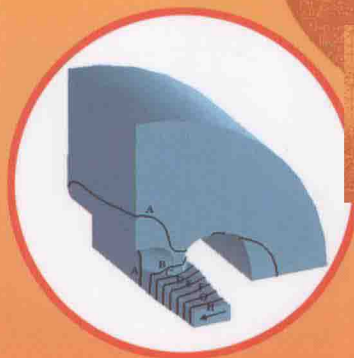
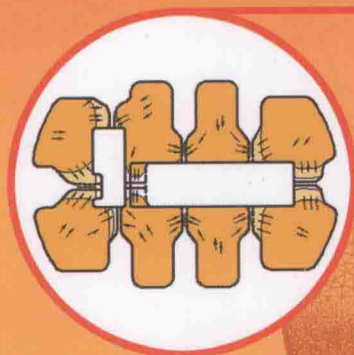


金属挤压有限元模拟 技术及应用

JINSHU JIYA YOUXIANYUAN MONI
JISHU JI YINGYONG

■ 黄东男 著 ■



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

金属挤压有限元模拟技术及应用

黄东男 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2015

内 容 提 要

本书介绍了挤压数值模拟技术的发展、应用及注意事项;系统地论述了有限元模拟技术在金属挤压成型理论与工艺,模具设计,寿命与成型质量预测中的应用。

全书共分9章,主要内容包括挤压成型数值模拟,焊合区网格重构技术,瞬态挤压过程温度场模拟,双孔模挤压过程模拟分析,复杂断面空心型材挤压过程模拟,变形体与工作带表面分离的解决方案,大型实心铝型材工作带结构优化,高性能镁合金挤压过程模拟。

本书可供从事金属挤压生产、研究、开发和应用的工程技术人员、科研人员以及科研院所、高等院校从事数值模拟研究的师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

金属挤压有限元模拟技术及应用/黄东男著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-5024-6854-5

I. ①金… II. ①黄… III. ①有限元法—应用—金属—挤压—数值模拟 ②有限元法—应用—金属—挤压—物理—模拟 IV. ①TG37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 045830 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 贾怡雯 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 978-7-5024-6854-5

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
2015 年 3 月第 1 版, 2015 年 3 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.25 印张; 202 千字; 151 页

38.00 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)

序 言

近年来，我国已经成为世界最大规模的金属加工制造大国。塑性加工技术作为一种主要金属加工制造方法，广泛应用于国民经济和国防建设的各个领域，在一定程度上代表了一个国家的制造业水平。

塑性加工过程表现为变形金属与模具之间在外力作用下的矛盾统一体，其变形过程与机理非常复杂。传统的成型工艺与模具设计是基于经验的多反复性过程，存在产品开发周期长、成本高的缺点。面对激烈的市场竞争压力，塑性加工行业迫切需要提升设计水平和自动化能力来改造传统技术，从而更有效地支持相关新技术、新产品的开发。塑性加工过程有限元模拟技术正是在这一背景下产生和发展的。

塑性加工过程有限元模拟技术是计算力学、塑性加工技术及材料科学相互交叉的理论计算分析方法，进入 21 世纪以来，该技术已经广泛应用于复杂塑性加工过程的模拟预测和过程分析中，成为工业化国家塑性加工工艺理论技术与工艺模具优化设计分析的必要工序。

挤压技术作为金属塑性加工的主要成型方法，可最大程度地提高金属的塑性成型能力。挤压方法不但可成型传统金属制品，还可成型锻造、轧制等其他塑性加工方法难加工甚至无法加工的低塑性难变形合金（高强铝合金、镁合金、高温合金、钛合金等）制品。经过 200 多年的发展，目前挤压技术正向着挤压产品的组织性能与形状的精确控制、高性能难加工材料的挤压工艺与技术开发、挤压生产的高效率化和低成本化等方向发展。由于挤压是在高温、高压、高摩擦等复杂条件下，近似于全密闭的空间（挤压筒、挤压模）内成型制品，因此精确把握真实的金属流动行为难度非常大。研究和把握金属在挤压过程中的流动变形行为，是正确设计模具，精确控制产品的组织性能、

形状尺寸, 预防缺陷产生, 提高挤压成材率和生产效率的基础, 因此把握金属在挤压过程中的流动变形行为一直是研究人员坚持不懈的努力方向。

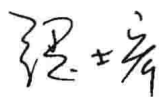
有限元模拟技术的快速发展和计算速度的迅速提高, 促进了计算机模拟分析方法在挤压过程金属流动变形行为研究中的应用, 在揭示金属流动变形和组织演变过程、分析缺陷形成原因、指导模具设计等方面正在发挥重要的作用, 是奠定挤压新工艺、新技术设计和发展的基础方法。

内蒙古工业大学材料科学与工程学院副教授黄东男博士所著《金属挤压有限元模拟技术及应用》一书, 建立在深入的塑性加工理论分析和企业现场实践的基础上, 是作者长期从事挤压过程有限元数值模拟研究工作经验和成果的总结。作者对于有限元模拟理论和方法及模具与工艺设计技术都有着深入的理解和丰富的实践经验, 不但可以为读者解决有限元挤压分析中的大量现实问题, 还提供了一些前沿理论和方法的研究成果与应用实例, 是一部难得的专著和参考教材。

该书系统地论述了挤压过程有限元模拟的一些关键问题, 并以大量实例介绍了有限元模拟技术在典型断面铝型材、镁合金型材等难加工材料上的应用, 尤其是书中关于分流挤压的焊合问题处理、变形体与工作带表面分离的解决方案、复杂断面空心型材挤压过程模拟等内容, 都具有先进的水平和实用性。

作为目前国内系统论述金属挤压过程有限元模拟技术的专著, 本书具有较高的学术价值, 同时也有必要在以后的发展和应用中不断修改、补充和完善。相信该书对从事挤压研究工作的企业研发人员、研究生及科研人员有所裨益, 特作序推荐。

中国塑性工程学会 副理事长
中国科学院金属研究所 研究员



前 言

挤压具有基础理论性强、工艺技术性高、品种多样和生产灵活等特点，是金属材料（管、棒、线、型材）工业生产和各种复合材料、粉末材料、高性能难加工材料等新材料与新产品制备、加工的重要方法。

经过 200 多年的发展，金属挤压技术、工艺和装备均取得了巨大的进步，挤压产品已广泛应用于航空航天、舰船、交通运输、能源、冶金、化工及国防军工等领域。但与锻造、轧制等其他传统塑性加工方法一样，金属挤压理论与技术仍处于不断发展之中。

随着对坯料、模具设计、挤压工艺、金属流变和组织控制、产品性能要求的提高，采用传统解析方法与依靠工程类比和模具设计师个人经验试错的方法已很难满足制品性能要求。以数值模拟取代部分实验，揭示挤压成型规律与各场量间的关系、减少试模次数、预测型材成型质量，已成为研究金属挤压制品精确成型过程、制定合理模具结构、优化工艺、奠定成型理论的最有效手段。

目前国外一些大公司已经将挤压成型过程数值模拟作为挤压工艺制定、模具设计及制造流程中的必经环节。基于这一认识，作者在多年从事挤压过程有限元数值模拟研究工作的基础上，写成了本书。旨在通过对挤压过程有限元模拟关键问题的解决，以及对数值模拟技术在典型断面铝型材、难加工材料等方面应用的系统总结，让读者了解挤压过程有限元模拟技术的发展与应用，及其对挤压理论与工艺制定、模具结构优化及生产实践提供的理论指导作用。

本书共分 9 章。第 1 章介绍了挤压技术的发展与应用，挤压理论的

研究方法及发展趋势；第2章为挤压数值模拟技术的发展、应用及注意事项；第3章重点介绍了分流模挤压时的焊合区网格重构技术及其在非对称小断面型材挤压中的应用；第4章是对分流模瞬态挤压的介绍，主要是在焊合过程温度场理论计算分析中的应用；第5章和第6章详细介绍了有限元模拟技术在双孔模挤压方管、复杂断面空心型材挤压过程的金属流变行为、焊合质量、模具设计及寿命、成型质量预测等方面的应用；第7章和第8章介绍了有限元模拟时变形体与工作带表面分离的解决方案，及其在大型实心铝型材工作带结构优化中的应用；第9章介绍了有限元模拟技术在高性能镁合金挤压成型工艺及模具优化设计中的应用。

完成本书之际，作者首先要感谢长期以来在该领域给予指导与帮助的各位老师，以及一起从事该研究的同事们。其次，本书除作者的研究成果外，还参考引用了国内外专家学者的研究成果，在此表示感谢。另外，作者特别感谢中国塑性工程学会副理事长、中国科学院金属研究所张士宏研究员为本书欣然作序。最后，感谢国家自然科学基金、内蒙古自治区高校材料成型及控制工程重点实验室学术著作出版基金对本书出版的支持。

由于作者水平所限，书中难免存在欠妥之处，诚请读者批评指正。

黄东男

2014年12月

目 录

1 概述	1
1.1 金属挤压理论及发展	1
1.2 挤压加工方法与特点	3
1.2.1 正挤压和反挤压	3
1.2.2 玻璃润滑挤压	5
1.2.3 静液挤压	6
1.2.4 特殊挤压	7
1.2.5 挤压方法的特点	7
1.3 挤压产品的应用	8
1.3.1 铝及铝合金	8
1.3.2 镁及镁合金	9
1.3.3 铜及铜合金	10
1.3.4 钛及钛合金	10
1.3.5 钢铁材料	11
1.3.6 复合材料	11
1.3.7 特殊材料	11
1.4 挤压模具结构特点	11
1.4.1 实心型材挤压模具	11
1.4.2 空心型材挤压模具	13
1.5 挤压成型理论的研究方法	16
1.5.1 理论解析法	17
1.5.2 模拟实验法	18
1.5.3 数值模拟法	19
1.6 挤压成型技术发展趋势	20
1.6.1 挤压基础理论发展趋势	21
1.6.2 挤压模具设计发展趋势	22

1.6.3 挤压新技术与新工艺开发	22
参考文献	24
2 挤压成型数值模拟	27
2.1 模拟的基本方法	27
2.2 模拟准备与分析工作	28
2.2.1 模拟流程	28
2.2.2 模拟信息	29
2.2.3 掌握模拟技术的关键	30
2.3 高温本构模型的建立	31
2.3.1 铝合金本构模型	31
2.3.2 镁合金本构模型	36
2.4 高温摩擦因子的测定	38
2.4.1 铝合金摩擦因子测定	39
2.4.2 镁合金摩擦因子测定	42
参考文献	43
3 焊合区网格重构技术	45
3.1 分流模挤压模拟存在的主要问题	45
3.2 基于逆向工程技术的 STL 模型的修复	47
3.2.1 STL 模型概述	47
3.2.2 STL 模型的修复方法	48
3.2.3 STL 模型的修复过程	49
3.3 焊合区网格重构技术开发	51
3.3.1 焊合区网格的重构准则	51
3.3.2 基于逆向工程技术的焊合区网格重构技术	53
3.4 焊合区网格重构技术的可行性分析	55
3.4.1 几何模型及边界条件	55
3.4.2 金属流变行为对比分析	56
3.4.3 场量对比分析	58
3.5 在小断面空心型材中的模拟与验证	59

3.5.1 焊合过程金属流动行为	59
3.5.2 挤压力分析	62
3.5.3 模芯弹性变形分析	64
参考文献	65
4 瞬态挤压过程温度场模拟	68
4.1 模型构建	68
4.2 分流过程温度分析	70
4.3 焊合过程温度分析	72
4.4 模孔出口处型材的温升	75
4.5 型材横断面温度分布	77
4.6 挤压温度与速度的关系	79
参考文献	80
5 双孔模挤压过程模拟分析	82
5.1 计算条件	82
5.1.1 几何模型	82
5.1.2 焊合区网格重构	84
5.2 挤压各阶段金属的流动行为分析	84
5.3 分流孔配置对金属流动行为的影响	87
5.3.1 分流孔面积比对金属流动行为的影响	87
5.3.2 分流孔面积比对焊合面位置的影响	89
5.3.3 分流孔面积比对焊合室静水压力与方管表面温度的影响	91
5.3.4 分流孔位置对挤压力与方管表面温度的影响	92
5.4 挤压比对挤压力与方管表面温度的影响	92
5.5 焊合室深度对焊合室静水压力与模芯稳定性的影响	93
5.5.1 焊合室深度对焊合室静水压力的影响	93
5.5.2 焊合室深度对模芯稳定性的影响	94
5.6 焊合角对金属流动行为及模芯稳定性的影响	96
5.6.1 焊合角对金属流动行为的影响	96
5.6.2 焊合角对死区体积的影响	98

5.6.3 焊合角对模芯稳定性的影响	99
5.7 模拟结果与实验结果对比分析	101
参考文献	103
6 复杂断面空心型材挤压过程模拟	105
6.1 计算条件	105
6.1.1 模具结构尺寸	105
6.1.2 几何模型	106
6.1.3 焊合区网格重构	107
6.1.4 网格局部细化	108
6.2 金属流动行为分析	108
6.2.1 挤压出型材头部形状	108
6.2.2 焊合过程金属流速分析	110
6.3 模具结构优化	112
6.4 型材断面温度分布	114
6.5 焊合室静水压力分布	115
6.6 挤压实验	115
参考文献	117
7 变形体与工作带表面分离的解决方法	119
7.1 变形体和工作带表面分离现象	119
7.2 解决方法	120
7.3 计算模型	120
7.4 各方案的金属流动行为对比分析	122
参考文献	127
8 大型实心铝型材工作带结构优化	129
8.1 模具结构	129
8.2 几何模型构建及边界条件	131
8.3 挤压金属流动行为分析	132
8.4 不等长工作带结构尺寸优化	134

8.5 等效应力分布	136
8.6 温度场分布	137
参考文献	139
9 高性能镁合金挤压过程模拟	141
9.1 模型构建	141
9.2 挤压过程温升及速度对成型性能的影响	143
9.3 定径带长度对金属流动行为的影响	145
9.4 挤压实验	149
参考文献	150



概 述

1.1 金属挤压理论及发展

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，从而获得所需截面形状和尺寸的一种塑性加工方法，如图 1-1 所示^[1]。

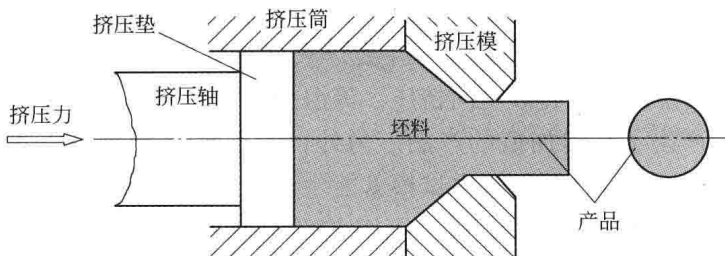


图 1-1 金属挤压的基本原理^[1]

挤压具有基础理论性强、工艺技术性高、品种多样性好和生产灵活性大等特点，是金属材料（管棒线型材）工业生产和各种复合材料、粉末材料、高性能难加工材料等新材料与新产品制备和加工的重要方法。

世界上第一台挤压机是英国人布拉曼（S. Raman）在 1797 年设计完成的，是用以生产铅等低熔点软金属产品的机械式设备。1820 年英国人托马斯（B. Thomas）设计制造了第一台液压式铅管挤压机，具有挤压模、挤压轴及穿孔针，是现代无缝管材挤压机的原型，促进了管材挤压的发展；1894 年，德国人迪克（A. Iek）设计并制造了第一台可用于挤压黄铜的卧式挤压机；1910 年开始出现铝材挤压机。1918 年美国阿尔考（Alcoa）公司安装了第一台采用铸锭进行挤压的卧式铝型材挤压机；1941 年法国人赛德尔内（J. Sejournet）发明了玻璃润滑剂之后，促进了钢材挤压的发展；1972 年英国人格林（D. Green）发明了 Conform 连续挤压法；1984 年英国霍尔顿（Hhoten）公司与美国南方线材公司机械制造部联合建立了第一台卡斯特克斯（Castex）连续铸挤试验机，并于 1985 年制造了用于生产铝材的设备^[1,2]。

经过 200 多年的发展，金属挤压技术、工艺和装备均取得了巨大的进步，挤压产品已广泛应用于航空航天、舰船、交通运输、能源、冶金、化工、国防军工等领域。根据统计，世界各国已装备不同类型、结构、用途及压力的挤压机 7000

台以上,其中美国 600 多台,日本 400 多台,德国 200 多台,俄罗斯 400 多台,中国 4000 余台^[3,4]。大型运输机、轰炸机、导弹、舰艇、航母等军事工业和地铁、高速列车等现代化交通运输业的发展,需要大量的整体壁板等结构部件,这就使得其工艺装备也开始向大型化方向发展。目前全世界 50MN(5000t)以上的大型挤压机接近 120 台,主要分布在美国、俄罗斯、日本、德国和中国。其中我国拥有 56 台,约占全球大型挤压机总数的一半,目前有色金属大型卧式挤压机包括 1.6 万吨、1.5 万吨级各一台,1.25 万吨级 3 台,1 万吨级 4 台,8000 吨级 11 台。黑色金属超重型立式挤压机 3.6 万吨级、5 万吨级各一台^[5]。

挤压技术发展至今已达到了一定的水平。近些年来,除了改进和完善正、反向挤压方法及其工艺之外,还出现了许多强化挤压过程的新工艺和新方法,如舌型模挤压、平面组合模挤压、变断面挤压、水冷模挤压、静液挤压、扁挤压筒挤压、宽展模挤压、精密气水(雾)冷在线淬火挤压、半固态挤压、多坯料挤压、高速挤压、冷却模挤压、高效反向挤压、等温挤压、粉末挤压、新材料挤压等新技术^[6~10],生产出了高附加值的产品。另外,为了提高产品的尺寸精度及生产效率、降低挤压成本,达到通过零试模就能生产出优质挤压产品的目的,各国都在研究开发用于优化模具设计和挤压工艺的自动控制系统,其流程如图 1-2 所示^[11]。

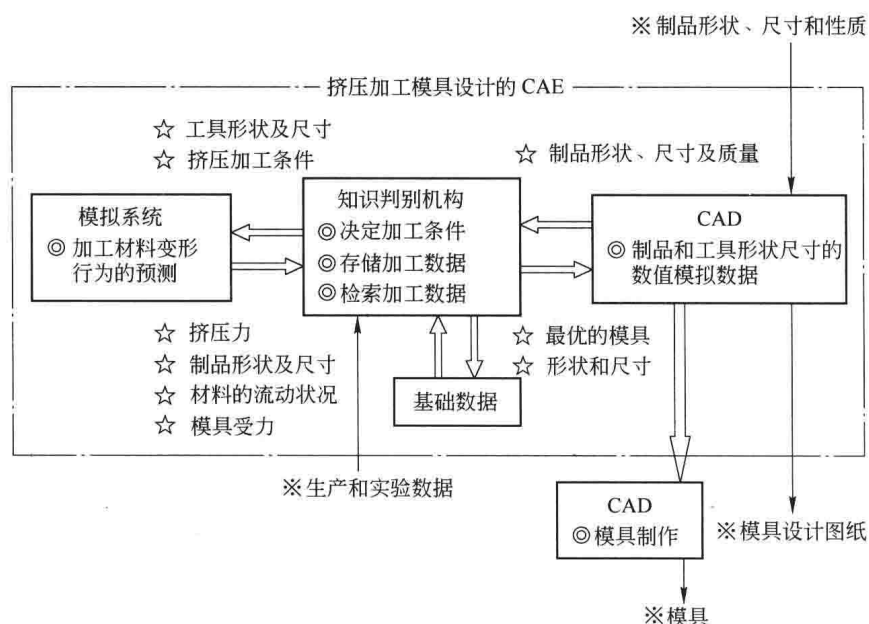


图 1-2 挤压加工模具设计 CAE

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。挤压产品从主要集中在建筑、电力、电子电器等简单断面的中小型材，开始向断面形状复杂化、尺寸超精密小型化和大型化方向发展。在应用方面，从大尺寸的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广泛的开发与应用。

1.2 挤压加工方法与特点

挤压加工方法根据挤压筒内的金属应力-应变状态、挤压方向、润滑状态、挤压温度、工模具的种类和结构、坯料和产品的形状或数目等，对挤压方法进行分类。目前工业上常用的挤压方法有正挤压、反挤压、玻璃润滑挤压和静液挤压等^[1]。

1.2.1 正挤压和反挤压

正挤压是挤压时金属产品的流出方向与挤压轴运动方向相同的挤压方法，如图 1-1 所示。正挤压是最基本的挤压方法，具有技术成熟、工艺操作简单、生成灵活性大等特点，成为铝及铝合金、铜及铜合金、镁合金、钛合金、钢铁材料等为代表的许多工业与建筑材料成型加工中使用最广泛的方法。其主要缺点是挤压时坯料与挤压筒内壁之间存在较大摩擦和摩擦热，使得挤压过程金属坯料表面和心部流动不均匀，从而给挤压产品质量带来不利的影响。

反挤压是挤压时产品流程方向与挤压轴运动方向相反的挤压方法，如图 1-3 所示。主要用于高强铝合金、铜及铜合金管材与型材的热挤压成型，以及各种铝合金、铜合金、钛合金、钢铁材料零部件的冷挤压成型。反挤压时由于金属坯料与挤压筒内壁间无相对滑动，同时金属变形主要集中在模孔区域，因此挤出过程金属流动均匀，相比正挤压法挤出型材尺寸精度高，如图 1-4 所

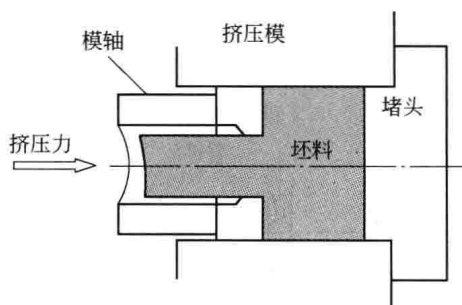


图 1-3 反挤压法^[1]

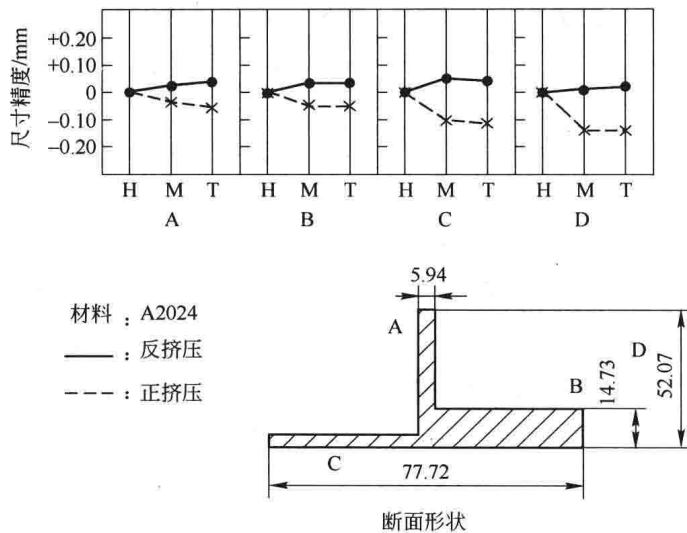
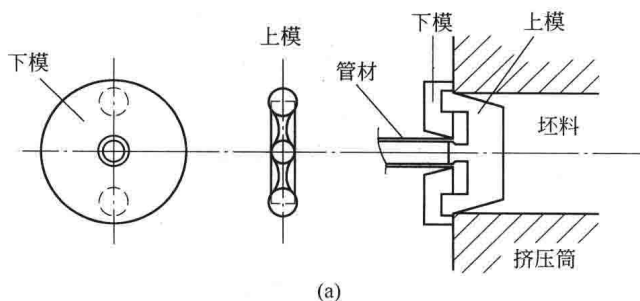
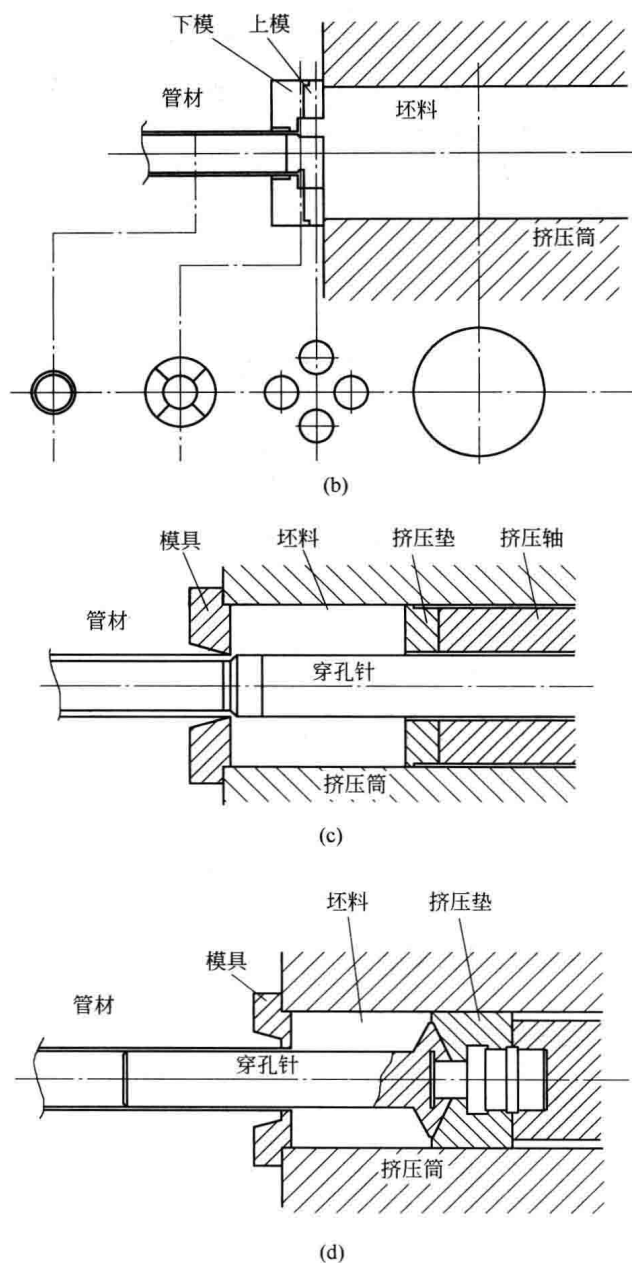


图 1-4 挤出型材的尺寸精度^[12]

示。同时挤压能耗低，因此在相同吨位的设备上，反挤压法可以实现更大变形程度的挤压变形，或挤压变形抗力更高的金属合金。主要缺点是坯料表皮金属容易残留在挤压制表面，同时挤压筒和坯料件的空气和杂质会在挤出制品表面产生缺陷。另外由于受反挤压时挤压轴中空，对于外接圆直径较大的型材，挤压时其内径强度将受到限制，与正挤压法相比其很难进行挤压。到目前为反挤压技术仍不完善，操作较为复杂，挤压产品质量的稳定性仍需进一步提高。

关于空心型材的挤压，正挤压和反挤压法存在较大差异，图 1-5 所示为空心型材挤压时的典型代表，对于纯 Al、Al-Mg-Si 系、Al-Mn 系合金的管材用图 1-5 (a) 所示的舌型模或者图 1-5 (b) 所示的分流组合模进行挤压。Al-Mg 系、Al-Zn 系、Al-Cu 系等高强铝合金、铜合金、钢的管材用图 1-5 (c)、(d) 所示的固定穿孔针法和浮动穿孔针法进行挤压。



图 1-5 空心型材挤压方法^[12]

(a) 舌型模；(b) 分流组合模；(c) 固定穿孔针挤压；(d) 浮动穿孔针挤压

1.2.2 玻璃润滑挤压

玻璃润滑挤压主要用于钢铁材料的棒、管等简单型材的成型。其主要特征是