

金属挤压理论与技术

Theory and Technology of Metals Extrusion

(第2版)

谢建新 刘静安 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 提 要

本书系统地论述了金属挤压理论、挤压技术及其应用,是作者多年教学、科研、技术开发和生产实践经验的积累和总结。

全书共分 10 章,包括:概论、挤压金属流动与产品组织性能、挤压力学理论、金属正挤压、金属反挤压、静液挤压、连续挤压、复合材料挤压、等温挤压、其他挤压新技术和新工艺等。

本书可供从事金属材料生产、研究、开发和应用的工程技术人员、科研人员、应用人员、管理人员及相关从业人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属挤压理论与技术/谢建新,刘静安著.—2 版.—北京:冶金工业出版社,2012.10

ISBN 978-7-5024-6066-2

I. ①金… II. ①谢… ②刘… III. ①金属—挤压 IV. ①TG37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 242603 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 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 张登科 美术编辑 李新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6066-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2001 年 5 月第 1 版,2012 年 10 月第 2 版,2012 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm;21.5 印张;420 千字;328 页

66.00 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)

第2版前言

《金属挤压理论与技术》初版自2001年出版以来，承蒙读者厚爱，出版后仅1年时间即重印。据CNKI不完全检索，该书初版被各种学术期刊、学位论文引用400次以上。除被学术期刊论文、会议论文和学位论文大量引用外，著者还收到不少来自生产一线的工程技术人员信函和邮件，或讨论有关技术问题，或提出宝贵建议，使著者备受鼓舞。

近10余年来，金属挤压理论和技术有了很大发展，从基础理论完善，工艺技术开发，到产品的高性能化与高质量化，生产的高效率化和低成本化，相关研究开发工作仍然非常活跃。实验研究与数值模拟相结合，在正确把握金属流动变形行为，分析缺陷形成原因，指导模具设计，进而精确控制产品的组织性能和形状尺寸精度等方面发挥了重要的作用。先进镁合金、高强度铝合金、各种高温合金、特殊结构层状复合材料、高性能粉末材料等新材料挤压技术与产品的开发，为航空航天、能源、高速交通、国防军工等高新技术的快速发展提供了重要支撑。等温挤压、固定垫片挤压等挤压新技术新工艺的发展和应用，在提高产品质量和生产效率，降低生产成本等方面发挥了很好的作用。

为了全面反映近十多年来金属挤压理论与技术的发展成果，本书在初版的基础上进行了较大篇幅修订，除新增“等温挤压”一章外，还新增了挤压延伸变形机制、镁合金挤压、小孔径空心材包芯挤压、连续铸挤工艺、W-Cu梯度复合材料挤压、弧形型材挤压、挤压理论与技术的发展展望等方面的内容，并对初版中有些内容和文字进行了删减和精炼，目的是保持该书内容的先进性，突出实用性，

使其可读性更强。希望本书的出版，能为读者提供更多的参考和帮助。

本书新增内容中，引用了国内外有关专家、学者一些珍贵资料和研究成果，均在各章末参考文献中进行了明示，并在此表示深深的谢忱。有关著者本人的研究成果，是课题组同仁和研究生共同努力的结果，在此一并表示感谢。

由于著者水平所限，本书尽管在初版的基础上做了大量修订，但书中仍可能存在不妥之处，恳请读者批评指正。

著者

2012年8月

第 1 版序言

挤压技术具有理论性强、工艺技术性高等许多重要特点，它是金属材料工业生产、新材料制备与加工的重要方法之一。自 1797 年世界第一台铅管成形用机械式挤压机问世以来，经过 200 多年的发展，有了很大的进步，特别是自 20 世纪 50 年代以来，挤压技术和生产得到了迅速的发展。仅就铝合金挤压型材而言，据不完全统计，目前全球共有铝材挤压机 5000 台以上，挤压铝材品种 4 万种以上，年产量 1000 万吨以上。挤压型材应用领域越来越广，且不断地向小断面超精密化、大型或超大型化两个方向发展。等温挤压、水封挤压、冷却模挤压、高速挤压、静液挤压、无压余挤压等先进工艺技术得到迅速的发展与应用。Conform 连续挤压新技术的开发成功与大规模工业化实用，使挤压生产由不连续变为连续，在节能降耗、简化生产工艺、提高成材率与生产效率等方面，新的挤压方法较传统挤压方法向前迈进了一大步。各种特殊挤压技术，如粉末挤压，铝包钢线和低温超导材料等层状复合材料（包覆材料）挤压技术得到广泛应用。同时，由于实验技术与数值模拟技术的进步和发展，有关挤压基础理论的研究也取得了许多重要的成果。

由北京科技大学材料科学与工程学院院长、教授谢建新博士，西南铝业（集团）有限责任公司副总工程师、教授级高工刘静安合著的《金属挤压理论与技术》，不但反映了国内外先进的挤压技术，而且是他们长期从事科学研究、生产技术开发与教学工作的经验积累和成果总结。该书是国内第一本既具深度、又有广度的挤压专著，系统地论述了有关挤压的基础理论、挤压技术的发展与现状、挤压技术的应用以及相关的最新研究成果。该书既是一本具有较高学术

价值的专著，也是一本深入结合生产技术实际，包含许多有关金属材料工业生产、复合材料制备与加工的实用经验与数据资料的书籍。

总之，作为一本论述金属挤压基础理论与挤压工程技术的专著，也许还存在这样或那样的不足，但我相信该书仍然不失为目前国内乃至国际上的一本十分难得的专著。期望该书对从事材料科学与工程及先进制造学科的大学生、研究生及科技工作者有所裨益。

中国工程院院士
中国材料研究学会 副理事长
北京工业大学 校长、教授



2001年2月

第1版前言

挤压是有色金属、钢铁材料生产与零件成形加工的主要方法之一，也是各种复合材料、粉末材料等先进材料制备与加工的重要方法。从大尺寸金属铸锭的热挤压开坯、大型与超大型管棒型材的热挤压加工至小型精密零件的冷挤压成形，从以粉末、颗粒料为原料的复合材料直接固化成形到金属间化合物、超导材料等难加工材料的加工，现代挤压技术得以广泛的应用。

虽然国内外已有几本有影响的有关挤压方面的专著，如 K. Laue、H. Stenger 著《EXTRUSION》，日本塑性加工学会编《押出し加工》，吴诗惇著《挤压理论》等，但尚没有一本较系统地论述挤压基础理论与现代挤压技术及其应用全貌的专著。基于这一认识，著者在多年教学、科学研究、技术开发和生产经验积累与总结的基础上，写成了本书。试图通过有限的篇幅，尽可能对有关挤压的基础理论，挤压技术的发展、现状与应用，以及有关最新研究成果中的主要内容，进行较系统的总结，以达到读者可以通过本书了解挤压理论与技术全貌的目的。

本书共由9章组成：第1章介绍了挤压技术的历史与发展现状，挤压成形加工的特点与应用；第2章和第3章是有关挤压的基础理论方面的内容，重点讨论了挤压的流动变形行为、挤压产品的组织性能与质量控制、挤压力学理论等问题；第4章至第7章分别介绍了工业生产中应用最为广泛的正挤压、反挤压、静液挤压、连续挤压的基本原理、技术特点、工艺实际与发展现状等；第8章介绍了挤压技术在复合材料制备与加工方面的应用；第9章介绍了有关挤压新技术、新工艺的发展与应用现状。

除著者本人的研究成果外，本书还参考或引用了国内外专家学者许多珍贵的资料和研究成果，均在引用之处用参考文献予以明示，在此向他（她）们表示深深的谢忱。著者衷心感谢我们的老师、材料加工界前辈，中国工程院院士、北京工业大学校长左铁镞教授，他对本书提出了许多宝贵的意见，并欣然为本书作序，给予本书极高的评价。此外，著者还要借此机会向长期以来与著者一起从事研究、开发、教学、生产技术工作的国内外恩师与同仁表示感谢，本书中许多内容，是著者与他（她）们共同钻研的成果。北京科技大学材料科学与工程学院李静媛女士对本书书稿的撰写给予了很大的帮助，在此深表谢意。

著者热切地希望，本书能为读者提供有益的启示与参考作用。但限于著者的学识与经验，书中难免存在一些不妥之处，真诚地欢迎读者批评指正。

著者
2001年2月

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 1 概论 | 1 |
| 1.1 挤压技术的发展 | 1 |
| 1.2 挤压方法的分类 | 2 |
| 1.2.1 正向挤压（正挤压） | 4 |
| 1.2.2 反向挤压（反挤压） | 5 |
| 1.2.3 侧向挤压 | 5 |
| 1.2.4 玻璃润滑挤压 | 5 |
| 1.2.5 静液挤压 | 5 |
| 1.2.6 连续挤压 | 6 |
| 1.3 挤压加工的特点 | 6 |
| 1.3.1 挤压加工的优点 | 6 |
| 1.3.2 挤压加工的缺点 | 7 |
| 1.4 挤压产品的种类及用途 | 8 |
| 1.4.1 铝及铝合金 | 8 |
| 1.4.2 铜及铜合金 | 10 |
| 1.4.3 镁及镁合金 | 11 |
| 1.4.4 钛及钛合金 | 12 |
| 1.4.5 钢铁材料 | 12 |
| 1.4.6 复合材料 | 12 |
| 1.4.7 其他材料 | 13 |
| 1.5 发展展望 | 13 |
| 1.5.1 金属流动变形行为 | 13 |
| 1.5.2 焊接过程与焊缝质量 | 14 |
| 1.5.3 组织性能演化与精确控制 | 14 |
| 1.5.4 模具数字化设计与制造 | 15 |
| 1.5.5 高性能、难加工材料挤压 | 15 |

| | |
|------------------------------|-----------|
| 1.5.6 新工艺新技术开发 | 16 |
| 参考文献 | 16 |
| 2 挤压金属流动与产品组织性能 | 18 |
| 2.1 概述 | 18 |
| 2.2 填充挤压阶段金属流动行为 | 18 |
| 2.2.1 金属流动与受力分析 | 19 |
| 2.2.2 填充挤压阶段的主要缺陷 | 21 |
| 2.3 基本挤压阶段金属流动行为 | 23 |
| 2.3.1 挤压延伸变形机制 | 23 |
| 2.3.2 金属流动特点 | 24 |
| 2.3.3 影响金属流动的因素 | 36 |
| 2.3.4 基本挤压阶段产品的主要缺陷 | 41 |
| 2.4 终了挤压阶段金属流动行为 | 50 |
| 2.4.1 金属流动特点 | 50 |
| 2.4.2 挤压缩尾 | 52 |
| 2.5 挤压产品的组织与性能 | 54 |
| 2.5.1 挤压产品的组织 | 54 |
| 2.5.2 挤压产品的力学性能 | 59 |
| 参考文献 | 62 |
| 3 挤压力学理论 | 64 |
| 3.1 概述 | 64 |
| 3.2 挤压受力状态分析 | 65 |
| 3.3 影响挤压力的因素 | 69 |
| 3.3.1 金属坯料的影响 | 69 |
| 3.3.2 工艺参数的影响 | 71 |
| 3.3.3 外摩擦条件的影响 | 74 |
| 3.3.4 模子形状与结构尺寸的影响 | 75 |
| 3.3.5 产品断面形状的影响 | 78 |
| 3.3.6 挤压方法 | 78 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| 3.3.7 挤压操作 | 79 |
| 3.4 挤压力计算 | 79 |
| 3.4.1 各种挤压力算式 | 79 |
| 3.4.2 挤压力算式中金属变形抗力的确定 | 90 |
| 3.5 穿孔力计算 | 95 |
| 参考文献 | 98 |
| 4 金属正挤压 | 100 |
| 4.1 正挤压方法及其工作原理 | 100 |
| 4.1.1 棒型材挤压 | 100 |
| 4.1.2 管材挤压 | 101 |
| 4.1.3 空心产品组合模挤压 | 102 |
| 4.1.4 变断面型材和管材挤压 | 104 |
| 4.2 铝及铝合金的挤压 | 105 |
| 4.2.1 可挤压性与挤压条件 | 107 |
| 4.2.2 可挤压成形尺寸范围 | 109 |
| 4.2.3 民用建筑型材挤压 | 111 |
| 4.2.4 特种型材挤压 | 116 |
| 4.2.5 高速挤压与冷却模挤压 | 120 |
| 4.2.6 挤压产品组织性能均匀性控制 | 122 |
| 4.3 铜及铜合金的挤压 | 123 |
| 4.3.1 可挤压性与挤压条件 | 124 |
| 4.3.2 棒材挤压 | 126 |
| 4.3.3 管材挤压 | 127 |
| 4.3.4 型材挤压 | 128 |
| 4.4 镁合金挤压 | 129 |
| 4.4.1 镁合金的可挤压性 | 129 |
| 4.4.2 镁合金挤压工艺 | 133 |
| 4.4.3 镁合金挤压模具 | 136 |
| 4.4.4 镁合金挤压材料的各向异性 | 138 |
| 4.5 钛合金挤压 | 139 |

| | |
|--|------------|
| 4.5.1 钛合金热挤压的特点 | 139 |
| 4.5.2 钛合金型材挤压 | 140 |
| 4.5.3 钛合金管材挤压 | 145 |
| 4.6 钢铁材料挤压 | 148 |
| 4.6.1 冷挤压 | 149 |
| 4.6.2 温挤压 | 155 |
| 4.6.3 热挤压 | 159 |
| 4.6.4 空心材包芯挤压 | 164 |
| 参考文献 | 166 |
| 5 金属反挤压 | 169 |
| 5.1 概述 | 169 |
| 5.2 反挤压方法及其特点 | 170 |
| 5.2.1 反挤压方法 | 171 |
| 5.2.2 反挤压金属的变形行为 | 173 |
| 5.2.3 反挤压的优缺点和选择原则 ^[3~8,11,13,14] | 176 |
| 5.3 反挤压工艺 | 178 |
| 5.3.1 坯料与脱皮 ^[3~6,11~14] | 178 |
| 5.3.2 挤压工模具 ^[2,5,6] | 179 |
| 5.3.3 坯料梯度加热与镦粗排气 | 180 |
| 5.3.4 闷车处理方法 | 181 |
| 5.3.5 压余分离方法 | 182 |
| 5.3.6 工艺参数选择 | 183 |
| 5.4 反挤压的应用 | 186 |
| 5.4.1 铝及铝合金的反挤压 | 186 |
| 5.4.2 铜及铜合金的反挤压 | 191 |
| 5.4.3 钢铁材料的反挤压 | 196 |
| 参考文献 | 197 |
| 6 静液挤压 | 199 |
| 6.1 概述 | 199 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 6.1.1 静液挤压方法 | 199 |
| 6.1.2 静液挤压的特点 | 200 |
| 6.2 静液挤压用坯料 | 201 |
| 6.3 挤压力 | 202 |
| 6.4 挤压工艺 | 204 |
| 6.4.1 挤压温度 | 204 |
| 6.4.2 挤压比 | 204 |
| 6.4.3 挤压速度 | 205 |
| 6.4.4 高压介质 | 206 |
| 6.4.5 润滑 | 206 |
| 6.5 静液挤压的应用 | 208 |
| 6.5.1 异型材挤压 | 208 |
| 6.5.2 难加工材料挤压 | 209 |
| 6.5.3 粉末材料挤压 | 211 |
| 6.5.4 包覆材料挤压 | 212 |
| 6.5.5 产品组织性能与缺陷 | 213 |
| 6.6 挤压设备与工模具 | 214 |
| 6.6.1 静液挤压设备 ^[5] | 214 |
| 6.6.2 挤压工模具 | 215 |
| 参考文献 | 218 |
| 7 连续挤压 | 219 |
| 7.1 概述 | 219 |
| 7.2 Conform 连续挤压法 | 220 |
| 7.2.1 Conform 连续挤压原理 | 220 |
| 7.2.2 Conform 连续挤压金属变形行为 | 221 |
| 7.2.3 Conform 连续挤压特点 | 224 |
| 7.2.4 Conform 连续挤压的应用 | 226 |
| 7.2.5 Conform 连续挤压工艺 | 227 |
| 7.2.6 Conform 连续挤压设备 | 229 |
| 7.3 连续铸挤 | 233 |

| | | |
|----------|---------------------|------------|
| 7.3.1 | 连续铸挤原理 | 233 |
| 7.3.2 | 连续铸挤工艺 | 234 |
| 7.3.3 | 连续铸挤设备 | 236 |
| 7.4 | 其他连续挤压法 | 238 |
| 7.4.1 | 链带式连续挤压法 | 238 |
| 7.4.2 | 轧挤法 | 239 |
| | 参考文献 | 240 |
| 8 | 复合材料挤压 | 242 |
| 8.1 | 概述 | 242 |
| 8.1.1 | 分散型复合材料 | 242 |
| 8.1.2 | 层状复合材料 | 243 |
| 8.2 | 金属基复合材料的挤压 | 245 |
| 8.3 | 双金属管挤压 | 249 |
| 8.3.1 | 复合坯料挤压法 | 249 |
| 8.3.2 | 多坯料挤压法 | 251 |
| 8.4 | 包覆材料挤压 | 253 |
| 8.4.1 | 单芯包覆材料 | 254 |
| 8.4.2 | 低温超导复合线材 | 265 |
| 8.5 | 其他层状复合材料的挤压 | 268 |
| | 参考文献 | 270 |
| 9 | 等温挤压 | 271 |
| 9.1 | 概述 | 271 |
| 9.2 | 挤压过程中的温度变化 | 272 |
| 9.2.1 | 实测法 | 272 |
| 9.2.2 | 理论预测法 | 275 |
| 9.3 | 等温挤压的实现方法 | 278 |
| 9.4 | 坯料梯温挤压 | 280 |
| 9.4.1 | 坯料梯温加热 | 281 |
| 9.4.2 | 坯料梯温冷却 | 283 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| 9.5 工模具控温挤压 | 285 |
| 9.5.1 挤压筒控温挤压 | 285 |
| 9.5.2 挤压模控温挤压 | 287 |
| 9.5.3 挤压垫片控温挤压 | 292 |
| 9.6 工艺参数优化控制等温挤压 | 293 |
| 9.6.1 难加工铝合金等温挤压特点 | 293 |
| 9.6.2 工艺参数优化控制法 | 294 |
| 9.7 速度控制等温挤压 | 300 |
| 9.7.1 温度-速度闭环控制法 | 300 |
| 9.7.2 温度-速度模型控制法 | 302 |
| 参考文献 | 304 |
| 10 其他挤压新技术和新工艺 | 306 |
| 10.1 无压余挤压和固定垫片挤压 | 306 |
| 10.1.1 无压余挤压 | 306 |
| 10.1.2 固定垫片挤压 | 307 |
| 10.2 半固态挤压 | 313 |
| 10.3 多坯料挤压 | 317 |
| 10.3.1 基本原理 | 317 |
| 10.3.2 高强度合金空心型材 | 318 |
| 10.3.3 层状复合材料 | 320 |
| 10.3.4 W-Cu 梯度复合材料 | 321 |
| 10.4 弧形型材挤压 | 324 |
| 10.4.1 不等长定径带挤压法 | 324 |
| 10.4.2 附加弯曲挤压法 | 325 |
| 参考文献 | 327 |

1 概 论

1.1 挤压技术的发展^[1,2]

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产品（制品）的一种塑性加工方法，如图 1-1 所示。

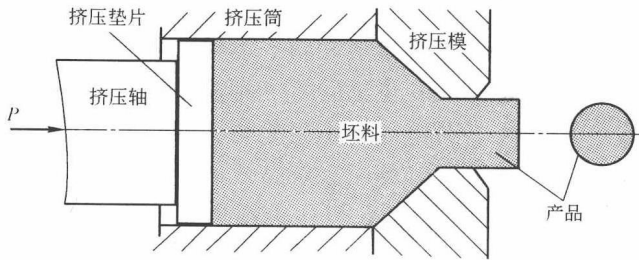


图 1-1 金属挤压的基本原理

与其他金属塑性加工方法（如轧制、锻压）相比，挤压法出现较晚。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轴上的随动挤压针。从此，管材挤压得到了较快的发展。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。1879 年法国的 Borel、德国的 Wesslau 先后开发了铅包覆电缆生产工艺，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应用价值，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形包覆材料的方法。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、石墨等作润滑剂,其润滑性能差,存在挤压产品缺陷多、工模具寿命短等致命的弱点。钢的挤压真正得到较大发展并被用于工业生产,是在1942年发明了玻璃润滑剂之后。1941年美国人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结果,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20世纪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。而从1950年代后期至1980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,20世纪后20年高速发展的工业技术对挤压产品断面形状复杂化、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、性能均匀化等的要求,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导体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形,从以粉末、颗粒料为原料的直接挤压成形到金属间化合物、超导材料等难加工材料的挤压加工,现代挤压技术得到了广泛的开发与应用。

1.2 挤压方法的分类

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、工模具的种类或结构、坯料的形状或数目、产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1-2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(正挤压)、反向挤压(反挤压)、侧向挤压等三种,而正向挤压、反向挤压又可按照变形特征进一步分为平面