

# 热处理工艺及设备计算

莫之民 韩睿师 编

上海交通大学出版社

高等学校教学参考用书

# 热处理工艺及设备计算

莫之民 韩睿师

上海交通大学出版社

(沪)新登字 205 号

## 内 容 提 要

本书较全面地列出了有关热处理工艺和设备的实验式、计算式及各种计算图表和实例。

本书共分十五章,较全面地概括了热处理工艺及设备计算,包括相变点、热处理主要工艺参数、质量效应、淬透性、端淬曲线、淬硬深度、回火硬度、淬火变形、热处理总效能、电阻炉、盐浴炉、淬火槽等计算及机械性能指标推算和换算。可供从事机械工程的教师、设计人员、工艺人员及大中专学校热处理专业学生参考。

## 热处理工艺及设备计算

出版:上海交通大学出版社

(上海市华山路 1954 号 邮政编码:200030)

发行:新华书店上海发行所

印刷:上海海峰印刷厂

开本:787×1092(毫米)1/16

印张:7.5 字数:185,000

版次:1995 年 4 月第 1 版

印次:1995 年 4 月第 1 次

印数:1—3000

科目:337—283

ISBN7-313·00990-9/TG·30

定价:9.00 元

# 前 言

运用热处理计算与图表资料,对设计、生产与现场操作有较大实用意义。这些计算式是人类长期从事生产实践和科学研究积累、总结,并根据假设和模拟真实条件进行数学推导而得到。

为了适应生产发展的需要,编者根据 60 年代以来,在“金属学”、“金属材料”、“热处理”等期刊、杂志和有关书籍中所提供的计算式、经验式、实验式、实验曲线、图表、计算方法,收集后编写成此书,供读者参考。在内容上着重实际生产中的热处理工艺和设备计算问题,预期这些计算式、曲线、图表等对教学、设计、制造与现场操作有一定的参考价值。

本书可供大中专学校热处理专业教师、学生作为参考书,可供设计人员、技术人员、工艺人员使用,也可供有一定热处理基础的工人参阅。

本书引用了一些工厂、科研单位、学校的资料、数据、图表,在此谨向有关作者、编者、译者表示深切的谢意。

本书由山东工业大学彭其凤教授审定。

由于编者学识粗浅,加上编写时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,希望广大读者批评指正。

编 者

1994.5

EAC58108

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 相变点计算 .....                 | 1  |
| 第二章 热处理主要工艺参数计算 .....           | 6  |
| 第一节 温度 .....                    | 6  |
| 第二节 速度 .....                    | 9  |
| 第三节 时间 .....                    | 12 |
| 第四节 形状换算(等效直径计算) .....          | 14 |
| 第五节 急冷度 .....                   | 20 |
| 第三章 质量效应计算 .....                | 22 |
| 第四章 淬透性计算 .....                 | 25 |
| 第一节 根据化学成分计算淬透性 .....           | 25 |
| 第二节 根据淬透性曲线计算淬透性 .....          | 31 |
| 第三节 根据淬火特性曲线计算淬透性 .....         | 33 |
| 第四节 根据临界直径与急冷度计算淬透性 .....       | 33 |
| 第五节 根据马氏体量计算淬透性 .....           | 34 |
| 第六节 珠光体和贝氏体淬透性计算 .....          | 35 |
| 第五章 端淬曲线计算 .....                | 38 |
| 第一节 根据理想临界直径计算端淬曲线(淬透性曲线) ..... | 38 |
| 第二节 根据加算法计算端淬曲线 .....           | 39 |
| 第三节 已知碳含量和理想临界直径计算端淬曲线 .....    | 42 |
| 第四节 用实验式计算端淬曲线 .....            | 46 |
| 第六章 淬硬深度计算 .....                | 48 |
| 第一节 计算临界直径 .....                | 48 |
| 第二节 计算理想临界直径 .....              | 48 |
| 第三节 根据化学成分计算淬硬深度 .....          | 48 |
| 第四节 淬火介质变更时计算淬硬深度 .....         | 52 |
| 第五节 计算圆钢的硬度分布 .....             | 53 |
| 第六节 根据圆钢推测板的淬硬深度 .....          | 54 |
| 第七节 计算与板相等的淬硬直径 .....           | 55 |
| 第七章 表面热处理淬硬深度计算 .....           | 58 |
| 第八章 回火硬度计算 .....                | 61 |
| 第一节 回火参数曲线(回火母线) .....          | 64 |
| 第二节 根据理想临界直径推算回火硬度 .....        | 66 |
| 第九章 淬火变形计算 .....                | 68 |
| 第一节 组织与比容 .....                 | 68 |
| 第二节 组织转变引起的体积变化 .....           | 68 |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 第三节         | 高碳合金工具钢中的未溶碳化物和尺寸变化 ..... | 70         |
| 第四节         | 材料方向性对尺寸变化影响 .....        | 72         |
| 第五节         | 回火引起尺寸变化 .....            | 73         |
| <b>第十章</b>  | <b>钢的热处理总效能计算 .....</b>   | <b>75</b>  |
| 第一节         | 化学成分选择 .....              | 75         |
| 第二节         | 热处理工艺选择 .....             | 75         |
| 第三节         | 成分与工艺检验 .....             | 76         |
| 第四节         | 计算举例 .....                | 76         |
| <b>第十一章</b> | <b>机械性能计算 .....</b>       | <b>84</b>  |
| 第一节         | 根据金相组织测算机械性能 .....        | 84         |
| 第二节         | 根据化学成分计算机械性能 .....        | 85         |
| <b>第十二章</b> | <b>机械性能指标推算与换算 .....</b>  | <b>88</b>  |
| <b>第十三章</b> | <b>电阻炉计算 .....</b>        | <b>91</b>  |
| 第一节         | 热量消耗计算 .....              | 91         |
| 第二节         | 电热体计算 .....               | 92         |
| <b>第十四章</b> | <b>盐浴炉计算 .....</b>        | <b>97</b>  |
| 第一节         | 坩埚尺寸 .....                | 97         |
| 第二节         | 盐浴炉功率 .....               | 97         |
| 第三节         | 电极尺寸 .....                | 100        |
| 第四节         | 起动电阻 .....                | 101        |
| <b>第十五章</b> | <b>淬火槽计算 .....</b>        | <b>105</b> |
| 第一节         | 周期作业淬火槽计算 .....           | 105        |
| 第二节         | 连续作业淬火槽计算 .....           | 108        |
| 第三节         | 带有蛇形管的淬火槽计算 .....         | 109        |
| <b>参考文献</b> | .....                     | <b>114</b> |

# 第一章 相变点计算

一、 $A_1$

$A_{c_1} (^{\circ}\text{C}) = 1333 - 25\text{Mn} + 40\text{Si} - 26\text{Ni} + 42\text{Cr}$  (1-1)

$A_{c_1} (^{\circ}\text{C}) = 723 - 14\text{Mn} + 22\text{Si} - 14.4\text{Ni} + 23.3\text{Cr}$  (1-2)

$A_{c_1} (^{\circ}\text{C}) = 732 - 10.7\text{Mn} + 29.1\text{Si} - 16.9\text{Ni} + 16.9\text{Cr} + 6.38\text{W} + 290\text{As}$  (1-3)

$A_{c_1} (^{\circ}\text{C}) = 754.88 - 82.25\text{C} - 17.76\text{Mn} + 23.32\text{Si} + 17.18\text{Cr} + 4.51\text{Mo} + 15.62\text{V}$  (1-4)

$A_{c_1} (^{\circ}\text{C}) = 723 - 12\text{Mn} + 26\text{Si} - 18\text{Ni} + 20\text{Cr} + 8\text{W} + 16\text{Mo} + 55\text{V} - 14\text{Cu}$  (1-5)

$A_{c_1} (^{\circ}\text{C}) = 750.8 - 26.6\text{C} - 11.6\text{Mn} + 17.6\text{Si} - 23\text{Ni} + 24.1\text{Cr} + 22.5\text{Mo} - 39.7\text{V}$   
 $+ 5.7\text{Ti} + 31.9\text{Zr} + 232.6\text{Nb} - 169.4\text{Al} - 891.7\text{B} - 22.9\text{Cu}$  (1-6)

注：上述各式中元素均以重量百分含量表示之。

式(1-5)中合金元素对  $A_1$  点影响见图 1-1；其余各式适用于一定化学成分的钢，见表 1-1。

表 1-1 不同  $A_{c_1}$  计算式所适用的钢

| 计算式      | 化 学 成 分 (%) |           |         |       |         |      |         |       |
|----------|-------------|-----------|---------|-------|---------|------|---------|-------|
|          | C           | Mn        | Si      | Ni    | Cr      | W    | Mo      | V     |
| 1-1, 1-2 | 0.3~0.6     | <2        | <1      | <3.5  | <1.5    |      | <0.5    |       |
| 1-3      | 0.08~1.43   | <1.98     | <1.78   | <5    | <4.48   | <4.1 | <2.61   | <2.51 |
| 1-4      | 0.25~0.45   | 0.7~1.2   | 0.6~3.1 |       | 0.8~2.9 |      | 0.2~0.9 | <0.4  |
| 1-6      | 0.07~0.22   | 0.35~1.72 | <1.28   | <3.18 | <1.64   |      | <0.61   | <0.35 |

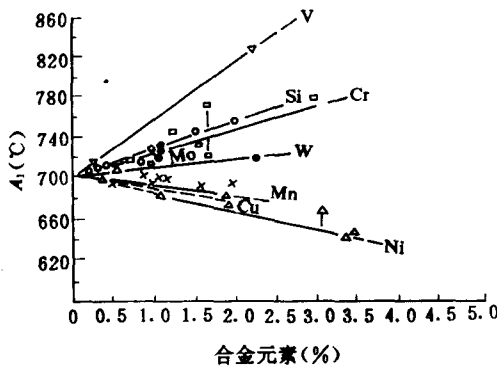


图 1-1 钢化学成分对  $A_1$  点影响

## 二、 $A_{c3}$

$$A_{c3}(^{\circ}\text{F}) = 1570 - 323\text{C} - 25\text{Mn} + 80\text{Si} - 32\text{Ni} - 3\text{Cr} \quad (1-7)$$

$$A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = 845 - 180\text{C} - 14\text{Mn} + 44\text{Si} - 17.8\text{Ni} - 1.7\text{Cr} \quad (1-8)$$

$$A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = 910 - 203 \sqrt{\text{C}} - 30\text{Mn} + 44.7\text{Si} - 15.2\text{Ni} - 11\text{Cr} + 13\text{W} + 31.5\text{Mo} \\ + 104\text{V} + 400\text{Ti} + 400\text{Al} + 700\text{P} + 120\text{As} - 20\text{Cu} \quad (1-9)$$

$$A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = 937.2 - 476.5\text{C} - 19.7\text{Mn} + 56\text{Si} - 26.6\text{Ni} - 4.9\text{Cr} + 38.1\text{Mo} + 142.8\text{V} \\ + 136.3\text{Ti} + 198.4\text{Al} - 19.1\text{Nb} + 35\text{Zr} + 3315\text{B} - 16.3\text{Cu} \quad (1-10)$$

$$A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = 930.21 - 394.75\text{C} - 14.4\text{Mn} + 54.99\text{Si} + 5.77\text{Cr} + 24.49\text{Mo} + 83.37\text{V} \quad (1-11)$$

$$A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = 908 - 223.7\text{C} - 34.43\text{Mn} + 30.49\text{Si} - 23\text{Ni} + 2(100\text{C} - 54 + 6\text{Ni}) + 438.5\text{P} \quad (1-12)$$

若括号内计算为负值,则该项省略。

$$A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = \left. \begin{array}{l} 910 - 320\text{X} \\ 782 - 150(\text{Y} - 0.4) \end{array} \right\} - 10\text{Mn} + 18\text{Si} - 14\text{Ni} + 5\text{Cr} + 7\text{W} + 14\text{Mo} + 5\text{V} - 12\text{Cu} \quad (1-13)$$

式中: X——钢中碳含量 $\leq 0.4$ ;

Y——钢中碳含量 $> 0.4$ 。

式(1-7)~式(1-11)适用于一定化学成分的钢,如表 1-2 所示;式(1-13)中碳与合金元素对  $A_3$  点影响见图 1-2。

表 1-2 不同  $A_{c3}$  计算式适用的钢

| 计算式      | 化 学 成 分(%) |         |         |       |         |      |         |       |
|----------|------------|---------|---------|-------|---------|------|---------|-------|
|          | C          | Mn      | Si      | Ni    | Cr      | W    | Mo      | V     |
| 1-7, 1-8 | 0.3~0.6    | <2      | <1      | <3.5  | <1.5    |      | <0.5    |       |
| 1-9      | 0.08~0.59  | <1.98   | <1.78   | <5    | <5      | <4.1 | <1.05   | <0.71 |
| 1-10     | 0.07~0.22  | <1.72   | <1.28   | <3.18 | <1.64   |      | <0.61   | <0.35 |
| 1-11     | 0.25~0.45  | 0.7~1.2 | 0.6~3.1 |       | 0.8~2.9 |      | 0.2~0.9 | <0.4  |

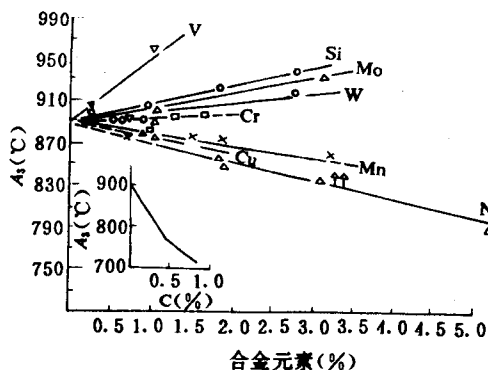


图 1-2 钢中碳与合金元素对  $A_3$  点影响

**实例 1** 化学成分  $C=0.40\%$ ,  $Mn=0.74\%$ ,  $Si=0.20\%$ ,  $Ni=3.03\%$ ,  $Cr=0.37\%$ ,  $P=0.017\%$ ,  $S=0.023\%$  的钢, 计算其  $A_{c_3}(^{\circ}C)$  点。

**解:** 用式(1-12)进行计算, 即:

$$A_{c_3}(^{\circ}C) = 908 - 223.7 \times 0.4 - 34.43 \times 0.74 + 30.49 \times 0.2 - 23 \times 3.03 \\ + 2(100 \times 0.4 - 54 + 6 \times 3.03) + 438.5 \times 0.017 = 745$$

该钢的实测值为  $748^{\circ}C$ , 而计算值为  $745^{\circ}C$ , 仅差  $3^{\circ}C$ , 故此计算式与实际测定基本符合。

### 三、 $A_{c_m}$

$$A_{c_m}(^{\circ}C) = 732 + 340(C - 0.8) - 15Mn + 30Si - 30Ni + 60Cr + 11W + 22Mo + 80V - 18Cu \quad (1-14)$$

### 四、 $M_s$

$$M_s(^{\circ}F) = 1042 - 853C - 60Mn - 30Ni - 30Cr - 38Mo \quad (1-15)$$

$$M_s(^{\circ}F) = 1010 - 630C - 72Mn - 31Ni - 36Cr - 9W - 18Mo - 63V - 54Al - 27Co - 18Cu \quad (1-16)$$

$$M_s(^{\circ}F) = 1000 - 650C - 70Mn - 35Ni - 70Cr - 50Mo \quad (1-17)$$

$$M_s(^{\circ}F) = 930 - 540C - 60Mn - 20Si - 30Ni - 20Mo \quad (1-18)$$

$$M_s(^{\circ}F) = 930 - 570C - 60Mn - 20Si - 30Ni - 50Cr - 20W - 20Mo \quad (1-19)$$

$$M_s(^{\circ}F) = 930 - 540C - 60Mn - 20Si - 30Ni - 40Cr - 20Mo \quad (1-20)$$

$$M_s(^{\circ}F) = 925(1 - 0.62C)(1 - 0.092Mn)(1 - 0.033Si)(1 - 0.045Ni)(1 - 0.07Cr) \\ (1 + 0.018W)(1 - 0.029Mo)(1 + 0.12Co) \quad (1-21)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo \quad (1-22)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 550 - 350C - 40Mn - 17Ni - 20Cr - 5W - 10Mo - 35V + 30Al + 15Co - 10Cu \quad (1-23)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 538 - 317C - 33Mn - 11Si - 17Ni - 28Cr - 11W - 11Mo \quad (1-24)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 520 - 320C - 50Mn - 30Cr - 20(Ni + Mo) - 5(Cu + Si) \quad (1-25)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 517 - 317C - 33Mn - 10Si - 16Ni - 26Cr - 10W - 10Mo \quad (1-26)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 517 - 300C - 33Mn - 10Si - 16Ni - 26Cr - 10Mo \quad (1-27)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 514(1 - 0.62C)(1 - 0.092Mn)(1 - 0.033Si)(1 - 0.045Ni)(1 - 0.07Cr) \\ (1 - 0.018W)(1 - 0.029Mo)(1 + 0.12Co) \quad (1-28)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 512 - 453C - 16.9Ni + 15Cr - 9.5Mo + 217(C)^2 - 715(C)(Mn) \\ - 67.6(C)(Cr) \quad (1-29)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 499 - 300C - 33Mn - 11Si - 17Ni - 22Cr - 11Mo \quad (1-30)$$

$$M_s(^{\circ}C) = 496(1 - 0.62C)(1 - 0.092Mn)(1 - 0.033Si)(1 - 0.045Ni) \\ (1 - 0.018W)(1 - 0.029Mo)(1 + 0.12Co) \quad (1-31)$$

$$M_s(^{\circ}C) = \left. \begin{array}{l} 795 - 5500X \\ 525 - 350(Y - 0.05) \end{array} \right\} - 45Mn - 5Si - 20Ni - 8W - 16Mo + 15Al + 6Co \quad (1-32)$$

式中:  $X$ ——钢中碳含量  $\leq 0.05$ ;

$Y$ ——钢中碳含量  $> 0.05$ 。

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = K - 47\text{C} - 33\text{Mn} - 17(\text{Ni} + \text{Cr}) - 21\text{Mo} \quad (1-33)$$

式中:  $K$ ——系数, 其值选取可根据转变程度, 见表 1-3。

表 1-3 转变程度与  $K$  值关系

| 转变程度                   | $K$ 值        |
|------------------------|--------------|
| $M_{0.1\%}$ (即 $M_s$ ) | 561          |
| $M_{10\%}$             | $551 \pm 3$  |
| $M_{50\%}$             | $514 \pm 9$  |
| $M_{90\%}$             | $458 \pm 12$ |
| $M_{100\%}$ (即 $M_f$ ) | $346 \pm 15$ |

**实例 2** 化学成分  $\text{C}=0.40\%$ ,  $\text{Mn}=0.65\%$ ,  $\text{Si}=0.20\%$ ,  $\text{Ni}=1.05\%$ ,  $\text{Cr}=0.6\%$ ,  $\text{Mo}=0.3\%$ ,  $\text{V}=0.2\%$ ,  $\text{Cu}=0.25\%$  的钢, 计算其  $M_s$  点。

**解:** 用式(1-23)计算, 即

$$\begin{aligned} M_s(^{\circ}\text{C}) &= 550 - 350 \times 0.4 - 40 \times 0.65 - 17 \times 1.05 - 20 \times 0.6 - 10 \times 0.3 - 35 \times 0.2 \\ &\quad - 10 \times 0.25 = 341 \end{aligned}$$

由式(1-23)计算钢的  $M_s$  点列于表 1-4 中。

表 1-4 SAE 钢的  $M_s$  点(计算值)

| 钢号   | $M_s(^{\circ}\text{C})$ | 钢号   | $M_s(^{\circ}\text{C})$ | 钢号   | $M_s(^{\circ}\text{C})$ |
|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|
| 1010 | 500                     | 1340 | 340                     | 4130 | 405                     |
| 1015 | 480                     | 2330 | 355                     | 4140 | 355                     |
| 1020 | 465                     | 2340 | 320                     | 4145 | 335                     |
| 1025 | 445                     | 2345 | 300                     | 4145 | 325                     |
| 1030 | 410                     | 2515 | 390                     | 4320 | 415                     |
| 1035 | 395                     | 3115 | 445                     | 4340 | 330                     |
| 1040 | 380                     | 3120 | 420                     | 4615 | 440                     |
| 1050 | 340                     | 3130 | 385                     | 4620 | 425                     |
| 1055 | 325                     | 3135 | 365                     | 4640 | 350                     |
| 1060 | 310                     | 3140 | 345                     | 4815 | 415                     |
| 1115 | 465                     | 3145 | 325                     | 4820 | 305                     |
| 1145 | 360                     | 3150 | 305                     | 5120 | 435                     |
| 1320 | 410                     | 3240 | 340                     | 5140 | 360                     |
| 1330 | 375                     | 3310 | 405                     | 5150 | 325                     |
| 1335 | 355                     | 4125 | 415                     | 9840 | 362                     |

## 五、 $M_f$

$$M_f(^{\circ}\text{F}) = 930 - 600\text{C} - 60\text{Mn} - 20\text{Si} - 30\text{Ni} - 50\text{Cr} - 20\text{W} - 20\text{Mo} \quad (1-34)$$

$$M_f(^{\circ}\text{F}) = 930 - 540\text{C} - 60\text{Mn} - 20\text{Si} - 35\text{Ni} - 40\text{Cr} - 20\text{Mo} \quad (1-35)$$

$$M_f(^{\circ}\text{F}) = 900 - 650\text{C} - 70\text{Mn} - 35\text{Ni} - 70\text{Cr} - 50\text{Mo} \quad (1-36)$$

$$M_f(^{\circ}\text{F}) = M_s - 385 \quad (1-37)$$

马氏体量(%M)与  $M_f$  点( $^{\circ}\text{C}$ )之间有下列关系式:

$$M_f(100\%M) = M_s - (215 \pm 5) \quad (1-38)$$

$$M_f(90\%M) = M_s - (103 \pm 12) \quad (1-39)$$

$$M_f(50\%M) = M_s - (47 \pm 9) \quad (1-40)$$

$$M_f(10\%M) = M_s - (10 \pm 3) \quad (1-41)$$

表 1-5 列出了每加入 1% 合金元素时,  $M_s$  点和残余奥氏体量变化情况(负号表示降低或减少, 正号表示升高或增加)。

表 1-5 合金元素对  $M_s$  点和残余奥氏体影响

| 每加 1% 的元素 | $M_s$ 点(°C) | 残余奥氏体(%)变化 |
|-----------|-------------|------------|
| C         | -300        | +50        |
| Mn        | -33         | +20        |
| Cr        | -22         | +11        |
| Ni        | -17         | +10        |
| Mo        | -11         | +9         |
| W         | -11         | +8         |
| Si        | -11         | +6         |
| Co        | +55         | -3         |
| Al        | +17         | -4         |

## 六、 $B_s$

$$B_s(°C) = 830 - 270C - 90Mn - 37Ni - 70Cr - 83Mo \quad (1-42)$$

$$B_s(°C) = 630 - 45Mn - 35Ni - 20Ni - 30Cr - 12W - 24Mo - 40V \quad (1-43)$$

式(1-42)适用于化学成分为 0.1%~0.55%C, 0.2%~1.7%Mn, 0.1%~5.0%Ni, 0.1%~3.5%Cr, 0.1%~1.0%Mo 的钢。

## 第二章 热处理主要工艺参数计算

### 第一节 温度

#### 一、奥氏体化温度

$$T_A = 920 - 150C - 20Ni + 20Cr + 30Mo + 10W + 200V \quad (2-1)$$

式中:  $T_A$ ——奥氏体化温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

**实例 1** 已知热锻模具钢的化学成分  $C = 0.55\%$ ,  $Mn = 0.65\%$ ,  $Ni = 1.6\%$ ,  $Cr = 0.65\%$ ,  $Mo = 0.25\%$ , 试计算  $T_A$ 。

**解:** 根据式(2-1), 则

$$T_A(^{\circ}\text{C}) = 920 - 150 \times 0.55 - 20 \times 1.6 + 20 \times 0.65 + 30 \times 0.25 = 826$$

由于  $T_A = 826^{\circ}\text{C}$ , 故这类热锻模具钢常用淬火温度为  $830 \sim 860^{\circ}\text{C}$ 。

式(2-1)适用于  $C < 0.9\%$ 。  $Si < 1.8\%$ ,  $Mn < 1.1\%$ ,  $Ni < 5\%$ ,  $Cr < 1.8\%$ ,  $Mo < 0.5\%$ ,  $W < 2\%$ ,  $V < 0.25\%$  的钢。

#### 二、再结晶温度

$$T_R = 0.4 \sim 0.45 T_M \quad (2-2)$$

式中:  $T_R$ ——再结晶温度,  $\text{K}$ ;

$T_M$ ——金属熔点,  $\text{K}$ 。

系数对纯金属取 0.4, 对加少量碳的低碳钢取 0.45。

**实例 2** 已知 10 钢的熔点  $1520^{\circ}\text{C}$ , 计算其再结晶温度。

**解:**  $T_R = 0.45 \times (1520 + 273) = 807(\text{K})$

即 10 钢的再结晶温度  $= 807 - 273 = 534(^{\circ}\text{C})$ 。

#### 三、钢件心部温度

##### 1. 实心圆棒

##### (1) 油冷时

$$T = -760 \log \tau - 475 + 1520 \log R \quad (2-3)$$

##### (2) 水冷时

$$T = -900 \log \tau - 870 + 1800 \log R \quad (2-4)$$

式中:  $T$ ——钢件心部温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\tau$ ——钢件冷却时间,  $\text{s}$ ;

$R$ ——钢件半径,  $\text{mm}$ 。

##### 2. 板材

##### (1) 油冷时

$$T = -760 \log \tau - 247 + 1520 \log \frac{S}{2} \quad (2-5)$$

(2) 水冷时

$$T = -900 \log \tau - 600 + 1800 \log \frac{S}{2} \quad (2-6)$$

式中:  $S$ ——板材厚度, mm。

#### 四、回火温度

1. 根据化学成分进行计算

如果已知钢的化学成分, 并对钢进行完全淬火后回火, 此回火温度可以计算。计算方法如下:

(1) 已知钢的碳含量, 其基本回火硬度可查图 2-1。

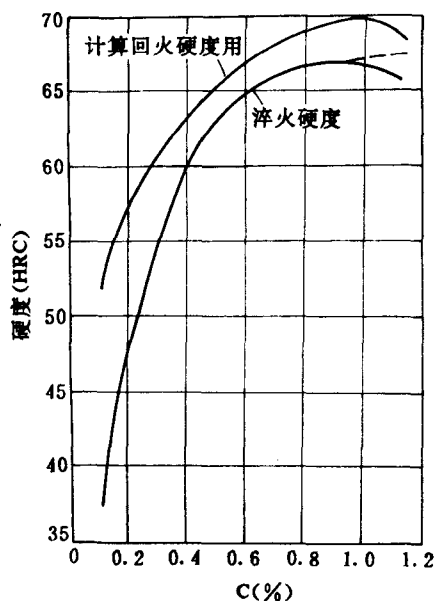


图 2-1 C%与成分硬度关系

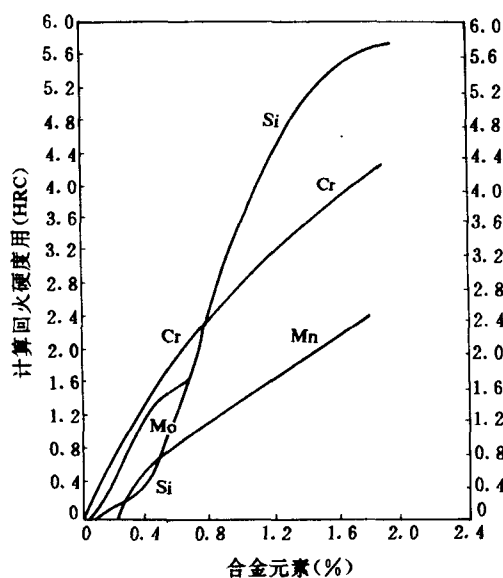


图 2-2 合金元素与成分硬度关系

(2) 已知钢中合金元素与晶粒度, 其基本回火硬度可查图 2-2 和图 2-3。

(3) 成分硬度(即碳含量、合金元素含量与晶粒度的基本回火硬度总和)、回火硬度与回火温度之间有一定关系。

$$T = 30 \times (H_c - H_a) \quad (2-7)$$

式中:  $T$ ——回火温度,  $^{\circ}\text{F}$ ;

$H_c$ ——成分硬度, HRC

$H_a$ ——回火硬度, HRC。

(4) 由于所求回火温度是以回火时间为 4 小时作基准, 如果回火时间不同, 则需要进行适当修正(见图 2-4), 尤其对 C% 与 Mo% 的修正(见图 2-5 和图 2-6)。

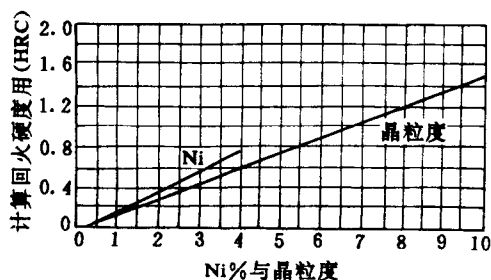


图 2-3 Ni%、晶粒度与成分硬度关系

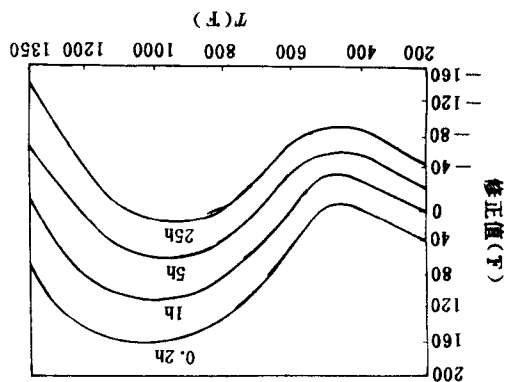


图 2-4 根据回火时间对回火温度修正

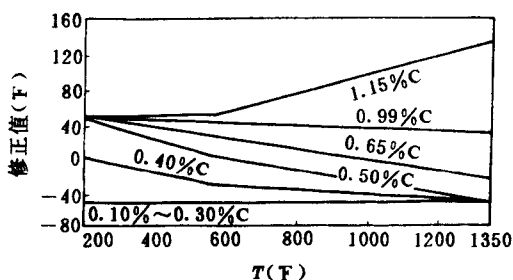


图 2-5 根据 C% 对回火温度修正

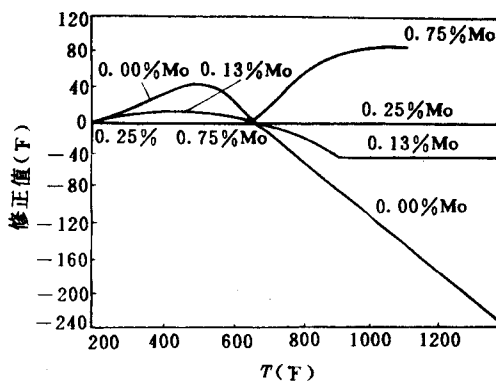


图 2-6 根据 Mo% 对回火温度修正

注: 所示回火温度必需低于相变温度  $A_1$ 。

**实例 3** 已知  $C = 0.32\%$ ,  $Mn = 0.84\%$ ,  $Si = 0.99\%$ ,  $Ni = 1.52\%$ ,  $Cr = 0.74\%$ ,  $Mo = 0.29\%$ , 晶粒度 No. 6 的钢, 回火后得到硬度 HRC37.5, 求回火温度(回火时间定为 3.6h)。

| 解: 成分(%) 与晶粒度 | 基本回火硬度(HRC) | 来自曲线图 |
|---------------|-------------|-------|
| C(0.32)       | 61.6        | 2-1   |
| Mn(0.84)      | 1.3         | 2-2   |
| Si(0.99)      | 3.5         | 2-2   |
| Ni(1.52)      | 0.3         | 2-3   |
| Cr(0.74)      | 2.3         | 2-2   |
| Mo(0.29)      | 0.8         | 2-2   |
| No. 6         | 0.9         | 2-3   |

总和  $70.7 = H_c$  (成分硬度)

故  $T = 30 \times (70.7 - 37.5) = 996 (F)$

再进一步修正

|             |     |         |
|-------------|-----|---------|
| T           | 996 |         |
| 回火 3.6h 的修正 | +75 | (图 2-4) |
| 0.32%C 的修正  | +13 | (图 2-5) |
| 0.25%Mo 的修正 | -49 | (图 2-6) |

总和 1035(F)

即要求回火温度为 1035 F (556℃)。

2. 根据端淬曲线进行计算

**实例 4** 将直径 60mm 的试样(化学成分见表 2-1)进行水淬或油淬后,为获得回火后  $\sigma_0 = 900\text{MPa}$ ,利用端淬曲线求满足上述强度所需要的回火温度。

表 2-1 试样用钢的化学成分(%)

| 钢 种 | C    | Si   | Mn   | Cr   | S     | P     |
|-----|------|------|------|------|-------|-------|
| I   | 0.69 | 0.35 | 0.62 | 0.35 | 0.028 | 0.026 |
| II  | 0.69 | 0.39 | 0.54 | 0.41 | 0.025 | 0.020 |
| III | 0.64 | 0.36 | 0.64 | 0.09 | 0.022 | 0.022 |

**解:**图 2-7 的右上方框内,通过纵坐标直径为 60mm 的一点引一水平线与  $H=2$ (水淬)及  $H=0.4$ (油淬)两条曲线相交,由此交点分别引垂线与端淬曲线相交;再从后者的交点引水平线与  $\sigma_0 = 900\text{MPa}$  的曲线相交,最后由这些交点作垂线与横坐标相交,即求得回火温度,见表 2-2。

表 2-2 不同钢水淬与油淬所需的回火温度

| 钢 种 | 回 火 温 度(℃) |     |
|-----|------------|-----|
|     | 油淬         | 水淬  |
| I   | 690        | 650 |
| II  | 660        | 630 |
| III | 630        | 620 |

## 第二节 速度

### 一、临界冷却速度

$$\log v = K - (A \cdot C\% + B \cdot \text{Mn}\% + C \cdot \text{Ni}\% + D \cdot \text{Cr}\% + E \cdot \text{Mo}\% + RT_A) \quad (2-8)$$

式中:  $v$ ——保证获得一定组织(马氏体、贝氏体、珠光体、铁素体)的临界冷却速度,℃/h;

$A, B, C, D, E$ ——合金元素系数;

$K$ ——常数;

$R$ ——奥氏体化参数;

$T_A$ ——奥氏体化温度,℃(一般取 850℃)。

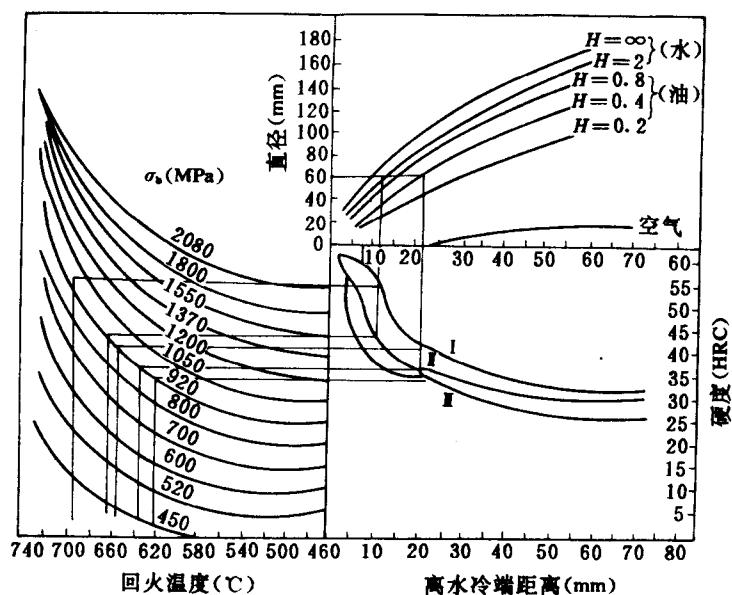


图 2-7 端淬曲线—淬火介质—回火性能关系

将各参数和常数列于表 2-3 中。

表 2-3 临界冷却速度与成分系数及常数的关系

| 不同组织的临界冷却速度   | 常数与成分系数 |      |      |      |      |      |        |
|---------------|---------|------|------|------|------|------|--------|
|               | $K$     | $A$  | $B$  | $C$  | $D$  | $E$  | $R$    |
| $v_M$         | 9.81    | 4.82 | 1.10 | 0.54 | 0.50 | 0.60 | 0.0018 |
| $v_B$         | 10.17   | 3.80 | 1.07 | 0.70 | 0.57 | 1.58 | 0.0032 |
| $v_{50B-M}$   | 8.50    | 4.13 | 0.86 | 0.57 | 0.41 | 0.94 | 0.0012 |
| $v_{50B-P-F}$ | 8.74    | 2.23 | 0.86 | 0.56 | 0.59 | 1.60 | 0.0032 |
| $v_{P-F}$     | 6.36    | 0.43 | 0.49 | 0.78 | 0.26 | 0.38 | 0.0019 |

表中的  $v_M$ 、 $v_B$ 、 $v_{50B-M}$ 、 $v_{50B-P-F}$ 、 $v_{P-F}$  分别表示中心区获得马氏体、贝氏体、50%贝氏体—50%马氏体、50%贝氏体—珠光体—铁素体、珠光体—铁素体的临界冷却速度。

**实例 5** 已知  $C = 0.35\%$ ， $Mn = 0.65\%$ ， $Ni = 1.5\%$ ， $Cr = 1.5\%$ ， $Mo = 0.25\%$  的 34CrNiMo 钢，计算淬火时中心区获得贝氏体的临界冷却速度。

**解：**由 34CrNiMo 钢的化学成分及表 2-3 可知

$$\log v_B = 10.17 - (0.35 \times 3.8 + 0.65 \times 1.07 + 1.5 \times 0.7 + 1.5 \times 0.57 + 0.25 \times 1.58 + 0.0032 \times 850) = 3.12$$

则  $v_B = 1320^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

由图 2-8 可知，该钢在油中淬火 ( $v_B = 1320^\circ\text{C}/\text{h}$ ) 后的心部组织为贝氏体时，其钢棒直径可达 320mm。

由表 2-3 及式 (2-8) 计算部分结构钢的临界冷却速度与临界直径列于表 2-4 中。

表 2-4 结构钢的临界冷却速度与临界直径

| 钢 种        | 马氏体    |       | 50%马氏体<br>—50%贝氏体 |       | 贝氏体    |       | 贝氏体—珠光<br>体—铁素体 |       | 珠光体<br>—铁素体 |       |
|------------|--------|-------|-------------------|-------|--------|-------|-----------------|-------|-------------|-------|
|            | $v_c$  | $D_c$ | $v_c$             | $D_c$ | $v_c$  | $D_c$ | $v_c$           | $D_c$ | $v_c$       | $D_c$ |
|            | (°C/s) | (mm)  | (°C/s)            | (mm)  | (°C/s) | (mm)  | (°C/s)          | (mm)  | (°C/s)      | (mm)  |
| 40         | 124    | 15    |                   |       |        |       |                 |       | 4.9         | 60    |
| 40Cr       | 49.4   | 17    | 25.9              | 20    | 13.6   | 50    | 2.9             | 80    | 2.8         | 80    |
| 40CrMnNi   | 12.4   | 45    | 5.5               | 60    | 2.8    | 80    | 0.9             | 160   | 0.5         | 195   |
| 40Cr2Mo    | 45.1   | 17    | 13.9              | 32    | 2.8    | 80    | 0.3             | 320   | 0.1         | 650   |
| 34CrNiMo   | 4.7    | 60    | 1.7               | 120   | 0.4    | 320   | 0.1             | 600   | 0.02        | 1000  |
| 34CrNi3Mo  | 1.3    | 140   | 0.3               | 325   | 0.05   | 1000  | 0.03            | 1000  |             |       |
| 35CrNiMo2V | 3.1    | 40    | 1.0               | 160   | 0.2    | 500   | 0.05            | 1000  |             |       |
| 38Cr2Ni3Mo | 0.5    | 230   | 0.2               | 500   | 0.02   | 1000  |                 |       |             |       |

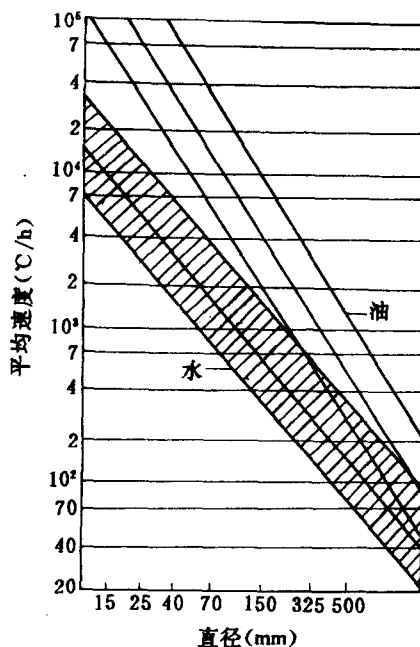


图 2-8 钢件冷却速度与临界直径关系

## 二、球铁盐浴中的冷却速度

$$\log v = 9.41 - 15.6 \log D - 2.54T \quad (2-9)$$

式中： $v$ ——600~500°C之冷却速度，°C/s；

$D$ ——工件直径，mm（一般为5~40mm）；

$T$ ——盐浴温度，°C（一般为290~410°C）。