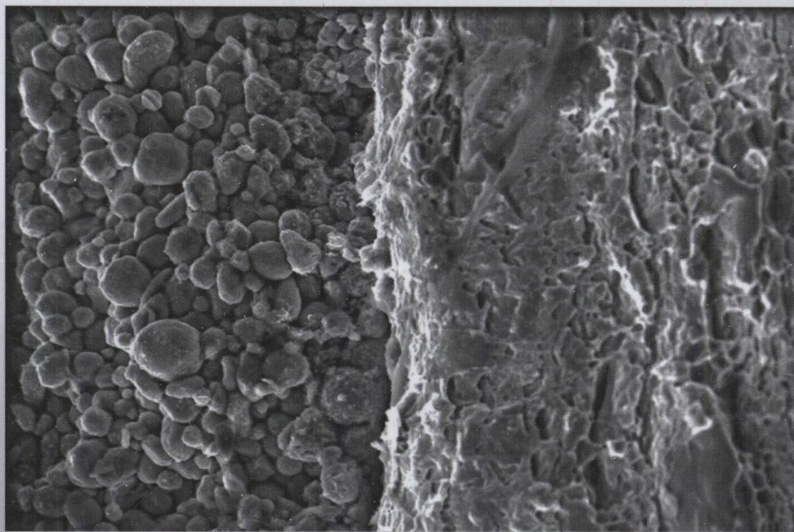


# 机械镀锌技术基础

Fundamentals of mechanical galvanizing

王胜民 何明奕 赵晓军 著



以机械镀锌技术原理为核心  
以指导生产实践和解决实际问题为目的



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 机械镀锌技术基础

Fundamentals of mechanical galvanizing

王胜民 何明奕 赵晓军 著



机械工业出版社

本书以机械镀锌过程中的锌粉吸附沉积、镀层组织结构特征、镀层与基体的结合机理为主线,对直接影响镀层结构和性能的理论基础进行了详细阐述,对直接影响机械镀锌应用推广及商务谈判的镀层理化性能及检测、工艺流程及原料管理、现行标准规定的技术条款等进行了全面客观分析。本书以机械镀锌技术原理为核心,以指导生产实践和解决实际问题为目的,在内容上做到了理论与实践结合的完整性、理论指导实践的实用性。

本书可供表面处理行业的工程技术人员、工人参考,也可供相关专业在校师生、研究人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械镀锌技术基础/王胜民,何明奕,赵晓军著. —北京:  
机械工业出版社, 2013. 10  
ISBN 978-7-111-44155-7

I. ①机… II. ①王… ②何…③赵… III. ①机械镀  
- 镀锌 - 技术 IV. ①TQ153. 1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第225413号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
策划编辑:陈保华 责任编辑:陈保华  
版式设计:霍永明 责任校对:胡艳萍  
责任印制:张楠  
北京京丰印刷厂印刷  
2013年10月第1版·第1次印刷  
148mm×210mm·7.875印张·229千字  
0 001—2 600册  
标准书号:ISBN 978-7-111-44155-7  
定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
电话服务 策划编辑(010) 88379734  
社服务中心:(010) 88361066 网络服务  
销售一部:(010) 68326294 教材网: <http://www.cmpedu.com>  
销售二部:(010) 88379649 机工官网: <http://www.cmpbook.com>  
读者购书热线:(010) 88379203 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>  
封面防伪标均为盗版

# 前 言

机械镀锌与电镀锌和热浸镀锌相比，在众多领域它表现出独特的优点。虽然机械镀锌技术在国内成功推广应用只有二十来年的历史，但其发展迅速，尤其是近几年来，在小五金加工、军工配件等行业受到业界的青睐；但机械镀锌技术原理的研究远远落后于其工艺应用的发展，这导致机械镀锌技术在推广应用中出现诸多问题。因缺乏必要的技术理论支持，甚至行业内人员对机械镀锌产生怀疑或片面的认识，这严重阻碍了机械镀锌技术的发展和應用，也影响到五金加工及表面处理行业的技术创新。鉴于此，本书基于大量的实验观察和数据分析，以机械镀锌过程的锌粉沉积、镀层结构、结合机理、镀层理化性能为主要研究对象，结合机械镀锌行业现状及现行标准评析，全面阐述了机械镀锌技术的理论基础。本书的出版，旨在为机械镀锌工艺实践提供理论支撑，为从事机械镀锌生产、研究的人员，以及采购商或潜在的投资者提供完整的、基础的专业知识，以便于业界内更加全面、深入地了解机械镀锌技术。

本书的主要内容包括三部分：

第一部分介绍了机械镀锌技术的基础理论知识，重点阐述了镀层形成过程中镀液环境发生的物理、化学变化及其影响因素，并借助于多种显微观测手段及分析方法详细阐述了镀层的组织结构特征、镀层与基体之间的结合机理及镀层内锌粉颗粒之间的结合机理。

第二部分介绍了机械镀锌层的理化性能，针对镀锌行业质检现状，结合机械镀锌层的组织结构特征，重点阐述了镀层外观、厚度、附着强度、耐蚀性等理化性能指标测试方法及检测结果。

第三部分介绍了机械镀锌工艺应用及推广、商务谈判方面的基础知识，重点阐述了机械镀锌工艺流程、原料管理、推广应用注意事项、现行标准技术条款，并对机械镀锌技术给予了全面、客观的评价。

本书在撰写过程中主要依据以下原则：

(1) 严谨性 机械镀锌工艺虽然操作简单，但其工艺流程仍要求严格的工艺参数和合适的镀液环境。本书的大量图片、实验数据均紧密联系机械镀锌的工艺操作流程及施镀参数，尤其是锌粉的吸附、沉积过程，镀液试样均采集于大批量机械镀锌生产现场。

(2) 创新性 机械镀锌发展至今，相关理论基础甚缺，本书针对机械镀锌形成镀层过程的锌粉吸附、沉积，镀层的致密化，镀层的组织结构及镀层的结合机理进行了深入的研究，部分图片、分析数据为首次公开发表，书中的部分结论为首次公开。

(3) 实用性 本书第2章至第4章内容涉及锌粉的吸附、沉积，镀层的致密化，镀层的组织结构，镀层的结合机理这些镀层形成过程中的关键环节，这些内容奠定了机械镀锌技术的基础原理；第5章和第6章阐述了机械镀锌层的理化性能、工艺操作流程及注意事项、现行标准评析、镀层质量缺陷分析及控制，这些内容奠定了机械镀锌生产操作、推广应用、商务谈判的主要基础。本书以机械镀锌技术原理为核心，以指导生产实践和解决实际问题为目的，在内容上做到了理论与实践结合的完整性、理论指导实践的实用性。

本书由王胜民、何明奕、赵晓军撰写，由王胜民统稿。书稿大部分内容是昆明理工大学材料保护研究所相关人员在机械镀锌领域的研究总结和归纳。在本书即将出版之际，作者在此特别对曾工作于昆明理工大学材料保护研究所参与机械镀锌技术开发的所有同仁表示衷心的感谢。

本书的主要研究工作得到了国家自然科学基金项目“无结晶过程形成锌基多元合金镀层的基础理论研究”（No：50561003）的资助，在此表示诚挚的感谢。

在本书撰写过程中，我们参阅了大量的国内外文献及技术资料，主要参考文献已列于每章之末，限于篇幅恕不能一一列举，谨表谢忱。

就机械镀锌技术原理而言，由于机械镀锌过程的复杂性和研究手段的局限性，一些现象难以得出确定性的结论，书中的部分研究结果

基于实验观察和数据分析给出了理论推理。限于作者水平，书中难免有错误或不妥之处，诚恳欢迎同行和读者给予批评指正。

王胜民  
于昆明理工大学

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 金属微粉涂镀工艺现状</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 金属微粉涂镀工艺及特点 .....	2
1.2.1 冷喷涂工艺 .....	2
1.2.2 轧制镀工艺 .....	5
1.2.3 无机水性金属微粉涂层工艺 .....	7
1.3 机械镀工艺 .....	8
1.3.1 机械镀的提出 .....	8
1.3.2 高能机械镀 .....	9
1.3.3 机械镀锌工艺及特点 .....	12
1.4 机械镀锌现状 .....	15
1.4.1 机械镀锌机理 .....	15
1.4.2 现状及存在的问题 .....	16
参考文献 .....	20
<b>第 2 章 镀液中锌粉的吸附、沉积</b> .....	25
2.1 概述 .....	25
2.2 锌粉的吸附、沉积过程 .....	28
2.2.1 基层建立阶段锌粉的吸附、沉积 .....	28
2.2.2 镀层增厚阶段锌粉的吸附、沉积 .....	36
2.2.3 机械镀锌实镀观察 .....	39
2.3 先导金属及其作用机制 .....	40
2.3.1 先导金属的提出 .....	40
2.3.2 先导金属的作用机制 .....	41
2.3.3 先导金属在镀层中的分布 .....	42
2.4 锌粉吸附、沉积的影响因素 .....	44
2.4.1 温度、pH 值对锌粉吸附、沉积的影响 .....	44
2.4.2 非锌微粉和稀土对锌粉吸附、沉积的影响 .....	48

---

2.5 小结 .....	51
参考文献 .....	52
<b>第3章 镀层的组织结构特征</b> .....	<b>54</b>
3.1 概述 .....	54
3.2 镀层的组织结构 .....	56
3.2.1 镀层表面的组织结构 .....	56
3.2.2 镀层的组织结构 .....	58
3.2.3 镀层的化学组成 .....	62
3.3 镀层的致密化过程 .....	72
3.3.1 镀层视为多孔材料的前提假设 .....	73
3.3.2 镀层的致密化过程 .....	74
3.3.3 机械镀锌过程的能耗分析 .....	79
3.4 添加非锌微粉、稀土的镀层组织结构 .....	83
3.4.1 锌-铝复合镀层的组织结构 .....	83
3.4.2 锌-稀土复合镀层的组织结构 .....	87
3.4.3 锌-镍复合镀层的组织结构 .....	95
3.4.4 片状锌粉制备镀层的组织结构 .....	99
3.5 小结 .....	105
参考文献 .....	106
<b>第4章 镀层的结合机理</b> .....	<b>111</b>
4.1 概述 .....	111
4.2 镀层与基体界面破坏方法 .....	115
4.2.1 拉开破坏试验法 .....	115
4.2.2 冲击破坏试验法 .....	116
4.3 镀层与基体间的结合 .....	116
4.3.1 镀层与基体界面的结合强度 .....	116
4.3.2 镀层与基体界面的组织结构 .....	119
4.3.3 镀层与基体界面的化学组成 .....	124
4.4 镀层中锌粉颗粒之间的结合 .....	126
4.4.1 镀层的断口 .....	127
4.4.2 锌粉颗粒之间的结合 .....	128
4.5 热处理对镀层结合机制的影响 .....	135
4.6 强化对镀层结合机制的影响 .....	138
4.7 添加非锌微粉、稀土对镀层结合机制的影响 .....	141

4.8 小结 .....	141
参考文献 .....	142
<b>第5章 镀层的理化性能</b> .....	<b>146</b>
5.1 概述 .....	146
5.2 镀层理化性能的检测方法 .....	153
5.2.1 镀层外观质量检测方法 .....	153
5.2.2 镀层厚度检测方法 .....	153
5.2.3 镀层结合强度检测方法 .....	154
5.2.4 镀层孔隙率检测方法 .....	154
5.2.5 镀层耐蚀性检测方法 .....	155
5.3 镀层理化性能的检测 .....	155
5.3.1 镀层的外观 .....	155
5.3.2 镀层的厚度 .....	159
5.3.3 镀层的结合强度 .....	160
5.3.4 镀层的孔隙率 .....	167
5.3.5 镀层的耐蚀性 .....	174
5.4 小结 .....	185
参考文献 .....	185
<b>第6章 机械镀锌工艺及应用</b> .....	<b>189</b>
6.1 机械镀锌工艺流程 .....	189
6.2 机械镀锌原料及用量计算 .....	191
6.2.1 机械镀锌所用原料 .....	191
6.2.2 机械镀锌原料用量计算 .....	194
6.3 机械镀锌工艺流程 .....	196
6.3.1 预处理 .....	196
6.3.2 加料 .....	198
6.3.3 调整 pH 值 .....	198
6.3.4 建立基层 .....	198
6.3.5 镀层增厚 .....	199
6.3.6 强化 .....	199
6.3.7 卸料、分离 .....	199
6.3.8 工件烘干 .....	199
6.3.9 钝化 .....	199
6.4 机械镀锌工艺过程的影响因素 .....	200

---

6.4.1	原料管理 .....	200
6.4.2	预处理质量 .....	201
6.4.3	配料计算 .....	201
6.4.4	加料过程 .....	202
6.4.5	镀后处理 .....	202
6.5	机械镀锌技术的评价 .....	203
6.5.1	机械镀锌工艺的客观认识 .....	203
6.5.2	机械镀锌设备的功能特征 .....	208
6.6	机械镀锌标准评述 .....	209
6.6.1	机械镀锌现行标准 .....	209
6.6.2	机械镀锌标准分析 .....	209
6.7	机械镀锌常见问题及措施 .....	218
	参考文献 .....	220
	<b>附录</b> .....	222
附录 A	钢铁制件机械镀锌 (JB/T 8928—1999) .....	222
附录 B	机械镀锌层技术规范和试验方法 (GB/T 26106—2010) .....	225
附录 C	钢铁上机械沉积锌镀层技术规范 [ASTM B695; 04 (2009)] .....	230
附录 D	现行的机械镀锌相关标准目录 .....	236

# 第 1 章 金属微粉涂镀工艺现状

## 1.1 概述

在钢铁行业，人类长期面临的难以解决问题就是钢铁的腐蚀。腐蚀遍及国民经济的各个领域，包括几乎所有的行业，如机械、冶金、化工、能源、交通、航空航天、信息、海洋工程等行业。从日常生活到工农业生产，从新工艺、新技术的实现到尖端科学的发展，都存在不同程度的腐蚀问题。腐蚀造成的经济损失十分惊人，据调查统计，全球每年因腐蚀造成的经济损失约 7000 亿美元，占各国国民生产总值（GNP）的 1% ~ 5%。腐蚀损失为自然灾害（水灾、风灾、地震、火灾等）损失总和的 6 倍。美国近年来每年因金属腐蚀造成的经济损失达 3000 亿美元，平均每年每位美国人因腐蚀而损失 1500 美元，这其中有 1/3（约 1000 亿美元）是可以采用防腐蚀材料或防腐蚀技术来避免的<sup>[1]</sup>。在我国，对于腐蚀损失，20 世纪 90 年代以前尚未进行过全面统计。据估计，我国每年金属腐蚀的损失至少在 400 亿元以上<sup>[2]</sup>。我国 1995 年统计腐蚀经济损失高达 1500 亿元人民币，约占国民生产总值的 4%，每天 4 亿元<sup>[3]</sup>。1998 年，我国因腐蚀造成的损失高达 2800 亿元人民币，约占当年国民生产总值的 4% 以上。

因为金属锌具有物理阻挡和优异的电化学保护作用<sup>[4-5]</sup>，所以钢铁产品和制品的表面多年来大多采用锌、锌-铝、锌基多元合金镀层进行长期防护，在发达国家镀锌钢材用量为钢年产量的 30% ~ 40%，我国目前达到 10% 左右。通常，人们获得锌镀层的方法机理是电化学、化学沉积和高温冶金反应。电镀、电刷镀等，其形成镀层过程中欲镀金属发生了固态→离子态→固态的变化。例如，电镀过程是在外电场的作用下，使锌离子在钢铁件表面还原为金属锌，即形成电沉积结晶层。热浸镀、热喷涂等，其形成镀层过程中欲镀金属发生了固态→液态→固态的变化，欲镀金属原子经过形核、长大而形成镀层，即

经过结晶过程形层；形成镀层的金属首先由固态变为液态，再在待镀基体表面上经扩散和凝固结晶为固态。例如，热浸镀锌时锌在钢铁表面形核，随后扩散生长，发生了冶金结晶，最终形成由 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\zeta$ 、 $\eta$ 等相组成的镀层。热喷涂锌时，锌的线材或粉状颗粒在瞬间高温作用下融化，喷射到钢铁基体表面上冷却形成结晶镀层。类似工艺中欲镀金属的存在状态往往是金属锭（热浸镀的锌锭、铝锭、锌基合金锭等）、金属板材（如电镀时铜板、锌板、镍板等）、金属线材或颗粒（如热喷涂用的线材、金属粉末等）。这些传统锌镀层形成过程是金属原子的结晶和晶核的长大过程，可以用金属学中的形核理论、扩散理论、晶体螺旋式或二维晶核成长理论等进行解释，镀层为结晶形层；形层过程中或发生电解沉积，或发生高温冶金反应。欲镀金属因为离子态或液态等中间态的转变，不可避免地在生产过程需要额外消耗能量；且因为废液排放、处理和金属蒸气、金属沉渣的存在造成严重的环境污染。如果使得欲镀金属在形成镀层过程中仅发生固态 $\rightarrow$ 固态的转移，不但可以大大降低能耗，而且可以缓和工艺本身对工作环境和周边生态的压力。

由于近几年国内的加工业发展已造成锌资源的匮乏，自2005年4季度以来锌价上涨了45%。此外，传统的热浸镀、电镀过程伴随有严重的三废排放，受环境及生态保护的压力逐渐增大，利用金属粉末直接在钢铁制件表面形成镀层逐渐受到人们的青睐。例如，机械镀锌、冷喷涂、粉末轧制镀、无机水性金属微粉涂层逐渐在一些领域代替传统的镀锌技术，这些工艺技术都是利用金属粉末颗粒在不通过电沉积结晶或高温熔体冶金反应的情况下，依靠外电场产生的机械能或较少的热能，直接在钢铁基体表面形成镀层。

## 1.2 金属微粉涂镀工艺及特点

### 1.2.1 冷喷涂工艺

#### 1. 冷喷涂工艺的提出

冷喷涂（CS: cold spray）又称冷空气动力学喷涂（CGDSM: cold gas dynamic spray method 或 CGDS、CGSM）。20世纪80年代中期，前苏联科学院在用示踪粒子进行超音速风洞试验时，发现当粒子

的速度超过某一临界速度时示踪粒子对靶材表面的作用从冲蚀转变为加速沉积，由此在1990年提出了冷喷涂的概念<sup>[6]</sup>。前苏联研究者Papyrin于1995年在美国召开的全美热喷涂会议上与美国学者开始联合发表相关研究结果<sup>[7]</sup>，直到2000年在加拿大召开的国际热喷涂会议上才组织了专门的讨论会，由此在国际上引起了广泛的关注。近几年来美国与德国一部分研究机构也开展了冷喷涂技术的研究工作<sup>[8]</sup>。

## 2. 冷喷涂的基本原理

冷喷涂是基于空气动力学原理的一种喷涂技术<sup>[9]</sup>，其原理如图1-1所示。冷喷涂是利用高压气体通过缩放管产生超音速流动将粉末粒子从轴向送入高速气流中，经加速后，在完全固态下撞击基体，通过较大的塑性流动变形而沉积于基体表面上形成涂层的。为了增加气流的速度，从而提高粒子的速度，还可以将加速气体预热后送入喷枪，通常预热温度小于600℃。

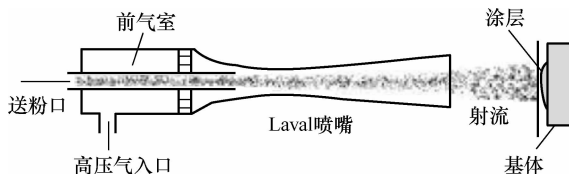


图1-1 冷喷涂原理示意图<sup>[10]</sup>

冷喷涂过程中，高速粒子撞击基体后，是形成涂层还是对基体产生喷丸或冲蚀作用，或是对基体产生穿孔效应，取决于粒子撞击基体前的速度。对于一种材料存在着一定的临界速度 $v_c$ ，当粒子速度大于 $v_c$ 时粒子碰撞后将沉积于基体表面；当粒子速度小于 $v_c$ 时，将发生冲蚀现象。 $v_c$ 因粉末种类而异，一般为500~700m/s<sup>[10]</sup>。

影响冷喷涂过程中粒子沉积特性的主要因素包括气体的压力、温度、种类，粉末的种类与粒度，以及喷枪结构等。在其他条件一定的情况下，气体的种类、压力及温度主要决定了粒子的速度，粒子速度的大小决定了其沉积特性。如前所述，只有当粒子速度超过临界速度 $v_c$ 时，才能在碰撞基体后实现沉积；否则将对基体或涂层产生冲蚀效应。

### 3. 冷喷涂层的结合机理

关于冷喷涂涂层的沉积过程行为, 一般认为, 高速粒子撞击基体时粒子的动能使粒子与已形成的涂层或基体产生较大的塑性变形, 从而结合在一起实现粒子的沉积。冷喷涂镀层虽然是高能量冲击镀层, 但镀层主要由金属颗粒组成, 颗粒之间存在明显的界线, 并且镀层中存在一定的空隙, 镀层内金属颗粒之间为机械式物理结合。例如, 文献 [11-13] 中观察到金属粒子撞击经抛光的基体后的扁平粒子和基体侧凹坑, 这表明粒子和基体发生了明显的塑性变形。T. H. Van Steenkiste<sup>[14]</sup>利用铝粉、铜粉喷涂时发现镀层中存在明显的颗粒界面, 同时还发现金属粉末的喷涂过程基本不发生氧化, 即使是利用空气作为携带气体介质, 金属粉末的氧化也非常少。Hamid Assadi<sup>[15]</sup>认为, 冷喷涂形层过程中金属颗粒没有被明显加热, 涂层中金属颗粒之间的结合仅仅是依靠冲击所产生的能量造成的机械锚合, 结合牢固与否主要是由金属颗粒的冷喷涂临界速度决定的。然而也有人认为, 粒子撞击到基体上时可能产生较大的冲击波, 使被碰粒子与相邻粒子在界面处的局部温度达到材料的熔点以上而造成局部熔化, 进而达到局部的冶金结合<sup>[8,16,17]</sup>, 并认为该过程与爆炸焊的过程类似。近两年来, 人们通过大量的研究认为, 冷喷涂涂层之间的粒子结合以机械咬合为主, 同时有部分冶金结合<sup>[18-20]</sup>。

### 4. 冷喷涂的应用

冷喷涂主要用于喷涂具有一定塑性的材料, 比如纯金属、金属合金、塑料及复合材料等, 特别是由于粒子加热温度低, 基本无氧化, 适用于对温度敏感(纳米、非晶等)、对氧化敏感(Cu、Ti等)和对相变敏感(金属、陶瓷)材料的涂层制备。由于高速粒子碰撞时对基体或涂层表面强烈的喷丸效应, 涂层内一般处于压应力状态, 有利于沉积厚涂层; 而且由于粉末没有经历明显的热过程, 基本不发生组织结构的变化, 未沉积的粒子可以回收利用。为了获得高的粒子速度与沉积效率, 要求粉末颗粒粒度及其分布范围要小, 一般为 $1 \sim 50 \mu\text{m}$ <sup>[21]</sup>。迄今的研究表明, 冷喷涂多用于制备有一定塑性的纯金属与合金, 如纯金属 Al、Cu、Fe、Ni、Ti 等, 不锈钢、青铜等合金, 也可以制备 NiCr 基高温合金等。通过控制气体预热温度也可以制备

金属陶瓷（如  $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$ ）等涂层，还可以制备有机高分子材料涂层及金属基复合材料涂层。随着冷喷涂技术的不断发展，人们也在尝试用冷喷涂制备纳米结构陶瓷涂层，实际上已有研究表明，在低压气氛下完全可以进行微纳米氧化物陶瓷颗粒的沉积，尽管对沉积机理尚不清楚<sup>[10]</sup>。但利用冷喷涂在低温下成功制备锌防护层的研究甚少<sup>[14,22]</sup>。

### 1.2.2 轧制镀工艺

#### 1. 轧制镀的提出

粉末轧制镀（plating powder and rolling method）全称为金属粉末—板带复合轧制镀，英文缩写为 PPR 法，是昆明理工大学在 20 世纪 90 年代研究开发的一项制备双金属复合薄板的新技术。该技术的主要工艺特点是：以一种金属为基材，在其表面覆上另一种金属粉末，通过将两者共同轧制和适当的后处理工艺，形成金属复合板带，板带表面金属轧制覆盖层的厚度可以控制在  $100 \sim 2000 \mu\text{m}$  的范围内<sup>[23,24]</sup>。

#### 2. 轧制镀的工艺过程

（1）表面预复合 将选定的基材进行表面活化处理后，通过特殊工艺在其表面沉积一定厚度的金属粉末。

（2）复合轧制 将经表面预复合的板带进行复合轧制，其目的是进一步强化覆层与基材的结合，改善复合板带材的表面质量，实现产品规格所需的最终几何尺寸。

（3）扩散处理 对轧制后的板材进行扩散处理，确保覆层与基材实现冶金结合。

#### 3. 轧制镀的原理

粉末轧制镀与传统双金属带复合轧制相同，金属在轧制力作用下的变形可分为滑动变形和粘结变形，如图 1-2 所示<sup>[25]</sup>。在滑动变形区（I 区）内，粉末颗粒与轧辊、粉末颗粒与基材、粉末颗粒与颗粒之间均发生相对滑动，这种滑动促使金属粉末颗粒外表面包裹的氧化膜破裂甚至脱落。在轧制力作用下，较大直径的粉末颗粒开始发生延展变形，较小直径的粉末颗粒通过滑动填充到大直径颗粒的间隙

中。在金属粉末颗粒尚未压紧变形之前，金属颗粒的变形是均匀向四周延展的。随变形量的增大，粉末颗粒逐渐变扁、展宽，彼此接近，间隙越来越小，最后相互焊合连接成一体。进入粘结变形区（Ⅱ区），已延展成一体的金属粉末与钢铁基体发生粘结，完成板带表面金属粉末镀层的轧制过程。

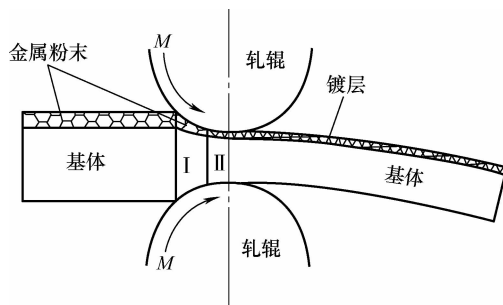


图 1-2 PPR 法复合过程金属变形示意图

用 PPR 法制备金属复合板带的轧制过程是一种不同于单一板材或板材叠轧的工件不对称轧制。在轧制力的作用下，粉末由疏松的颗粒状延展成致密的片状，并与金属基体结合成一体，粉末的变形与轧制力的大小有关，并直接影响复合板材的质量，而轧制压力又受粉末材料的特性、覆层厚度、颗粒大小的影响。另外，轧制过程中的摩擦力也对轧制压力有影响<sup>[25,26]</sup>。

#### 4. 轧制镀层的结合机理

在粉末轧制镀过程中，金属粉末颗粒在延展变形、连接成片的同时还对基材产生挤压作用，致使基材金属表面粗化，并与延展成片的粉末颗粒覆层紧密地“冷焊合”在一起完成复合过程，经过后续的扩散退火热处理，使镀层和基体之间达到扩散结合<sup>[27-28]</sup>。

#### 5. 轧制镀的应用

至今，利用粉末轧制镀已成功地开发出铜-钢、黄铜-钢、铝-钢、钛-钢、不锈钢-钢、银-钢等表面复合金属板带材，其中铝-钢粉末轧制复合材料已经用于卷帘门等领域的工业生产。

### 1.2.3 无机水性金属微粉涂层工艺

#### 1. 无机水性金属微粉涂层的提出

以富锌漆和达克罗涂层等为代表的技术直接利用非铁金属粉末参与形层，涂层防护功能强，形层过程无污染，逐渐引起人们的广泛关注。非铁金属粉末与有机或无机的粘结剂配制成涂料，刷涂或喷涂于工件表面，然后自然风干或加热烘干，形成涂层，例如有机富锌漆、无机富锌漆、达克罗涂层<sup>[29]</sup>、交美特涂层<sup>[30,31]</sup>等。这些涂层技术的共同特点是，金属粉末在各种粘结剂和添加剂的作用下，通过物理或化学的作用，金属粉末直接参与形层，而无重熔、再结晶过程。据此，何明奕等人<sup>[32,33]</sup>提出了金属微粉层层的概念，即金属微粉涂层是采用非铁金属微粉，加入其他无机金属盐、有机或无机添加剂，以及表面活性剂和其他添加剂，采用喷涂、刷涂或其他机械力的形式，使金属微粉直接参与形成表面涂层的一种表面处理技术。

#### 2. 无机水性金属微粉涂层形成原理

水性金属微粉涂层制备工艺涉及种类多，如富锌漆涂层、水性锌-铝复合涂层、达克罗涂层（锌铬膜涂层）、交美特涂层等。但其形层原理有着共同的特点：采用片状（或微细颗粒状）锌粉或铝粉、无机金属盐水溶液、有机或无机还原剂混合成浆料，加入表面活性控制物质或其他添加剂，配置成水性金属微粉涂料，经过喷、涂、浸等工艺涂覆于工件表面，然后经过低温烧结或自然固化形成金属基涂层。水性金属微粉涂层的防护机理主要有三：其一是物理屏蔽作用，涂层阻止腐蚀介质渗透到基体表面；其二是涂层中部分添加剂起到缓蚀剂的作用，比如涂层中添加铬酸盐或铬酐，涂层固化或形成过程中溶出铬酸根离子，其强烈的氧化作用使金属表面钝化，从而产生优异的耐蚀性；其三就是涂层的阴极保护作用，大部分水性金属微粉涂层中的锌粉（或锌基合金粉、锌铝混合粉）的质量分数可高达80%以上，从而保证了锌粉/锌粉之间及锌粉/钢基材之间良好的导电性，当水分侵入到涂层内，锌粉和钢基材之间即形成微电池，由于锌的电化学电位比铁负得多，所以就从锌粉向钢铁流过防蚀电流，从而对钢铁起到阴极保护作用。