

# 镍基合金管材挤压及 组织控制

NIEJI HEJIN GUANCAI JIYA JI ZUZHI KONGZHI

董建新 著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 镍基合金管材挤压及 组织控制

董建新 著

北京  
冶金工业出版社  
2014

## 内 容 提 要

本书以材料变形过程的再结晶行为和晶粒演化的材料学特征为基础,将微观的材料变形机理与高温合金的宏观加工参数、模具设计准则和组织控制原则相结合,同时利用计算材料学的基本手段对合金的变形规律及加工工艺进行优化,研究了高温合金挤压变形过程中坯料的优化设计、模具损伤与润滑及管材组织控制的关联性。

本书可供核电、火电、石化领域镍基合金管材的设计单位、生产单位(各大钢厂)、应用单位及评估单位的技术人员参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

镍基合金管材挤压及组织控制/董建新著. —北京:  
冶金工业出版社, 2014. 2

ISBN 978-7-5024-6431-8

I. ①镍… II. ①董… III. ①镍基合金—管材轧制  
IV. ①TG146. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 016069 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 李 臻 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6431-8

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京慧美印刷有限公司印刷

2014 年 2 月第 1 版, 2014 年 2 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 26.75 印张; 523 千字; 417 页

79.00 元

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

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

目前，国外在钢管挤压生产技术领域处于领先地位的企业有瑞典 Sandvik、德国 Mannesmann、意大利 Dalmine、加拿大 Akuoma、日本 Sumitomo、西班牙 Tubacex、奥地利 Schotter - B1 等。这些企业在挤压力的计算、模具、润滑剂、加热等方面做了大量的基础研究工作，但均属保密范畴。国内企业虽然从 20 世纪 60 年代以来引进了几条 3000t 级的钢管热挤压生产线，但是由于技术上的问题，仍然存在一些关键的控制因素无法掌握。综合性能较高的镍基合金管材，如油井管、锅炉管等，主要依赖进口。随着我国经济的快速发展，在核电、火电和石化等行业，对具有优异高温强度和耐蚀性能的镍基合金管材的需求急剧增长。近几年，我国投产建成了两条 6000t 卧式热挤压机生产线，该装备为我国镍基合金管材的国产化提供了重要保障。但我国在高附加值镍基合金管材的加工控制技术方面与先进国家有明显的差距，加之对镍基合金管材成型过程的材料学、摩擦学、塑性变形力学等本质问题尚缺乏系统研究，因此，系统地研究材料体系、挤压过程的相关科学问题及针对该类设备的相关应用等问题，对我国在镍基合金热挤压管方面奠定理论和工艺基础具有重要的学术和应用意义。

镍基合金热加工过程的最大特点在于：（1）由于合金化程度不断提高，镍基合金的组织结构变得愈加复杂，而合金的加工塑性随高温强度的提高而降低；（2）镍基合金的热加工温度范围很窄，一般在 150℃ 左右，难变形镍基合金甚至只有 70 ~ 80℃，而结构钢可达到 400℃，铝合金甚至在中低温度下也可以进行成型加工；（3）镍基合金变形过程对模具及设备的要求比较高。由于镍基合金的热强性高，在挤压变形过程中工件对模具的磨损比较大；（4）镍基合金的导热性较

差,在高速变形条件下,变形热效应引起的温升效应会影响材料的相变规律和组织演化,另外,由于挤压过程的复杂应力状态,其应力的不均匀性也会对组织控制带来很大的影响,尤其对管材的内外表面的质量状态,都将增加镍基合金热挤压过程的组织控制难度。

本书以材料变形过程的相变机理和晶粒演化的材料学特征为基础,将微观的材料变形机理与高温合金的宏观加工参数、模具设计准则相结合,同时利用计算材料学的基本手段对合金的相变规律及加工工艺进行优化,研究高温合金挤压变形过程中坯料的优化设计、模具损伤与润滑及管材缺陷间的关联性,研究结果对我国镍基合金管材的工程化生产具有重要的理论和实际指导意义,为我国镍基合金热挤压管材的制备奠定理论和设计基础,并为实际生产过程提供有效和可行的理论指导。

本书是作者所在的课题组对镍基合金长期研究成果的积累,主要是基于国家自然科学基金——钢铁联合基金重点项目“镍基合金管材挤压变形机理”(No. 50831008)研究期间的结果分析和总结。项目组成员张清东、张立红、邵卫东、张麦仓、孙朝阳等对该项研究投入了大量的精力,谢锡善和胡尧和老师给予了具体指导和大力帮助,在此对他们无私的投入和精诚的合作表示衷心感谢。

尤其需要指出的是,作者的研究生做了大量的工作,在此要感谢博士研究生焦少阳、王宝顺、杨亮、姚志浩、王珏、毛艺伦,硕士研究生罗坤杰、朱冠妮、何智勇、耿志宇、郑理理、林奔等的努力工作。

作 者

2013年9月

# 目 录

<b>1 镍基合金的挤压特点</b> .....	1
1.1 挤压成型技术 .....	1
1.1.1 挤压成型技术的分类 .....	2
1.1.2 挤压加工的特点 .....	3
1.2 镁合金管材的挤压成型 .....	4
1.3 铝合金的挤压成型 .....	5
1.4 钢铁材料的挤压成型 .....	6
1.4.1 冷挤压 .....	6
1.4.2 温挤压 .....	6
1.4.3 热挤压 .....	7
1.4.4 无缝钢管的热挤压技术 .....	8
1.5 镍基合金管材的生产工艺 .....	8
1.5.1 感应加热扩孔 .....	10
1.5.2 热挤压 .....	11
1.5.3 冷轧/冷拔 + 热处理 .....	12
1.6 典型镍基合金的特点 .....	13
1.6.1 蒸汽发生器传热管 690 合金 .....	13
1.6.2 油井管 G3 合金 .....	15
1.7 镍基合金管材制备过程中存在的问题 .....	18
1.7.1 成材率 .....	18
1.7.2 荒管内表面橘皮状缺陷 .....	18
1.7.3 冷轧管和成品管内表面丝状皱折 .....	19
1.7.4 成品管内壁细晶层及晶粒尺寸不均匀性 .....	21
1.7.5 油井管 G3 合金荒管开裂 .....	22
1.7.6 坯料温升引起的热塑性降低 .....	23
参考文献 .....	24
<b>2 镍基合金 690 的热变形行为</b> .....	26
2.1 流变应力的影响规律 .....	26

2.1.1	热变形行为的研究方案 .....	26
2.1.2	流变应力曲线 .....	28
2.2	本构关系的构建及验证 .....	32
2.3	再结晶组织的影响规律 .....	38
2.3.1	热变形参数对再结晶组织的影响 .....	39
2.3.2	初始晶粒尺寸对热变形特性的影响 .....	48
2.3.3	再结晶图 .....	53
2.4	加工图的建立及应用分析 .....	56
2.4.1	加工图的建立 .....	56
2.4.2	加工图的分析 .....	61
2.4.3	管材热挤压的控制原则 .....	64
2.5	热变形组织演变模型及挤压组织控制 .....	66
2.5.1	热变形过程中的组织演变及模型构建 .....	67
2.5.2	动态再结晶 .....	71
2.5.3	亚动态再结晶 .....	77
2.5.4	晶粒长大 .....	83
	参考文献 .....	86
<b>3</b>	<b>镍基合金 G3 的热变形行为 .....</b>	<b>87</b>
3.1	G3 合金的本构方程建立 .....	87
3.1.1	真应力 - 真应变曲线 .....	87
3.1.2	峰值应力的表征 .....	89
3.1.3	G3 合金的本构方程 .....	91
3.2	变形参数对微观组织的影响 .....	94
3.2.1	变形温度以及应变速率的影响 .....	94
3.2.2	应变量的影响 .....	97
3.3	动态再结晶行为 .....	102
3.3.1	真应力 - 真应变曲线 .....	103
3.3.2	显微组织特征 .....	105
3.3.3	动态再结晶动力学方程 .....	109
3.4	G3 合金亚动态 (静态) 再结晶行为 .....	114
3.4.1	双道次热压缩后 G3 合金的热变形特性 .....	116
3.4.2	G3 合金的亚动态再结晶组织演化规律 .....	121
3.4.3	热变形参数对 G3 合金亚动态再结晶行为的影响 .....	125
3.4.4	亚动态再结晶动力学方程 .....	127

3.5 G3 合金再结晶晶粒长大方程 .....	130
3.5.1 G3 合金晶粒长大阶段的组织演化规律 .....	131
3.5.2 晶粒长大模型验证 .....	134
参考文献 .....	136
<b>4 镍基合金 GH536 和 825 的热变形行为 .....</b>	<b>137</b>
4.1 GH536 合金 .....	137
4.1.1 GH536 的相组成及析出规律 .....	138
4.1.2 GH536 合金热加工性 .....	138
4.1.3 GH536 合金的焊接性 .....	139
4.1.4 GH536 合金的其他性能 .....	140
4.2 825 合金 .....	140
4.2.1 825 合金的热加工性 .....	141
4.2.2 825 合金的焊接性 .....	141
4.2.3 825 合金的耐腐蚀性 .....	142
4.3 两种合金的组织特征 .....	142
4.3.1 热力学模拟方法 .....	143
4.3.2 GH536 合金的热力学平衡相 .....	143
4.3.3 GH536 合金凝固过程中的元素再分配规律 .....	144
4.3.4 合金元素对 GH536 平衡析出相的影响规律 .....	145
4.3.5 合金元素对 825 合金平衡析出相的影响规律 .....	148
4.3.6 GH536 合金相组成及相析出规律 .....	149
4.3.7 825 合金的相组成及相析出规律 .....	151
4.4 两种合金的热变形特征 .....	157
4.4.1 两种合金的应力 - 应变曲线 .....	157
4.4.2 两种合金的流变应力本构方程 .....	160
4.4.3 两种合金热加工过程中的动态再结晶行为 .....	163
参考文献 .....	172
<b>5 C-276 和 800H 镍基合金及热变形行为 .....</b>	<b>173</b>
5.1 C-276 合金及其性能 .....	173
5.1.1 C-276 合金生产过程 .....	175
5.1.2 C-276 合金的性能 .....	176
5.2 C-276 合金的组织特征 .....	184
5.3 C-276 合金锭均匀化 .....	189



5.3.1	均匀化理论分析 .....	190
5.3.2	合金铸锭的组织分析 .....	192
5.3.3	均匀化制度 .....	195
5.3.4	均匀化效果 .....	196
5.4	热加工塑性 .....	198
5.5	热变形行为 .....	203
5.5.1	变形参数对组织特征的影响 .....	204
5.5.2	热压缩流变曲线特征 .....	208
5.5.3	高温压缩的本构关系 .....	209
5.6	800H 合金及热变形行为 .....	210
5.6.1	800H 合金及性能 .....	210
5.6.2	800H 合金的热变形行为 .....	212
5.6.3	800H 合金的热加工图 .....	215
	参考文献 .....	222
<b>6</b>	<b>镍基合金管材基于工艺优化的模拟 .....</b>	<b>223</b>
6.1	金属热变形的数值模拟技术研究现状 .....	223
6.1.1	金属塑性加工主要的数值模拟技术 .....	223
6.1.2	有限元法在金属塑性加工中的应用 .....	224
6.2	GH4169 合金管材正挤压的有限元模拟 .....	229
6.2.1	有限元模型的建立 .....	229
6.2.2	挤压参数调整对结果的影响 .....	231
6.3	G3 合金的管材挤压工艺优化有限元模拟 .....	239
6.3.1	有限元模型的建立 .....	239
6.3.2	材料特性与边界条件的定义 .....	239
6.3.3	基准参数选择与参数调整方案 .....	241
6.3.4	基准参数下挤压模拟结果分析 .....	242
6.3.5	挤压参数调整对结果的影响 .....	246
6.4	690 合金管材挤压的有限元模拟与正交试验优化 .....	255
6.4.1	有限元模型的建立 .....	255
6.4.2	材料特性与边界条件的定义 .....	255
6.4.3	正交试验的设计 .....	258
6.4.4	适宜参数组合的确定 .....	262
6.5	合金特征对挤压工艺的关联影响性 .....	266
6.6	GH625 和 825 合金管材挤压过程数值模拟 .....	268

6.6.1	GH536 合金管材挤压模拟 .....	269
6.6.2	825 合金管材挤压模拟 .....	273
	参考文献 .....	278
<b>7</b>	<b>热挤压工艺与磨损和润滑 .....</b>	<b>280</b>
7.1	热挤压模具磨损研究现状 .....	281
7.2	玻璃润滑热挤压工艺研究现状 .....	283
7.2.1	玻璃润滑热挤压工艺介绍 .....	283
7.2.2	玻璃润滑剂的研究现状 .....	285
7.2.3	玻璃润滑剂的组成 .....	286
7.3	G3 合金热挤压模具磨损行为 .....	287
7.3.1	模具磨损计算模型 .....	288
7.3.2	模具磨损特点 .....	291
7.3.3	模具-坯料界面状态对模具磨损的影响 .....	293
7.4	G3 合金热挤压过程中的润滑行为及与工艺的关系 .....	298
7.4.1	玻璃润滑膜厚度计算公式 .....	299
7.4.2	基于润滑特征的 G3 合金热挤压工艺参数的制定 .....	304
7.4.3	G3 合金热挤压工艺对润滑用玻璃粉的黏度要求 .....	322
7.4.4	G3 合金热挤压润滑用玻璃粉的组成设计 .....	328
7.5	模具磨损和润滑对 G3 合金热挤压工艺的作用规律 .....	336
7.5.1	润滑良好的模具磨损行为 .....	336
7.5.2	基于模具最高工作温度的热挤压工艺参数选择 .....	340
7.5.3	润滑效果对热挤压工艺的影响规律 .....	342
	参考文献 .....	344
<b>8</b>	<b>热挤压工艺与组织控制 .....</b>	<b>346</b>
8.1	G3 合金组织演变模型的验证 .....	347
8.2	热挤压工艺参数对 G3 合金管材内部晶粒的影响 .....	351
8.2.1	坯料预热温度 .....	351
8.2.2	挤压速度 .....	353
8.2.3	圆角半径和模具预热温度 .....	354
8.2.4	初始晶粒尺寸 .....	355
8.3	G3 合金管材热挤压工艺参数选择 .....	357
8.3.1	热挤压工艺参数选择准则 .....	357
8.3.2	G3 合金热挤压工艺参数选择 .....	359

8.4	690 合金热变形过程组织演变模型验证 .....	361
8.4.1	690 合金热压缩实验条件下的验证 .....	361
8.4.2	模型外推验证 .....	364
8.4.3	热挤压过程组织演变模拟的可行性 .....	364
8.4.4	用户定义子程序的开发 .....	366
8.4.5	热挤压变形的有限元模型 .....	368
8.4.6	热挤压组织预测可行性分析 .....	370
8.5	热挤压工艺参数对荒管晶粒组织的影响 .....	372
8.5.1	操作工艺参数 .....	372
8.5.2	模具尺寸因素 .....	376
8.5.3	摩擦润滑工艺条件 .....	377
8.5.4	其他因素 .....	378
	参考文献 .....	381
<b>9</b>	<b>690 合金冷轧退火组织控制及管材组织可控性 .....</b>	<b>382</b>
9.1	冷轧及退火处理工艺组织演变研究方案 .....	382
9.2	冷加工对组织和硬度的影响规律 .....	386
9.2.1	冷加工对显微组织的影响 .....	387
9.2.2	冷加工对硬度的影响 .....	388
9.3	退火处理工艺对组织和硬度的影响规律 .....	388
9.3.1	退火处理工艺对晶粒尺寸的影响 .....	389
9.3.2	退火处理工艺对碳化物回溶的影响 .....	393
9.3.3	退火处理工艺对硬度的影响 .....	394
9.3.4	退火再结晶晶粒长大模型 .....	395
9.4	基于组织均匀性的冷轧退火处理工艺优化 .....	398
9.4.1	组织均匀性研究方法 .....	399
9.4.2	单道次冷轧退火后的组织均匀性 .....	401
9.4.3	双道次冷轧退火后的组织均匀性 .....	404
9.5	组织可控传热管关键生产工艺优化 .....	410
9.5.1	组织可控的热挤压工艺参数优化 .....	411
9.5.2	组织可控的冷轧退火处理工艺参数优化 .....	414
	参考文献 .....	417

管材的生产往往采用挤压成型，从国际上来看，对于软金属如 Mg、Al、Cu 等的管材挤压成型已经有较为深入的研究，约在 1797 年，英国人布拉曼就设计了世界上第一台用于铅挤压的机械式挤压机，并取得了专利。从 20 世纪 50 年代后期至 80 年代初期，欧美、日本等先进国家对建筑、运输、电力、电子电器用铝合金挤压型材需要量的急剧增长，促进了铝合金管材挤压工艺的迅速发展。2005 年全世界挤压铝材产量约 1100 万吨（可近似地视为消费量），有约 2012 个挤压厂，生产能力 1850 万吨左右。1930 年欧洲出现了钢的热挤压，但由于当时采用油脂、石墨等润滑剂，其润滑性能差，存在挤压制品缺陷多、工具寿命短等致命的弱点。钢的挤压真正得到较大发展并被应用于工业生产，是在 1942 年发明了玻璃润滑剂之后。

### 1.1 挤压成型技术

挤压是对放在容器（挤压筒）内的金属坯料施加外力，使之从特定的模孔中流出，获得所需断面形状和尺寸的一种塑性加工方法。与其他金属塑性加工方法（如轧制、锻压）相比，挤压法出现得比较晚。约在 1797 年，英国人布拉曼（S. Braman）设计了世界上第一台用于铅挤压的机械式挤压机，并取得了专利。1820 年英国人托马斯（B. Thomas）首先设计制造了液压式铅管挤压机，这台挤压机具有现代管材挤压机的基本组成部分：挤压筒、可更换挤压模、装有垫片的挤压轴和通过螺纹连接在挤压轴上的随动挤压针。从此，管材挤压得到了较快速的发展。著名的 Tresca 屈服准则就是法国人 Tresca 在 1864 年通过铅管的挤压实验建立起来的。1870 年，英国人 Haines 发明了铅管反向挤压法，即挤压筒的一端封闭，将挤压模固定在空心挤压轴上实现挤压。1897 年法国的 Borel、德国的 Wesslau 先后开发了铅包裹电缆生产工艺，成为世界上采用挤压法制备复合材料的历史开端。大约在 1893 年，英国人 J. Robertson 发明了静液挤压法，但当时没有发现这种方法有何工业价值，直到 20 世纪 50 年代（1955 年）才开始得以实用化。1894 年英国人 G. A. Dick 设计了第一台可挤压熔点和硬度比较高的黄铜及其他铜合金的挤压机，其操作原理与现代的挤压机基本相同。1903 年和 1906 年美国 G. W. Lee 申请并公布了铝、黄铜的冷挤压专利。1910 年出现了铝材挤压机，1923 年 Duraaluminum 最先报道了采用复合坯料成型包覆材料的方法。1927

年出现了可移动挤压筒，并采用了电感应加热技术。1930年欧洲出现了钢的热挤压，但由于当时采用油脂、石墨等润滑剂，其润滑性能差，存在挤压制品缺陷多、工具寿命短等致命弱点。钢的挤压真正得到较大发展并被应用于工业生产，是在1942年发明了玻璃润滑剂之后。1941年美国H. H. Stout报道了铜粉末直接挤压的实验结果。1965年，德国人R. Schnerder发表了等温挤压实验研究成果，英国的J. M. Sabroff等人申请并公布了半连续静液挤压专利。1971年英国人D. Green申请了Conform连续挤压专利之后，挤压生产的连续化受到极大重视，于80年代初实现了工业化应用。

由上述可知，挤压技术的前期发展过程是从软金属到硬金属，从手工到机械化、半连续化，进一步发展到连续化的过程。从20世纪50年代后期至20世纪80年代初期，欧美、日本等先进国家对建筑、运输、电力、电子电器用铝合金挤压型材需求量的急剧增长，近20年来高速发展的工业技术对挤压制品断面形状复杂化、尺寸大范围化（向小型化与大型化两个方向发展）与高精度化、性能均匀化等要求的增多，以及厂家对高效率化生产和高剩余价值产品的追求，促进了挤压技术的迅速发展，具体表现为：

- (1) 小断面超精密型材与大型或超大型型材（如大型整体壁板）的挤压、等温挤压、水封挤压、冷却模挤压、高速挤压等正向挤压技术的发展与进步。
- (2) 反向挤压、静液挤压技术应用范围的扩大。
- (3) 以Conform为代表的连续挤压技术的实用化。
- (4) 各种特殊挤压技术，如粉末挤压，以铝包钢线和低温超电导材料为代表的层状复合材料挤压技术的广泛应用。
- (5) 半固态金属挤压、多坯料挤压等新方法的开发研究等。

从应用范围看，从大尺寸金属铸锭的热挤压开坯至小型精密零件的冷挤压成型，从以粉末、颗粒料为原料的直接挤压成型到金属间化合物、超导材料等难加工材料的挤压加工，现代挤压技术得到了极为广泛的开发与应用<sup>[1]</sup>。

### 1.1.1 挤压成型技术的分类

根据挤压筒内金属的应力应变状态、挤压方向、润滑状态、挤压温度、挤压速度、工模具的种类和结构、坯料的形状或数目、制品的形状或数目等的不同，挤压的分类方法也不同。各种分类方法如图1-1所示。这些分类方法并非一成不变，许多分类方法可以作为另一种分类方法的细分。例如，当按照挤压方向来分时，一般认为有正向挤压、反向挤压、侧向挤压三种，而正向挤压、反向挤压又可以按照变形特征进一步分为平面变形挤压、轴对称变形挤压、一般三维变形挤压等。

### 1.1.2 挤压加工的特点

挤压加工的优点为：

(1) 提高金属的变形能力。金属在挤压变形区处于强烈的三向压应力状态，可以充分发挥其塑性，获得大变形量。例如，纯铝的挤压比（挤压筒断面积与制品断面积之比）可以达到500，纯铜的挤压比可达400，钢的挤压比可达40~50。对于一些采用轧制、锻压等方法加工困难乃至不能加工的低塑性难变形金属和合金，甚至有如铸铁一类脆性材料，也可以采用挤压法进行加工。

(2) 制品综合质量高。挤压变形可以改善金属材料的组织，提高其力学性能，特别是对于一些具有挤压效应的铝合金，其挤压制品在淬火后时效，纵向（挤压方向）力学性能远高于其他加工方法生产的同类产品。对于某些需要采用轧制、锻造进行加工的材料，例如钛合金、LF6、LC4、MB15 锻件，挤压法还常被用作铸锭的开坯，以改善材料的组织，提高其塑性。与轧制、锻造等加工方法相比，挤压制品的尺寸精度高、表面质量好。随着挤压技术的进步、工艺水平的提高和模具设计与制造

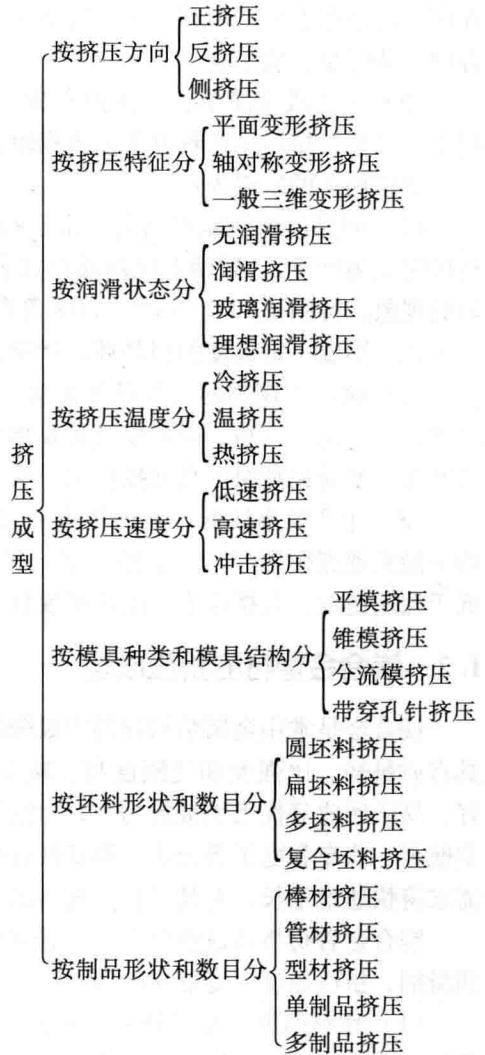


图 1-1 挤压成型分类

技术的进步，现已可以生产壁厚0.3~0.5mm、尺寸精度达 $\pm(0.05 \sim 0.1)$  mm的超小型高精度空心型材。

(3) 产品范围广。挤压加工不但可以生产断面形状简单的管、棒、线材，而且还可以生产断面形状非常复杂的实心 and 空心型材、制品断面沿长度方向分阶段变化的和逐渐变化的变断面型材，其中许多断面形状的制品是其他塑性加工方法所无法成型的。挤压制品的尺寸范围也非常广，如从断面外接圆直径达500~1000mm的超大型管材，到断面尺寸有如火柴棒大小的超小型精密型材。

(4) 生产灵活性大。挤压加工具有很大的灵活性，只需要更换模具就可以

在同一台设备上生产形状、尺寸规格和品种不同的产品，且更换模具的操作简单方便、费时少、效率高。

(5) 工艺流程简单、设备投资少。相对于穿孔轧制、孔型轧制等管材与型材生产工艺，挤压生产具有工艺流程短、设备数量与投资少等优点。

挤压加工的缺点为：

(1) 制品组织性能不均匀。由于挤压时金属的流动不均匀（在无润滑正向挤压时尤为严重），致使挤压制品存在表层与中心、头部与尾部的组织性能不均匀的现象。特别是 LD2、LD5、LD7 等合金的挤压制品，在热处理后表层晶粒显著粗化，形成一定程度的粗晶环，严重影响制品的使用性能。

(2) 挤压工模具的工作条件恶劣、工模具耗损大。挤压时坯料处于近似密闭状态，三向压力高，因而模具需要承受很高的压力作用。同时，热挤压时工模具通常还要受到高温、高摩擦作用，从而大大影响模具的强度和使用寿命。

(3) 生产效率较低。除近年来发展的连续挤压法外，常规的各种挤压方法均不能实现连续生产。一般情况下，挤压速度（这里指制品的流出速度）远远低于轧制速度，且挤压生产的几何废料损失大，成品率较低。

## 1.2 镁合金管材的挤压成型

镁合金是常用金属结构材料中最轻的一种，其密度约为铝的 2/3、钢的 1/4，具有质量轻、比强度和比刚度高、减震性好、屏蔽和导热性优良、成型加工性好、易于回收等优点而被誉为“21 世纪的一种绿色工程材料”，被广泛应用于航空航天、汽车和电子等行业。随着镁合金成型技术的不断进步，对镁合金管材的需求将快速地增长，对其品种、规格的需求也会越来越多。

镁合金管材挤压成型时主要工艺参数有坯料温度、模具预热温度、挤压比、润滑剂、挤压速度、变形速度等。

(1) 坯料温度：金属镁具有密排六方晶格，室温下只有基面 {0001} 产生滑移，因此镁合金常温下容易脆裂，难以进行塑性成型加工；200℃ 以上时第一类角锥面 {1011} 也产生滑移，塑性因此明显提高；225℃ 以上时第二类角锥面 {1012} 也可能产生滑移，塑性提高更大，因此镁合金宜在 200℃ 以上成型。镁合金 MB2 在热态下具有较高塑性，甚至在不利的应力 - 应变状态下也可以变形，但变形速度不能太大。镁合金在较高温度下，尤其 400℃ 以上很容易产生腐蚀氧化，因而不宜锻造。

(2) 模具预热温度：镁合金的变形温度范围狭窄，与冷模接触时，极易产生裂纹，所以对模具必须进行预热。由于坯料与模具的接触面积较大，变形时间较长，所以模具的加热温度要低于坯料加热温度，范围在 200 ~ 300℃。

(3) 润滑剂：挤压镁合金时，为了减轻坯料与挤压筒及凹模之间的摩擦，



防止粘模，降低摩擦力从而有利于金属流动，必须采用润滑剂，同时润滑剂还可以起到隔热作用，从而提高模具寿命。在实验过程中，润滑剂采用石墨、动物油或植物油。

(4) 变形速度：当变形速度较高时，由变形引起的热效应，会使挤压毛坯的温度升高，从而流动应力明显降低。当变形速度再增高时，虽然毛坯的升温很明显，但是由于变形过程中金属的加工硬化速度比再结晶过程的软化过程快，坯料流动应力不但不减小，反而明显增大。镁合金（MB2）在压力机上变形时，变形温度在 350 ~ 450℃ 的范围内塑性最高；当在锤上变形时，变形温度范围缩小为 350 ~ 425℃。由于镁合金（MB2）对变形速度极为敏感，变形速度不能太大，动变形时的允许变形程度不大于 40%；静变形时塑性明显增加，变形程度可达 80% 以上而不出现脆性状态。

### 1.3 铝合金的挤压成型

铝及铝合金型材被广泛应用于建筑、交通运输、电子、航天航空等部门。近年来，由于对汽车空调设备小型化、轻量化的要求，热交换器用管材及空心型材中铝挤压制品的比例迅速增加。据资料介绍，挤压加工制品中铝及铝合金制品约占 70% 以上。

在世界铝挤压发展史上最值得称道的是美国铝业公司，1905 年首次生产铝挤压材，1934 年研制成了 6061 合金，1944 年研制成 6063 合金，6063 合金既有一定的强度性能又有良好的可挤压性能，还可在挤压机上淬火，从此获得低成本挤压铝材，提高了市场竞争力，使铝材在建筑工业上的大量应用取得了突破性进展。1933 年又是美国铝业公司首创挤压机淬火工艺；另外，直接水冷铸造工艺（DC 铸造法）于 1935 年问世与完善，为铸造又长又大的成本低的挤压圆锭开辟了一片新天地；20 世纪 50 年代至 60 年代铝熔体炉外连续净化处理工艺的完善，对生产品质高的铝材与提高产量起了决定性的作用，大规格铝材生产才成为现实，高品质铝材的批量生产才有可能。

2005 年全世界挤压铝材产量约 1100 万吨（可近似地视为消费量）；有约 2012 个挤压厂，生产能力 1850 万吨左右。可生产挤压材的国家与地区有 90 个，其中前 10 名是中国、美国、日本、德国、意大利、西班牙、韩国、俄罗斯、中国台湾、土耳其，它们的总生产能力占世界总产能的 72%，前 5 个国家的生产能力占全球总产能的 57.9%。另一个值得注意的现象是，亚洲国家挤压材的生产能力约占世界总产能的 50.7%。中国拥有最多的大挤压企业，但也有最多的小企业。

铝及铝合金的挤压参数与镁合金相似，包括挤压温度、挤压比、挤压速度、润滑剂等。各种铝合金的挤压温度主要视合金的性质、用户对产品性能的要求以及生产工艺而定。挤压温度越高，被挤压材料的变形抗力越低，有利于降低挤压



压力,减少能耗。但挤压温度越高时,制品的表面质量越差,容易形成粗大组织。6000系合金采用较高的挤压温度,是由于大部分场合下采用直接风冷淬火的需要,但实验结果表明,500℃以上挤压的6063合金材料经自然冷却后,其延性有较明显降低。而7000系(除7075外)高强度铝合金采用较高的温度进行挤压,是为了降低其变形抗力,减轻工模具过大的负荷应力,提高生产率。但随着挤压温度的提高,制品的耐应力腐蚀性能下降。

挤压速度与合金的可挤压性有很大关系。软铝合金的挤压制品流出速度一般可达20m/min以上,部分型材的挤压流出速度高达80m/min以上。中高强度铝合金挤压速度过高时,制品的表面质量显著恶化,故其挤压速度一般限制在20m/min以下。挤压速度的选择往往还与挤压温度有关,由于铝合金通常在近似于绝热条件下进行挤压(挤压筒温度与坯料温度相差较小),挤压速度越快,挤压过程中的发热越不容易逸散,从而导致坯料温度的上升。当模口附近的温度上升到接近被挤压材料的熔点时,制品表面容易产生裂纹等缺陷,并导致制品组织性能的显著恶化<sup>[2]</sup>。

为确保制品的表面质量,铝及铝合金通常采用无润滑剂挤压。对表面质量要求较高的场合,可将加热好了的坯料在挤压前进行剥皮,以消除氧化表皮及油污流入制品的可能性。

## 1.4 钢铁材料的挤压成型

钢铁材料的挤压与铝、铜等有色金属一样,按挤压方法分为正挤压、反挤压、复合挤压等<sup>[3]</sup>;按挤压温度分为冷挤压、温挤压、热挤压等几类。

### 1.4.1 冷挤压

从金属学的概念出发,冷挤压应定义为温度低于回复温度的挤压,而对于铝、铜、钛等大多数有色金属以及钢铁材料,通常所说的冷挤压一般是指在室温下的挤压。钢铁材料的冷挤压主要用于零件的直接成型或近净形成型,具有节约原材料、制品尺寸精度高、表面质量好、强度高、生产率高等优点。适合于冷挤压的材料应具有较好的塑性、较低的加工硬化能力,例如中低碳钢、低合金钢等。镍含量比较高的钢一般不采用冷挤压进行成型。冷挤压坯料的形状与尺寸主要根据成型件的形状与尺寸、挤压成型工艺来确定。确定坯料形状的主要原则为:形状尽可能简单,所需成型工序尽可能少,有利于获得均匀的金属流动和均匀性能的制品。冷挤压前的坯料一般需要经过退火处理和润滑处理。冷挤压的变形程度远远低于相应的热挤压变形程度。

### 1.4.2 温挤压

挤压温度低于再结晶温度而高于回复温度时的挤压称为温挤压。在温挤压过