

带钢连续热处理炉内热过程 数学模型及过程优化

Heat Transfer Model and Heat Treatment Process Optimization Strategy Study on
Strip Steel Continuous Heat Treatment Process

豆瑞锋 温治 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

带钢连续热处理炉内热过程 数学模型及过程优化

豆瑞锋 温治 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 提 要

书中介绍了带钢热处理的工艺和设备,重点对带钢连续热处理炉内热过程计算模型进行了讨论,分别对封闭空间辐射换热、气体射流冲击换热和粗糙表面接触换热进行了详细的论述,在此基础上分别建立了带钢连续热处理立式炉和卧式炉炉内热过程数学模型,并以国内钢铁企业的三条机组(碳钢连续热处理立式炉、热轧不锈钢连续退火卧式炉、冷轧不锈钢连续退火卧式炉)为例,对数学模型进行了大量的验证。在炉内热过程模型验证正确的前提下,以连续热处理立式炉为例,探讨了连续热处理过程优化的策略,并提出了基于可行工况集的变工况优化策略。书中所述内容对带钢连续热处理机组的工艺优化、提质增产具有重要的指导意义。

本书可供带钢连续热处理生产系统的工程技术人员阅读,亦可供相关专业的教学、科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

带钢连续热处理炉内热过程数学模型及过程优化/豆瑞锋、温治著. —北京:冶金工业出版社,2014.12

ISBN 978-7-5024-6801-9

I. ①带… II. ①豆… ②温… III. ①带钢—连续热处理—炉内过程—数学模型 ②带钢—连续热处理—炉内过程—最佳化 IV. ①TG162.86 ②TK224.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第276654号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话(010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋良 唐晶晶 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6801-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014年12月第1版,2014年12月第1次印刷

169mm×239mm;18印张;4彩页;359千字;275页

50.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

连续热处理过程是冷轧和热轧带钢生产的重要工序，是在带钢成分确定的前提下，依靠控制热量传递过程来控制带钢内部微观结构的演化，最终完成金相组织的转变。因此，温度控制是带钢热处理过程控制的核心，也是热处理质量的根本保证。为了解决带钢连续热处理炉优化控制的技术难题，并克服半理论或纯经验控制模型严重依赖于现场、难以移植和泛化能力有限的不足，本书基于传热机理模型，对带钢在连续热处理炉内的传热过程及其优化控制策略展开相关的理论分析和实验研究。

本书在结构上分为四部分：

第一部分（第1章~第3章）主要论述了带钢连续热处理的工艺设备及过程优化研究的现状，对国内主要带钢连续热处理机组的生产现状加以总结。从中可以看出，在带钢连续热处理机组的建造和控制领域，国外企业仍然占据主导地位。

第二部分（第4章~第6章）重点论述了带钢在连续热处理炉内的主要换热方式的理论分析和数值计算方法，包括辐射换热、气体射流冲击换热和粗糙表面接触换热等。其中在第4章详细论述了蒙特卡罗方法计算辐射换热问题的步骤、误差分析和应用效果；在第5章提供了大量的气体射流冲击换热实验的关联式，并采用计算流体力学的方法，分析了特定形式的气体射流冲击装置的换热特性；第6章建立了考虑辐射换热的接触换热模型，为求解带钢与炉辊间的换热奠定了理论基础。

第三部分（第7章、第8章）分别建立了带钢连续热处理立式炉

和卧式炉数学模型，详细阐述了带钢连续热处理炉内热过程数学模型的建立方法，进行了大规模的数值分析和现场实验验证，证明了所建数学模型在稳定工况和变工况条件下，对带钢温度的预测均有足够的精确度。

第四部分（第9章）在验证了的带钢连续热处理炉内热过程数学模型的基础上，开发了带钢连续热处理过程的优化控制策略。其中包括稳定工况和变工况条件下的优化策略，并以带钢连续热处理立式炉为例，阐述了该优化策略的实施方法，力图解决带钢连续热处理过程动态优化控制的难题。

在带钢连续热处理立式炉（热镀锌炉和冷轧碳钢连续退火炉）和卧式炉（热轧和冷轧不锈钢带钢热处理）炉内热过程数学模型的开发过程中，先后得到了重庆赛迪工业炉有限公司、宝山钢铁股份有限公司、山西太钢不锈钢股份有限公司、上海宝钢工业检测公司的领导和工程技术人员的大力支持和帮助，在此一并表示衷心地感谢！

在本书的撰写过程中得到了北京科技大学“热过程模化与控制”课题组的楼国锋副教授、刘训良副教授、张瑞杰研究员和苏福永讲师，以及周钢博士、张雄博士、邢一丁博士、王丽红硕士、李强硕士、方旭硕士、董斌硕士、王林建硕士等的大力支持，他们在程序编写、图形制作和相关实验等方面付出了辛勤的劳动，在此一并表示衷心地感谢。

此外，本书的出版得到了北京市教委共建项目“节能与环保北京高校工程研究中心建设（改革试点）”、北京自动化学会“青年科技人才出版学术专著基金”的大力支持，同时还得到了北京科技大学“濮耐教育基金”、“洛伊教育基金”、“沃克教育基金”、“赛迪教育基金”、“凤凰教育基金”、“威仕炉教育基金”、“思能教育基金”、“赛能杰教育基金”、“热陶瓷教育基金”和“北京神雾教育基金”的大力支持。在此一并表示衷心地感谢！

由于带钢连续热处理过程的研究涉及热处理工艺、传热传质、参数优化、自动控制、程序设计等相关内容，限于作者对这一复杂现象的理解和认识水平，书中不妥或错误之处欢迎广大读者不吝指正。

作者联系方式：douruifeng@ustb.edu.cn

作 者

2014年8月25日于北京

目 录

| | |
|-----------------------------|----|
| 1 绪论 | 1 |
| 2 带钢热处理工艺与设备 | 3 |
| 2.1 带钢热处理工艺 | 4 |
| 2.1.1 带钢再结晶退火 | 4 |
| 2.1.2 退火工艺曲线 | 9 |
| 2.2 带钢热处理设备 | 11 |
| 2.2.1 森吉米尔法 | 12 |
| 2.2.2 改良森吉米尔法 | 13 |
| 2.2.3 美钢联法 | 13 |
| 2.2.4 改良森吉米尔法与美钢联法的比较 | 15 |
| 2.2.5 卧式加热炉与立式加热炉的比较 | 19 |
| 2.2.6 预热段(炉) | 23 |
| 2.2.7 加热段(炉) | 26 |
| 2.2.8 冷却段(炉) | 30 |
| 2.3 不锈钢退火工艺概述 | 37 |
| 2.3.1 不锈钢分类与特性 | 38 |
| 2.3.2 不锈钢热处理的目的 | 40 |
| 2.3.3 不锈钢退火炉炉型选择 | 43 |
| 3 带钢热处理数学模型与优化策略研究现状 | 45 |
| 3.1 带钢热处理炉内热过程模型研究进展 | 45 |
| 3.1.1 带钢整体非稳态热过程模型 | 46 |
| 3.1.2 带钢单元热过程跟踪模型 | 48 |
| 3.1.3 炉内热过程的半理论半经验模型 | 48 |
| 3.2 带钢热处理炉仿真优化控制研究进展 | 53 |
| 3.2.1 优化目标函数的确定 | 53 |
| 3.2.2 稳定工况下的优化控制策略 | 54 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2.3 | 变工况下的优化控制策略 | 55 |
| 3.2.4 | 基于智能优化技术的控制策略 | 57 |
| 4 | 封闭空间内的辐射换热 | 61 |
| 4.1 | 辐射换热的基本概念 | 65 |
| 4.1.1 | 辐射角系数的定义及其求解方法 | 66 |
| 4.1.2 | 蒙特卡洛法的基本原理 | 68 |
| 4.2 | 基于蒙特卡洛法的多个灰面间辐射换热通用模型 | 72 |
| 4.2.1 | 设计蒙特卡洛法程序需要考虑的问题 | 73 |
| 4.2.2 | 曲面单元设计 | 76 |
| 4.3 | 蒙特卡洛法模型的验证与计算误差分析 | 78 |
| 4.3.1 | 基于统计学的蒙特卡洛法误差分析 | 78 |
| 4.3.2 | 蒙特卡洛法模型验证与误差分析 | 81 |
| 4.4 | 封闭空间辐射换热计算方法 | 90 |
| 4.4.1 | 封闭空间辐射透明介质下的辐射换热 | 90 |
| 4.4.2 | 封闭空间辐射参与性介质下的辐射换热 | 94 |
| 4.5 | 蒙特卡洛法在复杂空间辐射换热模型中的应用 | 96 |
| 4.5.1 | 堆积状态下小球辐射换热模型 | 96 |
| 4.5.2 | 小球蓄热室内球体之间辐射换热的分析 | 99 |
| 4.5.3 | 辊底式辐射管炉内辐射换热模型 | 102 |
| 4.5.4 | 粗糙表面黑度系数的理论计算模型 | 104 |
| 5 | 气体射流冲击换热 | 108 |
| 5.1 | 气体射流冲击换热的实验方法和实验关联式 | 114 |
| 5.2 | 气体射流冲击换热数值仿真 | 120 |
| 5.2.1 | RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型计算单孔射流冲击换热 | 122 |
| 5.2.2 | 假设条件及边界条件设置 | 123 |
| 5.2.3 | 流场特征参数验证与分析 | 124 |
| 5.2.4 | 换热特性验证与分析 | 127 |
| 5.2.5 | 不同射流结构下单孔射流压力系数的分布规律 | 129 |
| 5.2.6 | 不同射流结构下单孔射流 Nu 数的分布规律 | 131 |
| 5.3 | 孔排射流冲击流动与换热过程数值模拟 | 136 |
| 5.3.1 | 换热特性分析 | 137 |
| 5.3.2 | 流场特性分析 | 140 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 6 粗糙表面间接触换热 | 142 |
| 6.1 接触换热的统计模型 | 145 |
| 6.1.1 假设条件 | 145 |
| 6.1.2 单峰接触模型 | 146 |
| 6.1.3 接触统计模型 | 146 |
| 6.1.4 接触间隙内的辐射模型 | 147 |
| 6.1.5 接触换热模型验证及其分析 | 149 |
| 6.1.6 等效辐射系数的定义与分析 | 152 |
| 6.2 影响接触热导的因素 | 155 |
| 6.2.1 温度对接触热导的影响 | 155 |
| 6.2.2 接触副导热系数与接触热阻的关系 | 155 |
| 6.2.3 接触副硬度与接触热导的关系 | 156 |
| 6.2.4 接触热阻影响因素的综合分析 | 156 |
| 6.3 带钢辊冷过程的仿真分析 | 158 |
| 6.3.1 带钢与冷却辊接触换热模型 | 159 |
| 6.3.2 数值仿真分析 | 160 |
| 6.4 立式炉辊室内的传热仿真分析 | 162 |
| 6.5 接触传热在带钢连续热处理炉上的最新应用 | 164 |
| 7 连续热处理立式炉炉内热过程数学模型及验证 | 166 |
| 7.1 带钢传热过程物理模型 | 166 |
| 7.2 带钢传热过程数学模型 | 167 |
| 7.2.1 假设条件 | 167 |
| 7.2.2 控制方程 | 168 |
| 7.3 带钢传热模型边界条件的确定 | 168 |
| 7.3.1 辐射换热边界条件 | 168 |
| 7.3.2 射流冲击换热边界条件 | 169 |
| 7.3.3 接触换热边界条件 | 170 |
| 7.3.4 其他换热边界条件 | 171 |
| 7.4 数值求解方法及计算流程框图 | 172 |
| 7.5 立式炉内带钢传热过程的数值模拟及实验验证 | 174 |
| 7.5.1 辐射管加热段内温度实测及其特性分析 | 174 |
| 7.5.2 基于炉膛温度的辐射管加热段的实验验证 | 176 |
| 7.5.3 基于辐射管管壁温度的辐射管加热炉段实验验证 | 181 |
| 7.5.4 电阻加热段内的数值模拟及实验验证 | 184 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|------------|
| 7.5.5 | 快速冷却段和感应加热段的数值模拟及实验验证 | 187 |
| 8 | 不锈钢连续热处理卧式炉炉内热过程数学模型及验证 | 190 |
| 8.1 | 物理模型与数学模型 | 190 |
| 8.1.1 | 控制方程及其离散化 | 190 |
| 8.1.2 | 外掠平板对流换热模型 | 193 |
| 8.1.3 | 炉内辐射换热模型 | 193 |
| 8.1.4 | 气体射流冲击换热模型 | 195 |
| 8.1.5 | 水雾/气雾冷却换热模型 | 196 |
| 8.2 | 炉膛热平衡模型的建立 | 196 |
| 8.2.1 | 加热段热平衡模型 | 196 |
| 8.2.2 | 冷却段热平衡模型 | 197 |
| 8.2.3 | 全炉热平衡模型 | 198 |
| 8.3 | 不锈钢热带连续退火炉数值仿真结果及验证 | 198 |
| 8.3.1 | 加热部分带温实测值、配方值与仿真结果分析 | 199 |
| 8.3.2 | 不锈钢热带连续退火炉加热部分实验验证 | 202 |
| 8.3.3 | 不锈钢热带连续退火炉冷却部分实验验证 | 212 |
| 8.4 | 不锈钢冷带连续退火炉数值仿真结果及验证 | 227 |
| 8.4.1 | 不锈钢冷带连续退火炉加热部分验证 | 227 |
| 8.4.2 | 不锈钢冷带连续退火炉冷却部分验证 | 238 |
| 8.4.3 | 仿真结果验证统计分析 | 241 |
| 8.4.4 | 热平衡仿真结果及验证 | 243 |
| 9 | 带钢连续热处理过程操作参数的优化及仿真 | 246 |
| 9.1 | 稳定工况下操作参数的优化控制策略 | 246 |
| 9.1.1 | 极限带速的计算方法 | 247 |
| 9.1.2 | 启发式优化算法 | 250 |
| 9.2 | 变工况时的参数优化控制策略 | 252 |
| 9.2.1 | 带钢钢种及规格相同时的变工况控制策略 | 253 |
| 9.2.2 | 可行工况集的交集非空时的变工况控制策略 | 254 |
| 9.2.3 | 可行工况集的交集为空集时的变工况控制策略 | 257 |
| 9.3 | 立式炉操作参数优化控制数值仿真分析 | 258 |
| | 附录 | 262 |
| | 参考文献 | 267 |

1 绪 论

带钢轧后热处理是冷轧带钢生产中的重要工序。冷轧带钢主要有碳钢和不锈钢等，其轧后热处理一般为再结晶退火，通过再结晶退火达到降低钢的硬度、消除加工硬化、改善钢的性能和恢复钢的塑性变形能力的目的。带钢退火炉主要有罩式退火炉和连续退火炉。罩式退火炉存在生产周期长、产品力学性能不够均匀、表面质量不佳的缺点，为了解决这些问题，人们开始致力于连续退火工艺的研发。

世界上第一条完备的冷轧带钢立式连续热处理线于 1972 年在新日铁的君津钢厂投入工业生产。由于连续热处理机组将带钢的清洗、热处理、平整、精整等工艺集于一体，具有生产效率高、产品质量好和生产成本低等特点，受到全世界的普遍关注，也促进了该工艺的不断改进和完善。

目前，连续退火机组共有四种类型：NSC-CAPL（连续退火酸洗机组，日本新日铁）、KM-CAL（连续退火机组，日本川崎制铁）、NKK-CAL（连续退火机组，日本钢管）和 CRM-HOWAQ（热水冷却连续退火机组，比利时）。由于热处理工艺的要求，上述几种退火机组具有共同的技术特点：都是通过明火加热或辐射管加热将带钢加热至再结晶温度，通过控制一次冷却速度、一次冷却终了温度和过时效温度，控制钢中固溶碳的析出，最终得到满足工艺要求的合格产品。

在带钢连续热处理过程中，加热和冷却技术是连续退火技术的核心。由于明火加热会造成带钢表面氧化，现代大型连续热处理机组多采用辐射管加热方式。冷却技术可划分为四大类：气体射流冲击冷却（喷气冷却 GJC、高速喷气冷却 HGJC）、接触冷却（辊冷 RC）、水冷（冷水淬 WQ、热水冷却 HOWAC）和复合冷却技术（气水双相冷却 ACC、喷气辊冷复合冷却 RGCC），此外还有依靠有机介质的相变冷却技术，如戊烷冷却技术。水冷技术（包括气水双相冷却）容易影响带钢表面质量（表面氧化、残留水印），通常用于带钢的最终冷却（冷却至出炉温度）。因此，现代带钢连续热处理的核心技术主要集中在辐射管加热、气体射流冲击冷却和接触冷却技术的研究上。

长期以来，我国的带钢连续热处理机组基本上停留在国外成套引进或国外引进技术国内总成的水平上。从我国 2006 年以前已建成和后来建成及正在建设的数十条国有重点企业的连续热处理机组（详见附录 A）可以看出：其中 90% 以上

的机组为国外成套引进，国内自主设计的机组所占比例不足 10%。究其原因，就是在相当长的一段时期内，还没有完全掌握其关键技术，即带钢在连续热处理炉（立式炉、卧式炉）内的温度控制和张力控制技术。其中：张力控制是为了避免带钢在炉内跑偏、瓢曲以及断带，是高速通板、板形控制的重要保障。在不同的热处理工艺区段内，带钢温度水平和宽度方向温度分布均不尽相同，这就需要根据带钢温度来确定张力设定值。由此可见，带钢温度的优化控制决定了带钢的张力控制，只有全面系统地掌握了带钢在连续热处理炉内的换热机理，建立炉内换热的全部热过程数学模型，并开展大规模的数值仿真计算和相关的实验研究，才能最终实现带钢连续热处理过程的计算机优化控制。

由于带钢连续热处理炉具有各炉区结构复杂多样、传热特性不尽相同、相对热惯性时间长（主要是立式炉的辐射管加热、保温段，炉温的热惯性时间约为 10~15min，而带钢在炉内的驻留时间小于 3min）、工况频繁变化等特点，因此，对连续热处理炉内热过程的仿真和优化控制变得十分困难，特别是变工况条件下目前还未见有从传热机理模型的角度对其进行优化控制的报道，大多数学者采用半理论半经验或者纯经验模型开展相关研究来解决这一难题。但是这些方法都存在严重依赖于现场、难以移植和泛化能力有限等问题。本书正是在该背景下，同时鉴于我国在该领域的技术现状，开展连续热处理炉内带钢换热过程基础理论和相关实验研究。

2 带钢热处理工艺与设备

作为产品的冷轧带钢主要有普通冷轧板、镀层板和不锈钢板，其中镀层板又分镀锌板和镀锡板。镀锌板是我国目前用量最大的镀层板，主要用于汽车、建筑、轻工、仓储、环保等行业；镀锡板主要用于轻工食品工业；不锈钢板主要用于石油化工、建筑装潢、家用电器、厨房用具、医疗等领域。

近年来，国内带钢连续热处理（涂镀）产能有了大幅度的提高，但是仍然存在产品质量差、成本高的缺点，不能完全满足汽车、家电等高档用户的需求，同时由于国内高品质带钢产线产能严重不足，造成了汽车、家电用板大部分需要进口的局面。

造成带钢产品质量不高的因素有多种，如带钢的轧制、热处理、涂镀、拉矫等工艺过程，都会产生诸如表面质量问题（划伤、辊印等）、镀层问题（厚度不均、附着力不强、焊接性能不好等）、板形问题（各种浪形、边中厚度不均等）、力学性能不高（强度、塑性）。而带钢连续热处理过程，作为带钢生产（包括涂镀生产）的最终环节，对保证产品质量起着至关重要的作用。

此外，我国在带钢连续热处理炉的设计水平上与国外存在较大的差距。如附录 A 所示，从 20 世纪 70 年代末至 2006 年，国内大型钢铁联合企业的带钢连续热处理（涂镀）产线，80%以上是由国外设计制造，其产能占 90%以上。国内对带钢连续热处理（涂镀）产线控制技术的研发方面，如带钢温度控制、张力控制等，从 20 世纪 90 年代开始，所见报道的仅有蒋大强^[1]、田玉楚^[2]等人开展的研究和实践，以及李少远等人^[3,4]所作的神经网络模拟；在带钢张力控制方面，主要有张清东^[5,6]、胡广魁^[7]、叶玉娟^[8]等人针对连续退火立式炉机组开展的研究；对于热处理过程及其前后工序的联合优化和控制方面，国内尚处于起步阶段。

实际生产过程中，由于热处理过程带钢温度控制不当造成的产品质量问题主要有：表面划伤、辊印、板形（浪形）、镀层附着力差、热处理过程不完全（金相组织转变不完全，力学性能差）等；造成的生产事故主要有：带钢跑偏、皱曲、断带等。那么为了提高产品质量，减少生产事故，就必须按照带钢热处理工艺精确控制带钢温度，这就需要对带钢连续热处理炉各个工艺段进行热工特性分析，获得影响带钢温度的主要因素，然后建立数学模型描述各个工艺段的热工过

程,并最终通过数值仿真技术获得各种工况下带钢温度分布,以其来指导或控制带钢连续热处理过程。

2.1 带钢热处理工艺

带钢热处理(包括涂镀前的热处理)大多是再结晶退火,达到降低钢的硬度、消除冷加工硬化、改善钢的性能和恢复钢的塑性变形能力的目的。

2.1.1 带钢再结晶退火

冷轧带钢在连续退火炉中完成再结晶退火。冷轧前的原料板为等轴晶粒,晶格的排列比较完整。在冷轧过程中,由于晶体中原子产生刃型位错,因此晶格沿着一定的滑移面和滑移方向(即轧制方向)进行双滑移或多滑移,出现沿钢板轧制力作用下的塑性形变。这样经冷轧之后,发生了晶粒延长、扭曲或破碎,如图 2.1 所示。位错增加,则形变抗力增大,塑性变差,产生加工硬化。据测定,经过冷轧后的薄板,抗拉强度可达 800~900MPa,洛氏硬度 HRB 达 90 以上。这种产品是不宜加工成型的,为了恢复它的可塑性,必须经过再结晶退火。

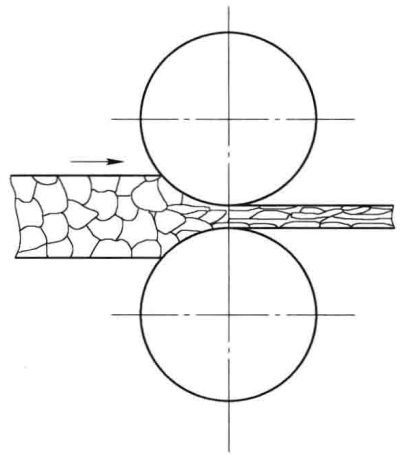


图 2.1 钢板冷轧晶粒变化示意图

退火指的是将固态金属或合金加热到一定温度,根据不同钢种采用不同的保温时间,然后以一定的速率冷却以获得需求的状态或性能的过程。其目的除了消除加工硬化,改善力学性能和加工性能外,还可通过控制退火温度和冷却速度等方法得到需要的组织和使用性能^[9~11]。

根据前序轧制工艺的不同,对不锈钢卷的退火可以分为热轧卷退火和冷轧卷退火。带钢经过热轧,强度和硬度较高,塑性降低,并有大量碳化物析出。对热轧卷的退火主要是为了恢复塑性,为后面的冷轧工序做准备。对于奥氏体不锈钢来说,由于轧制过程中造成碳化物的析出,使得带钢变脆。热轧退火主要是通过快速加热和快速冷却(如图 2.2 所示),使析出的碳化物重新溶解到奥氏体中,获取单一的奥氏体组织,并保持到常温状态,防止因冷却速度过慢造成奥氏体的敏化。

再结晶退火是将冷轧变形的金属加热到再结晶温度之上,铁素体向奥氏体转变温度以下,经保温后冷却的热处理工艺。钢材经过冷轧变形之后,金属内部组织产生晶粒拉长、晶粒破碎和晶体缺陷大量存在的现象,导致金属内部自由能升

高，处于不稳定状态，具有自发地恢复到比较完整、规则和自由能低的稳定平衡状态的趋势。但是，在室温状态下，金属的原子动能小，扩散能力差，扩散速度极低，这种自发转化无法实现，必须施加推动力。而施加这种推动力的方式是将金属加热到一定温度，使原子获得足够的扩散动能，消除晶格畸变，使组织和性能发生变化。随着加热温度的升高，组织和性能的变化经历三个主要阶段：回复、再结晶和晶粒长大^[12]。

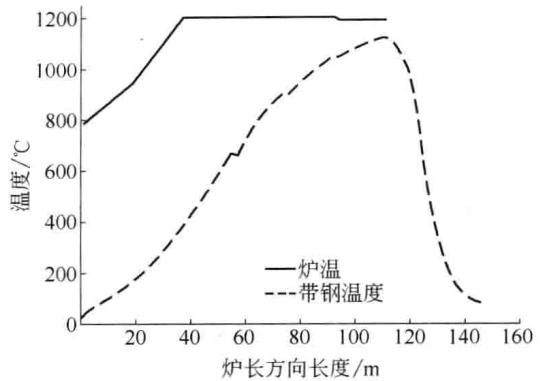


图 2.2 典型奥氏体不锈钢退火工艺曲线

A 回复

当加热温度不高时，冷变形金属中微观内应力显著降低，强度、硬度变化不大，塑性和韧性稍有上升，显微组织无显著变化，新的晶粒没有出现。这种变化过程称为回复。轧硬板在回复时，显微组织不发生变化，但晶体缺陷密度和它们的分布有所改变。回复阶段发生的变化不涉及大角度晶面的移动，因而回复仅是变形材料的结构完整化过程。这个过程是通过点缺陷消除、位错的对消和重新排列来实现的。对于冷变形材料，后一个过程是主要的，位错重新排列形成小角度晶界迁动。由于这种变化是相对均匀的，因此，回复过程也是均匀的。

B 再结晶

冷变形金属加热到较高温度时，将形成一些位向与变形晶粒不同和内部缺陷较少的等轴小晶粒。这些小晶粒不断向周围的变形金属扩展长大，直到金属的冷变形组织完全消失为止，称为再结晶。在加热过程中，冷塑性变形后的金属的组织力学性能最显著的变化是在再结晶阶段发生的。再结晶是消除加工硬化的重要手段，再结晶还是控制晶粒大小、形态、均匀程度，获得或者避免晶粒的择优取向的重要方法。通过各种影响因素对再结晶过程进行控制，从而对金属材料的强度、韧性、可冲压性、电磁性能（硅钢）等产生决定性的影响。

再结晶过程中，再结晶完成的分数随着时间的变化并不均匀，有一个先慢后快，再由快变慢的过程。在再结晶完成最初的 5% 范围内，再结晶的速度很慢，称为孕育期，此后再结晶速度逐渐加快。当完成 80% 以后，速度又逐渐下降。随着加热温度的升高，孕育期变短，再结晶完成的速度也越快^[12]。例如，通过实验测定，430 冷轧不锈钢的再结晶退火中，当退火温度为 750°C 时，完成再结晶需要 280s 的保温时间；当退火保温温度为 800°C 时，仅需要保温 53s 就能完成再结晶过程；当保温温度继续升高到 850°C 时，仅需要 12s 就能完成再结晶。因此，

再结晶温度的选择,对于再结晶退火过程的控制至关重要。

C 晶粒长大

再结晶完成后,继续升高温度或延长保温时间,晶粒会继续长大^[13,14]。晶粒长大是通过大角度晶界的移动使一些晶粒尺寸增加,另一些晶粒尺寸缩小以至于完全消失的方式进行的。晶粒长大是靠晶界的迁移完成的。晶界的迁移可定义为晶界在其法线方向上的位移,它是通过晶粒边缘上的原子逐步向毗邻晶粒的扩散而实现的。晶界的移动速度与晶界移动驱动力成正比。晶粒大小对金属的性能有很大影响,控制再结晶晶粒长大在生产中非常重要。国内外很多研究机构都在研究金属材料的细晶强化,通过细化晶粒,提高材料的强度和韧性^[15]。

金属中的合金元素常常聚集在晶界上,晶粒长大时,这些合金元素与晶界一并迁移。由于合金元素扩散速度的限制,晶界迁移速度变慢。当金属中存在第二相颗粒时,这些颗粒对晶界的迁移也有阻碍作用。第二相颗粒体积分数越大,颗粒越细小,对晶界迁移所施加的阻力越大。当晶界迁移的驱动力等于第二相颗粒施加的阻力时,晶界将停止迁移,此时晶粒直径达到最大值。利用这一原理,可以控制金属晶粒的长大,例如在钢中添加少量的铝、钛、钒、铌,使其在钢中形成氮化物、碳化物或者碳氮化物的细小颗粒,可以有效地防止钢中高温加热时的晶粒长大。

图 2.3 为钢的再结晶退火过程示意图。

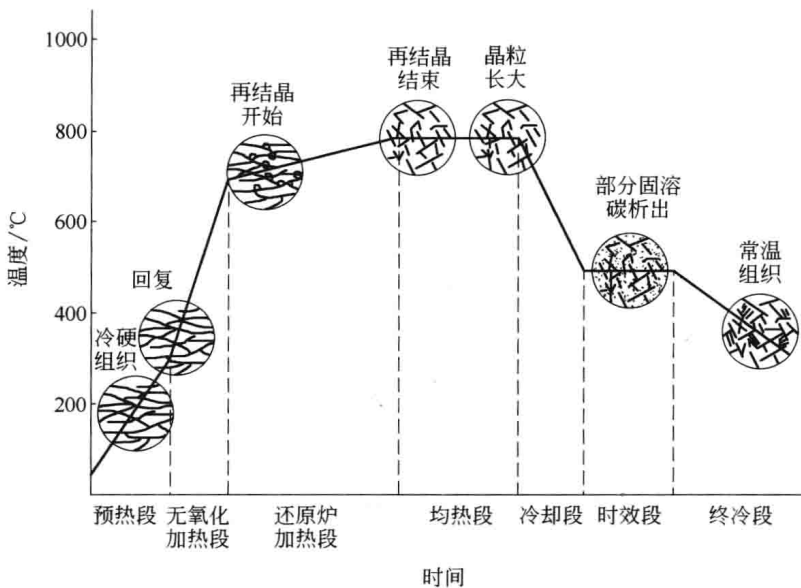


图 2.3 带钢在退火炉内再结晶过程示意图

薄板的再结晶退火通常是在 A_{c1} 点以下进行,不发生金属中的相变。再结晶退火时,随着温度升高,原子活动能力增强,本来不稳定的状态,可以通过原子

间的相对移动而进行重新排列。在晶体中形成新的晶核并长大成为平衡态晶粒，消除了内应力，使钢板的塑性得到恢复。

形变后金属开始进行再结晶时的温度称为再结晶温度。金属的再结晶温度受到下列因素的影响：

(1) 冷轧时的形变程度。薄板在冷轧过程中的变形量为 60%~80%，形变程度愈大，则内应力愈大，愈处于稳定的状态，因此再结晶温度则愈低。图 2.4 为轧制形变程度与再结晶温度的关系示意图。

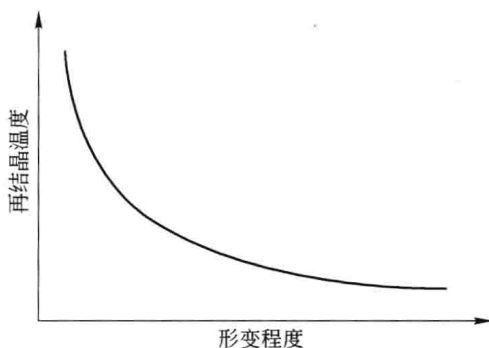


图 2.4 轧制形变程度与再结晶温度的关系示意图

(2) 钢的化学成分。金属在再结晶形核时将形成新的表面，形核时原子还需要有扩散过程。因此，凡增加扩散激活能及增加金属表面能的合金元素，都将使再结晶温度升高。

在多数情况下，合金的再结晶温度高于纯金属的再结晶温度。当加入少量合金元素时，这种效应较为显著；当合金元素含量较高时，产生的影响很复杂，再结晶温度可能升高，也可能降低。

(3) 退火加热速度。对于已冷轧硬化的钢板来说，在退火时其加热速度愈快，即在不同温度下停留的时间较短，则再结晶温度就愈高；反之，再结晶的温度就愈低。

(4) 原始组织。由于金属在晶粒晶界上容易形成再结晶核心，因此原始形变时钢板的晶粒愈大，其再结晶温度就愈高。

由此可见，同一钢种根据不同的工艺条件能获得不同的再结晶温度。包契瓦尔 (A. A. Вочвар) 总结了大量实验结果提出了金属的最低再结晶温度与该金属熔点的热力学温度存在如下关系：

$$\frac{T_P}{T_{\text{熔}}} \approx 0.35 \sim 0.40 \quad (2.1)$$

式中， T_P 、 $T_{\text{熔}}$ 分别为最低再结晶温度和金属熔点。