

大型铝合金型材挤压技术 与 工模具优化设计

刘静安 谢建新 著

北 京
冶金工业出版社

2003



序 言

自 20 世纪 60 年代以来,铝合金型材生产与应用技术发展迅速,主要具有以下重要特征:挤压技术不断发展,静液挤压、连续挤压、等温挤压等新技术新工艺不断完善并获得工业应用;到 20 世纪 70 年代以后,型材应用领域由以建筑型材为主,迅速扩展到航天航空、交通运输等各个工业领域;合金种类与型材品种不断增加;尺寸规格不断地向小断面超精密化和大型化或超大型化两个方向发展。

型材的大型化或超大型化可以带来重大的经济和社会效益,如提高挤压生产效率,促使结构部件的整体化和合理化,提高结构的强度、刚度和耐用性,进而有利于实现轻量化,节约资源与能源等。因此,近 20 年来大型铝合金型材获得快速发展和广泛应用。据统计,目前全世界大型铝合金型材的实际年使用量大约在 30 万 t 以上,规格品种达到 5000 种以上;而每年的实际需求量在 40 万 t 左右,并以较高的速度增长。

大型铝合金型材的主要特点是薄壁扁宽化、断面复杂化、形状尺寸高精度化,而对于轨道车辆、大型舰船等用途的大型型材,其长度要求达到 25~30m 以上。正是由于这些特点,给挤压生产带来了一系列困难。除了需要配备 80MN(8000t)以上的大型挤压设备外,尚需解决诸如大型优质坯料、大型优质高比压扁挤压筒和特种型

材模具等一系列关键技术难题。可以说,大型铝合金型材的生产技术及其工模具设计与制造技术,代表着铝型材生产的挤压技术水平,甚至也从一个方面代表一个国家的工业发达水平。

我国的铝材挤压工业自改革开放以来得到了飞跃性的发展。产量由 1980 年的 15 万 t 增加到目前的 140 万 t,品种超过 8000 种;挤压机的台数达到 2500 台以上,占世界挤压机总台数的将近一半;拥有 80MN(8000t)油压挤压机 3 台,100MN(10000t)油压挤压机和 125MN(12500t)水压挤压机各一台,是世界上拥有万吨级挤压机的少数几个国家之一。大型铝合金型材挤压与工模具技术发展迅速,目前可挤压生产的型材最大断面积达 400cm^2 ,壁板最大宽度达到 740mm,长度达 10~28m。随着国民经济的持续高速发展,预计在 21 世纪的前 20 年内,大型铝合金型材的需求量将迅速增长,应用领域也将不断拓宽。但是,我国的大型铝合金型材,特别是交通运输用大型铝合金型材的生产技术与国外先进工业国家相比仍有很大差距,尚不能适应交通运输现代化、轻量化、高速化、国产化的需求。为了促进我国大型型材生产技术的发展,广大挤压工作者迫切需要一些全面、系统论述大型型材生产关键技术的著作问世。

西南铝业(集团)有限责任公司刘静安教授、北京科技大学谢建新教授长期从事挤压基础理论、生产工艺技术与工模具设计的研究开发工作,并取得了许多重要的研究和攻关成果,是我国在这一领域有重要影响的专家和学者。他们在自己的研究成果与经验积累的基础上,博采众长,合著了《大型铝合金型材挤压技术与工模具优

化设计》一书。该书是一本针对性很强的专著,内容丰富,理论与实际交融,既具有较高的学术价值,又包含了大量的实用技术资料与诀窍,是广大铝合金型材挤压与工模具设计研究开发人员和工程技术人员难得的参考书。相信该书的出版,对于我国铝合金型材,尤其是大型铝合金型材挤压与工模具技术的发展,将起到重要的促进作用。

中国工程院院士



2003年4月8日



前 言

随着以高速列车、城市地铁与轻轨列车为典型代表的现代交通运输工具的轻量化以及航天航空、舰船兵器、机械制造工业的快速发展,对大型铝合金型材的需求量迅速增长。型材的大型化和整体化可以带来巨大的经济和社会效益,如提高挤压生产效率,降低机器或设备的制造成本,大幅度地减轻其重量,提高其使用性能等。因此,发展大型铝合金型材挤压技术,对于发展我国现代国防和交通运输,提高工业装备水平具有重要意义。

另一方面,大型铝合金型材,尤其是用于现代交通运输工具的大型铝合金型材所具有的薄壁扁宽化、尺寸高精度化、断面形状复杂化的特点,给挤压生产带来了一系列困难,如需要配备重型挤压机和大型特种辅助设备;需要使用各种结构特殊、造价昂贵的大型扁挤压筒和模具;金属流动与产品组织性能均匀性的控制难度大大增加等。解决这些困难,除设备方面的因素外,合理地制定挤压工艺,正确地设计工模具就显得尤为重要。为此,著者根据多年科学研究、技术开发和生产经验的积累和总结,写成了本书,试图对大型铝合金型材的挤压技术与工模具设计进行较为系统、深入的总结和论述,为生产现场、科研院所及高等学校相关的工程技术人员、研究人员和师生提供参考。

本书共由5章组成:第1章介绍了大型铝合金型材的

特点、分类、开发应用现状与发展趋势等;第2章论述了各种用途大型铝合金型材的挤压技术与工艺特点;第3章介绍了大型圆挤压筒的设计与优化;第4章讨论了大型扁挤压筒的设计与优化问题;第5章论述了有关大型型材模具设计与优化问题。

本书中引用了国内外专家学者和工程技术人员许多宝贵的资料和研究成果,所引用之处均以参考文献明示,在此向他(她)们表示深深的谢忱。著者衷心感谢西南铝业(集团)有限责任公司曾苏民院士,他对本书的内容提出了许多重要的建议,并欣然为本书作序。著者还要特别感谢北京工业大学校长左铁镛院士,中南大学钟掘院士、曹乃光教授、彭大暑教授,北京有色金属研究总院谢水生教授,西南铝业(集团)有限责任公司副总工程师杨文敏高工,他们许多卓有成效的研究成果大大地丰富了本书的内容,并为本书提出了许多宝贵的意见。北京科技大学材料科学与工程学院周成副教授、张颖助工为本书书稿的修改与录入工作付出了辛勤的劳动,一并表示谢意。

著者热切地希望,本书能为读者提供有益的启示和参考。但因本书是国内外首次对大型铝合金型材挤压技术进行系统的论述,限于著者的学识与经验,书中难免存在不妥之处,真诚地欢迎读者提出批评意见。

著 者

2003年5月8日

作者简介

刘静安，男，61岁，湖南省涟源市人。西南铝业(集团)有限责任公司副总工程师、教授级高工，我国著名的铝合金挤压和模具专家。1964年毕业于中南大学(原中南矿冶学院)有色金属压力加工与热处理专业。北京科技大学、中南大学、重庆大学兼职教授，享受政府特殊津贴。

长期在生产第一线从事科研、开发和生产技术服务工作，具有深厚的理论基础知识与丰富的生产实践经验。曾组织并参与完成了多项国家重点新产品研制任务和技术开发项目，获国家级科技进步奖5项、省部级科技进步奖30余项。正式出版《轻合金挤压工具与模具》(上、下册)、《铝材生产关键技术》、《铝型材挤压模具设计、制造、使用及维修》、《金属挤压理论与技术》等专著多部。在国内外刊物上发表论文200余篇、译文200余篇。



作者简介

谢建新，男，44岁，湖南省双峰县人。北京科技大学材料科学与工程学院院长、教授、博士生导师。1982年1月毕业于中南大学(原中南矿冶学院)金属压力加工专业，1991年3月在日本东北大学工学院材料加工学系获博士学位，并留校任助教、副教授。1995年4月回国。1999年入选国家人事部“百千万人才工程”第一、二层次人选，2001年被聘为教育部长江学者奖励计划特聘教授，2002年获国家杰出青年科学基金资助，并获政府特殊津贴。

主要研究方向有：金属挤压理论与技术、金属控制凝固与控制成形、微成形技术开发与应用、先进复合材料制备与加工等。在有关挤压基础理论、新技术新工艺、工模具优化设计等方面有较系统、深入的研究。正式出版《金属挤压理论与技术》等专著3部、教材1部，在国内外刊物上发表论文90余篇。申请、授权专利6项。

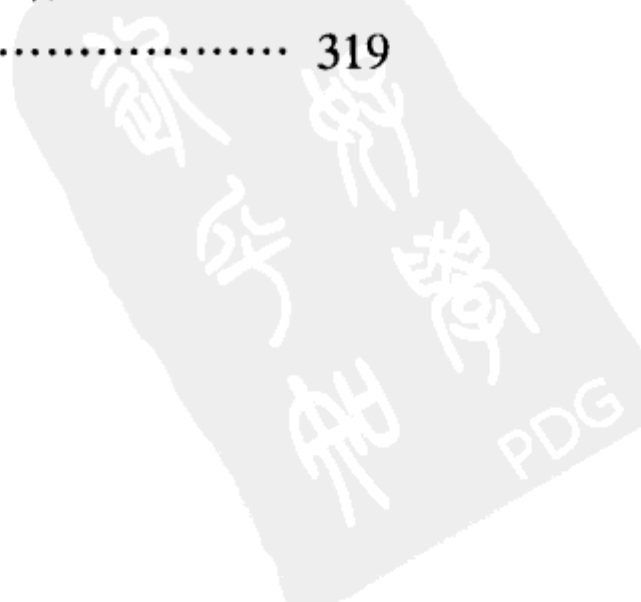
目 录

1 绪论	1
1.1 大型铝合金型材的特点及其分类	1
1.1.1 大型铝合金型材的特点	1
1.1.2 大型铝合金型材的分类	5
1.2 大型挤压型材常用铝合金及其性能	7
1.2.1 挤压型材常用铝合金	7
1.2.2 典型挤压铝合金的性能	14
1.2.3 变形铝合金的可挤压性	19
1.3 大型铝合金型材开发应用现状与发展趋势	22
1.3.1 大型铝合金型材生产技术水平与发展趋势	22
1.3.2 大型铝合金型材应用现状与前景	27
参考文献	50
2 大型铝合金型材挤压技术	52
2.1 大型铝合金型材挤压方法与工艺流程	52
2.1.1 大型铝合金型材挤压方法	52
2.1.2 大型型材挤压工艺流程与参数确定原则	61
2.2 大型铝合金型材生产条件与要求	65
2.2.1 重型卧式挤压机	65
2.2.2 高比压挤压筒	66
2.2.3 挤压性能优良的铝合金	67
2.2.4 宽幅薄壁型材的外形设计	68
2.2.5 模具设计与制造	69
2.2.6 精整矫直	72

2.2.7 大型铝合金型材在线精密淬火与人工时效·····	75
2.3 大型壁板型材挤压技术·····	77
2.3.1 大型壁板型材模具结构及设计·····	77
2.3.2 大型壁板型材的挤压工艺·····	84
2.4 航天航空用大型型材的挤压技术 ·····	102
2.4.1 航天航空工业对大型型材的要求 ·····	102
2.4.2 大型实心型材的生产工艺 ·····	104
2.4.3 大型异形无缝空心型材生产工艺 ·····	111
2.5 交通运输用大型型材挤压技术 ·····	114
2.5.1 铝结构车辆的设计要求 ·····	114
2.5.2 车辆型材用铝合金及焊丝材料的合理选择 ·····	116
2.5.3 车辆用大型铝合金型材典型断面设计 ·····	116
2.5.4 车辆用大型铝合金型材挤压技术 ·····	120
2.6 大型型材的挤压缺陷及质量分析 ·····	129
参考文献·····	135
3 大型圆挤压筒的设计与优化 ·····	137
3.1 大型圆挤压筒的工作环境、受力条件和失效·····	137
3.1.1 大型圆挤压筒的工作环境 ·····	137
3.1.2 大型圆挤压筒的受力条件 ·····	137
3.1.3 大型圆挤压筒的失效 ·····	137
3.2 大型圆挤压筒的结构要素及特点 ·····	138
3.2.1 多层过盈配合热装结构 ·····	138
3.2.2 挤压筒的加热方式 ·····	139
3.2.3 圆挤压筒工作内套的结构 ·····	144
3.2.4 圆挤压筒各层衬套的配合结构 ·····	145
3.2.5 挤压筒与模具的配合方式 ·····	146
3.3 大型圆挤压筒的结构尺寸设计 ·····	148
3.3.1 工作内孔尺寸的确定 ·····	148
3.3.2 挤压筒长度 L_1 的确定 ·····	149

3.3.3 挤压筒衬套厚度的确定	150
3.3.4 挤压筒各衬套间配合过盈量的确定	154
3.3.5 圆挤压筒的强度校核及使用寿命	156
参考文献	159
4 大型扁挤压筒的设计与优化	160
4.1 扁挤压筒的结构类型与失效	160
4.1.1 扁挤压筒的结构特点	160
4.1.2 扁挤压筒的失效	162
4.2 扁挤压筒的设计	164
4.2.1 扁挤压筒的设计要点	164
4.2.2 扁挤压筒的加热方式	165
4.2.3 大型扁挤压筒用材料	167
4.2.4 大型扁挤压筒的结构尺寸	168
4.3 大型扁挤压筒的应力计算与强度校核	174
4.3.1 扁挤压筒的应力计算	175
4.3.2 扁挤压筒强度校核	183
4.4 大型扁挤压筒的有限元分析与优化设计	190
4.4.1 分析模型及其简化	190
4.4.2 装配接触压力与装配应力	192
4.4.3 内压所产生的挤压应力	196
4.4.4 扁挤压筒内的工作应力	197
4.4.5 各种因素对扁挤压筒内应力分布的影响	201
4.4.6 扁挤压筒内的温度场与热应力场	205
4.4.7 扁挤压筒内孔形状的优化	213
参考文献	216
5 大型型材模具的设计与优化	218
5.1 模具设计的基本原则与要求	218
5.1.1 设计时应考虑的主要因素	218

5.1.2	基本原则与步骤	219
5.1.3	技术条件与基本要求	221
5.2	大型实心型材挤压模具的设计	222
5.2.1	模孔在模子平面上的合理配置	222
5.2.2	模孔形状与加工尺寸的设计	226
5.2.3	控制型材各部分流速均匀性的方法	230
5.2.4	模具强度校核	242
5.3	大型带筋壁板型材挤压模的设计	246
5.3.1	带筋壁板型材的挤压特点及模具的工作条件	246
5.3.2	模具结构及设计举例	247
5.4	大型空心型材模具的设计	254
5.4.1	分流组合模设计	254
5.4.2	无缝异形型材和管材挤压模具设计	272
5.5	其他大型型材挤压模具的设计	278
5.5.1	大悬臂半空心型材模具的设计	278
5.5.2	阶段变断面型材模具的设计	281
5.5.3	宽展模的设计	288
5.5.4	提高模具使用寿命的新结构设计	294
5.6	大型型材模具的制造工艺	307
5.6.1	大型型材模具的制造工艺特点与技术要求	307
5.6.2	大型平面分流模的加工特点及提高使用寿命的主要技术措施	308
5.6.3	大型型材模具用材料及其性能要求	309
5.6.4	大型型材模具的制造工艺及主要设备	311
	参考文献	319



1 绪 论

1.1 大型铝合金型材的特点及其分类

1.1.1 大型铝合金型材的特点^[1]

随着科学技术的进步和现代经济的高速发展,铝合金型材正向着大型化和整体化、薄壁扁宽化、尺寸高精度化、形状复杂化、外形轮廓美观化的方向发展。品种规格不断增多,应用范围不断拓展,已由 20 世纪 50~60 年代民用建筑型材为主体,扩展到了航天航空、汽车船舶、交通运输、电子电力、石油化工、机械制造、家用电器等各行各业和人们日常生活各个方面。近年来,大型铝合金型材的发展尤其引人注目,据不完全统计,目前世界上每年需要的大型铝合金型材约 40 万 t,并以较高的速度增长。为了适应这种市场需求趋势,各国都在加速建设重型挤压机或大型型材挤压生产线。

大型铝合金型材之所以能获得高速发展和广泛应用,主要是由于它具有许多独特的优点,能满足市场的各种需求。

1.1.1.1 大型化和整体化

铝合金挤压型材的“大型”或“小型”,主要是以它的外形尺寸或断面积大小来界定的。一般来说,大型型材具有以下特点:

- (1) 型材的宽度或外接圆直径大于 250mm;
- (2) 型材断面积大于 20cm^2 ;
- (3) 型材交货长度大于 10m。

图 1-1 为日本近年来铝合金型材生产能力与需求量的比较,实线表示生产能力,虚线表示需求量。由图可知,尽管大型型材生

产在整个型材品种中占有较大比例,但仍不能满足市场需求。近年来,日本由于设计制造和引进了十余台 39MN 以上的大型挤压机,使大型型材的生产能力大为提高,与此相适应,日本的型材生产也进入了超越传统挤压技术的“大型型材挤压技术”时期,甚至有人提出 21 世纪是“大型型材挤压技术”或“大型挤压机”世纪的观点。

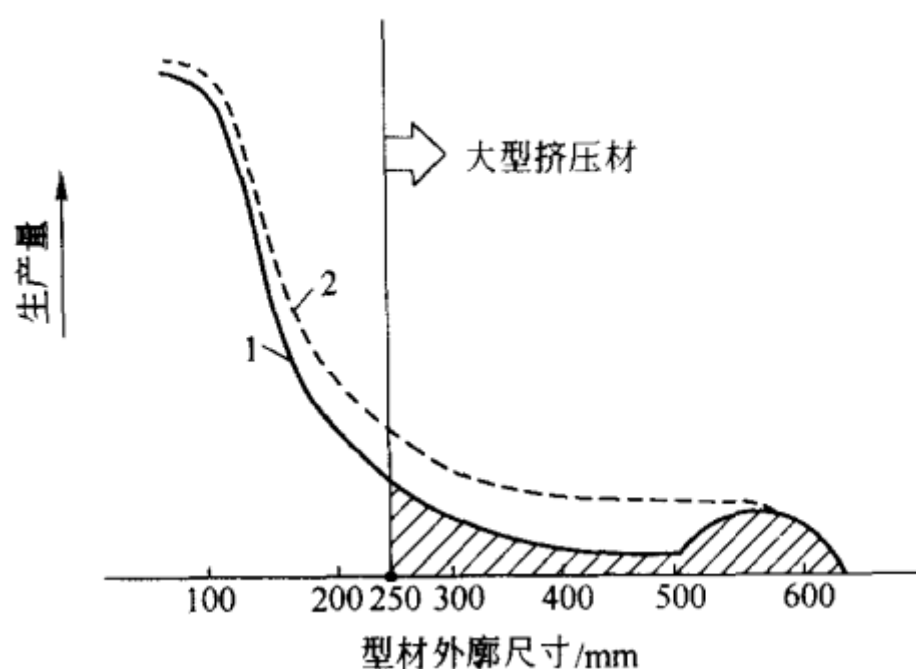


图 1-1 不同尺寸型材的生产量和需求量

1—生产量;2—需求量

型材的大型化和整体化可带来巨大的经济和社会效益。

(1) 用一根大型型材取代过去用两根或多根型材拼成的宽幅薄壁型材构件,既节约了模具设计、制造费用,提高挤压生产率,又可减少拼接费用。

(2) 可使机械部件的结构变得更为合理。采用大型整体型材不仅可减少零件和对接数量,改善结构的工艺性,减轻机器的质量及生产这些机器所需的劳动量和成本,而且可大大提高结构的强度和刚度,同时在拉应力区由于接头洞孔所引起的应力集中也随之减小。

(3) 由于大型整体型材密封性好,无纵向和横向接缝(焊接、铆接、粘接、压接等),因此可获得完善的部件表面。

由于型材的大型化和整体化,需要配备重型挤压机、可获得高比压^①的大型圆挤压筒或扁挤压筒、大型特种模具以及高精度水(气)淬火装备、大型拉伸矫直设备和特殊的辊矫装置等,使型材挤压技术的难度大大增加。

1.1.1.2 薄壁化和轻量化

大型的整体结构部件,过去用数块小型材组装拼接而成,或用轧制板材弯曲加工而成,而用大型整体型材代替之后,为了达到轻量化的要求,必须保证大型整体型材的壁厚与小型材或轧制板材的厚度相同。由于轻量化是现代航天航空飞行器、铁道车辆、地铁列车、双层客车、汽车和船舶高速化、重载化的主要途径,因而向大型整体铝合金型材提出了“更大型化、更扁宽化、更薄壁化”的要求。

型材的宽厚比(型材的宽度 W 与壁厚 t 之比 W/t)是表征型材扁宽化和薄壁化的重要指标,也是反映型材加工难易程度的主要指标^②。当 $W/t \leq 130$ 时,在现代挤压技术条件下,能较顺利地生产出合格的产品;若 $W/t > 130$ 时,则可能由于成形困难,断面尺寸和形状精度难于保证等原因,使产品质量大为降低,生产率和成品率急剧下降,生产成本大为提高。

1.1.1.3 断面尺寸和形位公差高精密化

大型铝合金型材断面形状复杂,长度可达 30m,是多种功能的集合体,往往在不进行机械加工的情况下进行拼接组焊。因此,对断面尺寸公差和定尺长度内的扭拧度、平直度、弯曲度、波浪度等形位公差的要求十分严格。有时要求达到一般机械加工精度或与冷拔加工产品同等的精度。这对于用热挤压加工成形的断面复

① 挤压时可对垫片施加的最大单位挤压力,称为比压,等于挤压机的吨位与垫片的面积之比。对于不带穿孔针挤压时的情形,比压也等于挤压机的吨位与挤压筒的横断面积之比。

② 当型材的宽厚比 W/t 一定时,其宽高比(型材断面宽度 W 与高度 H 之比) W/H 是反映型材加工难易程度的另一个主要指标。