

# 热轧钢材组织-性能 演变的模拟和预测

刘振宇 许云波 王国栋 著

**Simulation and Prediction of the Evolution  
of Microstructure and Properties  
of Hot Rolled Steels**



**NEUPRESS**  
东北大学出版社



国家“十五”出版规划重点选题

# 热轧钢材组织-性能 演变的模拟和预测

Simulation and Prediction of the Evolution  
of Microstructure and Properties  
of Hot Rolled Steels

ISBN 7-81102-090-4



9 787811 020908 >

ISBN 7-81102-090-4 定价: 30.00元

国家“十五”出版规划重点选题

国家自然科学基金资助研究项目

# 热轧钢材组织-性能 演变的模拟和预测

刘振宇 许云波 王国栋 著

Simulation and Prediction of the Evolution  
of Microstructure and Properties  
of Hot-Rolled Steels

东北大学出版社

• 沈 阳 •



© 刘振宇 许云波 王国栋 2004.

图书在版编目 (CIP) 数据

热轧钢材组织-性能演变的模拟和预测 = Simulation and Prediction of the Evolution of Microstructure and Properties of Hot Rolled Steels / 刘振宇, 许云波, 王国栋著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2004.12

ISBN 7-81102-090-4

I. 热… II. ①刘… ②许… ③王… III. 热轧—金属—性能  
IV. TG335.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 127728 号

---

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印刷者: 沈阳市政二公司印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 230mm

印 张: 18.25

字 数: 347 千字

印 数: 1~2000 册

出版时间: 2004 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2004 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 郭爱民 孟 颖

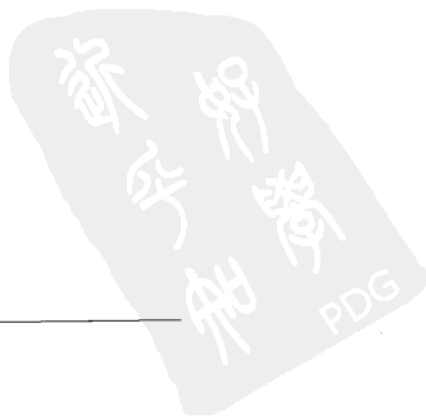
责任校对: 米 戎

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

---

定 价: 30.00 元



# 序

热轧钢材的组织-性能预测与控制技术(SPPC)是 20 世纪 90 年代国际轧钢界出现的一项新技术,它的基本概念是将物理冶金学原理、轧钢工艺学及信息与控制技术结合在一起,对钢材热轧过程的组织和性能演变进行预测与控制,从而生产出满足用户要求的产品。这一技术的发展,意味着对热轧产品性能质量的控制将从实验摸索跨越到计算机定量模拟和控制。

这一技术的发展过程可分为实验室基本数据积累、计算机程序开发及计算机程序在热轧生产过程的应用。该研究工作得到了国家自然科学基金、国家“863”计划以及国家“十五”科技攻关计划等资助,已经和正在取得一系列有影响力的科研成果。

由刘振宇等同志撰写的这部关于热轧钢材组织-性能预测的专著,是轧制技术及连轧自动化国

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论                     | 1  |
| 1.1 钢材组织性能控制开发研究的背景           | 1  |
| 1.2 组织性能模拟与预测的沿革              | 2  |
| 1.3 组织性能模拟与预测的发展展望            | 5  |
| 1.4 热轧钢材组织-性能演变的模拟和预测研究的思路与结构 | 6  |
| 1.5 本章主要参考文献                  | 7  |
| 第 2 章 热轧钢材组织-性能预测与控制技术概述      | 8  |
| 2.1 组织-性能预测与控制技术 (SPPC) 的内涵   | 8  |
| 2.2 组织-性能演变的基础理论模型            | 11 |
| 2.3 热轧生产的组织-性能预测模型发展现状        | 17 |
| 2.4 组织-性能预测与控制技术在热轧生产中的应用     | 23 |
| 2.5 本章主要参考文献                  | 25 |
| 第 3 章 相变热力学与动力学基本理论           | 27 |
| 3.1 固态相变热力学概述                 | 27 |
| 3.2 固态相变动力学概述                 | 36 |
| 3.3 本章主要参考文献                  | 50 |
| 第 4 章 钢材热轧生产过程中温度变化的数值计算      | 52 |
| 4.1 轧制过程中的热传导                 | 52 |
| 4.2 轧制过程散热系数的确定               | 54 |
| 4.3 轧制过程温度计算的有限差分法            | 57 |

|              |                                            |            |
|--------------|--------------------------------------------|------------|
| 4.4          | 刚塑性有限元基本理论·····                            | 60         |
| 4.5          | 钢材热轧过程中温度变化的典型计算结果·····                    | 69         |
| 4.6          | 本章小结·····                                  | 85         |
| 4.7          | 本章主要参考文献·····                              | 85         |
| <b>第 5 章</b> | <b>组织演变预测模型的典型实验方法</b> ·····               | <b>87</b>  |
| 5.1          | 单道次压缩实验·····                               | 88         |
| 5.2          | 双道次压缩实验·····                               | 93         |
| 5.3          | 应力松弛实验·····                                | 97         |
| 5.4          | 热膨胀实验·····                                 | 103        |
| 5.5          | 连续冷却压缩试验·····                              | 104        |
| 5.6          | 本章主要参考文献·····                              | 109        |
| <b>第 6 章</b> | <b>显微组织演变模型的应用</b> ·····                   | <b>111</b> |
| 6.1          | 奥氏体再结晶模型在制定控轧控冷规程中的应用·····                 | 111        |
| 6.2          | 奥氏体相变模型在控制冷却中的应用·····                      | 122        |
| 6.3          | 本章小结·····                                  | 140        |
| 6.4          | 本章主要参考文献·····                              | 140        |
| <b>第 7 章</b> | <b>热轧 C-Mn 钢组织-性能演变综合模型及其在生产中的应用</b> ····· | <b>142</b> |
| 7.1          | 再结晶行为的预测模型·····                            | 142        |
| 7.2          | 相变行为的预测模型·····                             | 148        |
| 7.3          | 热轧 C-Mn 钢组织-性能间对应关系模型的建立·····              | 162        |
| 7.4          | 热轧 C-Mn 钢综合组织-性能预测模型在板带生产中的应用·····         | 162        |
| 7.5          | 本章小结·····                                  | 174        |
| 7.6          | 本章主要参考文献·····                              | 176        |
| <b>第 8 章</b> | <b>HSLA 钢热轧组织-性能演变综合模型及其在生产中的应用</b> ·····  | <b>179</b> |
| 8.1          | 热变形奥氏体的再结晶行为·····                          | 180        |
| 8.2          | 奥氏体显微组织的演变过程·····                          | 183        |
| 8.3          | 微合金碳氮化物的应变诱导析出·····                        | 187        |
| 8.4          | 加工硬化奥氏体的连续冷却相变·····                        | 196        |
| 8.5          | 显微组织与力学性能的对对应关系·····                       | 210        |

---

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 8.6 预测模型在预测组织-性能演变规律中的应用 .....       | 214        |
| 8.7 本章小结 .....                       | 224        |
| 8.8 本章主要参考文献 .....                   | 225        |
| <b>第9章 智能化热轧钢材组织-性能预测系统的开发 .....</b> | <b>229</b> |
| 9.1 人工神经网络在组织-性能预测中的应用 .....         | 229        |
| 9.2 热轧钢材组织-性能演变软件的开发设计 .....         | 241        |
| 9.3 本章小结 .....                       | 255        |
| 9.4 本章主要参考文献 .....                   | 255        |
| <b>第10章 热轧钢材组织-性能的在线预测与控制 .....</b>  | <b>257</b> |
| 10.1 在线组织-性能预测技术在国内外的应用 .....        | 258        |
| 10.2 中厚板组织-性能在线预测与控制 .....           | 261        |
| 10.3 本章小结 .....                      | 277        |
| 10.4 本章主要参考文献 .....                  | 278        |





# 第1章

## 绪论

### 1.1 钢材组织性能控制开发研究的背景

近年来,对轧制过程中钢材组织性能演变的模拟、预测与控制成为国际材料研究的热点,其主要驱动力如下:

首先,用户对钢材内部质量的要求越来越高,除了要求钢材有严格的化学成分之外,还要求钢材有均匀的内部组织、细小的晶粒度,能够满足具体服务条件的使用性能和理想的寿命。特别是随着科技的发展,汽车、建筑业等用钢大户近年来普遍提出减轻结构质量的要求,促使钢铁生产企业开发高性能的新钢种。这就要求在钢材生产的全过程,特别是热轧过程,对工件的微观组织和结构进行有效的控制,以得到满足用户要求的高性能钢材。

其次,作为传统材料,钢铁面临着其他结构材料的竞争,铝、钛及其合金和塑料逐渐蚕食原本属于钢铁的领地。例如,钢窗换成了塑料窗或铝合金窗,自来水管由钢管换成了塑料管或复合管,钢板换成了塑料板或复合板。如果钢铁不想退出竞争,就必须保持成本和价格优势,不断地通过改善钢材内部组织结构,来提高性能,迎接挑战。

再次,除了外部的竞争,钢铁行业的内部竞争也迫使人们千方百计地通过控制钢材的组织性能来降低成本,改进质量,增强其市场竞争能力。加入WTO后,我国的钢铁企业更是面临国外大型钢铁公司的市场竞争,降低产品价格并提高产品质量已经迫在眉睫。

并且, 添加合金元素也是提高钢材性能的一条途径, 但这种办法存在两个问题: 一是合金元素比铁贵得多, 添加合金元素意味着增加钢材的成本; 二是很多合金元素在地球中的储量有限, 过量使用合金元素会带来严重的可持续发展问题和环境问题。

另外, 人们对提高钢铁性能的努力一直没有停止过, 近期国际上对新一代钢铁材料(简称超级钢, 即 Super Steel)的开发更是把这种努力提升到新的层次。通过钢的洁净化、高均质和超细晶, 大幅度提高钢材的强度(如将普碳钢的屈服强度提高 1 倍, 由 200MPa 级提高到 400MPa 级), 包括冶炼和轧制在内的整个冶金工业的技术进步为实现这个梦想提供了条件, 实现这个宏伟目标在很大程度上依赖于钢材组织性能控制的研究和技术发展。

## 1.2 组织性能模拟与预测的沿革<sup>[1~3]</sup>

### 1.2.1 金属组织与性能的早期研究

人类认识和使用金属, 是从利用它的性能开始的。自从有了显微镜以后, 人们用它来观察金属内部的组织, 并逐渐认识到钢铁并不是“铁板一块”, 它的内部有晶粒和晶界, 晶粒内部又有各种各样的亚结构。随着温度的变化和变形的参与, 晶粒的尺寸、方位和形状都要发生变化。在深入了解这些变化的机理之前, 人们已经很容易地观察到金属组织方面的变化与性能改变的密切联系。

化学、晶体学、物理冶金学和金相学的发展, 促使人们对金属晶体内部有了更为深刻的认识。晶格、晶胞和同素异晶体等概念, 以及对金属中点缺陷、线缺陷和面缺陷的研究, 帮助人们找到了金属性能表现的内在原因。

对钢铁材料来说, 铁碳平衡图的出现是组织演变研究的一个里程碑。有了铁碳平衡图, 人们可以很容易地知道不同含碳量的钢种在不同温度下其组织的大体特征。这期间, 对各种组织所对应的性能也有了更深刻的认识, 铁碳平衡图的作用至今仍非常重要。

### 1.2.2 近代成形过程中组织性能的控制

20 世纪 40 年代, 金属成形过程中组织与性能的控制方法得到了快速的发展。第二次世界大战期间, 大量采用焊接结构的运输船只发生的焊接断口脆性断裂事故, 使人们认识到提高钢材韧性的的重要性。由于当时的钢铁厂不具备热处理设备, 为了生产强度级别在 400MPa 的高韧性船板, 采用了“低温大压下”

的方法,即在900℃以下经过总变形量为20%~30%的3~6道次的轧制,来细化晶粒,改善钢材的韧性,以代替正火处理,从而形成了控制轧制的原始概念。

20世纪50年代到60年代,欧美及前苏联等国家在进行含铌钢生产中发现,采用普通热轧工艺时,钢的韧性下降,从而促使对钢中的合金元素、轧制工艺参数和钢的显微组织与力学性能之间的关系进行研究。20世纪60年代后期,日本大力开展了控制轧制理论和实践的研究工作,这些研究成果为控轧工艺的发展提供了理论基础,并且导致采用控轧工艺大批量生产用于铺设石油天然气管道的高韧性管线钢。

20世纪60年代,轧后层流冷却系统在热轧带钢生产中得到应用,加速冷却对钢的晶粒细化和组织强化的作用逐渐为人们所认识,以至于有了“水是最廉价的合金元素”的通俗说法,以轧后的水冷替代某些合金元素的作用,达到提高钢材强韧性的目的。轧后的加速冷却越来越引起人们的重视,轧后加速冷却除沿袭了控制轧制的特点以外,还具有其独特的优越性——它克服了控制轧制易形成混晶组织和各向异性的弊端。因此,从20世纪80年代第一套在线加速冷却装置在日本钢管福山厚板厂投入工业化运行后,迅速得到了推广应用。目前,所有的日本厚板轧机都已经安装了加速冷却设备,欧美各地也采用了轧后加速冷却技术。轧后冷却技术日臻成熟,有水幕、管层流、汽雾和喷淋等多种冷却装置可供选择,轧后冷却已经成为热轧带钢机组必备的工艺环节。轧后冷却的广泛采用,为钢材组织性能的控制提供了有效的手段,使先期的一些组织性能控制思想能够在生产中得以实施。

在1975年的“微合金钢国际会议”、1981年的“微合金钢形变热处理国际会议”、1988年的“钢和其他金属的形变热处理国际会议”、1995年的“高强度低合金钢国际会议”和1997年的“钢和其他材料的形变热处理工艺国际会议”等一系列国际性学术活动中,提交了大量有关控制轧制和控制冷却的学术论文,它们基本上概括了近代在钢材成形过程中对其组织与性能进行控制的发展过程。

### 1.2.3 现代组织性能模拟与预测的进展

近年来,随着用户对钢材质量要求的不断提高,相关行业特别是以计算机为标志的信息技术的发展,以及钢铁行业本身的技术进步,使成形过程中钢材组织性能控制的研究出现了新的趋势<sup>[4,5]</sup>。

首先,在人们多年探索的基础上,成形过程中钢材组织性能变化的物理冶金理论逐渐完善,已经形成了关于静态再结晶、动态再结晶、相变和沉淀析出

等各种物理冶金现象的热力学理论和动力学理论。结合部分实验数据,很多学者建立了相应的数学模型,为成形过程中钢材组织演变的模拟和性能的预测提供了理论基础。

其次,热模拟实验机的普遍应用推进了人们对钢材组织性能的研究工作。利用热模拟实验,人们可以精确地控制成形过程中的变形温度、变形速率和变形程度,记录应力-应变关系,观察再结晶、相变和析出等现象,为各个钢种作出动态连续冷却相变曲线(CCT曲线)和等温相变曲线(TTT曲线)。热模拟实验积累的数据一方面可以为制定现场生产工艺制度提供指导,另一方面可以帮助人们加深对成形过程中组织性能演变规律的认识,为建立数学模型提供参数和验证。

再次,近年来对成形过程的数值模拟已经扩大到考虑组织性能的变化<sup>[6]</sup>。有限元等数值模拟方法使人们很容易获得温度场、速度场和应力-应变场,即利用有限元方法帮助人们掌握钢材在成形过程中组织性能演变的外部条件,在时间域得到从成形开始到结束的任意时刻,在空间域得到在变形物体内任意位置处的变形温度、变形速率和变形程度。这些参数是变形过程数值模拟的结果,又是组织演变的前提。将它们与再结晶、相变等内因结合起来,将在组织性能的预测中发挥重大作用。

另外,近年来飞速发展的信息处理技术从一个新的角度推进了组织性能预测的进展<sup>[7]</sup>。人们利用在现场生产线上测取的大量数据,来训练人工神经网络,使之“记住”在什么样的钢种成分和什么样的工艺条件下能够得到什么样的组织和性能。这样,训练好的网络,相当于记住了这种对应关系,就可以利用过去的经验预测将要发生的现象。把钢种成分和轧制条件告诉训练好的神经网络,就能得到晶粒尺寸、相组成的质量分数等组织参数以及屈服强度、抗拉强度和延伸率等性能参数。

值得注意的是,近年来组织性能的预测已经在生产中得到应用。据报道,奥钢联工程技术公司与林茨厂合作开发的热轧带钢性能预测和控制系统(VAIQ Strip)已于1997年下半年投入使用,其基础工作是在奥地利格拉茨大学完成的,核心部分是描述轧制过程及相关组织结构变化的物理冶金模型,例如,加热期间的奥氏体化、轧制期间的再结晶及晶粒尺寸变化、输出辊道上和带卷冷却期间发生的奥氏体向铁素体转变等。力学性能的预测不仅要考虑到钢种成分和工件温度,还要考虑温度履历,轧制过程中的形变再结晶,冷却时微合金析出对晶粒细化的影响等。首先得到铁素体晶粒尺寸预测模型,进而导出力学性能模型。目前其所能达到的精度是:碳钢抗拉强度的标准差为8.5MPa,屈服

强度的标准差为 13.7MPa; 低合金高强度钢二者分别为 12.9MPa 和 17.5MPa, 这对于在线性能预测和控制来说已经足够了。

目前, 国内钢铁企业界以很大的热情关注着成形过程中钢材性能预测的进展, 因为这项高技术成果能够从两个方面为企业带来好处:

第一, 有助于优化生产工艺, 生产出性能稳定、均匀的热轧带钢;

第二, 能够为开发新钢种提供工艺制度和参数设定方面的指导。

比以上两点更直接、更常用也更为诱人的是可以大幅度减少力学性能检验量。这是因为, 有了性能预测软件以后, 可以根据成分和工艺条件立即预测得到大部分产品的力学性能指标, 而无须件件依赖现场取样检验。于是, 常规检验被取消, 仅用抽检验证及修改模型。其优点是: 减少了破坏性取样带来的金属损失, 节省了现场检验的设备费用和人工费用, 即时提供性能质保单(无须等待数日后方可提供性能实测结果), 可以缩短生产周期, 减少库存, 加快资金周转。

### 1.3 组织性能模拟与预测的发展展望

如果说企业家从性能预测中看到了效益, 那么科学家则可以从性能预测的发展轨迹中找到今后发展的方向。

#### (1) 热轧带钢无检验交货

如果今后人们能够把各种情况下的钢材性能预测都作得很准确, 那么钢材生产中的无检验交货将成为现实。这里需要做的工作是: 搞清性能预测的机理, 积累大量数据, 提高预测精度和模型适用范围。

#### (2) 轧制派生品种

“派生品种”是指使用同一种成分的原料, 通过调整轧制和轧后冷却工艺, 生产出多种不同性能等级的钢材品种(见图 1.1)。这样可以简化炼钢、连铸的操作和管理, 方便炼钢、连铸、板坯库和加热炉之间的衔接。同时有利于满足不同的使用要求, 最大程度地发挥钢材的性能潜力。这种思想的优点是显而易见的, 但必须有准确的性能预测技术作支撑, 才能付诸实施。

#### (3) 新一代钢铁材料的开发工具

开发新一代钢铁材料, 要成倍提高性能, 必须最大限度地调动成形过程中再结晶、相变和析出等作用机制, 综合利用细晶、沉淀和位错强化等效果, 因此, 需要以物理冶金理论作指导、大量的实验及生产数据作支撑。它们恰恰是钢材组织性能预测之车得以运转的双轮。毫无疑问, 组织演变的控制及性能预

测将在此发挥重要作用。

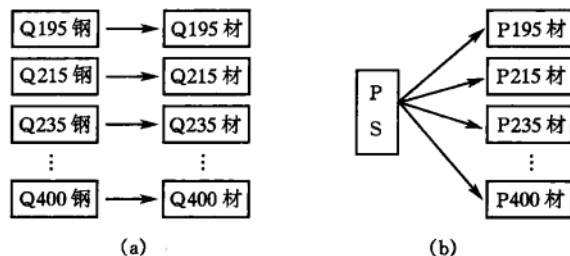


图 1.1 轧制派生品种示意图

(a) 传统做法：开发品种由炼钢开始；(b) 新思路：由轧钢开发派生品种

## 1.4 热轧钢材组织-性能演变的模拟和预测研究的思路与结构

全书的结构如图 1.2 所示。本书按照循序渐进的原则，从物理冶金的基本原理出发，首先，介绍钢材组织性能演变的热力学基础和动力学基础，为建立

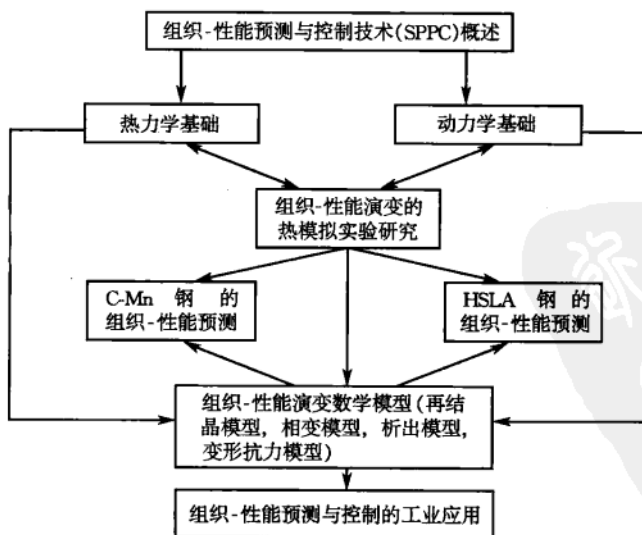


图 1.2 本书结构示意图



相关的机理模型做理论准备;然后,介绍热模拟实验研究,通过典型实例说明如何通过单道次实验和双道次实验研究成形过程中的再结晶、相变和析出等现象,并介绍实验原理与具体做法;接着,对 C-Mn 钢和 HSLA 钢两类常见钢种的组织-性能演变规律及其预测和控制进行详细介绍;此外,介绍了利用人工神经网络进行组织-性能预测的原理、实现方法及应用实例。

## 1.5 本章主要参考文献

- 1 翁宇庆. 钢铁结构材料的组织细化. 见: 中国材料研究学会. 2002 年材料科学与工程新进展(上). 北京: 冶金工业出版社, 2002. 3~16
- 2 杜林秀, 李维娟, 张红梅, 等. 400MPa 级超级钢工业轧制实验. 见: 中国金属学会. 新一代钢铁材料重大基础研究论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2000. 98~101
- 3 董瀚. 屈服强度 800MPa 级高强度低合金钢的研究. 见: 中国金属学会. 新一代钢铁材料重大基础研究论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2000. 122~129
- 4 田村今男, 等. 高强度低合金钢的控制轧制与控制冷却. 王国栋, 刘振宇, 熊尚武译. 北京: 冶金工业出版社, 1993
- 5 鲁茨·迈耶. 带钢轧制过程中材料性能的优化. 赵辉译. 北京: 冶金工业出版社, 1996
- 6 刘相华. 刚塑性有限元及其在轧制中的应用. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 7 王殿辉, 刘振宇, 王国栋, 等. 利用神经网络预测热轧板带力学性能. 钢铁, 1995, 30 (1): 28~31

## 第 2 章

### 热轧钢材组织-性能预测与控制技术概述

#### 2.1 组织-性能预测与控制技术(SPPC)的内涵

采用最经济的手段生产出最高质量的产品是所有技术发展的终极目标,也是现场工程师和研究人员在生产线上和实验室内孜孜以求的目标。达到这一目的,重要的是可以预测产品的性能,并以此为基础设计产品的化学成分和工艺规程,从而控制产品生产过程和达到质量要求。

传统意义上的显微组织和力学性能的预测与控制基本上完全依赖工程师个人的经验,个人的知识和经验是控制产品质量的重要一环。但是,由于钢铁生产过程的复杂性和显微组织演变的动态性,作出这种预测需要很长时间,而达到的精度则是极为有限的。因此,基于传统方法,对生产过程作出合理而有效的控制是很难的。随着物理冶金学、轧制工艺学、控轧控冷技术及计算机等方面的进展,对显微组织演变和力学性能的变化作出预测,并以此为基础应用高速计算机来控制生产过程中的各项参数已经成为可能。研究人员为发展这项新的计算机辅助预测和控制技术作出了大量的努力。组织-性能预测与控制技术(Structure-Properties Prediction and Control Technology, 即 SPPC)作为计算机集成生产过程的一个分支而发展起来,这种技术通过在线预测和控制提高生产力和产品质量并降低产品消耗,其基本过程如图 2.1 所示。

以物理冶金学为基础,应用数学模型可以准确地预测显微组织的变化和产品的最终力学性能水平。如何建立组织演变数学模型,一直是钢铁材料国际会

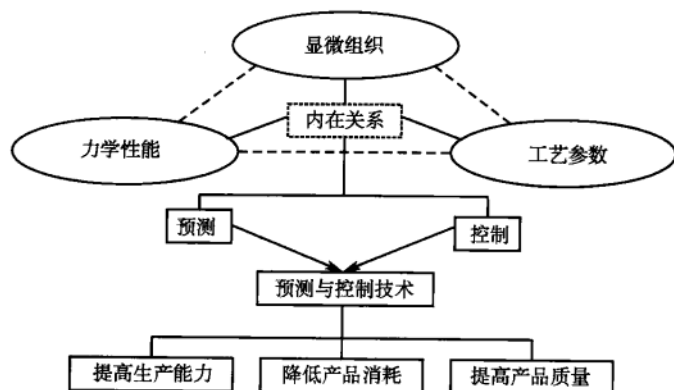


图 2.1 组织-性能预测与控制技术过程

议的重要议题之一。自 20 世纪 80 年代开始，出现了各种描述贯穿热轧至冷却过程的组织演变模型。有些模型在生产中已经开始应用，其中多数集中在板带热轧生产过程。这可能是由于在板带热轧生产中，只有对生产条件进行精密控制才能保证最终产品的各项性能指标。

目前，板带轧制过程的冶金学特点和机制已基本清楚。如果在再结晶终止温度( $T_{nr}$ )之上进行钢材轧制，那么在道次间隔之内可以充分完成静态再结晶，这种情况一般发生在普碳钢的轧制生产中；在  $T_{nr}$  以下进行板带轧制，由于应变诱导析出阻止了奥氏体的静态再结晶，会产生奥氏体的拉长。与此相反，由于棒线材轧制过程中道次间隔时间很短，不会发生静态再结晶和沉淀析出。与板带轧制不同的是，棒线材轧制过程中的累积应变会导致动态再结晶及随后进行的亚动态再结晶。从道次间隔时间的角度来看，板带轧制介于中厚板和棒线材轧制之间。在粗轧过程中，道次间隔时间较长，冶金学行为与中厚板轧制过程相似；在精轧过程中，道次间隔时间较短，更接近棒线材轧制过程。板带轧制的这种既类似于中厚板轧制，又类似于棒线材轧制的特点，使建立描述其冶金学行为的数学模型很困难。目前，国际轧钢界高度重视轧制过程组织-性能演变的建模工作，针对不同钢种和轧制条件的各种模型相继出现。合理地应用这些模型预测轧制中的组织-性能演变，可带来以下好处：降低实机轧制实验次数，初步评价设备改造后的效果，预测不可测量的变量参数，清楚地认识产品性能进一步提高的潜力，降低研究开发新产品的成本。

热轧板带组织-性能预测与控制系统如图 2.2 所示<sup>[1]</sup>。

在钢铁工业中，各种新技术都朝着融合各个生产过程或建立它们之间的直