

# 钢的热处理工艺设计经验公式

## Empirical Formulas for Process Planning for Steel Heat Treatment

中国航空燃气涡轮研究院 黄春峰

**[摘要]** 收集整理了钢的 33 个热处理工艺设计经验公式。实践证明,所列的公式具有计算方便、实用性强、可靠性高、误差率小的优点。

**关键词:** 金属热处理 参数 经验公式 数据库

**[ABSTRACT]** In this paper 33 pieces of empirical formulas for process planning for steel heat treatment are collected. The fact proves that these empirical formulas have advantages of easy calculation, wide applications, high reliability and less error rate.

**Key words:** Metal heat treatment Parameters

**Empirical formulas Data base**

随着科学技术的发展,为满足机械零件越来越高的性能要求,研制和引进的新钢种日益增多。由于诸多原因,大多数生产厂家无法及时获得新钢种的有关资料数据,给材料选择、技术设计和热处理工艺编制带来困难。解决的办法之一是进行必要的工艺试验,为此,要消耗大量的经费和时间。这对于从事单件、小批量生产的中小企业是难以办到的。

经过热处理工作者的多年努力,采用试验和数理统计方法导出了许多实用的经验公式。本文收集整理出的 33 个公式,可在缺乏新材料的有关数据资料的情况下(只需通过理化分析得到新钢种的化学成分)估算出钢的热处理工艺参数,进行热处理工艺设计。这是建立金属热处理柔性系统(FCM)数据库的前期工作。

### 1 钢的热处理相变点及再结晶温度的计算<sup>[1]</sup>

(1) 亚共析钢加热时,所有铁素体转变为奥氏体的温度  $Ac_3$  ( ):

$$Ac_3 = 908 - 223.7C + 438.5P + 30.49Si + 37.92V - 34.4Mn - 23Ni - 200(C - 0.54 + 0.06Ni) \quad \dots(1)$$

$$Ac_3 = 854 - 180C - 14Mn + 44Si - 17.8Ni - 1.7Cr \quad \dots(2)$$

式(1),(2)适用于 0.3% C 0.6%, 0 Si 1.0%, 0 Ni 3.5%, 0 Cr 1.5%, 0 Mo 0.5%。

(2) 钢加热时,开始形成奥氏体的温度  $Ac_1$  ( ):

$$Ac_1 = 723 - 14Mn + 22Si - 14.4Ni + 23.3Cr \quad \dots(3)$$

式(3)适用范围同式(1)。

$$Ac_1 = 723 + 25Si - 7Mn + 15Cr - 15Ni + 30W + 40Mo + 50V \quad \dots(4)$$

式(4)适用于 0 C 0.8%, 0 Mo 0.5%, 0 V 0.5%, 0 W 1.5%, 0 Cr 7.5%。

(3) 钢奥氏体化后冷却时,奥氏体开始转变为马氏体的温度  $M_s$  ( ):

$$M_s = 550 - 350C - 40Mn - 35V - 20Cr - 17Ni - Cu - 10Mo - 5W + 15Co + 30Al + 0Si \quad \dots(5)$$

$$M_s = 561 - 474C - 33Mn - 17Cr - 17Ni - 21Mo \quad \dots(6)$$

式(5),(6)适用于中低碳钢。

$$M_s = 539 - 423C - 30.4Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - 7.5Mo \quad \dots(7)$$

式(7)适用于 0.11% C 0.60%, 0.04% Mn 4.8%, 0.11% Si 1.89%, 0 Ni 5.04%, 0 Cr 4.61%, 0 Mo 5.4%。

注意,上述  $M_s$  点的计算公式主要用于亚共析钢;对于过共析钢,由于淬火加热温度对奥氏体的成分影响较大,故根据钢的成分来计算  $M_s$  点是没有意义的。

$$M_s = 41.7(14.6 - Cr) + 0.6(6.9 - Ni) + 33(1.33 - Mn) + 28(0.47 - Si) + 1677(0.068 - C - Ni) - 17.8 \quad \dots(8)$$

式(8)适用于 SUS 类不锈钢(日本)。

(4) 奥氏体转变为马氏体 ( $M$ ) 的终了温度  $M_f$  ( ):

$M_f$  点根据不同的马氏体转变量的计算公式:

$$M_f = (100 \%M) = M_s - (215 \pm 15) \quad \dots(9)$$

$$M_f = (90 \%M) = M_s - (103 \pm 12) \quad \dots(10)$$

$$M_f = (50 \%M) = M_s - (47 \pm 9) \quad \dots(11)$$

$$M_f = (10 \%M) = M_s - (10 \pm 3) \quad \dots(12)$$

(5) 贝氏体组织开始转变的温度  $B_s$  ( ):

$$B_s = 830 - 270C - 90Mn - 37Ni - 70Cr - 83Mo \quad \dots(13)$$

(6) 钢的再结晶温度  $T_R$  (K):

$$T_R = 0.4 T_m \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中:  $T_m$  ——钢的熔点温度, K。

## 2 钢在空气炉中加热时间(考虑节能)的计算<sup>[2]</sup>

(1) 按工件形状确定加热时间  $t(\text{min})$  :

$$t = k_i w \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中:  $k_i$  ——形状系数,  $k_{\text{圆柱}} = 1/6 \sim 1/9$ ,  $k_{\text{板}} = 1/3 \sim 1/6$ ,  $k_{\text{薄壁管}} = (\delta/D < 1/4) = 1/4 \sim 1/5$ ,  $k_{\text{厚壁管}} (\delta/D > 1/4) = 1/2 \sim 1/4$ ;  $w$  ——形状特征尺寸, 直径、板厚或壁厚, mm。

(2) 按实际装炉量确定加热时间  $t(\text{min})$  :

$$t = (0.6 \sim 0.8) G_w \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中:  $G_w$  ——装炉工件总重量, kg。

式(16)适用于 45kW 箱式电炉加热。

## 3 钢的临界冷却速度的计算<sup>[3]</sup>

(1) 钢在油中淬火时心部得到马氏体的临界冷却速度  $v_M(\text{ }^\circ\text{C/h})$  :

$$\log v_M = 9.81 - 4.62C + 1.10Mn + 0.54Ni + 0.50Cr + 0.60Mo + 0.00183 P_A \quad \dots\dots\dots(17)$$

式中:  $P_A$  ——奥氏体化参数(加热时间  $\times$  加热温度, 此处加热时间为 1h)。

(2) 钢在油中淬火时心部得到贝氏体的临界冷却速度  $v_B(\text{ }^\circ\text{C/h})$  :

$$\log v_B = 10.17 - 3.80C + 1.07Mn + 0.70Ni + 0.57Cr + 1.58Mo + 0.0032 P_A \quad \dots\dots\dots(18)$$

(3) 钢在油中淬火时心部得到珠光体 - 铁素体混合物的临界冷却速度  $v_{PF}(\text{ }^\circ\text{C/h})$  :

$$\log v_{PF} = 6.36 - 0.43C + 0.49Mn + 0.78Ni + 0.26Cr + 0.38Mo + 0.0019 P_A \quad \dots\dots\dots(19)$$

(4) 钢在油中淬火时心部得到 50 % 马氏体 + 50 % 贝氏体的临界冷却速度  $v_{50MB}(\text{ }^\circ\text{C/h})$  :

$$\log v_{50MB} = 8.50 - 4.13C + 0.86Mn + 0.57Ni + 0.41Cr + 0.94Mo + 0.0012 P_A \quad \dots\dots\dots(20)$$

式(17) ~ (20) 适用条件: C 0.50 %, Mn 1.75 %, Ni 3.0 %, Cr 2.25 %, Mo 1.0 %, Mn + Ni + Cr + Mo 5.0 %。

## 4 钢的淬火冷却时间的计算<sup>[4]</sup>

(1) 钢预冷淬火时空气预冷时间  $t_y(\text{s})$  :

$$t_y = 12 + (3 \sim 4) D \quad \dots\dots\dots(21)$$

式中:  $D$  ——淬火工件危险截面厚度, mm。

(2) 钢  $M_s$  点上分级冷却时间  $t_f(\text{s})$  :

$$t_f = 30 + 5D$$

## 5 钢的淬火硬度的计算<sup>[5]</sup>

(1) 钢终端淬火试验时, 距试样顶端 4 ~ 40 mm 范围内各点硬度  $H_{4-40}(\text{HRC})$  :

$$\begin{aligned} H_{4-40} = & 88 \sqrt{C} - 0.0135E^2 \sqrt{C} + 19 \sqrt{Cr} + \\ & 6.3 \sqrt{Ni} + 16 \sqrt{Mn} + 35 \sqrt{Mo} + \\ & 5 \sqrt{Si} - 0.82G - 20 \sqrt{E} + \\ & 2.11E - 2 \quad \dots\dots\dots(22) \end{aligned}$$

式中:  $E$  ——到顶端距离, mm;

$G$  ——奥氏体晶粒度。

(2) 钢的最高淬火硬度, 即淬火钢获得 90 % 马氏体时的硬度  $H_h(\text{HRC})$  :

$$H_h = 30 + 50C \quad \dots\dots\dots(23)$$

(3) 钢的临界淬火硬度, 即淬火钢获得 50 % 马氏体时的硬度  $H_l(\text{HRC})$  :

$$H_l = 24 + 40C \quad \dots\dots\dots(24)$$

(4) 钢淬火组织为马氏体时的硬度  $HV_M$  :

$$\begin{aligned} HV_M = & 127 + 949C + 27Si + 11Mn + 8Ni + \\ & 16Cr + 21 \log v_M \quad \dots\dots\dots(25) \end{aligned}$$

(5) 钢淬火组织为贝氏体时的硬度  $HV_B$  :

$$\begin{aligned} HV_B = & -323 + 185C + 330Si + 153Mn + 65Ni + \\ & 144Cr + 191Mo + \log v_B (89 + 54C - 55Si - \\ & 22Mn - 10Ni - 20Cr - 33Mo) \quad \dots\dots\dots(26) \end{aligned}$$

(6) 钢淬火组织为珠光体 - 铁素体的硬度  $HV_{PF}$  :

$$\begin{aligned} HV_{PF} = & 42 + 223C + 53Si + 30Mn + 13Ni + \\ & 7Cr + 19Mo + \log v_{PF} (10 - 19Si + 4Ni + \\ & 8Cr + 130V) \quad \dots\dots\dots(27) \end{aligned}$$

式(25) ~ (27) 适用条件同式(17) ~ (19)。

## 6 钢回火后硬度的计算<sup>[6,7]</sup>

(1) 钢淬火组织为马氏体时的回火硬度  $HV_M$  :

$$\begin{aligned} HV_M = & -74 - 434C - 368Si + 15Mn + 37Ni + \\ & 17Cr - 335Mo - 2235V + (10^3/P_B) \\ & (260 + 616C + 321Si - 21Mn - 35Ni - \\ & 11Cr + 352Mo - 2345V) \quad \dots\dots\dots(28) \end{aligned}$$

式中:  $P_B$  ——回火参数(回火温度  $\times$  回火时间, 此处加热时间为 1h)。

(2) 钢淬火组织为贝氏体时的回火硬度  $HV_B$  :

$$HV_B = 262 + 162C - 349Si - 64Mn - 6Ni -$$

$$186\text{Cr} - 485\text{Mo} - 857\text{V} + (10^3 / \text{P}_\text{B})$$

$$(-149 + 43\text{C} + 336\text{Si} + 79\text{Mn} + 16\text{Ni} +$$

$$196\text{Cr} + 498\text{Mo} + 1094\text{V}) \dots\dots(29)$$

式(28), (29)适用条件: C 0.83%, Mn 2.0%, Si 1.0%, Cr 2.0%, Mo 1.0%, Ni 3.0%, V 0.5%, Mn + Ni + Cr + Mo 5.0%。

(3) 钢回火后硬度回归方程<sup>[7]</sup>:

$$\text{HRC} = 75.5 - 0.094 T + 0.66 C_M \dots\dots(30)$$

式中:  $T$ ——回火温度, °C;

$C_M$ ——钢的含碳量或碳当量, %;

$$C_M = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15} \text{。}$$

(4) 45 钢回火后硬度回归方程:

$$\text{HV} = 640 - (T - 200)1.05 - (\log t - 1.28)36.6 + (T - 200)(\log t - 1.28)0.0036 \dots\dots(31)$$

$$200 \leq T \leq 400$$

$$\text{HV} = 17.2 \times 10^4 / T - (\log t - 1.28)29.4 - (T - 400)(\log t - 1.28)0.014 \dots\dots(32)$$

$$400 \leq T \leq 600$$

式中:  $t$ ——回火时间, min。

## 7 钢的回火温度的估算(适用于碳素钢)<sup>[7]</sup>

$$T = 200 + k(60 - x) \dots\dots(33)$$

式中:  $x$ ——回火后硬度值, HRC;

$k$ ——待定系数, 对于 45 钢,  $x > 30$ ,  $k = 11$ ;

$x \leq 30$ ,  $k = 12$ 。

## 8 结束语

(1) 在使用经验公式时, 应严格限制其适用条件。特别要求钢的化学成分及力学性能应符合国家技术标准, 最大外径(或有效截面积)接近或小于淬火临界直径; 在热处理淬火温度、回火时间为定值和限定的回火温度范围内(未注明回火温度范围的均为 180 ~ 650 °C 的条件下), 经验公式, 尤其是回火回归方程仅适用于常规淬火、回火工艺。

(2) 因参考资料的来源不同, 经验公式有不同的表达形式。考虑到随机因素的影响, 计算所得的钢热处理工艺参数与实测值一般情况下有小于或等于 ±10% 的误差, 可认为二者吻合, 具有高的实用价值。

(3) 随着理化测试和热处理工艺技术的进步, 以及经验公式的使用和推广, 我们相信, 将来会总结出更精

航空制造技术

确、实用价值更高的经验公式。

## 参 考 文 献

- 1 结构钢坯淬火的临界冷却速度的计算. 金属热处理, 1982(12): 33 ~ 38
- 2 赵振东. 新钢种热处理工艺设计. 新技术新工艺, 1992(2): 6 ~ 10
- 3 黄春峰. 50 种常用钢材的回火方程. 热加工工艺, 1993(5): 48 ~ 50
- 4 太和久重雄. 热处理 108 法. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 5 邹庆化. 钢的成分、回火温度与硬度之间的关系. 金属热处理, 1994(3): 41 ~ 42
- 6 李自才. 实用小资料. 机械工人, 1990(8): 63 ~ 65
- 7 钟士红. 几种钢的回火方程和回火动力学曲线. 金属热处理, 1983(11): 8 ~ 10

(责编 根 山)

## 中国航空学会第六届工艺专业委员会 成立大会在京举行

中国航空学会第六届工艺专业委员会成立大会于 2000 年 4 月 24 ~ 26 日在中国航空工业制造工程研究所召开。参加会议的 50 余名代表分别来自航空、航天部门的厂、所、院校和机关等 32 个单位。会议由工艺专业委员会副主任刘善国、黄麟纂共同主持。中国航空学会吴松副秘书长和中国航空工业一集团公司科技发展部代表在会上作了重要讲话。会上, 第五届工艺专业委员会主任胡建国作了第五届工艺专业委员会工作总结报告。中国航空学会组织部王树青部长宣读了聘任第六届工艺专业委员会委员文件, 宣告第六届中国航空学会工艺专业委员会成立。

会议特邀请有关专家学者作了“航空先进制造技术展望”专题学术报告。报告论述了新世纪航空制造工程领域的发展动向, 报告内容丰富, 形式生动、活泼, 受到了与会代表的普遍欢迎和好评。

在讨论中, 代表们对新形势下如何搞好学会工作, 加强厂、所、院校间的学术交流展开了热烈讨论。认为, 新形势下开展学术活动应强调交流与合作, 要与型号研制、生产实际相结合, 以交流科技发展最新动态为重点, 不断增强活动成效, 提高学术交流质量和水平, 为促进航空制造技术进步服务。

(刘忠祥)