



Technology and Application of Liquid
Solid Forming Under High Pressure

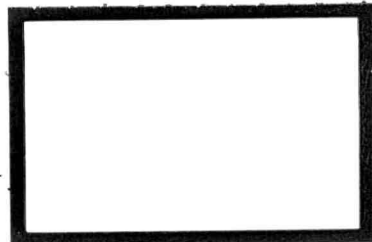
液固高压成形 技术与应用

■ 李贺军 齐乐华 周计明 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

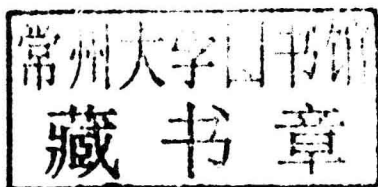
国家科学技术学术著作出版基金资



液固高压成形技术与应用

Technology and Application of Liquid Solid
Forming Under High Pressure

李贺军 齐乐华 周计明 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

液固高压成形技术与应用/李贺军,齐乐华,周计明
著. —北京:国防工业出版社,2013.1

ISBN 978-7-118-08332-3

I. ①液... II. ①李... ②齐... ③周... III. ①液
固萃取—压制成型 IV. ①TF804.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 211440 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 19 3/4 字数 299 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

此书同时获得

总装备部国防科技图书出版基金资助

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加

兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金

第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

序

液固高压成形是在液态模锻研究的基础上逐步发展起来的融铸造、模锻与热挤压工艺于一体的节能降耗新技术。该技术是在材料处于液固态时对其施压,并在压力作用下结晶、强制补缩和产生塑性变形,因此可以消除材料的内部缺陷,提高构件性能,具有变形力小、成形质量高、构件组织性能优良、生产成本低等优点,近年来在金属及金属基复合材料成形领域得到了日益广泛的应用,是颇具发展前景和竞争优势的一种金属成形新技术。由于涉及高压凝固理论、塑性成形力学、冶金学和过程控制等诸多学科领域,其理论及应用中的诸多问题仍需要深入研究,本书是对液固高压成形理论与工艺应用的系统总结。

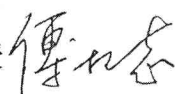
液固高压成形技术的研究在我国起步较早。自 20 世纪 70 年代起,哈尔滨工业大学霍文灿教授、兵器五二研究所齐丕骧教授、原武汉水运学院陈炳光教授等研究团队在液态模锻方面开展了卓有成效的研究工作,相继出版了相关专著,但系统论述液固高压成形理论与应用方面的书籍至今尚未见到。因而,急需有一部全面揭示液固高压成形内在规律并能指导实际应用的学术专著,以适应当前广泛应用的铝、镁合金及其复合材料高性能复杂结构件的成形需求,为降低生产成本、扩大该技术的应用领域奠定基础。

李贺军教授 20 世纪 80 年代初师从霍文灿教授,即对液态模锻工艺和理论进行深入研究,并以此为基础提出了液态挤压新工艺。著者随后又提出了液态浸渗挤压、真空吸渗挤压等液固高压成形新工艺与新思路,突破了凝固速度与变形速度难以协调的关键技术,并指导多名博士和硕士对高压凝

固—液固成形的共性规律进行了深入系统的研究,由此揭示了液固高压成形过程的实质,丰富了液固高压成形的概念及理论内涵。所总结的“液固高压成形工艺与控制技术”和“液固高压成形理论与应用基础”的研究成果分别获得国家技术发明二等奖和陕西省科学技术一等奖。

《液固高压成形技术与应用》一书是著者在多项国家自然科学基金和省部级科学基金的资助下,对液固高压成形相关理论与技术问题进行长期深入系统研究的成果结晶,该书全面阐述了液固高压成形的力学冶金学原理和材料的力学行为、金属塑性流动规律及其强韧化机制;揭示了液固高压成形过程中的物理、化学冶金现象和变形规律。特别是在系统建模、人工智能应用和参数优化等方面的研究成果是目前其他相关专著中所未涉及的,填补了国内外在这方面的空白,展现了近年来国内外液固高压成形领域的最新研究进展,具有重要的学术价值。

该书内容丰富、言简意赅,理论结合实际,指导性强,对于相关学科的本科生、研究生和工程技术人员有重要的参考价值和指导作用。

中国工程院院士、西北工业大学教授 

2013 年 1 月

前 言

液固高压成形是融铸造、模锻及热挤压工艺于一体的节能降耗新技术。该技术是在材料处于液固态时对其施压,发生压力下结晶、强制补缩,产生塑性变形,因此可以消除材料的内部缺陷,提高构件性能,且变形力远低于模锻和热挤压,可广泛用于铝、镁合金及其高性能复合材料结构件的成形,在航空、航天、兵器、汽车等领域具有广阔应用前景。由于液固高压成形技术涉及材料液固相变、塑性变形和过程控制等诸多科学技术问题,理论和应用研究难度较大。

本书是著者 20 余年来在十余项国家自然科学基金、航空科学基金、国防预研基金、陕西省自然基金等项目资助下,在液固高压成形领域潜心研究的理论与应用成果的总结与概括,其成果分别获陕西省科学技术一等奖、三等奖,航空科技进步二等奖、三等奖。其间,得到了霍文灿教授、罗守靖教授的悉心指导和帮助,著者指导的博士生和硕士生欧阳海波、苏力争、李正佳、刘健和关俊涛等在碳纤维增强镁基复合材料的成形试验及理论方面做出很大贡献。

本书系统揭示了高压凝固—液固成形的共性规律,提出了基于实验辨识与参数优化相结合的模糊神经网络/遗传算法多变量系统建模与优化方法,建立起成形理论、工艺实验、辨识建模和参数优化的关联体系。

全书共分 10 章,包括绪论,液固高压成形力学冶金学理论,液固高压成形的强韧化机制,锌合金液态模锻,锌、铝合金管、棒、型材液态挤压,铝基复合材料液态浸渗挤压,短切碳纤维增强镁基复合材料真空吸渗挤压工艺,液

固高压成形系统辨识与建模方法,液固高压成形系统优化与过程控制,液固高压成形工艺应用实例等。

本书在撰写过程中得到了博士生苏力争、欧阳海波、李正佳、王振军、刘健、孙振锋等的大力帮助,在此表示衷心感谢。

本书的出版还得到了国家科学技术学术著作出版基金及国防科技图书出版基金的资助,在此一并表示诚挚谢意!

由于著者水平有限,如有不当之处,敬请读者批评指正。

著者

2012年9月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 液固高压成形工艺特点与分类	1
1.1.1 液态模锻	1
1.1.2 液态挤压	3
1.1.3 液态浸渗挤压	4
1.1.4 真空吸渗挤压	5
1.1.5 半固态压力成形	6
1.2 液固高压成形技术研究现状及发展趋势	8
1.2.1 液固高压成形技术研究现状	8
1.2.2 液固高压成形技术发展趋势	10
参考文献	13
第 2 章 液固高压成形力学冶金学理论	16
2.1 液态金属在压力作用下的凝固行为	16
2.1.1 压力下结晶凝固过程分析	16
2.1.2 压力对合金熔点的影响	18
2.1.3 压力对结晶参数的影响	19
2.1.4 压力对材料偏析的影响	24
2.1.5 压力对合金组织成分的影响	25
2.2 液固高压成形中材料的变形行为	25
2.2.1 组合体力学模型	26
2.2.2 塑性流动模型	30
2.2.3 成形压力变化规律	31
2.2.4 变形协调方程	33

2.2.5 变形力计算	35
2.2.6 半固态材料的力学行为	43
参考文献	52
第3章 液固高压成形强韧化机制	56
3.1 合金液固高压成形强化机制	56
3.1.1 固溶强化	56
3.1.2 细晶强化	59
3.1.3 位错强化	63
3.1.4 第二相强化	65
3.2 金属基复合材料液固高压成形强化机制	66
3.2.1 第二相强化	67
3.2.2 界面强化	68
3.2.3 位错强化	73
3.2.4 其他强化机制	75
3.3 液固高压成形强韧化机理	77
参考文献	82
第4章 锌合金液态模锻	85
4.1 锌合金液态模锻装置及材料选用	85
4.2 锌合金液态模锻工艺参数的选取	88
4.2.1 浇注温度	88
4.2.2 模具温度	88
4.2.3 加压前停留时间	89
4.2.4 比压	89
4.2.5 保压时间	90
4.3 液态模锻对锌合金性能的影响	91
4.3.1 液态模锻对 ZA27 合金常温力学性能的影响	93
4.3.2 液态模锻对锌合金耐磨性能的影响	97
4.3.3 液态模锻对锌合金高温性能的影响	99
4.3.4 液态模锻对锌合金组织的影响	100
4.4 锌合金液态模锻的缺陷及其控制	103

4.4.1 表面缺陷及其控制	103
4.4.2 内部缺陷及其控制	105
参考文献	109
第5章 锌、铝合金管、棒、型材液态挤压	111
5.1 型材液态挤压的工艺原理及参数选取	111
5.1.1 管材液态挤压	111
5.1.2 棒材液态挤压	113
5.1.3 其他型材液态挤压	114
5.2 液态挤压对锌合金组织与性能的影响	116
5.2.1 液态挤压对锌合金力学性能及耐磨性的影响	116
5.2.2 液态挤压对锌合金组织的影响	118
5.3 液态挤压对铝合金组织与性能的影响	123
5.3.1 液态挤压对 ZL108 合金力学性能的影响	123
5.3.2 液态挤压对 ZL108 合金组织的影响	124
5.4 液态挤压制件的缺陷产生及其控制方法	126
5.4.1 表面缺陷	126
5.4.2 其他缺陷	128
5.4.3 制件缺陷的控制方法	131
参考文献	132
第6章 铝基复合材料液态浸渗挤压	133
6.1 液态浸渗挤压工艺参数	133
6.2 液态浸渗挤压模具内部温度场分布	134
6.3 液态浸渗挤压对铝基复合材料组织性能的影响	136
6.3.1 液态浸渗挤压对铝基复合材料性能的影响	136
6.3.2 液态浸渗挤压对复合材料微观组织的影响	142
6.3.3 液态浸渗挤压对复合材料界面的影响	146
6.4 液态浸渗挤压制件的缺陷产生及其控制方法	149
6.4.1 宏观缺陷及其控制方法	149
6.4.2 微观缺陷及其控制方法	150
参考文献	154

第7章 短切碳纤维增强镁基复合材料真空吸渗挤压工艺	156
7.1 短切碳纤维预制体的制备方法	156
7.1.1 预制体预成形	156
7.1.2 碳纤维表面处理	159
7.2 液态金属浸渗过程的理论建模	161
7.2.1 液态金属浸渗的静力学模型	161
7.2.2 液态金属浸渗的动力学模型	162
7.3 真空吸渗工艺研究	165
7.3.1 真空吸渗实验装置设计	165
7.3.2 影响液态金属浸渗过程的主要因素	165
7.3.3 真空吸渗正交实验设计	169
7.3.4 液态金属浸渗行为的影响因素分析	169
7.4 真空吸渗挤压工艺研究	172
7.4.1 真空吸渗挤压工艺原理	172
7.4.2 真空吸渗挤压工艺参数的确定	172
7.4.3 液固挤压成形过程中工艺参数的变化规律及稳定成形条件	174
7.4.4 工艺参数对复合材料成形过程的影响	178
7.5 真空吸渗挤压 C_{sf}/Mg 复合材料的组织与性能	180
7.5.1 $C_{sf}/AZ91D$ 复合材料的组织结构特征	180
7.5.2 $C_{sf}/AZ91D$ 复合材料的力学性能及其影响因素	187
7.5.3 $C_{sf}/AZ91D$ 复合材料的热膨胀性能	194
7.5.4 $C_{sf}/AZ91D$ 复合材料的阻尼性能	199
7.6 $C_{sf}/AZ91D$ 复合材料常见缺陷及预防措施	206
7.6.1 浸渗孔洞	206
7.6.2 表面划痕	207
7.6.3 制件热裂	207
7.6.4 表面裂纹	207
7.6.5 挤压试样弯曲	208
参考文献	209

第 8 章 液固高压成形系统辨识与建模方法	211
8.1 液固挤压复合材料建模与优化系统的设计	211
8.1.1 液固挤压复合材料工艺建模与优化系统的体系结构	211
8.1.2 数据采集系统的设计与开发	212
8.2 液固挤压复合材料工艺系统建模方法	215
8.2.1 液固挤压复合材料正交试验设计	215
8.2.2 液固挤压复合材料动态系统建模方法	216
8.3 液固挤压复合材料过程神经网络建模方法	221
8.3.1 神经网络建模方法的基本原理	221
8.3.2 基于 BP 神经网络工艺参数知识库的建立	222
8.4 液固挤压复合材料过程模糊神经网络建模方法	230
8.4.1 模糊神经网络建模基本原理	231
8.4.2 液固挤压复合材料模糊神经网络系统的建立	233
8.4.3 工艺参数耦合作用分析	242
参考文献	245
第 9 章 液固高压成形系统优化与过程控制	246
9.1 液固挤压成形系统遗传算法优化的基本原理	246
9.1.1 遗传算法的基本原理与方法	246
9.1.2 遗传算法优化关键技术问题处理	247
9.2 液固挤压成形复合材料工艺遗传算法优化系统的建立	250
9.2.1 基于 ANN/GA 的液固挤压复合材料工艺参数优化	250
9.2.2 基于 FNN/GA 的液固挤压复合材料工艺参数多目标 优化	252
9.2.3 系统建模优化方法比较	260
9.3 液固挤压复合材料工艺优化系统的软件实现	262
9.3.1 主界面程序的开发	262
9.3.2 数据库维护程序的开发	265
9.4 液固高压成形过程控制方法	266
9.4.1 液固挤压复合材料挤压速度控制系统设计	267
9.4.2 液固挤压复合材料保压过程控制系统设计	268

9.4.3 液固挤压复合材料过程开关控制系统	269
9.4.4 液固挤压复合材料过程控制系统界面设计	270
参考文献	271
第10章 液固高压成形工艺应用实例	273
10.1 液态模锻工艺成形波导弯头	274
10.2 液态模锻工艺成形锌合金轴承保持架	275
10.3 液态模锻成形炮弹壳体	277
10.4 液态模锻成形空压机铝合金连杆	278
10.5 铸锻双控成形镁合金轮毂	280
10.6 局部加载-定域补缩工艺制备铝负重轮	280
10.7 液态模锻浸渗工艺成形局部增强复合材料活塞	282
10.8 触变压力成形铝镁合金制件	283
10.9 液态(浸渗)挤压工艺成形合金及其复合材料管棒件与异 型件	284
参考文献	285