

钢的计算机设计

GDJSJSJ

余柏海 著

2.1

75

冶金工业出版社

钢的计算机设计

（第二版）

冶金工业出版社

钢的计算机设计

余柏海 著

北 京
冶金工业出版社
1996

内 容 提 要

根据化学成分预测钢的组织性能,对于设计和合理选用钢种以及正确制定生产工艺具有重要意义。端淬曲线能在较大范围反映淬火硬度与冷却速度的对应关系,计算预测端淬曲线就成为这一研究领域的主要课题。在试验研究和成果应用中,因数据处理任务更加繁重和计算精度要求不断增高而越来越多地借助于计算机。除一般情况外,本书着重介绍了计算端淬曲线、力学性能和组织分类的非线性公式,以及依据这些公式编制成的设计新钢号和预测组织性能的计算机软件。这些公式和软件,作为一种新工具和研究成果,可供从事金属材料工作的工程技术人员和大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

钢的计算机设计/余柏海著. —北京:冶金工业出版社,
1996

ISBN 7-5024-1985-3

I. 钢… II. 余… III. 计算机辅助设计-钢材 IV. TG14
2.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 18156 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

中国人民警官大学印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1996 年 12 月第 1 版, 1996 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/32; 3.625 印张; 80 千字; 107 页; 1-100[^]册

8.00 元

前 言

根据化学成分预测钢的组织性能，对于设计和合理选用钢种以及正确制定生产工艺具有重要意义。端淬曲线能在较大范围连续反映淬火硬度与冷却速度的对应关系，计算预测端淬曲线就成为这一研究领域的主要课题。本书主要介绍著者长期研究创建的计算端淬曲线、力学性能和组织分类的非线性公式，以及依据这些公式编制成的设计化学成分、预测组织性能和控制淬透性的成分微调的计算机软件。著者从艰难的研究中体会到，数学模型的研究特别重要，故在介绍计算公式时，着重探讨建立通用数学模型的方法及各种参数的物理意义，期望能对这一研究领域起到推波助澜的作用。这些公式和软件适用的广泛性、计算的精确性和体系的完善性，使之中能普遍应用于科研和生产，作为一种新工具和研究成果，可供从事金属材料工作的工程技术人员和大专院校有关专业的师生参考。

在著者的研究工作中，特别是近十多年以来，曾得到杨其莘和杨培义两位学者的大力支持和帮助，他们在结晶偏析和测试误差对淬透性带宽影响的研究、新钢种和新工艺的研究、成分微调工艺的制订和实施，以及大量数据的搜集整理和统计分析等诸多方面，为著者提供了宝贵的资料；同时，还在物质上和精神上给予了有力的支持和勉励，特在此深致谢意。

KAD 78 / 06

目 录

1 概论	1
1.1 引言	1
1.2 端淬曲线计算方法简介	2
1.2.1 理想临界直径换算法	2
1.2.2 回归方程算法	4
1.2.3 非线性方程算法	5
1.3 计算机软件简介	7
1.3.1 计算机调谐的适宜剪裁系统	7
1.3.2 应用回归方程控制熔炼成分的计算机软件	8
1.3.3 设计化学成分及预测组织性能的通用软件	9
2 计算公式	10
2.1 概述	10
2.2 端淬曲线计算公式	12
2.2.1 马氏体及半马氏体硬度	12
2.2.2 合金化当量	14
2.2.3 半马距	21
2.2.4 曲率系数	24
2.2.5 端淬曲线	26
2.2.6 淬透性带	30
2.3 其它计算公式	36
2.3.1 整体淬火硬度	37
2.3.2 整体淬火强度	39
2.3.3 冲击韧性	42

2.3.4	成分上下限	43
2.3.5	组织分类	44
2.3.6	成分微调	45
3	计算机软件	48
3.1	源程序简介	48
3.2	操作说明	51
3.2.1	运行条件	51
3.2.2	启动操作	52
3.2.3	主菜单的操作	52
3.2.4	设计菜单的操作	53
3.2.5	预报菜单及查询菜单的操作	55
4	公式及软件的应用	60
4.1	概述	60
4.2	设计渗碳齿轮钢	62
4.2.1	设计中等淬透性齿轮钢	63
4.2.2	设计较高淬透性齿轮钢	68
4.2.3	设计高淬透性齿轮钢	69
4.3	设计调质钢	73
4.3.1	设计较低淬透性调质钢	74
4.3.2	设计中等淬透性调质钢	75
4.3.3	设计较高淬透性调质钢	76
4.3.4	设计高淬透性调质钢	78
4.4	设计高强度钢	81
4.4.1	设计强度大于 1400MPa 的钢	82
4.4.2	设计强度大于 1700MPa 的钢	82
4.4.3	设计强度大于 1800MPa 的钢	89
4.4.4	设计强度大于 2000MPa 的钢	89

4.5 设计微合金化非调质钢.....	94
4.5.1 设计强度大于 800MPa 的钢	95
4.5.2 设计强度大于 900MPa 的钢	95
4.5.3 设计强度大于 1000MPa 的钢	96
4.5.4 设计强度大于 1100MPa 的钢	96
参考文献.....	103
附录 计算公式.....	104

1 概 论

1.1 引言

钢制结构零件的主要设计指标之一是硬度和强度，同时还要求有足够的韧性，因此，设计新钢号或选用老钢号时，突出考虑的是强韧性。钢的强韧性主要取决于组织状态，就合金化不超过中等程度的钢而言，赖以获得一定组织状态的基础，是高温奥氏体冷却下来的转变产物。这种转变产物的特性主要取决于过冷奥氏体发生转变的温度区间，也就是与奥氏体的过冷能力或者说与奥氏体的稳定性密切相关。奥氏体过冷能力越大，转变温度越低，转变产物中的固溶体过饱和程度越大，碳化物弥散程度越大，其硬度和强度就越高。在实用上衡量奥氏体过冷能力的一个重要尺度就是表现淬火深透硬化能力的淬透性。钢的淬透性与合金化程度、加热和保温后的奥氏体化程度、晶粒大小以及冶金质量等因素有关，而影响淬透性的最重要因素是化学成分。

根据化学成分预测钢的性能，尤其是预测强韧性，一直是钢铁研究方面的重要目标之一。由于强韧性主要取决于淬透性，故这种预测的关键是预测化学成分对淬透性的影响。乔米尼 (W. E. Jominy) 最先于 1938 年提出的端淬试验法，早已成为应用最广泛和最满意的测定淬透性的方法；由端淬试验得出的端淬曲线，能在较大范围连续反映淬火硬度与冷却速度的对应关系，是对淬透性的最佳表达。因此，根据化学成分来计算预测端淬曲线，就成为这一研究领域的主要课题。

对于淬透性与化学成分的关系,早在 40 年代初,人们即已开始探寻从定性或半定量描述发展到定量计算的途径。历经半个世纪的摸索,已提出不少计算公式,应用范围在逐步扩大,合理性和精确性在不断提高,并且更多地应用电子计算机这一有力工具而加快了这一研究领域的进展。就比较适用的端淬曲线计算方法来说,大致上可分为理想临界直径换算法、线性回归方程计算法和非线性方程计算法三类;与这几种计算方法相对应,根据计算公式编制成设计化学成分及预测组织性能的计算机软件,也可以分为三类,此处都先作简略介绍。本书将要着重介绍的主要是这一研究领域的最新进展,即计算预测端淬曲线和强韧性的非线性数学模型以及计算机软件。

定量描述钢的成分、组织和性能的关系,是一个困难重重的研究领域,因为这种描述一直还主要是经验性的,并且各种计算式彼此孤立,既没有形成反映内在联系的通用计算体系,也很少表现出合乎逻辑的物理意义。著者从多年的研究中认识到,要想在这一领域取得突破性进展,就必须重视通用数学模型的研究。本书的宗旨就是试图通过强调内在联系和物理意义来探讨数学模型,期望能够对这一研究领域起到推波助澜的作用。

1.2 端淬曲线计算方法简介

1.2.1 理想临界直径换算法

40 年代初格罗斯曼^[1]最先提出描述淬透性的理想临界直径计算公式,计算方法是,先根据图表提供的碳和晶粒度因子,确定理想临界直径基数 D_{IC} ,再由图表查得有关合金元素的硬化因子的乘数(效果系数) a ,第 i 个元素的硬化因子

F_i 等于该元素的效果系数 a_i 乘以含量 M_i 再加 1；理想临界直径 D_I 等于基数 D_{IC} 乘以诸元素硬化因子的连乘积：

$$F_i = 1 + a_i M_i \quad (1-1)$$

$$D_I = D_{IC} \prod F_i \quad (1-2)$$

$$\text{即 } D_I = D_{IC} \prod (1 + a_i M_i) \quad (1-3)$$

以这个理想临界直径为基础，波埃德与菲耳德^[2]提出，通过水冷端硬度与端淬硬度比值表（后经斯庞吉利、凯司和华尔特^[3]引伸修正）来计算端淬曲线。具体步骤是：

(1) 根据由成分及晶粒度确定的硬化因子计算出理想临界直径 D_I 。

(2) 从硬度与含碳量的关系表中查出水冷端的马氏体硬度（起始硬度）IH。

(3) 从 IH 与端淬硬度（距离硬度）DH 的比值表中，按 D_I 查出不同端距的 IH/DH 比值。

(4) 由 IH 和查得的各个比值计算出对应于不同端淬距离的 DH 值。

(5) 按 IH 和不同的 DH 值描绘出端淬曲线。

这种方法的优点是：

(1) 用一个统一的参数（理想临界直径）来描述化学成分对淬透性的影响。

(2) 基本表达了化学成分与淬透性的非线性关系。

(3) 肯定了端淬曲线自淬水端最大硬度开始的单调递减特点。

(4) 用比值分配表大致上描绘出端淬曲线的基本形状和变化规律。

计算中所依赖的各种图表数据都有一定的局限性，适用范围较窄，查对中所造成的偏差也较大，而且都是间断的数

据点，因此，描绘的曲线只有模糊的意向性而缺乏合乎逻辑的精确性，这就在很大程度上限制了它的实际使用价值。几十年来，许多学者在此领域作了大量研究工作。然而，由于只致力于修改补充供查对换算的图形和表格数据，而一直未能依靠理想临界直径这个关键参数去建立统一计算端淬曲线的数学模型，并且很少利用计算机这一有力工具，因而进展很缓慢，其局限性很难克服。

1.2.2 回归方程算法

60年代末发展起来的以嘉斯特^[4]为代表的采用回归方程计算端淬曲线的方法，在此领域开拓了一条新途径。这种方法主要是利用计算机进行多元回归分析导出线性方程，直接根据化学成分计算端淬曲线上选定位置的硬度。

这种方法的突出优点是，导出方程非常快捷，使用起来直观和简便易行。这种简捷方法推广起来非常快，发表的公式特别多，但基本上都只能适用于很窄的成分范围和曲线上的特定位置。曾采取先构造一条上弯抛物线再使合金元素和晶粒度起上下推移作用的方法，试图建立适合于端淬曲线各个位置的通用方程，这种通用方程的典型形式如下例所示：

$$J_0 = 60 \sqrt{C} + 20 \quad (1-4)$$

$$\begin{aligned} J_{4-40} = & (88 - 0.0135E^2) \sqrt{C} + 2.11E \\ & - 20 \sqrt{E} - 2 + 19Cr + 6.3Ni \\ & + 16Mn + 35Mo + 5Si - 0.82K_{ASTM} \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中的 E 表示端淬距离，单位是 1/16in (1.5875mm)； K 表示按 ASTM 标准评定的晶粒级别 (适用于 1.5~11 级)。给出的适用成分范围 (%) 如下：

C 0.08~0.56, Mn 0.20~1.88, Ni 0~8.94, Cr 0~

1.97, Mo 0~0.53, Si 0~3.8。

分析这种计算端淬曲线的数学模型可以看出它的构造是：假定端淬距离小于4时，硬度只取决于含碳量，其值等于端淬马氏体硬度 J_0 ，是一段由式1-4决定的水平线；端淬距离4-40区间的曲线形状由式1-5中含 E 项组成的非线性式确定，这个非线性式只受含碳量影响，所构造的曲线是一段有一个最低点而两侧向上弯曲的抛物线，其基本形状不变，合金元素和晶粒度起线性的上下推移作用。

正如文献[5]所指出的，显然，水平线末端与抛物线始端并不总是能够恰好相衔接，并且最低点有时处在端淬距离小于40的位置，整个曲线既不平滑，也不反映单调递减的实际特征。这样的数学模型不但未能反映端淬曲线的基本形态和变化规律，而且端淬距离大于抛物线最低点后，即使在指定适用的成分范围及端淬距离范围以内，也可能会计算出硬度随冷却速度降低反而增高的荒唐结果。看来，采用线性方程去描绘非线性的端淬曲线是很难相适应的。美国汽车工程师协会第八组提出过扩大应用范围的研究计划，但一直未见有重大进展的报导。从建立通用方程的角度考虑，这种方法不如前一种方法更有前途。

1.2.3 非线性方程计算法

在第一种方法的启发下，80年代初著者在文献[5]中提出采用非线性方程计算端淬曲线。经过不断改进而更臻完善的通用公式，还以统一的参数把端淬距离、淬火直径、硬度、强度、韧性和组织分类等各种计算联成完整的体系，具体公式见附录所列的公式集锦，并且将在下一章予以详细介绍。这种方法的主要特点是：

(1)根据数理逻辑分析建立远程适用的非线性数学模型。

(2) 以端淬曲线半马氏体点至水冷端的距离作为描述端淬曲线的关键参数。

(3) 计算端淬曲线的通用公式充分反映了端淬曲线的基本形态和变化规律。

(4) 所有参数都用非线性公式表达，以保证数据的连续性和精确性。

(5) 采用计算机通用软件计算各种数据和绘制各种函数图形。

(6) 普遍适用于钢的设计、选择、预测组织性能以及控制性能的成分微调。

这种方法充分注意吸收前人的成功经验，抓住统一参数这个关键，建立起直观实用的端淬曲线半马氏体点至水冷端的距离（可简称为半马距）的计算式；同时，再往前跨进一步，建立了非线性的端淬曲线通用计算式，展现出这一研究领域的新前景。

在研究通用公式的过程中，显得特别重要的是如何建立数学模型。采用回归分析多项式往往缺乏明确的物理意义，很难讨论其技术上的合理性，有时甚至被引入歧途。因此，有必要充分运用专业知识和经验，通过数理统计分析和逻辑推理去建立合理的数学模型，以便得到既在应用上合乎实际、又在理论上合乎逻辑的公式。

这种研究除了依靠严密的逻辑思维之外，还在提高工作效率方面十分得益于电子计算机。事实上，在这种研究中逐渐形成和完善的工具性数理分析软件起着非常重要的作用。这个软件具有方差分析、线性回归分析、非线性回归分析、解联立方程组、函数特性分析等多种功能，是从事这类研究工作的得力助手。研究数学模型的工作虽然很艰苦，但结果常

常是令人鼓舞的。从这种繁杂的工作中可以概括出如下几个要点：

(1) 尽可能广泛地搜集生产、科研、标准等各方面的有关数据和情况，细致认真地审查其可靠性和局限性。

(2) 结合专业理论和经验进行统计、分析和比较，解释和判断各种变量之间的确切关系、主次地位和变化规律。

(3) 找出起主导作用的变数和函数，在实际可能出现的足够大的范围内，描绘出合乎逻辑的函数关系曲线。

(4) 通过数学分析，选择或构造最近似的函数模式，经过细致地调整和改进，建立能圆满反映函数关系曲线特征及变化规律的数学模型。

(5) 以分布在曲线各关键位置上且比较值得信赖的某些数据为基准，借助于计算机，采用逐步逼近法确定系数。

(6) 任何参数都采用通用公式进行计算，以保证函数的连续性和精确性。

1.3 计算机软件简介

1.3.1 计算机调谐的适宜剪裁系统

布林、华尔特、斯庞吉利和凯司^[6~10]曾在 70 年代初发表一系列文章，阐述一种满足淬透性要求并使成本最低的成分设计优化系统，称为 CHAT 系统，CHAT 是计算机调谐的适宜剪裁法 (Computer Harmonized Application Tailoring) 的缩写。这个系统当时主要用于设计代用钢，以节约短缺的合金材料。

这种系统采用所加合金元素的成本函数与满足淬透性要求的理想临界直径函数联立调谐求解的方法设计成分。以渗碳齿轮钢为例，如果用 MB 代表加入合金元素的总成本， K

为每百分之一的合金元素成本, DI_1 和 DI_2 分别为心部和渗层的理想临界直径, f 和 g 分别为心部和渗层的硬化因子函数, X 代表合金元素的百分含量, 则方程形式为:

$$MB = K_1 \cdot X_1 + K_2 \cdot X_2 + K_3 \cdot X_3 + \dots$$

(目标函数) (1-6)

$$DI_1 = f_1(X_1) \cdot f_2(X_2) \cdot f_3(X_3) \dots$$

(约束函数) (1-7)

$$DI_2 = g_1(X_1) \cdot g_2(X_2) \cdot g_3(X_3) \dots$$

(约束函数) (1-8)

为了便于求解, 将式 1-6 和式 1-7 取对数化为线性式:

$$\lg(DI_1) = \lg f_1(X_1) + \lg f_2(X_2) + \lg f_3(X_3) \dots$$

(1-9)

$$\lg(DI_2) = \lg g_1(X_1) + \lg g_2(X_2) + \lg g_3(X_3) \dots$$

(1-10)

这样即可利用计算机调谐求出使目标函数为极小值的联立解。

由于这种系统立足于上一节所介绍的第一类计算方法, 这类计算方法的局限性, 也就是这种系统的局限性。此外, 众所周知, 最廉价的元素无疑是锰, 单从淬透性效率考虑, 计算机调谐的结果, 必然是将锰调整到所允许的极限含量, 这种复杂的联立求解就显示不出其重要性了。正因为如此, 这种系统未能得到广泛应用。

1.3.2 应用回归方程控制熔炼成分的计算机软件

这是依据第二类计算方法所编制的软件。由于导出回归方程和编制计算机软件都很简捷, 所以应用很广泛。然而, 就绝大多数而论, 一个方程只适用于一个钢号的端淬曲线上的一个特定点, 这就意味着每一个钢号的每一个控制点都得有

一个专用软件。并且，有时甚至不同厂家的同一控制点的软件，还可能因生产条件及导出公式采用数据的差异而相互不能通用。要想稍稍扩大一点适用范围，就得附加许多约束条件，使系统变得十分复杂。虽然对于获得一个专用软件而言，这是一条简捷而有效的途径；但就研究通用系统而言，即使走得通，也还将有很艰苦和很漫长的路程要走。

1.3.3 设计化学成分及预测组织性能的通用软件

根据第三类方法建立的有关成分、组织和性能的一套计算公式，因其适用的广泛性、函数的连续性、计算的精确性和系统的完善性，而特别适合于编制计算机软件。已编制成的钢的计算机设计程序及控制淬透性的成分微调程序，具有功能齐全、结构紧凑、层次清晰、画面美观、操作简便等特点。本书所有的图形和表格都是利用这些软件提供的。这套公式和据以编制的计算机软件，在应用上至少有以下几个方面：

- (1) 根据淬透性或力学性能要求设计新钢号。
- (2) 根据用途和性能要求选用合适的钢号。
- (3) 按照给定的化学成分预报组织性能。
- (4) 建立符合资源情况和经济实惠的钢种系列。
- (5) 进行控制淬透性或力学性能的冶炼成分微调。
- (6) 参照预报的组织特性制订合适的生产工艺。
- (7) 根据淬透性或力学性能进行分级管理、销售和选用。
- (8) 审查或制订技术标准中的化学成分和性能指标。