



金属粉末轧制

郭 栋 编著
周志德

冶金工业出版社

76.134
128

金属粉末轧制

郭 栋 周 志 德 编著

3240-119



内 容 简 介

本书介绍了金属粉末的轧制工艺技术，包括粉末轧制成形原理、轧制粉末用设备、轧制动力参数的分析及计算、轧制工艺、粉末轧制材料的性能、轧制工艺因素对粉末轧制材料性能的影响以及粉末轧制材料的应用等。本书可供从事粉末冶金及有关应用粉末冶金材料的研究人员和工程技术人员参考。

本书第一、四、五章由周志德编写，第二、三、六章由郭栋编写，冶金部钢铁研究总院王恩珂同志对本书的编写工作提出不少宝贵意见，并为本书写了前言，马晋新和李德泉同志对本书编写工作也给予了帮助，在此表示感谢。

金 属 粉 末 轧 制

郭 栋 周志德 编著

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 6 字数 155 千字

1984年7月第一版 1984年7月第一次印刷

印数00,001~2,500册

统一书号: 15062·4090 定价0.80元

前 言

粉末轧制是粉末冶金成形工艺中制造板、带材的最主要方法。粉末轧制的工艺特点是连续成形、生产率高；成形均匀、产品质量稳定、收得率高；金属损耗和成形能耗少；工艺流程短、设备投资少、加工成本低等等。目前粉末轧制可以制造多种材料。就材质而论，有金属、假合金、金属与非金属组合材料，乃至非金属；就结构而论，有多孔材料、致密材料、乃至多层复合材料；就形状而论，有板、带、箔，乃至线、管、环等各种形状的材料，这些材料一般分为多孔板、带和致密板、带材两大类。制造前一类材料包括粉末轧制和烧结两个基本工序，而生产致密板、带材，除经粉末轧制和烧结两个基本工序外，还增加冷轧、退火或热轧工序等。全部工序还可以与粉末连续轧制连接，同步连续化。

早在十九世纪中叶就有人在轧制青铜车屑时获得具有光滑表面的带材。但粉末轧制技术的真正发展，还是从本世纪四十年代开始的。德国人和英国人先后发表了有关轧制还原铁粉和铜粉的研究论文。随后，苏联、加拿大、日本、美国等国对金属粉末轧制理论、工艺及设备开展了进一步的研究。至今，粉末轧制技术已在制取高纯金属板、带材，多孔金属，抗磨和摩擦材料，电焊极带等具有特殊性能的板、带材方面获得了广泛的应用，并已推广，进行了工业生产。

应该指出，粉末轧制的机制或理论，从简单的金属粉末连续辊压成形的角度看，已与传统的致密金属轧制大不相同。它所遵循的一般原理已不是被轧制材料在轧制前后简单的体积恒等定律，而是重量相等定律。粉末轧制过程涉及到粉末的咬入、摩擦力、粉末体的被压缩、颗粒的迁移和变形、类似骨架整体的形成和变形等等问题，比致密金属整体的塑性变形机制复杂得多，而

这些正是有关粉末轧制理论所要探讨的问题。

我国粉末轧制研究工作是从本世纪六十年代初开始的。二十多年来，研究和试制工作主要集中在多孔特殊性能材料和高纯金属板、带材方面，对致密板、带材也进行过某些试验和探讨。

本书综合了国内外有关金属粉末轧制方面最基本的和最新的技术资料，期望对推进我国粉末冶金事业的发展有所裨益。

王恩珂

1982年8月

· 符号说明

- Q_1 ——单位时间内通过供料截面的粉末量。
 Q_2 ——单位时间内通过辊缝截面带材的重量。
 V_1 ——通过供料截面的粉末流动速度。
 V_2 ——带材出辊速度。
 H ——粉末被轧辊咬入的厚度，或称供料厚度。
 h ——带材厚度。
 Δh ——楔形刚性体前后两端厚度差之半。
 b ——带材宽度。
 B ——供料宽度。
 γ_0 ——粉末松装密度。
 γ ——粉末生带材密度。
 γ_K ——致密金属材料的密度。
 h_1 ——轧制角所对应的截面厚度。
 h_2 ——压制角所对应的截面厚度。
 h_3 ——中性角所对应的截面厚度。
 ε ——压制系数； $\varepsilon = H/h$ 或 $\varepsilon = h_1/h_0$ 。
 λ ——延伸系数； $\lambda = V_2/V_1$ 。
 β_1 ——宽展系数； $\beta_1 = b/B$ 。
 Z ——压实系数； $Z = \gamma/\gamma_0$ 。
 D ——轧辊直径。
 α ——粉末供料角。
 α_1 ——粉末轧制角。
 α_2 ——粉末压制角。
 α_3 ——粉末轧制中性角。
 α_4 ——轧辊弹性压缩角。
 ΔR ——轧辊对粉末的径向压力。
 ΔT ——摩擦力。
 ΔQ ——粉末柱自重。

- ΔP ——粉末对轧辊的反作用力。
 μ ——粉末与轧辊表面间的摩擦系数。
 S_0 ——原始轧辊辊缝。
 β ——粉末与轧辊间的摩擦角。
 K ——侧压系数。
 P ——轧辊对粉末的压力。
 P_1 ——由摩擦力、粉末自重和其它外力引起的作用于变形区内微小粉末体上的压力。
 S_f ——轧辊弹跳值。
 $V_{\min}$ ——最低轧制速度。
 $V_{\max}$ ——最高轧制速度。
 A_p ——阿基米德常数。
 C ——粉末轧制过程中所有几何和物理力学因素综合作用的经验系数。
 ΔQ_{iti} ——轧辊咬入粉末的增量。
 Δq_{hi} ——引起带材增厚的粉末增量。
 Δq_{ri} ——引起带材密度增加的粉末增量。
 d_1 ——粉末颗粒等效直径。
 η ——气体粘滞系数。
 K_1 ——粉末体渗透系数。
 Q ——粉末带材试样的重量。
 l ——粉末带材试样的长度。
 σ_s ——金属屈服强度。
 σ'_s 、 σ'' ——咬入弧起点和终点金属的屈服强度。
 ε_1 ——粉末带材孔隙度。
 V ——轧辊线速度。
 α_s ——计算带材密度时的假定轧制中心角。
 α_z ——轧制角 α_1 的任意值。
 α_x ——作用于微小粉末体 $abcd$ 上部的平均法线接触应力。
 t_x ——轧辊作用于微小粉末体上的切线应力。
 h_x ——对应于 α_x 角的粉末截面厚度。
 R ——轧辊半径。
 K_2 ——临界截面的屈服强度。
 P_x ——轧辊对微小粉末体作用的法线应力随 α_x 的变化值。

$P_{\max}$ ——单位法线接触应力最高值。

A ——压制压力与轧制力间的比例常数。

Z_0 ——粉末体的极限压实系数； $Z_0 = \frac{\gamma_K}{\gamma_0}$ 。

P_0 ——取 $\alpha = 0$ 时的压制粉末的单位压力值，即 $P_0 \approx P_{\max 0}$ 。

φ ——滞后区粉末与轧辊接触弧所对应弦的延线与轧制方向（轴线）间的夹角。

$Z_{\max}$ ——压制条件下所能达到的最高压实系数。

l_d ——变形区弧长。

M_1 ——粉末轧制力矩。

γ_3 ——粉末振动密度。

A_m ——轧制压力与轧辊辊心间的距离，即轧制力的力臂。

M_2 ——轧制时的摩擦力矩。

μ_2 ——轧辊轴颈与轴瓦间的摩擦系数。

d_2 ——轧辊辊径直径。

M ——粉末轧制总力矩； $M = M_1 + M_2$ 。

β_p ——轧制总压力作用点和轧辊辊心的连线与带材出辊截面间的夹角；

$$\beta_p = \frac{1}{3} (\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4)。$$

W ——轧制1吨粉末生带材所需的能量。

ψ ——轧制力矩力臂系数； $\psi = 0.30 \sim 0.33$ 。

ρ ——轧件的相对密度。

$\gamma_{\max}$ ——轧件的最高密度，可取 $\gamma_{\max} = \gamma_A$ 。

K_3 和 β_2 ——与粉末轧制材料和轧辊辊径有关的系数。

D_1 和 D_2 ——轧辊直径。

ΔQ_m ——由热金属或金属粉末向外传递的热量。

ΔQ_d ——金属或金属粉末在发生塑性变形时所产生的热量。

ΔQ_s ——粉末体热轧时所损失的总热量。

Z_3 ——粉末密度取其振动密度时所具有的压实系数； $Z_3 = \frac{\gamma}{\gamma_3}$ 。

λ_b ——轧辊的导热率。

λ_m ——被轧金属的导热率。

λ_{pm} ——多孔金属的导热率。

λ_1 ——导热率平均值。

t ——粉末与轧辊间的接触时间。

C_b ——热辊的比热。

C_m ——金属或金属粉末的比热。

T_b ——轧辊温度。

T_m ——金属或金属粉末的温度。

T_K ——金属与轧辊间的接触温度。

γ_1 ——密度的平均值； $\gamma_1 = \frac{\gamma_0 + \gamma}{2}$ 。

γ_b ——轧辊密度。

ε_0 ——粉末孔隙度。

h_4 ——平均厚度； $h_4 = \frac{H + h}{2}$ 。

S_2 ——粉末带材的前滑值。

T_s ——粉末带材温度。

σ''_s ——与金属或粉末温度有关的抗变形阻力。

G_K ——致密轧制坯料的质量。

G_P ——由 α 角所确定的空间内的粉末体质量。

目 录

前言

符号说明

第一章 金属粉末轧制原理	1
第一节 金属粉末轧制成形	1
一、粉末轧制与致密金属轧制的区别	1
二、粉末轧制变形区的形成	2
三、粉末轧制的主要变形系数	4
四、粉末轧制中的不均匀变形	7
第二节 粉末轧制中的角度参数	11
一、供料角 α	11
二、轧制角 α_1	12
三、压制角 α_2	13
四、中性角 α_3	14
五、轧辊弹性压缩角 α_4	15
第三节 粉末轧制时粉末的咬入条件	16
一、实现粉末轧制的必要条件	16
二、粉末漏斗侧挡板对粉末咬入条件的影响	18
第四节 粉末在轧制条件下的流动	19
一、粉末通过两个不转动的轧辊辊缝的流动	19
二、垂直轧制时粉末的流动	20
三、水平轧制时粉末的流动	22
四、垂直方向轧制时粉末沿供料宽度的流动	23
第五节 气体介质对粉末轧制过程的影响	26
一、粉末轧制与粉末压制成形的区别	26
二、粉末体内的气流对粉末轧制成形的影响	27
三、粉末轧制时气体介质的粘度及压强对粉末带材性能的影响	27
第六节 粉末轧制中的前滑	30

一、测定粉末带材前滑值的主要方法	30
二、影响粉末轧制前滑值的主要因素	30
第二章 金属粉末轧制工艺	33
第一节 金属粉末的直接轧制成形	33
一、常规金属粉末轧制成形法	33
二、粉末轧制法生产多孔和致密板、带材的几种工艺方案	37
三、扩大粉末轧件厚度的几种方法	39
四、粘结粉末轧制-粉浆成形法	42
第二节 金属粉末的热轧成形	43
一、金属粉末的热轧工艺及计算热轧金属粉末带材温度的方法	43
二、金属粉末冷轧生带坯的热轧	54
三、粉末包套轧制	57
四、喷射粉末轧制	58
第三节 粉末轧制材料的烧结	61
一、粉末生带材烧结炉	61
二、烧结时间对粉末带材性能的影响	62
三、烧结温度对粉末带材性能的影响	63
四、粉末生带材高温短时间烧结的可能性及其应用	65
五、粉末带材烧结时出现的表面缺陷及其消除方法	67
第三章 粉末轧制设备及粉末轧制动力参数	70
第一节 轧制金属粉末用轧机	70
一、粉末轧机的特点	70
二、国外常用的几种粉末轧机	72
三、热轧及保护气氛下轧制金属粉末用轧机	81
第二节 粉末轧制供料装置	83
一、粉末轧制供料漏斗及其结构特点	83
二、几种具有特殊结构的粉末供料装置	90
三、工业用机动供料漏斗	94
第三节 粉末轧制动力参数的分析和计算	96
一、轧制粉末的受力分析	96
二、法线接触应力分布的实验研究	97
三、粉末轧制压力计算式	101

四、金属粉末轧制力矩、能量消耗及轧制压力和力矩的计算实例···	110
第四章 金属粉末轧制带材的厚度、密度及其计算方法 ·····	116
第一节 粉末轧制带材厚度和密度的关系 ·····	116
一、影响粉末带材厚度与密度间相互关系的几个主要因素 ·····	116
二、粉末粘辊现象对带材厚度和密度的影响 ·····	117
第二节 带材厚度和密度的计算方法 ·····	121
一、称重法 ·····	121
二、公式计算法 ·····	122
三、图表法 ·····	123
四、经验系数法 ·····	124
第五章 影响粉末轧制带材性能的主要因素 ·····	126
第一节 粉末性能的影响 ·····	126
一、粉末松装密度对带材性能的影响 ·····	126
二、粉末流动性对带材性能的影响 ·····	127
三、粉末的压实性和成形性对带材性能的影响 ·····	129
第二节 粉末轧制工艺因素的影响 ·····	130
一、辊缝 ·····	130
二、辊径 ·····	131
三、轧制速度 ·····	133
四、辊面状态 ·····	134
五、带材宽度 ·····	139
六、供料厚度 ·····	140
第六章 粉末轧制材料及其应用 ·····	141
第一节 粉末轧制多孔材料 ·····	141
一、粉末轧制多孔材料的特点 ·····	141
二、粉末轧制多孔镍、钛、不锈钢及其应用 ·····	143
第二节 金属及合金粉末板、带材 ·····	146
一、铁及铁基合金粉末带材 ·····	147
二、铝、镍、钴、铜及其合金粉末带材 ·····	155
三、钛、钨、钨及其它金属粉末板带材 ·····	158
第三节 粉末轧制法制造的一些特殊性能材料 ·····	161
一、粉末轧制复合材料 ·····	162

二、耐磨和摩擦材料	166
三、电工材料及磁性材料	168
四、金刚石和硬质合金材料	172
五、弥散强化型合金带材	173
六、粉末轧制陶瓷材料	174

第一章 金属粉末轧制原理

第一节 金属粉末轧制成形

一、粉末轧制与致密金属轧制的区别

金属粉末轧制实质上是一个连续的压制过程。粉末不断地通过位于同一平面但转动方向相反的两个轧辊的缝隙之间，并依靠轧辊的压力将其轧制成具有一定机械强度的多孔板、带材。

按带材出辊方向的不同，粉末轧制可分为三种形式：垂直的、水平的和倾斜的，其中以垂直方向的粉末轧制方法采用得较为普遍，并且与其相关的轧制原理和工艺问题研究得也比较系统。图 1-1 为垂直方向的粉末轧制示意图。

粉末轧制的原料是一种具有一定流动性的分散颗粒或团粒组成的不连续的松散体。在粉末轧制过程中，整个粉末体在压力作用下的行为，实质上与致密金属的轧制不完全相同。因此，金属粉末轧制与致密金属轧制相比，在成形原理上有它的特点。

众所周知，致密金属轧制前后只是金属体形状的改变，而体积不变。金属粉末轧制就像其它任何粉末压力加工一样，是建立在颗粒间有空隙存在的基础上。在轧制压力作用下，粉末颗粒相互移近和重新排列，颗粒间所含气体也不断逸出。结果，粉末颗粒间的空隙减小，粉末体被压实成为具有一定密度和一定机械强

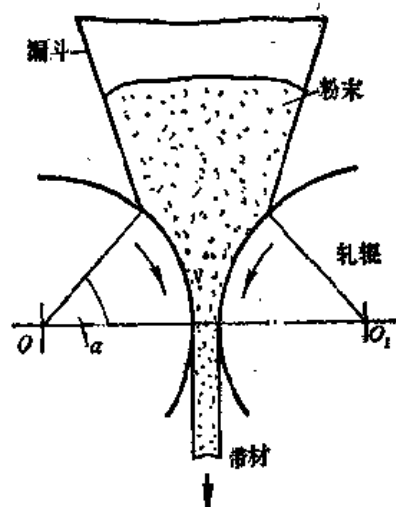


图 1-1 垂直方向的粉末轧制示意图

度的连续的多孔板、带材。实践表明,原始松装密度为 1.14克/厘米^3 的电解镍粉末,在工作辊径为14毫米的四辊轧机上进行一次轧制(单位轧制压力 1000公斤/厘米^2)成形后,就可成为密度是 3.6克/厘米^3 的多孔带材。每克粉末所占有的体积,由松装状态的 0.88立方厘米 ,减小到 0.28立方厘米 。由此可见,致密金属轧制前后金属体积相等的这一原理不适用于金属粉末的轧制,金属粉末轧制遵守轧制前后金属粉末重量相等这一原理。

二、粉末轧制变形区的形成

在垂直方向的金属粉末轧制中,依据粉末在轧制变形区所处状态的不同,通常又将整个粉末轧制变形区划分为三个区段^[1],即供料区、粉末滑移区和压实区(图1-2)。在这三个不同区段里,相应出现有粉末的流动、滑移和粉末体的压实。

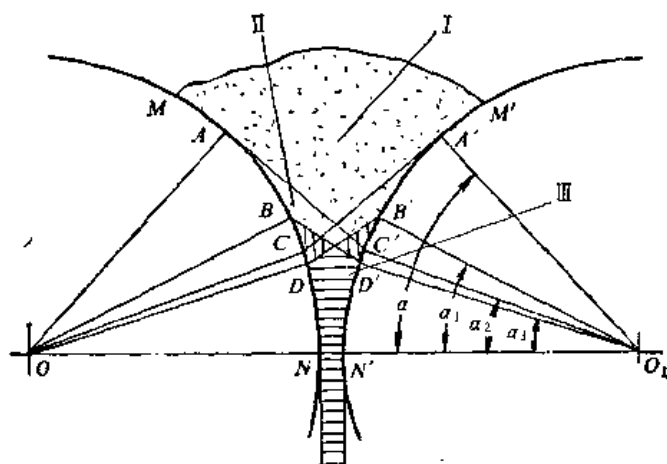


图 1-2 金属粉末轧制变形区的形成

I—供料区；II—滑移区；III—压实区

在供料区内,粉末依靠自重下流,贴近辊面的粉末为辊面的摩擦所带动。就是说,漏斗内的粉末颗粒移动有两个基本方向:位于漏斗中心部位的粉末颗粒按垂直方向下落,而贴近辊面的粉末层则按横向弧形移动。随着粉末的下落和向变形区的移近,它们的移动速度逐渐加快。在这一过程中,松散的粉末开始进行重

新排列，并由于某些震动，而引起粉末更加密实的堆积，其密度由原来松装时的密度逐渐增大到粉末的摇实密度。但此时粉末颗粒之间尚未构成联接，整体粉末仍然处于一种松散状态。应该指出，在供料区内，粉末颗粒向变形区流动的特点，在很大程度上取决于粉末开始的供料厚度和轧制方式。

滑移区是指部分金属粉末间发生相对移动的区域，包括从最上部至最下部（图1-2中 AC' 和 $A'C$ 到 BD' 和 $B'D$ ）的滑移线所包围的区域。所谓滑移线就是各部分粉末层间在相对滑移时所沿循的路线。因此，滑移区实际上是由许多粉末层相对滑移时最上面和最下面的滑移线所构成的粉末条带区。

在滑移区内，粉末颗粒向压实区移动逐渐加快。原来处于漏斗内开始布料的粉末水平层，随着轧制过程的进行，破坏了其层次间的连续性，继面出现粉末层间的滑移，使贴近辊面的粉末开始沿滑移线向变形区移动，而被滑移线切断的中心部位的粉末，则仍作垂直方向向下移动。不过它的移动速度要低于贴近辊面的粉末的移动速度。随着粉末层的下落，粉末沿滑移线的移动速度也逐渐加快。同时，使沿滑移线向前移动的粉末层厚度加厚。粉末滑移的厚度通常取决于粉末颗粒大小和形状，而滑移区的长度则与供料方式（自由供料或强制供料）有关。

在此区段内，随着粉末颗粒向前移动速度的加快，轧制压力逐渐增大，粉末体内部颗粒间的空隙逐渐减少。这时粉末颗粒间已经产生了一定的联接。

压实区的形成与滑移区的形成一样，也是由于在两个轧辊之间形成一抑制变形区的结果。在形成抑制变形区的同时，除与轧辊表面接触的粉末层外，所有粉末都被压实到摇实密度，粉末的内摩擦角也逐渐增大。由于粉末内摩擦角的增大，使侧压系数和滑移线倾斜角以及压实角相对减小。接触表面层平衡条件破坏的结果，又使抑制变形区缩小，并形成了新的边界滑移线 BD' 和 $B'D$ 。这时 BD' 和 $B'D$ 就成为粉末滑移区和压实区的边界线，而在新变形条件下，这一边界线所对应的轧辊中心角分别称为

α_1 和 α_3 (图1-2)。

在压实区内，由于轧制压力急剧增长，粉末颗粒进一步相互靠紧和镶嵌，颗粒间的接触面积增大。这时颗粒间已产生较好的联接，粉末体被轧制成具有一定密度和一定机械强度的多孔板、带材。

三、粉末轧制的主要变形系数

在金属粉末轧制过程中，如果粉末和其它轧制条件都保持不变，那么根据粉末轧制前后重量相等原理，在单位时间内，通过供料截面而流向变形区的粉末量应与单位时间内出辊的粉末带材重量相等。

单位时间通过供料截面流向变形区的粉末量为：

$$Q_1 = V_1 H B \gamma_0 \quad (1-1)$$

而单位时间通过出辊截面的粉末带材重量则为：

$$Q_2 = V_2 h b \gamma \quad (1-2)$$

因

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_1 H B \gamma_0 = V_2 h b \gamma$$

所以

$$\frac{H}{h} = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{b}{B} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_0} \quad (1-3)$$

由此，我们就可以得到轧制过程中金属粉末的如下几个主要轧制变形系数。

供料厚度与带材厚度之比叫做粉末轧制中的压制系数，即：

$$\frac{H}{h} = e$$

带材出辊时的移动速度与通过供料截面的粉末流动速度之比叫做延伸系数，即：

$$\frac{V_2}{V_1} = \lambda$$

带材宽度与粉末供料宽度之比叫做宽展系数，即：