

# 真空热处理工艺

屠恒悦

## 目录

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 前言.....                                  | 1  |
| 一、真空热处理工艺原理和真空热处理和加热特点.....              | 1  |
| 1、工艺原理.....                              | 1  |
| 2、真空热处理的加热特点：.....                       | 3  |
| 二、真空热处理工艺参数的确定.....                      | 4  |
| 1、真空度：.....                              | 4  |
| 2、加热和预热温度：.....                          | 4  |
| 3、真空淬火加热时间.....                          | 5  |
| 三、真空热处理的冷却方法.....                        | 6  |
| 1、气淬.....                                | 6  |
| 2、真空油淬.....                              | 8  |
| 3、为减小工件变形采用的分级冷却。.....                   | 10 |
| 4、真空水淬。.....                             | 10 |
| 5、真空硝酸盐淬火。.....                          | 10 |
| 6、炉冷或控速冷却。.....                          | 10 |
| 四、真空退火、真空淬火、真空回火及常用金属材料的真空淬火、回火工艺规范..... | 10 |
| 1、真空退火目的.....                            | 10 |
| 2、真空淬火：.....                             | 15 |
| 3、真空回火.....                              | 22 |
| 四、常用金属材料的真空淬火、回火工艺规范。.....               | 23 |
| (1) 合金结构钢和超高强度钢.....                     | 23 |
| (2) 弹簧钢.....                             | 24 |
| (3) 轴承钢.....                             | 25 |
| (4) 合金工具钢.....                           | 25 |
| (5) 高速钢.....                             | 26 |
| (6) 不锈钢耐热钢.....                          | 27 |

# 前言

所谓真空热处理是工件在  $10^{-1}\sim 10^{-2}\text{Pa}$  真空介质中进行加热到所需要的温度，然后在不同介质中以不同冷速进行冷却的热处理方法。

真空热处理被当代热处理界称为高效、节能和无污染的清洁热处理。真空热处理的零件具有无氧化，无脱碳、脱气、脱脂，表面质量好，变形小，综合力学性能高，可靠性好（重复性好，寿命稳定）等一系列优点。因此，真空热处理受到国内外广泛的重视和普遍的应用。并把真空热处理普及程度作为衡量一个国家热处理技术水平的重要标志。真空热处理技术是近四十年以来热处理工艺发展的热点，也是当今先进制造技术的重要领域。

## 一、真空热处理工艺原理和真空热处理和加热特点

### 1、工艺原理

(1) 金属在真空状态下的相变特点。

在与大气压只差  $0.1\text{MPa}$  范围内的真空下，固态相变热力学、动力学不产生什么变化。在制订真空热处理工艺规程时，完全可以依据在常压下固态相变的原理。完全可以参考常压下各种类型组织转变的数据。

(2) 真空脱气作用，提高金属材料的物理性能和力学性能。

(3) 真空脱脂作用。

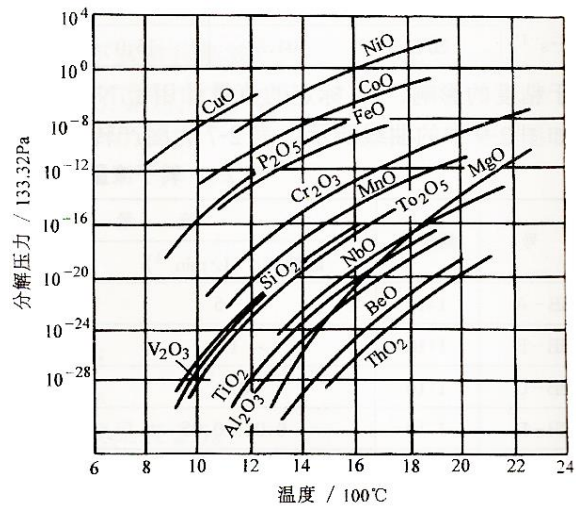
(4) 金属的蒸发：在真空状态下加热，工件表面元素会发生蒸发现象。

表一 各种金属的蒸气压

| 金属 | 达到下列蒸气压的平衡温度 (°C)  |                    |              |               |                | 熔点 (°C) |
|----|--------------------|--------------------|--------------|---------------|----------------|---------|
|    | $10^{-2}\text{Pa}$ | $10^{-1}\text{Pa}$ | $1\text{Pa}$ | $10\text{Pa}$ | $133\text{Pa}$ |         |
| Cu | 1035               | 1141               | 1273         | 1422          | 1628           | 1038    |
| Ag | 848                | 936                | 1047         | 1184          | 1353           | 961     |
| Be | 1029               | 1130               | 1246         | 1395          | 1582           | 1284    |
| Mg | 301                | 331                | 343          | 515           | 605            | 651     |
| Ca | 463                | 528                | 605          | 700           | 817            | 851     |
| Ba | 406                | 546                | 629          | 730           | 858            | 717     |

|    |      |      |      |      |      |       |
|----|------|------|------|------|------|-------|
| Zn | 248  | 292  | 323  | 405  | -    | 419   |
| Cd | 180  | 220  | 264  | 321  | -    | 321   |
| Hg | -5.5 | 13   | 48   | 82   | 126  | -38.9 |
| Ae | 808  | 889  | 996  | 1123 | 1179 | 660   |
| Li | 377  | 439  | 514  | 607  | 725  | 179   |
| Na | 195  | 238  | 291  | 356  | 437  | 98    |
| K  | 123  | 161  | 207  | 265  | 338  | 64    |
| In | 746  | 840  | 952  | 1088 | 1260 | 157   |
| C  | 2288 | 2471 | 2681 | 2926 | 3214 | -     |
| Si | 1116 | 1223 | 1343 | 1485 | 1670 | 1410  |
| Ti | 1249 | 1384 | 1546 | 1742 | -    | 1721  |
| Zr | 1660 | 1861 | 2001 | 2212 | 2549 | 1830  |
| Sn | 922  | 1042 | 1189 | 1373 | 1609 | 232   |
| Pb | 548  | 625  | 718  | 832  | 975  | 328   |
| V  | 1586 | 1726 | 1888 | 2079 | 2207 | 1697  |
| Nb | 2355 | 2539 | -    | -    | -    | 2415  |
| Ta | 2599 | 2820 | -    | -    | -    | 2996  |
| Bi | 536  | 609  | 693  | 802  | 934  | 271   |
| Cr | 992  | 1090 | 1205 | 1342 | 1504 | 1890  |
| Mo | 2095 | 2290 | 2533 | -    | -    | 2625  |
| Mn | 791  | 873  | 980  | 1103 | 1251 | 1244  |
| Fe | 1195 | 1330 | 1447 | 1602 | 1783 | 1535  |
| W  | 2767 | 3016 | 3309 | -    | -    | 3410  |
| Ni | 1257 | 1371 | 1510 | 1679 | 1884 | 1455  |
| Pt | 1744 | 1904 | 2090 | 2313 | 2582 | 1774  |
| Au | 1190 | 1316 | 1465 | 1646 | 1867 | 1063  |

(5) 表面净化作用，实现少无氧化和少无脱碳加热。



图一 各种金属氧化物的分解压力

金属的氧化反应是可逆的： $M \rightleftharpoons 2M + 2O \rightleftharpoons O_2 \uparrow$

取决于气氛中氧的分压和金属氧化物的分压的大小。

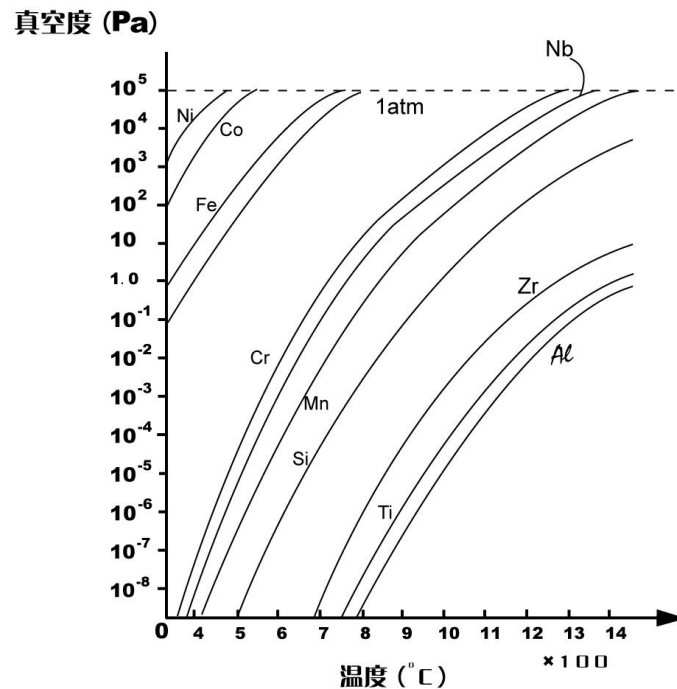
当氧分压大于金属氧化物的分压时，反应向左进行，金属表面产生氧化。反之，如氧化物的分解压大于氧的分压，反应向右进行，其结果是氧化物分解。

亚氧化物理论和真空炉中碳元素存在，使炉内氧的分压低于金属氧化物的分压，使金属不会氧化。

表二 真空度和相对杂质及相对露点关系

|           |           |                    |                    |                    |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 真空度       | Pa        | $1.33 \times 10^4$ | $1.33 \times 10^3$ | $1.33 \times 10^2$ | $1.33 \times 10$      | 1.33                  | $1.33 \times 10^{-1}$ | $1.33 \times 10^{-2}$ | $1.33 \times 10^{-3}$ |
|           | 托         | 100                | 10                 | 1                  | $10^{-1}$             | $10^{-2}$             | $10^{-3}$             | $10^{-4}$             | $10^{-5}$             |
| 相对杂质含量    | %         | 13.2               | 1.32               | 0.132              | $1.32 \times 10^{-2}$ | $1.32 \times 10^{-3}$ | $1.32 \times 10^{-4}$ | $1.32 \times 10^{-5}$ | $1.32 \times 10^{-6}$ |
|           | PPM(百万分比) |                    |                    | 1320               | 132                   | 13.2                  | 1.32                  | 0.132                 | 0.0132                |
| 相对露点 (°C) |           |                    | +11                | -18                | -40                   | -59                   | -74                   | -88                   | -101                  |

(6) 金属实现无氧化加热所需的真空度。



图二 为不同金属无氧化加热温度和真空度的关系曲线

## 2、真空热处理的加热特点：

两个显著特点：一是空载时炉子的升温速度快，二是工件的加热速度慢。

## 二、真空热处理工艺参数的确定

### 1、真空度：

表三 各种材料在真空热处理时的真空度

| 材 料                           | 真空热处理时真空度 Pa               |
|-------------------------------|----------------------------|
| 合金工具钢、结构钢、轴承钢（淬火温度在 900℃ 以下）  | $1\sim 10^{-1}$            |
| 含 Cr、Mn、Si 等合金钢（在 1000℃ 以上加热） | 10Pa（回填高纯氮）                |
| 不锈钢（析出硬化型合金）、Fe、Ni 基合金，钴基合金   | $10^{-1}\sim 10^{-2}$      |
| 钛合金                           | $10^{-2}$                  |
| 高速钢                           | 1000℃ 以上充 666~13.3Pa $N_2$ |
| Cu 及其合金                       | 133~13.3Pa                 |
| 高合金钢回火                        | $1.3\sim 10^{-2}$          |

在考虑工作真空度时应注意几点：

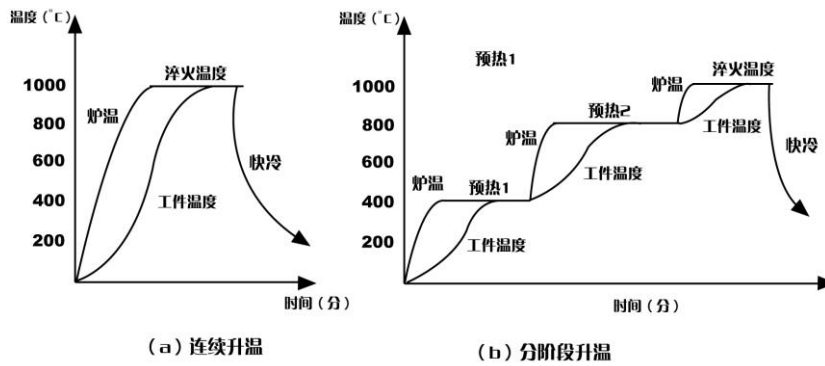
- (1) 在 900℃ 以前，先抽 0.1Pa 以上高真空，以利脱气。
- (2)  $10^{-1}$ Pa 进行加热，相当于 1PPM 以上纯度惰性气体，一般黑色金属就不会氧化。
- (3) 充入惰性气体时，如充 133Pa，(50% $N_2$ +50% $H_2$ ) 的氮氢混合气体，其效果比  $10^{-2}\sim 10^{-3}$ Pa 真空还好。此时氧分压 66.5Pa 是安全的。
- (4) 真空度与钢表面光亮度有对应关系。
- (5) 一般  $10^{-3}\sim 133$ Pa 真空范围内，真空度温差为  $\pm 5^\circ C$ ，如气压上升，温度均匀性下降，所以充气压力应尽量可能低些。

### 2、加热和预热温度：

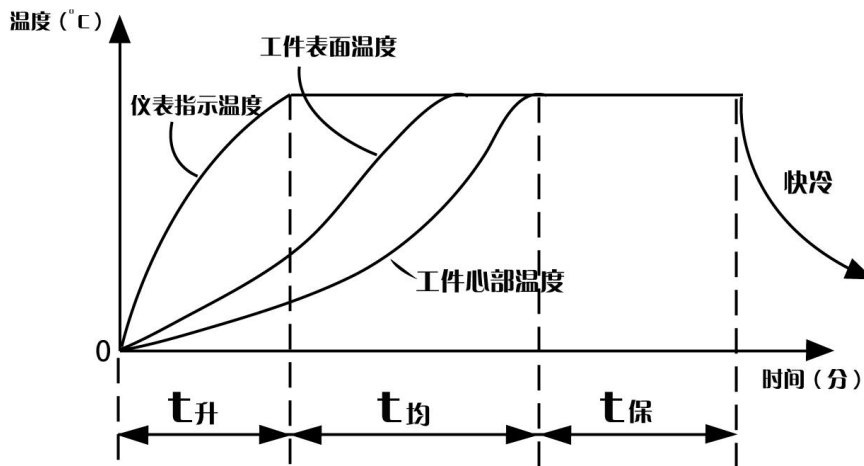
表四 预热温度参考表

| 淬火加热温度 (°C) | 预热温度 (1) (°C) | 预热温度 (2) (°C) | 预热温度 (3) (°C) |
|-------------|---------------|---------------|---------------|
| 800~900     | 550-600       |               |               |
| 1000-1100   | 550-600       | 800-850       |               |
| 1200 以上     | 550-600       | 800-850       | 1000-1050     |

### 3、真空淬火加热时间



图三 真空加热时的特性曲线



图四 炉温和被加热工件表面与中心温度

$$t_{总} = t_{均} + t_{保}$$

$$t_{均} = a' \times h$$

$t_{保}$ 为相变时间， $t_{均}$ 为均热时间， $a'$ 为透热系数（分/mm）， $h$ 为有效厚度（mm）。

表五  $a'$ 透热系数的确定

|             |         |         |            |                 |
|-------------|---------|---------|------------|-----------------|
| 加热温度（℃）     | 600     | 800     | 1000       | 1100~1200       |
| $a'$ （分/mm） | 1.6~2.2 | 0.8~1.0 | 0.3~0.5    | 0.2~0.4         |
| 预热情况        |         | 600℃预热  | 600、800℃预热 | 600、800、1000℃预热 |

注：没有预热，直接加热， $a'$ 应增大10~20%

表六  $t_{保}$ 时间确定

|             |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|
| 钢材          | 碳素工具钢 | 低合金钢  | 高合金钢  |
| $t_{保}$ （分） | 5~10  | 10~20 | 20~40 |

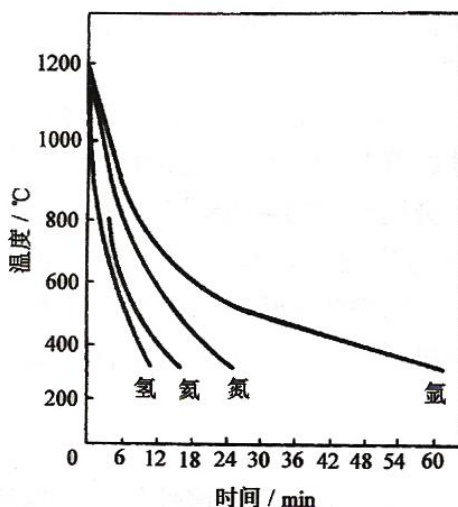
### 三、真空热处理的冷却方法

#### 1、气淬

(1) 各种冷却气体的性质

表七 各种冷却气体的性质 (100°C时)

| 气体             | 密度<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | 普朗特数 | 粘度系数<br>(Kg.s/m <sup>3</sup> ) | 热传导率<br>(kcal/m.h. °C) | 热传导率比 |
|----------------|----------------------------|------|--------------------------------|------------------------|-------|
| N <sub>2</sub> | 0.887                      | 0.70 | 2.5×10 <sup>-6</sup>           | 0.0269                 | 1     |
| Ar             | 1.305                      | 0.69 | 2.764                          | 0.0177                 | 0.728 |
| He             | 0.172                      | 0.72 | 2.31                           | 0.143                  | 1.366 |
| H <sub>2</sub> | 0.0636                     | 0.69 | 1.048                          | 0.189                  | 1.468 |



图五 氢、氦、氮、氩的相对冷却性能

为保证工件表面不氧化，具有高的光亮，对冷却气体 N<sub>2</sub> 纯度有一定要求。

表八 氮气纯度标准

| 处理材料    | 氮气纯度 (%)      |
|---------|---------------|
| 轴承钢、高速钢 | 99.995~99.998 |
| 高温耐热合金  | 99.999        |
| 高温活性金属  | 99.9999       |
| 半导体材料   | 99.99999      |

表九 热处理用氩气、氢气、氮气的行业标准

| 名称     | 指标要求, % (V/V) |         |         |         |                                                                 |         |             |
|--------|---------------|---------|---------|---------|-----------------------------------------------------------------|---------|-------------|
|        | 氩含量           | 氮含量     | 氢含量     | 氧含量     | 总碳含量<br>(以甲烷计)                                                  | 水含量     |             |
| 高纯氩气   | ≥99.999       | ≤0.0005 | ≤0.0001 | ≤0.0002 | ≤0.0002                                                         | ≤0.004  |             |
| 氩气     | ≥99.99        | ≤0.007  | ≤0.0005 | ≤0.001  | ≤0.001                                                          | ≤0.002  |             |
| 高纯氮    | -             | ≥99.999 | ≤0.0001 | ≤0.0003 | ≤0.0003                                                         | ≤0.0005 |             |
| 纯氮     | -             | ≥99.996 | ≤0.0005 | ≤0.001  | CO≤0.0005<br>CO <sub>2</sub> ≤0.0005<br>CH <sub>4</sub> ≤0.0005 | ≤0.0005 |             |
| 工业用气态氮 | I类            | -       | 99.5    | -       | ≤0.5                                                            | -       | 露点≤-43℃     |
|        | II类I级         | -       | 99.5    | -       | ≤0.5                                                            | -       | 游离水≤100ml/瓶 |
|        | II类II级        | -       | 98.5    | -       | ≤1.5                                                            | -       | 游离水≤100ml/瓶 |
| 氢气     | -             | ≤0.006  | ≥99.99  | ≤0.0005 | CO≤0.0005<br>CO <sub>2</sub> ≤0.0005<br>CH <sub>4</sub> ≤0.001  | ≤0.003  |             |

注：①水分压 15℃，大于 11.8MPa 条件下测定。

②高纯氮、纯氮不适合用于沉淀硬化不锈钢，马氏体时效钢，高温合金、钛合金等真空热处理回充和冷却气之用。

③氢气不适用于高强度钢、钛合金、黄铜的热处理保护。

④液态氮不规定水的含量。

## (2) 提高气体冷却能力的方法

$$\text{牛顿公式: } Q = k (t_w - t_f) \cdot F \text{ (kcal/h)}$$

Q 为传热量；  $t_w$  为工件温度；  $t_f$  为气体温度；

F 为工件表面积； k 为对流传热系数。

$$K = (\lambda/d) \cdot C (w\rho/\eta)^m$$

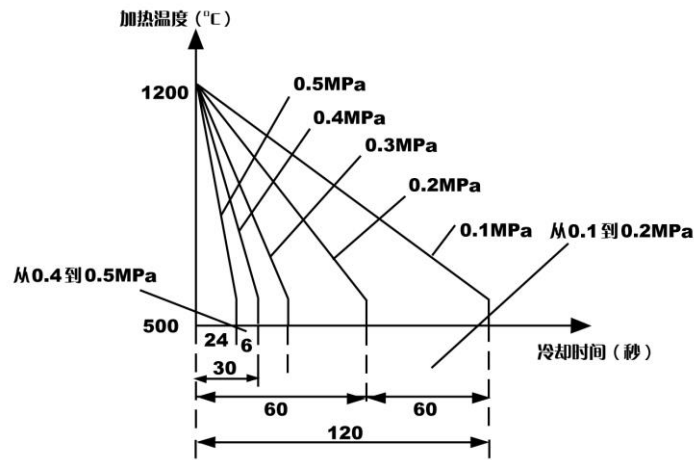
d 为工件直径，C 为因雷诺系数范围不同而异的常数，m 为幂指数，一般 0.62~0.805  
w 为流速，ρ 为密度的函数（亦可视为气压），λ 为气体导热系数，η 为粘滞系数。

从公式中可见，提高冷却气体的密度（压力）和流速可以成比例地加大对流传热效率。

①提高冷却气体压力。

②提高气体的流速。





图六 气体压力和淬火速率间的关系曲线

表十 各种淬火介质对热传导系数的比较

| 介质和淬火参数                                           | 热导率 (w/m <sup>2</sup> .k) |
|---------------------------------------------------|---------------------------|
| 盐浴 550°C                                          | 350~450                   |
| 液态床                                               | 400~500                   |
| 油 20~80°C 不流动                                     | 1000~1500                 |
| 油 20~80°C 搅拌循环的                                   | 1800~2200                 |
| 水 15~25°C                                         | 3000~3500                 |
| 空气、无强力循环                                          | 50~80                     |
| 1000 毫巴 (1×10 <sup>5</sup> Pa) N <sub>2</sub> 循环的 | 100~150                   |
| 6×10 <sup>5</sup> Pa N <sub>2</sub> 快速循环          | 300~400                   |
| 10×10 <sup>5</sup> Pa N <sub>2</sub> 快速循环         | 400~500                   |
| 6×10 <sup>5</sup> Pa He 快速循环                      | 400~500                   |
| 10×10 <sup>5</sup> Pa He 快速循环                     | 550~650                   |
| 20×10 <sup>5</sup> Pa He 快速循环                     | 900~1000                  |
| 6×10 <sup>5</sup> Pa H <sub>2</sub> 快速循环          | 450~600                   |
| 10×10 <sup>5</sup> Pa H <sub>2</sub> 快速循环         | ~750                      |
| 20×10 <sup>5</sup> Pa H <sub>2</sub> 快速循环         | ~1300                     |
| 40×10 <sup>5</sup> Pa H <sub>2</sub> 快速循环         | ~2200                     |

## 2、真空油淬

- (1) 真空淬火油的条件。
- (2) 真空淬火油的主要技术指标

表十一 (a) 国产真空淬火油质量指标

|                     |                    |                    |
|---------------------|--------------------|--------------------|
| 真空淬火代号              | ZZ-1               | ZZ-2               |
| 粘度 (cst) 50°C       | 20~25              | 50~55              |
| 闪点 (°C) 不低于         | 170                | 210                |
| 凝点 (°C) 不高于         | -10                | -10                |
| 水份 (%)              | 无                  | 无                  |
| 残碳 (%) 不大于          | 0.08               | 0.1                |
| 酸值 (mgkoH/g)        | 0.5                | 0.7                |
| 饱和蒸气压 20°C (133Pa)  | $5 \times 10^{-5}$ | $5 \times 10^{-5}$ |
| 热氧化安定性              | 合格                 | 合格                 |
| 冷却性能 特性温度 (°C)      | 600~620            | 580~600            |
| 特性时间 (s)            | 3.0~3.5            | 3.0~4.0            |
| 800°C冷至 400°C时间 (s) | 5~5.5              | 6~7.5              |

表十一 (b) 上海惠丰石油化工有限公司真空淬火油质量指标

| 项目/型号                                                                                                                                                                                | CZ1 真空淬火油  | CZ2 真空淬火油  | 试验方法     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|----------|
| 运动粘度 (40°C), mm <sup>2</sup> /s                                                                                                                                                      | 32~42      | 80~90      | GB/T265  |
| 闪点 (开口), °C                                                                                                                                                                          | 180        | 220        | GB/T3536 |
| 倾点, °C                                                                                                                                                                               | -10        | -10        | GB/T3535 |
| 冷却特性<br>特性温度<br>800~400°C时间                                                                                                                                                          | 600<br>5.5 | 585<br>7.5 | SH/T0220 |
| 注: 以上数据为代表性试样的测定结果, 产品性能以实测为准。                                                                                                                                                       |            |            |          |
| 性能: 1、有较低的饱和蒸汽压, 蒸发量较小, 使溶入的气体迅速脱出;<br>2、较强的抗汽化能力和较快的冷却速度, 不污染真空炉膛及真空操作效果;<br>3、冷却性能稳定, 在真空条件下, 能保证淬火后工件淬硬效果好;<br>4、良好的光亮性和光辉性, 淬火后表面清洁光亮, 不会变色、无氧化、无污染;<br>5、极佳的挥发安定性和氧化安定性, 使用寿命长。 |            |            |          |
| 用途: 1、适用于轴承钢、工模具、刀具及大中型航空结构钢及其它特种钢材;<br>2、HFV-CZ1 真空淬火油用于中型材料在真空状态下的淬火, HFV-CZ2 真空淬火油用于淬透性好的材料在真空状态下淬火。                                                                              |            |            |          |

表十二 美国 C. I. Hayes 公司真空淬火油质量指标

|                  |                |                |
|------------------|----------------|----------------|
| 真空淬火油代号          | H <sub>1</sub> | H <sub>2</sub> |
| 比重 (lb/gal)      | 7.36           | 7.2            |
| 粘度指数             | 76             | 95             |
| 粘度 (100°F) sus   | 92~95          | 110~121        |
| 着火点 (°C)         | 170            | 190            |
| 热线试验             | 34.0           | 31.0           |
| 蒸汽压 40°C (133Pa) | 0.002          | 0.0001         |
| 90°C (133Pa)     | 0.100          | 0.0103         |
| 150°C (133Pa)    | 2.00           | 0.45           |
| GM 淬火试验 (s)      | 11             | 17             |

|             |    |    |
|-------------|----|----|
| 最高使用温度 (°C) | 60 | 80 |
|-------------|----|----|

真空油淬时注意的几个问题：

- ①真空油淬压力填充纯 N<sub>2</sub> 40kPa~67kPa。
- ②淬火油量： 工件：油重量 1：10~15，油池比油与工件体积之和大 15~20%。
- ③油中不许有水分。当达 0.03%时，工件变暗；0.3%时，冷速明显变化。
- ④真空淬火油的调制。
- ⑤工件入油前应充分脱气。
- ⑥油温在 40~80℃使用。
- ⑦油应有搅拌。静止油冷却强度为 0.25~0.30；激烈搅拌油冷却强度为 0.8~1.1。
- ⑧真空油淬时的高温瞬时渗碳现象。

### 3、为减小工件变形采用的分级冷却。

- ①油冷却到 M<sub>s</sub> 点以上→风冷。
- ②延时油淬，先预冷 30~70 秒→（1090℃）入油。
- ③风冷至 550℃→在油中淬火。
- ④气体分级淬火，气冷到马氏体转变点以上→停风扇→表面温度均匀后再开风扇快冷。
- ⑤工件在硝盐浴中等温淬火。

### 4、真空水淬。

### 5、真空硝盐淬火。

### 6、炉冷或控速冷却。

## 四、真空退火、真空淬火、真空回火及常用金属材料的真空淬火、回火工艺规范。

### 1、真空退火目的：

获得洁净光亮的表面，省去或减少加工工序；使金属材料软化，消除内应力和改变结构，提高材料性能。

(1) 铜及其合金

表十三 青铜真空热处理参数

| 材料号                    | 真空度 (Pa)  | 退火温度 (°C) | 冷却方式 |
|------------------------|-----------|-----------|------|
| QSn4-3<br>QSn4-4-2.5   | 13.3~1.33 | 600       | 炉冷   |
| QSn6.5-0.4<br>QSn4-0.3 |           | 600~650   |      |
| QA19-2                 | 13.3~1.33 | 600~750   |      |
| QA19-4                 |           | 700~750   |      |
| QA110-3-1.5            |           | 650~750   |      |
| QA110-4-4              |           | 650~750   |      |
| QA110-5                |           | 600~700   |      |
| QA110-7                |           | 650~750   |      |

表十四 紫铜和黄铜真空热处理参数

| 材料牌号                 | 消除应力退火温度 (°C) | 再结晶退火温度 (°C)       | 真空度 (Pa)  | 冷却方式         |
|----------------------|---------------|--------------------|-----------|--------------|
| 紫铜<br>T1、T2<br>T3、T4 |               | 600~700<br>600~700 | 133~13.3  | 炉冷或<br>惰性气体冷 |
| 黄铜<br>H96            |               | 540~600            | 13.3~1.33 |              |
| H90                  | 200           | 650~720            |           |              |
| H80                  | 260           | 600~700            |           |              |
| H70                  | 260~270       | 520~650            |           |              |
| H68                  | 260~270       | 520~650            |           |              |
| H62                  | 270~300       | 600~700            |           |              |
| H59-1                |               | 600~670            |           |              |
| HSn70-1              | 300~350       | 560~580            | 133~13.3  |              |
| HSn62-1              | 350~370       | 550~650            | 13.3~1.33 |              |
| HA177-2              | 300~350       | 600~650            | 13.3~1.33 |              |
| HA159-3-2            | 350~400       | 600~650            |           |              |
| HMn58-2              |               | 600~650            |           |              |
| HFe59-1-1            |               | 600~650            |           |              |
| HPb74-3              |               | 600~650            |           |              |
| HPb64-3              |               | 620~670            |           |              |
| HPb63-3              |               | 620~650            |           |              |
| HPb60-1              |               | 600~650            |           |              |

表十五 铍青铜时效工艺参数

| 材料牌号   | 时效温度 (°C) | 真空度 (Pa)         | 时间 (小时) |
|--------|-----------|------------------|---------|
| QBe2   | 300       | $1 \sim 10^{-2}$ | 3~5     |
| QBe2.5 | 285       |                  | 3~4     |
|        | 320       |                  | 2       |

(2) 金属和合金的除气处理。

应用于加速器、宇宙模拟设备、电子管材料和高温活性金属。

表十六 金属及合金真空除气的温度及真空度

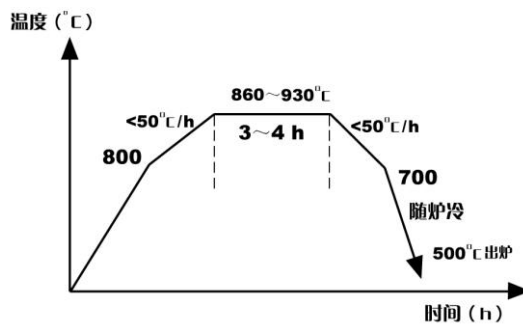
| 金属及合金          | 除气温度 (°C) | 真空度 (Pa)             |
|----------------|-----------|----------------------|
| 铜              | 800       | $2.7 \times 10^{-3}$ |
| 镍              | 800~950   | $1.3 \times 10^{-3}$ |
| 铁与铁合金, 硅钢, 不锈钢 | >900      | $4 \times 10^{-2}$   |
| 钼              | >1450     | $6.7 \times 10^{-3}$ |
| 钨              | >1400     | $6.7 \times 10^{-3}$ |
| 钛              | 810       | $1.3 \times 10^{-3}$ |
| 钽              | 900~950   | $1.3 \times 10^{-3}$ |

(3) 软磁材料的真空退火

软磁材料与硬磁材料的区别是磁性不同。

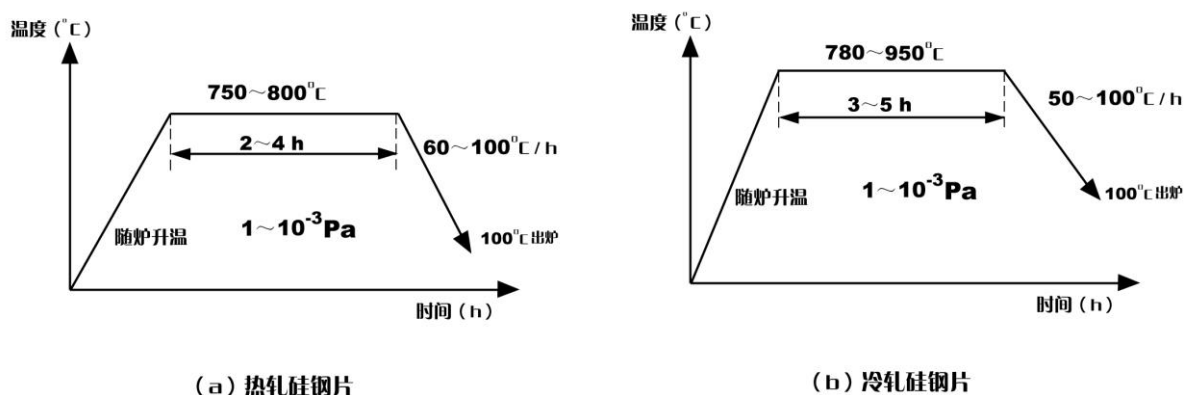
矫顽力  $H_c < 10$  奥斯特为软磁,  $H_c = 10 \sim 300$  奥斯特为半硬磁,  $H_c > 300$  奥斯特为硬磁。目前广泛应用于氢气退火和真空退火。

① 电工纯铁的真空退火, 见图七。



图七 电工钢真空退火工艺曲线

②硅钢片的真空退火见图八。



图八 硅钢片真空退火工艺曲线

③Fe-Ni 系合金真空退火。

表十七 常用 Fe-Ni 软磁材料的真空退火规范

| 合金牌号                 | 退火温度 (°C)         | 保温时间 (小时)  | 真空度 (Pa)               | 冷却方式                                                                               |
|----------------------|-------------------|------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1J46<br>1J50<br>1J79 | 随炉升温<br>1050~1150 | 3~6        | $10^{-1} \sim 10^{-3}$ | 100~200°C/h 冷至 300°C 后快冷<br><100°C 出炉                                              |
| 1J51                 |                   | 1~2        |                        |                                                                                    |
| 1J54<br>1J80         | 随炉升温<br>1100~1150 | 8~6        | $1 \sim 10^{-1}$       | 100°C/h 冷至 300°C 移至冷却室, 冷至 100°C 以下出炉<br>100~200°C/h 冷至 400°C 移至冷却室冷至 100°C 以下出炉   |
| 1J85<br>1J77         | 随炉升温<br>1100~1200 |            | $10^{-1} \sim 10^{-3}$ | 100~200°C/小时冷至 480°C 后快冷至 100°C 以下出炉                                               |
| 1J76                 | 随炉升温<br>1100~1150 |            | $1 \sim 10^{-1}$       | 100~150°C/h 冷至 500°C 后, 以 30~50°C/h 冷至 300°C, 再快冷到 100°C 出炉。                       |
|                      |                   |            |                        | 100°C/h 冷至 500°C 后, 以 10~50°C/h 冷至 300°C, 再快冷到 <100°C 出炉。                          |
| 1J52<br>1J83         | 随炉升温<br>1050~1150 | 1~2<br>3~5 | $10^{-1} \sim 10^{-3}$ | 100~200°C/h 冷至 600°C 快冷至 300°C, <100°C 出炉<br>100~200°C/h 冷至 600°C 再稍快冷至 100°C 以下出炉 |
| 1J86                 | 随炉升温<br>1100~1200 | 8~6        |                        | 100°C/h 冷至 600°C 后以 30~100°C/h 冷至 300°C, <100°C 出炉                                 |
| 1J41<br>1J42         | 随炉升温<br>1100~1150 | 2~4        |                        | $1 \sim 10^{-1}$                                                                   |
| 1J47                 |                   | 1~2        | $10^{-1} \sim 10^{-3}$ | 150°C/h 冷至 300~400°C 后快冷至 <100°C 出炉                                                |

#### ④Fe-Al 系合金真空退火

表十八 常用 Fe-Al 系软磁合金真空退火规范

| 合金牌号 | 退火温度 (°C)                                         | 保温时间 (小时) | 真空度 (Pa)                           | 冷却方式                                          |
|------|---------------------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1J16 | 缓慢升温<br>950~1150                                  | 2         | 10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-3</sup> | 200~150°C/h 炉冷, 100°C 以下出炉                    |
| 1J13 | 随炉升温<br>900~950                                   | 2         |                                    | 100°C/h 冷至 600°C, 60°C/h 冷至 200°C, <100°C 出炉。 |
| 1J12 | 随炉升温<br>1050~1200                                 | 2~3       |                                    | 100~150°C/h 冷至 500°C 快冷至 200°C, <100°C 出炉     |
| 1J6  |                                                   |           |                                    | 100~150°C/h 冷至 250°C, <100°C 出炉               |
| 1J8  | 随炉升温<br>700°C 以后<br>50~200°C/h<br>升至<br>1200~1220 |           |                                    | 50~150°C/h 冷至 250°C 以下, <100°C 出炉             |

软磁合金退火时注意:

- a) 在高温退火时必须防止工件叠片间和卡具粘合, 可以在其间撒布工业氢氧化镁或滑石粉, 或经高温下除过气的氧化铝粉撒布其间。
- b) 工件不能与石墨接触, 最好不用石墨纤维的真空炉中处理。

(4) 钢材料的真空退火;

①钢铁材料:

表十九 钢的真空退火工艺参数

| 材料           | 真空度 (Pa)                 | 退火温度 (°C) | 冷却方式                   |
|--------------|--------------------------|-----------|------------------------|
| 45           | 1.3~1.3×10 <sup>-1</sup> | 850~870   | 炉冷或气冷, ≈300°C 出炉       |
| 0.35~0.6 卷钢丝 | 1.3×10 <sup>-1</sup>     | 750~800   | 炉冷或气冷, =200°C 出炉       |
| 40Cr         | 1.3×10 <sup>-1</sup>     | 890~910   | 缓冷, ≈300°C 出炉          |
| Cr12M0       | 1.3×10 <sup>-1</sup> 以上  | 850~870   | 720~750°C, 等温 4~5 小时炉冷 |
| W18Cr4V      | 1.3×10 <sup>-1</sup>     | 870~890   | 720~750°C, 等温 4~5 小时炉冷 |
| 空冷低合金模具钢     | 1.3                      | 780~870   | 缓冷                     |
| 高碳铬冷作模具钢     | 1.3                      | 870~900   | 缓冷                     |
| W9~18 热模具钢   | 1.3                      | 815~900   | 缓冷                     |

②不锈钢、耐热钢真空退火；

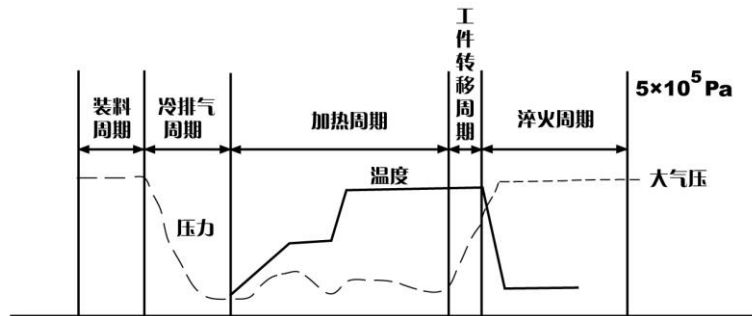
表二十 奥氏体不锈钢退火温度和真空度

| 热处理            | 温度 (°C)   | 真空度 (Pa)                                     |
|----------------|-----------|----------------------------------------------|
| 热变形后去氧化皮代替酸洗退火 | 900~1050  | 13.3~1.3                                     |
| 退火             | 1100      | $1.3 \times 10^{-1} \sim 0.7 \times 10^{-2}$ |
|                | 1050~1150 | $1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$                |
| 电真空零件退火        | 950~1000  | $1.3 \sim 4 \times 10^{-3}$                  |
| 带料在电子束设备中退火    | 1050~1150 | $1.3 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ |

表二十一 一些不锈钢的退火工艺参数

| 钢种类型        | 主要化学成分 (质量分数) 分析结果 (%)    | 退火温度范围 (°C) | 真空度 (Pa)                                     |
|-------------|---------------------------|-------------|----------------------------------------------|
| 铁素体类        | Cr12~14, C0.08 (最多)       | 630~830     | $1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$                |
| 马氏体类        | Cr14, C0.4, Cr16~18, C0.9 | 830~900     | $1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$                |
| 奥氏体类 (未稳定化) | Cr18, Ni8                 | 1010~1120   | $1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$                |
| 奥氏体类 (稳定化)  | Cr18, Ni8, N61 或 Ti       | 950~1120    | $1.3 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ |

## 2、真空淬火：



图九 真空淬火循环

真空淬火操作过程见图八，先预抽真空到  $1 \sim 1 \times 10^{-2} \text{Pa}$  时开始加热，当保温结束，升压到  $0.8 \times 10^5 \text{Pa}$ ，工件油淬或回填到  $5 \times 10^5 \text{Pa}$  进行高压气淬。

各种钢和合金加热时的真空度要求和淬火冷却方式见表二十二。



表二十二 各种钢和合金加热时的真空度要求和淬火冷却方式

| 材料                                                                                                                                            | 真空度                                                      |                                                          |   | 淬火方式                                                     |   |                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---|----------------------------------------------------------|---|----------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                               | 低                                                        | 中                                                        | 高 | 油                                                        | 水 | 气                                                        |
| 耐冲击钢<br>(美) S-1 (SKS41)<br>(美) S-2 (SKS4)<br>(美) S-3<br>(美) S-4<br>(美) S-5                                                                    | A<br>A<br>A<br>A<br>A                                    | B<br>B<br>B<br>B<br>B                                    |   | A<br>A<br>A<br>A<br>A                                    |   |                                                          |
| 油淬火钢<br>(美) 0-1 (MnCrWv)<br>(美) 0-2 (9Mn2v)<br>(美) 0-6<br>(美) 0-7 (WCrv)<br>(美) 4140 (40CrMnMo)<br>(美) 4340<br>(美) 52100                      | A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A                          | B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B                          |   | A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A                          |   |                                                          |
| 空气淬火钢<br>(美) A-2<br>(美) A-6<br>(美) A-7<br>(美) D-1<br>(美) D-2<br>(美) D-4<br>(美) D-5<br>(美) D-7<br>(美) H-11<br>(美) H-14<br>(美) H-21<br>(美) H-22 | A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A | B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B |   | C<br>C<br>C<br>C<br>C<br>C<br>C<br>C<br>C<br>C<br>C<br>C |   | A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A |
| 高速钢 W 系<br>(美) T-1<br>(美) T-2<br>(美) T-3<br>(美) T-4<br>(美) T-5<br>(美) T-15                                                                    | A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A                               | B<br>B<br>B<br>B<br>B<br>B                               |   | A<br>A<br>A<br>A<br>A<br>A                               |   | E<br>E<br>E<br>E<br>E<br>E                               |
| 高速钢 Mo 系<br>(美) M-1<br>(美) M-2<br>(美) M-6<br>(美) M-10                                                                                         | A<br>A<br>A<br>A                                         | B<br>B<br>B<br>B                                         |   | A<br>A<br>A<br>A                                         |   | E<br>E<br>E<br>E                                         |

|                               |   |   |   |   |   |   |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| (美)M-30                       | A | B |   | A |   | E |
| (美)M-50                       | A | B |   |   |   | A |
| 钛合金                           |   |   |   |   |   |   |
| Ti-2Al-4Mn                    | A | B | D |   | A |   |
| Ti-6Al-4V                     | A | B | D |   | A |   |
| Ti-679                        | A | B | D |   | A |   |
| Ti-6Al-4V (低 O <sub>2</sub> ) | A | B | D |   | A |   |
| Ti-6Al-6VZ-5Sn-1 (Fe, Cu)     | A | B | D |   | A |   |
| Ti-7Al-4Mo                    | A | B | D |   | A |   |
| 不锈钢                           |   |   |   |   |   |   |
| 400                           | A | B |   |   |   | A |
| 410                           | A | B |   |   |   | A |
| 416                           | A | B |   |   |   | A |
| 420                           | A | B |   |   |   | A |
| 440                           | A | B |   |   |   | A |
| 沉淀硬化合金                        |   |   |   |   |   |   |
| Ni-spand                      | A | B | A |   |   | A |
| AM-350                        | A | B | A |   |   | A |
| AM-355                        | A | B | A |   |   | A |
| (美) 17-7PH                    | A | B | A |   |   | A |
| (美) 17-4PH                    | A | B | A |   |   | A |
| 铁镍基合金                         |   |   |   |   |   |   |
| 901 合金                        | A | B | A |   |   | A |
| A-286                         | A | B | A |   |   | A |
| Disaloy                       | A | B | A |   |   | A |
| Unitemp 212                   | A | B | A |   |   | A |
| 钴基合金                          |   |   |   |   |   |   |
| Al-Risist 213                 | A | B | A |   |   | A |
| H-21                          | A | B |   |   |   | A |
| MAR-M509                      | A | B | A |   |   | A |
| W1-52, HS152                  | A | B |   |   |   | A |
| 镍基合金                          |   |   |   |   |   |   |
| T18 合金                        | A | B | A |   |   | A |
| Hastelloy X                   | A | B |   |   |   | A |
| Inconelx750                   | A | B | A |   |   | A |
| M-252-J-1500                  | A | B | A |   |   | A |
| RA-333                        | A | B |   |   |   | A |
| Rene`41                       | A | B | A |   |   | A |
| Rene`62                       | A | B | A |   |   | A |
| Rene`63                       | A | B | A |   |   | A |
| TDNickel 棒                    | A | B |   |   |   | A |
| Waspaloy A                    | A | B | A |   |   | A |
| Waspaloy B                    | A | B | A |   |   | A |

|                |   |   |  |  |  |   |
|----------------|---|---|--|--|--|---|
| CTreek Ascaloy | A | B |  |  |  | A |
|----------------|---|---|--|--|--|---|

注：A-必要条件；B-需改善泵的停机时间；C-预冷至 550℃施行油淬；D-用扩散泵排出；E-气冷至 1090℃淬油；

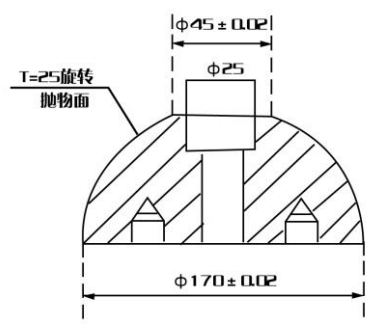
真空度：低-机械泵；中-增压泵；高-扩散泵。

(1) 真空淬火工艺操作实例：

① 汽车车灯反射镜凸模（图十）

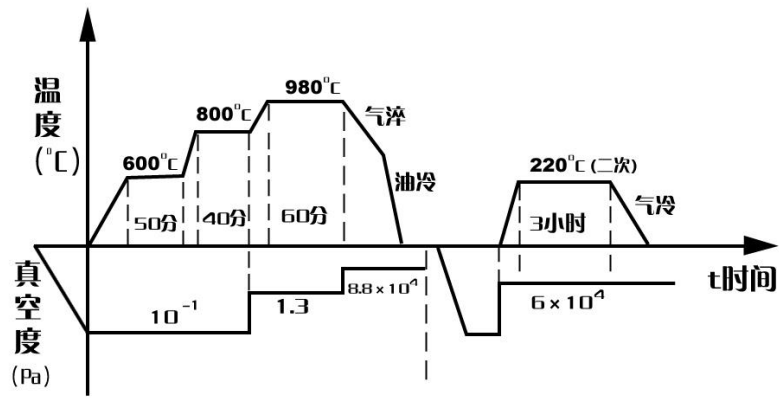
材料：Cr<sub>12</sub> MOV

技术要求：热处理 HRc60~62 变形愈小愈好。



图十 车灯反射镜凸模

该厂引进日本加工技术，与外商协作，共同制造汽车反射镜。凸面为抛物面，热处理后无法进行加工，故要求模具变形越小越好。原采用盐浴炉淬火，变形达±0.3mm，冲件不能达到聚焦反射作用。经真空热处理后变形控制在 0.05mm 以内，表面光亮，无氧化脱碳，硬度均匀，使用性能良好。其真空热处理工艺见图十。本凸模在 ZC30 型双室油淬负压真空炉内处理。



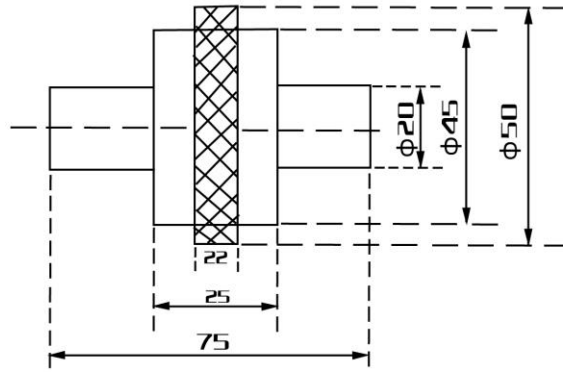
图十一 车灯凸模真空热处理工艺曲线

凸模在高压气淬炉内处理，气淬压为 3~4×10<sup>5</sup>Pa，其效果更好。

② 100 目不锈钢网滚模模芯（图十二）

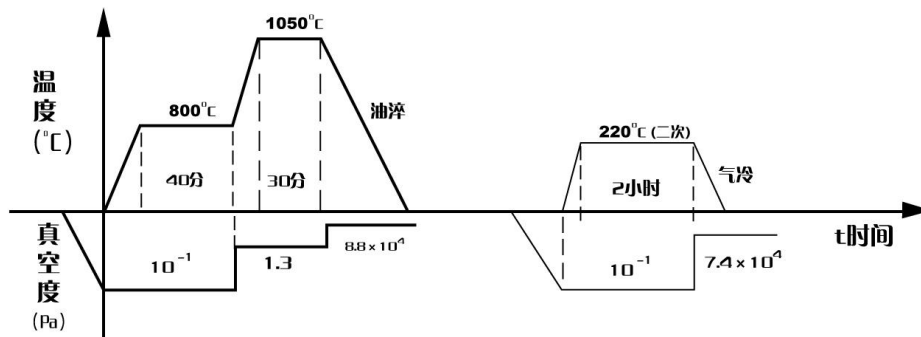
材料：Cr<sub>12</sub> MOV

技术要求：热处理 HRc58~62。



图十二 100目不锈钢网滚模模芯

此件加工六角形不锈钢网用，系出口任务，要求很高。在 $\phi 50\text{mm}$ 处的六角形网眼要用放大镜才能看清楚。该厂原采用盐浴淬火，由于残盐嵌在六角形网眼中，需经放大后才能看见，再用人工方法将残盐从一个个微小的网眼内剔除，既费时又有极易损坏模眼而导致报废。故用盐浴处理的模芯废品率很高。采用真空热处理后模芯表面光洁，合格率达100%，寿命也比原来提高，用户非常满意。其热处理工艺见图十三。本模芯在ZC-30型双室负压油淬炉内处理。若在加压气淬炉内处理，气淬压力 $2\sim 3\times 10^5\text{Pa}$ ，其淬火效果更佳。



图十三 不锈钢网滚模模芯

### ③ 压铸模

材料：H13

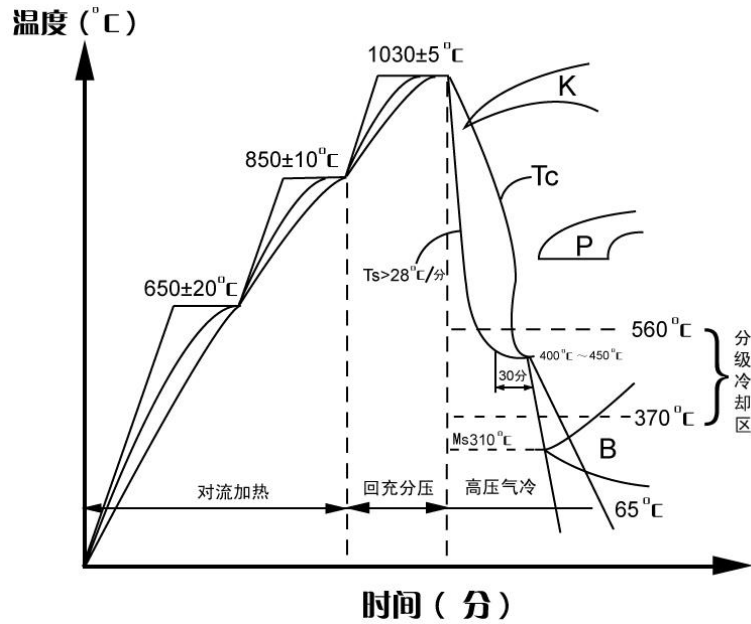
技术要求：大型复杂模具 HRC42-44

中小型优质模具 HRC44-46

小型模块 HRC48-50

设备：采用5bar以上高压气淬炉

工艺：采用分级气淬工艺  
 具体工艺曲线示意图见图十四。



图十四 H13 钢真空高压气淬加热冷却工艺示意图

其中  $T_s$  为表面热电偶温度， $T_c$  为心部热电偶温度，冷炉升温速度  $220^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，对流加热炉压 2bar，预热二次，当  $T_c=T_s$  后再升温。

奥氏体化保温时间：快速升温至  $1030^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ，当  $T_s-T_c < 14^{\circ}\text{C}$  后，保温 30 分钟。

回充高纯氮分压  $> 26.6\text{Pa}$ 。

从  $1030^{\circ}\text{C}$  到  $540^{\circ}\text{C}$  淬火冷速至少  $28^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ，在  $455-400^{\circ}\text{C}$  间进行分级，当  $T_s$  冷至分级温度区后 30 分钟继续快冷到  $65^{\circ}\text{C}$  出炉。在静止空气中冷到  $50^{\circ}\text{C}-30^{\circ}\text{C}$  进行二次以上回收。

回火至少二次，每次回火后模具冷到室温再进行第二次回火。回火时间按  $2.4\text{分}/\text{mm}$  计算，或心部到温度后在保温 2 小时。回火温度按不同硬度要求，一般  $580-600^{\circ}\text{C}$  左右。

## (2) 真空淬火的质量效果

### ① 真空淬火对工件表面质量的影响

- A) 真空状态下加热氧化物的还原作用。
- B) 元素发挥的影响。

- C) 钢种的影响。
- D) 冷却方式的影响。
- E) 回火的影响。
- F) 真空泵、油增压泵、油扩散泵返油的影响。
- G) 真空淬火油脱气。
- H) 炉子泄漏率。
- I) 加热速度影响。
- J) 充气管道的漏气问题。

② 真空淬火工件的变形，减小真空淬火变形的具体措施

A) 加热技术方面

- a) 多次预热。
- b) 在 800℃以下进行对流加热。
- c) 提高炉温均匀性，合理布置。
- d) 合理控制炉内压力，回填 N<sub>2</sub> 以 13.3Pa 为宜。

B) 冷却技术减少工件变形

- a) 尽量采用高压气淬代油淬。
- b) 为减少组织应力，先油淬在 M<sub>s</sub> 点以上出炉气冷。
- c) 气体分级淬火。
- d) 控制油搅拌开动时间。
- e) 减少工件在热态下振动。
- f) 料盘、工具的变形，会影响工件变形。
- g) 厚薄不均匀，锐角处包扎氧化铝棉。
- h) 合理装炉。
- i) 高压气淬时，冷却气体的喷射方式。

③ 真空淬火后钢的机械性能

在真空淬火加热时，工件有脱气、不氧化、不脱碳，因而有较高的机械性能。

表二十三 Cr<sub>12</sub>MOV 钢真空淬火、回火与盐浴淬火、回火后机械性能比较

| 淬火温度(°C) | 回火温度(°C)   | Rm (N/mm <sup>2</sup> ) |      | F (mm) |      | a <sub>k</sub> (N. m/cm <sup>2</sup> ) |      | (硬度 HRc)<br>真空淬火 |      | (硬度 HRc)<br>盐浴 |      |
|----------|------------|-------------------------|------|--------|------|----------------------------------------|------|------------------|------|----------------|------|
|          |            | 真空                      | 盐浴   | 真空     | 盐浴   | 真空                                     | 盐浴   | 淬火态              | 淬回火态 | 淬火态            | 淬回火态 |
| 950      | 180        | 4239                    | 3105 | 4.3    | 2.87 | 12.7                                   | 18.4 | 60.8             | 61   | 61.3           | 60.5 |
| 980      | 180        | 3756                    | 2814 | 4      | 2.4  | 21.6                                   | 14.7 | 64.7             | 61.9 | 65.8           | 63   |
| 1020     | 240        | 3851                    | 3048 | 4.4    | 2.36 | 21.6                                   | 21.6 | 65.8             | 60.8 | 66.2           | 60.8 |
| 1080     | 240        | 3584                    | 2139 | 4.1    | 1.76 | 25.1                                   | 14.7 | 61.9             | 58.6 | 65.5           | 59.7 |
| 1120     | 520<br>(冷) | 2501                    | 2755 | 5.1    | 3.5  | 27.5                                   | 26.5 | 55.3             | 55.6 | 59.3           | 60.7 |

注：真空淬火：800℃预热 25 分，淬火保温 20 分。

盐浴淬火：淬火温度为 950~1020℃时，400℃预热一小时，淬火保温 9 分钟；  
淬火温度为 1080~1120℃时，850℃预热 6 分，淬火保温 3 分钟，  
600~650℃分级 2~3 分钟后空冷。

#### ④ 真空淬火产品的使用寿命

真空淬火模具寿命一般提高 40~400%。

### 3、真空回火

(1) 概述。

(2) 真空回火的光亮度变成灰色或暗灰色的原因。

认为从 10<sup>-2</sup>Pa 到 10<sup>-4</sup>Pa，水蒸气峰继续保持相当大的比例，O<sub>2</sub>的光谱已近消失。高于 650℃水蒸气开始分解，出现链式反应，在低于 650℃温度范围内，真空炉呈微氧化气氛（或微氧化状态），从而室温至 600℃温度，正好是回火处理区域，也就可解释通常真空回火后表面光亮度灰暗或不稳定的原因。

提高真空回火的光亮度的方法：

- ① 提高工作真空度。从 1~10Pa 提高到 1.3×10<sup>-2</sup>Pa，目的减少 O<sub>2</sub> 含量，消除 O<sub>2</sub> 对工件氧化的影响。
- ② 充入 N<sub>2</sub> 中加入 10%H<sub>2</sub>，使炉内氧化性气氛与 H<sub>2</sub> 中和，形成弱还原性气氛。
- ③ 减少真空炉隔热屏吸收和排放水气的影响，排除耐火纤维隔热屏吸水性大的弊端，采用全金属隔热屏设计。
- ④ 回火后快冷，使工件出炉温度低，提高回火光亮度。
- ⑤ 提高回火温度均匀性，有利于回火光亮度一致。用上述方法可使回火工件光亮度达到真空淬火的 90%以上。

### (3) 真空回火脆性及其防止

第一类回火脆性（不可逆回火脆性）200~350℃。

第二类回火脆性（可逆回火脆性）450~650℃。

当钢中含 Ni、Cr、Mn、Si 等合金元素，才有第二类回火脆性，一般碳钢不存在第二类回火脆性。

防止方法：为防第二类回火脆性，要求回火后快冷。

## 四、常用金属材料的真空淬火、回火工艺规范。

### (1) 合金结构钢和超高强度钢

注意几点：

- ① 晶粒度，采用淬火温度比规定温度下限或低 5~10℃为宜。
- ② 元素挥发。回填 N<sub>2</sub> 到 13.3Pa 或以下。
- ③ 超高强度钢可采用等温淬火。
- ④ 有回火脆性要快冷。

表二十四 常用合金结构钢真空热处理工艺规范

| 钢材牌号       | 淬火    |          |    | 回火    |                                                         |                          | 机械性能（不小于）                           |                                        |      |      |                          |
|------------|-------|----------|----|-------|---------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|------|------|--------------------------|
|            | 温度（℃） | 真空度（Pa）  | 冷却 | 温度（℃） | 真空度（Pa）                                                 | 冷却                       | R <sub>m</sub> （N/mm <sup>2</sup> ） | R <sub>p0.2</sub> （N/mm <sup>2</sup> ） | A（%） | Z（%） | ak（N-m/cm <sup>2</sup> ） |
| 45Mn2      | 840   | 1.3      | 油  | 550   | 5.3×10 <sup>4</sup> ~7.3×10 <sup>4</sup>                | 油空冷<br>N <sub>2</sub> 快冷 | 882.6                               | 735.5                                  | 10   | 6    | 441.3                    |
| 30SiMn2MoV | 870   | 1.3      |    | 650   | 1.3~0.13                                                |                          | 882.6                               | 784.5                                  | 12   | 9    | 490.3                    |
| 16SiMn2WV  | 860   | 1.3      |    | 200   | 空气炉                                                     | 空冷                       | 1176.7                              | 882.6                                  | 10   | 8    | 441.3                    |
| 20Mn2TiB   | 860   | 1.3      |    | 200   | 空气炉                                                     | 空冷                       | 1127.7                              | 931.6                                  | 10   | 7    | 441.3                    |
| 30Mn2MoTiB | 870   | 1.3      |    | 200   | 空气炉                                                     | 空冷                       | 1471                                | -                                      | 9    | 5    | 392.2                    |
| 40CrMn     | 840   | 1.3      |    | 520   | 5.3×10 <sup>4</sup> ~7.3×10 <sup>4</sup> N <sub>2</sub> | 快冷                       | 980.6                               | 833.5                                  | 9    | 6    | 441.3                    |
| 25CrMnSiA  | 880   | 1.3      |    | 450   | 5.3×10 <sup>4</sup> N <sub>2</sub>                      | 快冷                       | 1078.7                              | 882.6                                  | 10   | 5    | 392.2                    |
| 30CrMnSiA  | 880   | 1.3      |    | 520   | 10 <sup>-1</sup> 或5.3×10 <sup>4</sup>                   | 快冷                       | 1078.7                              | 882.6                                  | 10   | 5    | 441.3                    |
| 50CrV      | 860   | 1.3~0.13 |    | 500   |                                                         |                          | 1074.8                              | 1127.7                                 | 10   | -    | 392.2                    |
| 35CrMo     | 850   | 1.3~0.13 |    | 550   |                                                         |                          | 980.6                               | 833.5                                  | 12   | 8    | 441.3                    |
| 40CrMnMo   | 850   | 1.3      |    | 600   |                                                         |                          | 980.6                               | 784.5                                  | 10   | 8    | 441.3                    |
| 20CrMnMo   | 850   | 1.3      |    | 200   | 空气炉                                                     | 空冷                       | 1176.7                              | 882.6                                  | 10   | 7    | 441.3                    |
| 25Cr2MoV   | 1040  | 1.3~0.13 |    | 700   | 0.13                                                    | 快冷                       | 735.5                               | 588.36                                 | 16   | 6    | 490.3                    |
| 25Cr2MoV   | 900   | 1.3~0.13 |    | 620   | 0.13                                                    |                          | 931.6                               | 784.5                                  | 14   | 8    | 539.3                    |



|            |      |          |                  |     |                                             |                               |                                    |       |        |    |       |
|------------|------|----------|------------------|-----|---------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------|--------|----|-------|
| 38CrMoAl   | 940  | 1.3      |                  | 640 | 0.13                                        | N <sub>2</sub> Ar<br>强制<br>冷却 | 980.6                              | 833.5 | 14     | 9  | 490.3 |
| 20Cr3MoWV  | 1050 | 1.3      | N <sub>2</sub> 油 | 720 | 0.13                                        |                               | 784.5                              | 637.4 | 14     | 7  | 392.2 |
| 40Cr       | 850  | 1.3-0.13 | 油                | 500 | N <sub>2</sub> 5.3×10 <sup>4</sup>          |                               | 980.6                              | 784.5 | 9      | 6  | 441.3 |
| 40CrNi     | 820  | 1.3-0.13 | 油                | 500 | N <sub>2</sub> 5.3×10 <sup>4</sup>          |                               | 980.6                              | 784.5 | 10     | 7  | 441.3 |
| 12CrNi3    | 860  | 1.3-0.13 | N <sub>2</sub> 油 | 200 | -                                           | 空冷                            | 931.6                              | 686.4 | 11     | 9  | 490.3 |
| 37CrNi3    | 820  | 1.3-0.13 | N <sub>2</sub> 油 | 500 | 0.13, N <sub>2</sub><br>5.3×10 <sup>4</sup> | N <sub>2</sub><br>强制<br>冷却    | 1127.7                             | 980.6 | 10     | 6  | 490.3 |
| 40CrNiMo   | 850  | 1.3-0.13 |                  | 600 |                                             |                               | 980.6                              | 833.5 | 12     | 10 | 539.3 |
| 30CrNi2MoV | 860  | 1.3-0.13 |                  | 650 |                                             |                               | 882.6                              | 784.5 | 12     | 9  | 490.3 |
| 45CrNiMoV  | 850  | 1.3-0.13 |                  | 460 |                                             |                               | N <sub>2</sub> 5.3×10 <sup>4</sup> | 1471  | 1323.8 | 7  | 4     |
| 18CrNi4W   | 950  | 1.3      |                  | 200 | -                                           | 空冷                            | 1176.7                             | 833.5 | 10     | 10 | 441.3 |
| 25CrNi4W   | 850  | 1.3-0.13 | N <sub>2</sub>   | 550 | N <sub>2</sub> 5.3×10 <sup>4</sup>          | N <sub>2</sub><br>强制<br>冷却    | 1078.7                             | 931.6 | 11     | 9  | 441.3 |
| 30CrNi3    | 820  | 1.3-0.13 | N <sub>2</sub> 油 | 500 | -                                           |                               | 980.6                              | 784.5 | 9      | 8  | 441.3 |

表二十五 超高强度钢真空热处理工艺规范

| 钢材牌号                      | 淬 火     |          |                            | 回 火         |         |                        | 机械性能 (不小于)              |                                        |               |                |                              |
|---------------------------|---------|----------|----------------------------|-------------|---------|------------------------|-------------------------|----------------------------------------|---------------|----------------|------------------------------|
|                           | 温度 (°C) | 真空度 (Pa) | 冷却                         | 温度 (°C)     | 时间 (小时) | 冷却                     | Rm (N/mm <sup>2</sup> ) | Rp <sub>0.2</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | A (%)         | Z (%)          | ak (N-m/cm <sup>2</sup> )    |
| 30CrMnSiNi2A              | 900     | 1.3-0.13 | 油或<br>260°C±<br>20°C等<br>温 | 250         | 1       | 空冷                     | >1569                   | -                                      | 9             | 40             | 88.3                         |
| 32SiMnMoV                 | 920     | 1.3      | 油或<br>280°C±<br>20°C等<br>温 | 320         | 2       | 空冷<br>或 N <sub>2</sub> | ≥1765.1<br>≥1667        | ≥1520<br>≥1569                         | 9~10<br>10~12 | 40~50<br>40~50 | 49<br>-68.6<br>55.8<br>-78.4 |
| 40SiMnMoV(Re)             | 930     | 1.3      | 油<br>230°C等<br>温           | 250         | 3       | 空冷                     | 1961<br>1765.1<br>~1912 | 1471<br>~1667                          | 11.5<br>10-12 | 48<br>40-50    | 61.8<br>58.8<br>~78.4        |
| 40SiMnMo<br>CrMoVRe (406) | 930     | 1.3      | 油                          | 280         | 2       | 空冷<br>或 N <sub>2</sub> | ≥1761.1                 | ≥1421.9                                | >8.5          | >35            | ≥49                          |
| 40SiMnCrNiMoV             | 900     | 1.3      | 油<br>310°C±<br>10°C等<br>温  | 230-28<br>0 |         | 空冷<br>或 N <sub>2</sub> | ≥1961<br>1569<br>~1667  | -<br>-                                 | >9<br>15      | >35<br>45      | >49<br>78.4<br>~98           |
| 40CrNiMo<br>(4340)        | 850     | 1.3-0.13 | 油                          | 200         | 2       | 空冷                     | 1863.1<br>~2059.3       | 1667<br>~1765.1                        | 10-12         | 40-50          | 39.2<br>~58.8                |
| 6025                      | 950     | 1.3      | 油                          | 300-35<br>0 | 3       | 空冷<br>或 N <sub>2</sub> | 1765.1<br>~1863.1       | 1667<br>~1765.1                        | 10~12         | 40-50          | 49<br>~68.6                  |
| 45CrNiMoV<br>(D6Ac)       | 860     | 1.3      | 油                          | 300         | 1       | 空冷<br>或 N <sub>2</sub> | 1863.1<br>~2059.3       | 1510.1<br>~1725.8                      | 10-12         | 34-50          | 39.2<br>~49                  |

## (2) 弹簧钢

表二十六 常用弹簧钢真空热处理工艺规范

| 钢号       | 淬 火                      |                    | 回 火     |                                                                        | 硬度 (HRc) |
|----------|--------------------------|--------------------|---------|------------------------------------------------------------------------|----------|
|          | 温度 (°C)                  | 真空度 (Pa)           | 温度 (°C) | 真空度 (Pa)                                                               |          |
| 65Mn     | 预热 500-550<br>加热 810-830 | 1.3-0.13<br>13-1.3 | 370-400 | 先抽真空至<br>1.3Pa 升至回<br>火温度, 回充<br>N <sub>2</sub> 至 5×10 <sup>4</sup> ~6 | 36-40    |
| 60Si2MnA | 预热 500-550<br>加热 860-880 | 1.3-0.13<br>13-1.3 | 410-460 |                                                                        | 45-50    |

|           |                          |                  |         |                     |       |
|-----------|--------------------------|------------------|---------|---------------------|-------|
| 60Si2CrVA | 预热 500-550<br>加热 850-870 | 0.13<br>1.3      | 430-480 | ×10 <sup>4</sup> Pa | 45-52 |
| 50CrVA    | 预热 500-550<br>加热 850-870 | 0.13<br>1.3-0.13 | 370-420 |                     | 45-50 |

### (3) 轴承钢

表二十七 常用轴承钢的真空热处理工艺规范

| 钢号                 | 预热       |                    | 淬火       |                    |      | 回火       |         |      | 硬度<br>(HRc) |
|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|------|----------|---------|------|-------------|
|                    | 加热温度(°C) | 真空度(Pa)            | 加热温度(°C) | 真空度(Pa)            | 冷却介质 | 加热温度(°C) | 真空度(Pa) | 冷却介质 |             |
| GCr15              | 520-580  | 10 <sup>-1</sup>   | 830-850  | 1-10 <sup>-1</sup> | 油    | 150-160  | 空气炉     | 油    | ≥60         |
| GCr15SiMn          | 520-580  | 1-10 <sup>-1</sup> | 820-840  | 1-10               | 油    | 150-160  | 空气炉     | 油    | ≥60         |
| GSiMnV(Re)         | 500-550  | 1-10 <sup>-1</sup> | 780-810  | 1-10               | 油    | 150-170  | 空气炉     | 油    | ≥62         |
| GCrSiMnMoV<br>(Re) | 500-550  | 1-10 <sup>-1</sup> | 770-810  | 10-1               | 油    | 150-170  | 空气炉     | 油    | ≥64         |

### (4) 合金工具钢

表二十八 常用合金工具钢真空热处理工艺规范

| 钢号        | 预热         |            |                    | 淬火        |                    |      | 回火       |                       |      | 硬度<br>HRc |
|-----------|------------|------------|--------------------|-----------|--------------------|------|----------|-----------------------|------|-----------|
|           | 一次预热温度(°C) | 二次预热温度(°C) | 真空度(Pa)            | 加热温度(°C)  | 真空度(Pa)            | 冷却介质 | 加热温度(°C) | 真空度(Pa)               | 冷却介质 |           |
| 9CrSi     | 500-600    |            | 1-10 <sup>-1</sup> | 850-870   | 1-10 <sup>-1</sup> | 油    | 170-190  | 空气炉                   | 空气   | 61-63     |
| CrWMn     | 500-600    |            | 1-10 <sup>-1</sup> | 820-840   | 1-10 <sup>-1</sup> | 油    | 170-185  | 空气炉                   | 空气   | 62-63     |
| CrMn      | 500-600    |            | 1-10 <sup>-1</sup> | 840~860   | 1-10 <sup>-1</sup> | 油    | 170-190  | 空气炉                   | 空气   | 60-63     |
| 9Mn2V     | 500-600    |            | 1-10 <sup>-1</sup> | 780-820   | 1-10 <sup>-1</sup> | 油    | 170-190  | 空气炉                   | 空气   | 58-62     |
| 5CrMnMo   | 500-600    |            | 1-10 <sup>-1</sup> | 830-850   | 1-10 <sup>-1</sup> | 油或氮气 | 450-500  | 5-7×10 <sup>4</sup>   | 氮气   | 38-44     |
| 5CrNiMo   | 500-600    |            | 1-10 <sup>-1</sup> | 840-850   | 1-10 <sup>-1</sup> | 油或氮气 | 450-500  | 5-7×10 <sup>4</sup>   | 氮气   | 39-44.5   |
| Cr12MoV   | 500-550    | 800-850    | 1-10 <sup>-1</sup> | 1020-1040 | 1-10 <sup>-1</sup> | 油或氮气 | 170-250  | 空气炉                   | 空气   | 58-62     |
| Cr6WV     | 500-550    | 750-820    | 1-10 <sup>-1</sup> | 970-1000  | 10                 | 油或氮气 | 170~250  | 空气炉                   | 空气   | 58-62     |
| 3Cr2W8V   | 480-520    | 800-850    | 1-10 <sup>-1</sup> | 1050-1100 | 1-10               | 油或氮气 | 560-580  | 5-6.7×10 <sup>4</sup> | 氮气   | 42-47     |
| 4Cr5W2SiV | 480-520    | 800-850    | 1-10 <sup>-1</sup> | 1050-1100 | 1-10               | 油或氮气 | 600-650  | 5-6×10 <sup>4</sup>   | 氮气   | 38-44     |
| 4Cr5W2SiV | 480-520    | 800-850    | 1-10 <sup>-1</sup> | 1050-1100 | 1-10               | 油或氮气 | 600-620  | 5-6×10 <sup>4</sup>   | 氮气   | 40-44     |
| 3Cr2W8V   | 480-520    | 800-850    | 1-10 <sup>-1</sup> | 1050-1100 | 1-10               | 油或氮气 | 600-640  | 5-6.7×10 <sup>4</sup> | 氮气   | 39-44.5   |

|            |         |         |     |           |      |          |         |                                  |          |                |
|------------|---------|---------|-----|-----------|------|----------|---------|----------------------------------|----------|----------------|
| 7CrSiMnMoV | 500-600 |         | 0.1 | 880-900   | 0.1  | 油或<br>氮气 | 450-200 | 5-6.7<br>×10 <sup>4</sup><br>空气炉 | 氮气<br>空气 | 52-54<br>60-62 |
| H13        | 500-550 | 800-820 | 0.1 | 1020-1050 | 10-1 | 油或<br>氮气 | 560-600 | 5-6.7<br>×10 <sup>4</sup>        | 氮气       | 45-50          |
| Cr12       | 500-550 |         | 0.1 | 960-980   | 10-1 | 油或<br>氮气 | 180-240 | 空气炉                              | 空气       | 60-64          |

## (5) 高速钢

表二十九 高速钢真空热处理工艺规范

| 钢号                   | 预热                  |                     |                    | 淬火          |                                      |                                                   | 回火          |                           |                  | 硬度<br>HRc |
|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------|---------------------------|------------------|-----------|
|                      | 一次<br>预热<br>温度<br>℃ | 二次<br>预热<br>温度<br>℃ | 真空<br>度<br>(Pa)    | 加热温度<br>(℃) | 真空<br>度<br>(Pa)                      | 冷却<br>介质                                          | 加热温<br>度(℃) | 真空<br>度<br>(Pa)           | 冷却<br>介质         |           |
| W18Cr4V              | 600<br>~<br>650     | 850~900             | 1~10 <sup>-1</sup> | 1260-1280   | 10~<br>266Pa<br>(回<br>填高<br>纯氮<br>气) | 油或<br>3~5×<br>10 <sup>5</sup> Pa<br>的氮<br>气快<br>冷 | 550-580     | 5-6.7<br>×10 <sup>4</sup> | 氮<br>气<br>快<br>冷 | 61-67     |
| 95W18Cr4V            |                     |                     |                    | 1240-1270   |                                      |                                                   | 550-580     |                           |                  | 63-68     |
| W6Mo5Cr4V2           |                     |                     |                    | 1200-1240   |                                      |                                                   | 540-580     |                           |                  | 62-67     |
| W6Mo5Cr4V2Al         |                     |                     |                    | 1200-1230   |                                      |                                                   | 540-560     |                           |                  | 64-69     |
| W6Mo5Cr4V3Al         |                     |                     |                    | 1210-1240   |                                      |                                                   | 540-560     |                           |                  | 64-69     |
| W12Cr4V4Mo           |                     |                     |                    | 1220-1250   |                                      |                                                   | 550-580     |                           |                  | 64-68     |
| W18Cr4V3SiAlNb       |                     |                     |                    | 1230-1250   |                                      |                                                   | 530-560     |                           |                  | 66-70     |
| W12Mo3Cr4V3Co5<br>Si |                     |                     |                    | 1230-1250   |                                      |                                                   | 540-580     |                           |                  | 65-70     |
| W7Mo4Cr4Co5          |                     |                     |                    | 1230-1250   |                                      |                                                   | 540-590     |                           |                  | 65-70     |
| W2Mo9Cr4V2Co8        |                     |                     |                    | 1190-1200   |                                      |                                                   | 540-580     |                           |                  | 65-70     |
| W9Mo4Cr4V3Co10       |                     |                     |                    | 1220-1240   |                                      |                                                   | 540-580     |                           |                  | 65-70     |
| W6Mo5Cr4V5Si<br>NbAl |                     |                     |                    | 1220-1240   |                                      |                                                   | 530-560     |                           |                  | 64-68     |

注意事项:

- ① 真空度 10-266Pa 下加热, 防止 Cr、Mn、Al 合金元素挥发。
- ② 导热性差, 要多次预热。
- ③ 淬火温度比常规低 10-20℃ 为宜。
- ④ 为防止油淬面亮层, 用高压气淬。
- ⑤ 为防止工件相互粘连, 不能将光洁度高的平面叠在一起。
- ⑥ 在 530-590℃ 回火 2-3 次, 为保持光亮度 90%N<sub>2</sub>+10%H<sub>2</sub>。

## (6) 不锈钢耐热钢

表三十 常用不锈钢耐热钢的真空热处理工艺规范

| 钢号                                                   | 淬火                                                                                |          |                              | 回火                       |                               |                | 硬度 (HRC)                  |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------------|
|                                                      | 加热温度 (°C)                                                                         | 真空度 (Pa) | 冷却介质                         | 加热温度 (°C)                | 真空度 (Pa)                      | 冷却介质           |                           |
| 2Cr13 3Cr13                                          | 1040-1060                                                                         | 1        | 油或 2-5×10 <sup>3</sup> Pa 氮气 | 230±30                   | 空气炉                           | 空气             | 40-45                     |
|                                                      |                                                                                   |          |                              | 250±30                   | 空气炉                           |                | 36-40                     |
|                                                      |                                                                                   |          |                              | 500±20                   | 5-8×10 <sup>4</sup>           | 氮气             | 32-36                     |
| 4Cr13                                                | 1050-1100                                                                         | 1        | 油或 2-5×10 <sup>3</sup> Pa 氮气 | 250±30                   | 空气炉                           | 空气             | 40-50                     |
| 9Cr18                                                | 1010-1050                                                                         | <1       |                              | 200±30                   |                               |                | 50-60                     |
| Cr17Ni2                                              | 950-1040                                                                          | 1        |                              | 250±30                   |                               |                | 45-50                     |
| Cr17Ni2                                              | 950-1040                                                                          | 1        | 油                            | 500±20                   | 0.1                           | 氮气             | 45-50                     |
| 1Cr18Ni9Ti                                           | 1100-1150                                                                         | 1.3-0.13 | 氮气或 Ar 气                     | -                        | -                             | -              | -                         |
| 1Cr21Ni5Ti                                           | 950-1050                                                                          |          |                              | -                        | -                             | -              | -                         |
| 1Cr11Ni12W2 MoV                                      | 1000-1020                                                                         | 1.3-0.13 | N <sub>2</sub> 或油            | 660-710<br>540-600       | 0.13<br>1.3-0.13              | N <sub>2</sub> | HB3. 4-3.7<br>HB3. 1-3.45 |
| 1Cr14Ni13W2 VB                                       | 1050±10                                                                           | 1.3-0.13 | N <sub>2</sub> 或油            | 660-680<br>550-600<br>时效 | 1.3-0.13                      | N <sub>2</sub> | HB3. 3-3.6<br>HB3. 1-3.35 |
|                                                      |                                                                                   |          |                              | 480<br>495               | 1.3-0.13<br>或 Ar              | 惰性气体           | >40<br>>38                |
| 0Cr17Ni4Cu4 Nb                                       | 1030-1050                                                                         | 1.3      | Ar 气或油                       | 550<br>580               | 5-8×10 <sup>4</sup> Ar        | 惰性气体           | >35<br>>31                |
| 0Cr17Ni7Al (17-7PH)<br>0Cr15Ni7Mo2 Al<br>(15-7MoP H) | 固溶 1050±10<br>+<br>调整 760±10<br><br>固溶 1050±10<br>+<br>调整 950±10<br>+<br>-73℃冰冷处理 | 1.3-0.13 | Ar 气                         | 时效<br>565±10             | 高纯 Ar5-8×10 <sup>4</sup> 或0.1 | Ar 气           | ≥HB363                    |
|                                                      |                                                                                   | 1.3      | Ar                           |                          |                               |                |                           |
|                                                      |                                                                                   | -        | -                            | 时效<br>510±10             |                               |                |                           |

注意几点:

- ① 当淬火温度相同, 真空淬火马氏体不锈钢晶粒度比普通电炉晶粒度大一级, 对材料冲击韧性没影响。
- ② 双相不锈钢 (1Cr<sub>21</sub>Ni<sub>5</sub>Ti) 冷速不能太慢, 在 700~800℃有脆性想折出, 在 500-650℃, 有 475℃脆性, 因此冷速很重要。
- ③ 马氏体不锈钢可以油淬, 也可以气淬。
- ④ 奥氏体镍铬钢用氩冷却和分压, 防微 N 而使机械性能变坏。
- ⑤ 对薄件, 采用一段或二段预热。

(7) 高温合金特点:

- ① Fe 基 Ni 基高温合金含有 Al、Mn、Ti 元素以及高含量的 Cr, 一般先抽高真空 10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup>Pa, 然后在高温加热时通入高纯氩, 使真空度到 1~0.1Pa, 对已加工成品尺

寸用  $10^{-2}\sim 10^{-3}$ Pa 高真空性时效处理。

② 热处理时时间长。特别固溶时效合金，经 16 小时以上，其泄漏率要非常小，压升率最好在 0.133Pa/h，否则时效时空气渗入零件会被氧化。

③ 高温合金固溶处理要求较快冷却速度，一般水淬炉。

表三十一 常用高温合金真空热处理工艺规范

| 合金牌号  | 固溶温度 (°C)            | 固溶时间 (小时) | 冷却 | 真空度 (Pa)              | 时效温度 (°C) | 时效时间 (小时) | 冷却 | 真空度 (Pa)              | 硬度 (HB) |
|-------|----------------------|-----------|----|-----------------------|-----------|-----------|----|-----------------------|---------|
| GH37  | 1180±10              | 2         | 气冷 | 1-0.1                 | 800±10    | 16        | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ | 3.3-3.7 |
|       | 1050±10              | 4         |    |                       |           |           |    |                       |         |
| GH143 | 1150±10              | 4         | 气冷 | $1\sim 10^{-1}$       | 700±10    | 16        | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ | 3.1-3.5 |
|       | 1065±10              | 16        |    |                       |           |           |    |                       |         |
| GH49  | 1200±10              | 2         | 气冷 | $1\sim 10^{-1}$       | 850±10    | 8         | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ | 3.2-3.5 |
|       | 1050±10              | 4         |    |                       |           |           |    |                       |         |
| GH151 | 1250±10              | 5         | 气冷 | $1\sim 10^{-1}$       | 950±10    | 10        | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ | 3.1-3.4 |
|       | 1000±10              | 5         |    |                       |           |           |    |                       |         |
| GH44  | 1120~1160            | ~30`      | 气冷 | $1\sim 10^{-1}$       |           |           |    |                       |         |
| GH128 | 1215±10              | 20`       | 气冷 | $10^{-2}$             |           |           |    |                       |         |
| GH169 |                      |           |    |                       |           | 1         |    | $10^{-2}\sim 10^{-3}$ |         |
| GH141 | 1180±10              | 0.5       | 气冷 | $1\sim 10^{-1}$       | 900±10    | 4         | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ |         |
| GH130 | 1180±10              | 1.5-4     | 气冷 | $1\sim 10^{-1}$       | 800±10    | 16        | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ | 3.3-3.7 |
|       | 1050±10              | 4         |    |                       |           |           |    |                       |         |
| GH302 | 1180±10              | 2         | 气冷 | $1\sim 10^{-1}$       | 800±10    | 16        | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ | 3.3-3.7 |
|       | 1050±10              | 4         |    |                       |           |           |    |                       |         |
| GH131 | 1130~1200<br>1160±10 | 1.5-2     | 气冷 | $1\sim 10^{-2}$       |           |           |    |                       |         |
| GH132 | 980~1000             | 0.5-2     | 气冷 | $10^{-1}$             | 710±10    | 12-16     | 气冷 | $10^{-2}\sim 10^{-3}$ | 3.4-3.8 |
| GH135 | 1080±10              | 8         | 气冷 | $1\sim 10^{-1}$       | 830±10    | 8         | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ | 3.45-   |
|       | 1140                 | 4         |    |                       | 700±10    | 16        |    |                       | 3.65    |
| GH39  | 1050~1080            |           | 气冷 | $10^{-1}\sim 10^{-2}$ | 830±10    | 8         | 气冷 | $10^{-2}\sim 10^{-3}$ | 3.4-3.8 |
|       |                      |           |    |                       | 650±10    | 10        |    |                       |         |

(8) 钛合金真空淬火(固溶)和时效

表三十二 钛合金淬火(固溶)时效工艺规范

| 合金牌号             | 真空度(Pa)               | 固溶温度(°C) | 时间(小时) | 时效温度(°C) | 时间(小时) |
|------------------|-----------------------|----------|--------|----------|--------|
| TC <sub>3</sub>  | $10^{-2}\sim 10^{-3}$ | 820~920  | 0.5~2  | 450~550  | 2~12   |
| TC <sub>4</sub>  |                       | 850~950  |        | 450~550  |        |
| TC <sub>6</sub>  |                       | 860~900  |        | 500~620  |        |
| TC <sub>8</sub>  |                       | 900~950  |        | 500~620  |        |
| TC <sub>9</sub>  |                       | 900~950  |        | 500~620  |        |
| TC <sub>10</sub> |                       | 850~900  |        | 500~620  |        |
| TB <sub>1</sub>  |                       | 800      |        | 480~500  |        |
|                  |                       |          |        | 550~570  |        |
| TB <sub>2</sub>  |                       | 800      |        | 500      |        |