

21 世纪新材料科学与技术丛书

复合材料 液态挤压

罗守靖 著

冶金工业出版社

21 世纪新材料科学与技术丛书

复合材料液态挤压

罗守靖 著

冶金工业出版社

2002

国家自然科学基金资助项目

图书在版编目(CIP)数据

复合材料液态挤压/罗守靖著. —北京:冶金工业出版社, 2002. 7
(21 世纪新材料科学与技术丛书)

ISBN 7-5024-2995-6

I. 复… II. 罗… III. 金属基复合材料—挤压—工艺
IV. TG376

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 020758 号

复合材料液态挤压

出 版 人 曹胜利(北京市东城区沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

作 者 罗守靖

责任编辑 张登科(联系电话: 010-64062877)

美术编辑 熊晓梅

责任校对 王贺兰

责任印制 牛晓波

版式设计 张 青

出 版 冶金工业出版社(www.cnrip.com)

发 行 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(100711); 电话: 010-65289081

经 销 全国各地新华书店

印 刷 北京兴华印刷厂

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 8.75 印张

字 数 234 千字

页 数 267 页

版 次 2002 年 7 月第 1 版

印 次 2002 年 7 月第 1 次印刷

印 数 1~3500 册

书 号 ISBN 7-5024-2995-6/TG·308

定 价 25.00 元

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

编者的话

材料是人类物质生活和人类文明进步的基础,新材料是支撑现代文明社会的基石和高新技术发展的先导。

在刚刚过去的 20 世纪,科学技术迅猛发展,各学科交叉融合。随着科学的发展与工业技术的进步,传统的金属材料、无机非金属材料和高分子材料越来越不能满足现代科技应用的需要,科技工作者不断研制出新材料,特别是新型功能材料,如超导材料、智能材料、纳米材料、生物医用材料、储能材料、环境材料、薄膜材料、先进陶瓷材料等等。正是这些新材料所具有的特殊性能,使其他高新技术及产业得以高速发展,同时材料科学与技术本身相关产业也将快速发展。如纳米材料和技术为功能器件的小型化、多功能化和智能化展示了其未来诱人的发展前景;又如光电子材料的研究与开发为信息技术及产品不断满足人们的要求提供了保障。

21 世纪,材料科学与技术将与信息技术、生物技术等其他科学技术一同为人类的

进步做出贡献。然而,目前有些具有美好发展前景的新型材料的研究与开发,还处于基础阶段,还需要材料工作者做大量理论研究与技术开发工作,并不断总结提高。基于此,我们将有重点、有系统地组织国内从事新材料基础研究、材料制备工艺与先进测试分析技术研制以及产品应用开发的科技工作者,将其取得的最新科技成果及时归纳总结,撰写成著作,编入《21 世纪新材料科学与技术丛书》陆续出版,以推进我国材料科学与技术及其产业化的进程,满足其他高新技术产业发展对新材料提出的更高要求;同时,让更多的科技工作者同享这些研究成果,记录我国在 21 世纪中材料科学与技术的发展历程。

欢迎承担国家“863”项目、国家自然科学基金资助项目、国家“973”项目以及省、部重点研究课题的材料研究学者踊跃参与此项工作,欢迎广大科技工作者和读者提供建议和意见。

2002 年 6 月

前言

液态挤压是作者在多年从事液态模锻理论和应用研究基础上,提出的材料加工领域的一个新课题。液态模锻虽然融入了力学成形,具有塑性变形特征,但其变形量却很小,其组织充其量是稍有变态的铸造组织。液态挤压既保留了液态模锻下高压凝固的特点,又引入了热挤压大塑性变形的优势,其工艺复合交叉,因其具有创新性,1990年获国家自然科学基金资助,并取得一系列成果,包括确立了铝、锌合金棒、管和型材的液态挤压过程;提出了液态挤压金属流动的理论模型;提出了液态挤压使液态金属在压力下发生结晶的同时,承受大塑性变形的双重强韧化机制;成功地解决了集传热、凝固、大变形于一体的数值模拟问题。该成果获1994年航天工业总公司科技成果二等奖。随后又成功地把成果应用于铝合金管、型材生产,于1996年获航空工业总公司科技成果二等奖。

通过对液态挤压的研究,作者发现它可以使金属基复合材料制备与成形融合,并开

拓出一种制造工艺简单、质量稳定和成本低廉的复合材料成形新工艺。为此,作者把液态挤压引入了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf} / 2\text{Al}_2$ 和陶瓷粒子 $/2\text{Al}_2$ 两种类型复合材料成形,其意义在于把短纤维(或颗粒)与基体高压下浸渗和固-液挤压过程在同一模具内按顺序完成。由于在变形抗力较小条件下,可以实现大塑性变形,并使其结合界面致密,基体为变形组织,增强体损伤小,从而经济地获得了保持基体韧性,又具有增强材料特有强度的一种综合性复合材料。作者的两项研究,均获国家自然科学基金的资助(59275202,59475055)。第一项成果于1996年通过专家鉴定;第二项于1998年被国家自然科学基金委评定为特优结项成果。

从液态挤压提出到在金属基复合材料制备与成形中的应用,历经7年,期间得到了霍文灿教授的帮助,作者指导的博士生李贺军、胡连喜,硕士生孙家宽、吴刚强等,从理论和实验两方面结合,进行了开拓性研究,表现在完成了两份博士论文和三份硕士论文,并以此为基础,陆续在国内外刊物上发表论文40余篇,其中被EI收录7篇,SCI收录5篇。

感谢国家自然科学基金委的资助,使作者能在液态挤压这一新领域耕耘,并取得一定的成果。作为一种回报,作者萌生了一种撰写专著的强烈愿望,以便使成果系统化、理论化,以促进与国内外研究同行的交流,推进这项新技术的进一步研究和应用。

另外,本书的出版得到了哈尔滨工业大学出版基金的部分资助,在此表示感谢。

作者希望通过本书,向读者介绍一种新的金属基复

合材料制备与成形方法,如果有所裨益,那将是撰写本书的初衷所在。

在撰写本书过程中,始终得到了博士生姜巨福、王迎等的帮助,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中不当之处,敬请读者指正。

作 者

2002 年 2 月于哈尔滨工业大学

21世纪新材料科学与技术丛书

已出书目

- 金刚石薄膜沉积制备工艺与应用
- 金属凝固过程中的晶体生长与控制
- 复合材料液态挤压
- 陶瓷材料的强韧化
- TiC/Fe复合材料的自蔓延高温合成工艺
及其应用

目 录

1 绪论	(1)
1.1 液态模锻理论研究及应用	(1)
1.1.1 液态模锻理论	(1)
1.1.2 液态模锻工艺应用	(2)
1.2 液态挤压	(8)
1.2.1 连续铸挤	(9)
1.2.2 固态重熔挤压	(9)
1.2.3 液态挤压	(11)
1.3 金属基复合材料成形	(13)
1.3.1 金属基复合材料发展概况	(13)
1.3.2 金属基复合材料制备与成形 技术的现状	(15)
1.3.3 液态挤压在金属基复合材料 中的应用原理	(24)
2 液态挤压	(27)
2.1 管、棒、型材液态挤压	(27)
2.1.1 管材液态挤压	(27)
2.1.2 型材的液态挤压	(36)
2.1.3 线、棒材的液态挤压	(38)
2.2 液态挤压成形规律	(39)
2.2.1 挤压过程的金属流动	(39)

2.2.2	液态挤压的压力曲线·····	(44)
2.2.3	液态挤压的压下速度·····	(48)
2.2.4	液态挤压制件缺陷分析·····	(49)
2.2.5	影响制件质量的主要因素·····	(55)
2.3	液态挤压强韧化·····	(56)
2.3.1	锌基合金液态挤压强韧化·····	(56)
2.3.2	ZL108 铝合金的液态挤压强韧化·····	(71)
2.4	液态挤压力学模型及变形力解析计算·····	(78)
2.4.1	组合体模型及力学分析·····	(78)
2.4.2	变形力计算·····	(79)
2.4.3	液态挤压与传统挤压变形力比较·····	(85)
2.5	管材液态挤压模具温度场的实验研究·····	(87)
2.5.1	沿模具径向温度变化·····	(87)
2.5.2	沿模具高度方向的温度分布·····	(89)
2.6	液态挤压过程模拟·····	(91)
2.6.1	热传导分析·····	(91)
2.6.2	塑性变形的 UBET 分析·····	(98)
2.6.3	变形后差分网格的确定·····	(109)
2.6.4	程序设计及参数选取·····	(111)
2.6.5	模拟结果·····	(112)
3	短纤维增强金属基复合材料液态挤压·····	(117)
3.1	液态金属浸渗过程·····	(117)
3.1.1	浸渗过程的静力学分析·····	(117)
3.1.2	浸渗过程的动力学分析·····	(120)
3.1.3	纤维预热温度对浸渗过程的影响·····	(123)
3.1.4	液态浸渗实验研究·····	(128)
3.2	液态浸渗后直接挤压工艺的研究·····	(132)
3.2.1	工艺方案选择与试验装置设计·····	(132)
3.2.2	工艺参数确定·····	(133)

3.2.3 挤压成形过程的规律与特点	(137)
3.2.4 挤压时制件内部与模具温度场	(142)
3.3 液态浸渗后直接挤压 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}/\text{Al}$ 复合材料	
组织与性能研究	(149)
3.3.1 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}/\text{Al}$ 复合材料的组织研究	(149)
3.3.2 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}/\text{Al}$ 复合材料的界面研究	(154)
3.3.3 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}/\text{Al}$ 复合材料性能的研究	(163)
3.4 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}/\text{Al}$ 复合材料在高温及固-液态	
下的力学行为	(177)
3.4.1 试验方案	(177)
3.4.2 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}/\text{Al}$ 复合材料在高温及固-液态	
下的流动应力	(179)
3.4.3 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}/2\text{A12}$ 复合材料在高温及固-液态	
下的变形特点与破坏形式	(184)
3.5 液态浸渗后直接挤压工艺过程的数值模拟	(194)
3.5.1 程序设计及参数选取	(194)
3.5.2 模拟结果与分析	(196)
4 颗粒增强金属基复合材料半固态挤压	(202)
4.1 $\text{SiC}_p/2\text{A12}$ 搅融混合-半固态挤压	(202)
4.1.1 搅融混合过程的理论分析	(202)
4.1.2 搅融混合过程的实验研究	(212)
4.1.3 搅融混合后半固态挤压	(217)
4.2 内生成 $\text{TiC}_p/2\text{A12}$ 复合材料重熔后半固态	
挤压的研究	(219)
4.2.1 接触反应法制备 $\text{TiC}_p/2\text{A12}$ 复合材料	(219)
4.2.2 $\text{TiC}_p/2\text{A12}$ 复合材料重熔后的半固态挤压	(221)
4.3 $\text{SiC}_p/2\text{A12}$ 、 $\text{TiC}_p/2\text{A12}$ 与复合材料性能分析	(225)
4.3.1 复合材料的物理性能	(225)
4.3.2 复合材料的力学性能	(230)

4.4	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}\cdot\text{SiC}_p/\text{Al}$ 复合材料液态加压成形	(241)
4.4.1	液态浸渗过程	(241)
4.4.2	渗后直接挤压	(242)
4.4.3	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}\cdot\text{SiC}_p/2\text{A12}$ 复合材料的组织研究	(243)
4.4.4	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{sf}\cdot\text{SiC}_p/2\text{A12}$ 复合材料的性能研究	(245)
参考文献		(255)

1 绪 论

1.1 液态模锻理论研究及应用

1.1.1 液态模锻理论

理论研究依赖于生产实践,其成果又必然指导实践。液态模锻的出现是以补充现行工艺不足,即压力铸造和热模锻发展起来的。它针对某些特殊制件(包括制件材料、形状、尺寸和批量等),采用铸造方法生产,制件性能难以满足预定的要求,改用锻造方法生产,难以成形(成形力太大),或即使成形,成本也太高。这样一类制件,采用液态模锻进行生产或许是最好的方法之一。例如,船用或车辆用发动机铝活塞就是一个典型的例子^[1]。

活塞对发动机的使用性能(如寿命)有直接影响。对活塞的要求是:质量轻、热传导性好、膨胀系数小、有足够的高温强度和耐热疲劳性能、耐磨、耐腐蚀、尺寸稳定等。活塞毛坯的制造,世界各国多数采用金属型铸造,个别也采用锻造工艺。锻造活塞耐热疲劳性能好,适用于高爆发压力的高速活塞,但加工复杂,成本高;铸造活塞加工简单,成本较低,但容易出现各种铸造缺陷,力学性能大为降低,甚至造成非正常的损坏。铝活塞液态模锻工艺克服了铸造活塞内部疏松、缩孔等缺陷,也克服了锻造活塞需要重型设备的困难,而且还有缩短加工周期、改善劳动环境、节约能源、提高金属利用率等优点。目前,世界各国把液态模锻作为生产铝活塞毛坯的主要方法之一。已制造出直径分别为: $\phi 90\text{mm}$ 、 $\phi 180\text{mm}$ 、 $\phi 220\text{mm}$ 、 $\phi 400\text{mm}$ 大小不一的铝活塞液态模锻毛坯。这就使得有色合金液态模锻工艺在生产中得到完全的确立。

因此,液态模锻研究,初期主要集中在工艺开拓,即依据特定产品,确定成形方案,优化工艺参数,设计模具,选定加压设备等,但它和理论工作又总是相辅相成地联结在一起。

液态模锻过程实质是物理冶金过程和力学成形过程的复合,涉及金属学、凝固和塑性变形等理论,这些理论的融合和交叉形成和确立了液态模锻理论。液态模锻主要理论框架有^[1]:

(1) 液态模锻下物理冶金学理论。包括液态模锻三种热力学模型;液态模锻下合金热物理参数变化规律;液态模锻下合金相图变化特征;液态模锻下合金凝固的热力学条件和动力学条件;成分过冷和偏析;液态模锻下,压力对晶体长大中形成结构缺陷的影响;液态模锻下,压力对气体析出过程的影响等。

(2) 液态模锻下凝固理论。包括液态模锻下模具温度场和熔体温度场;液态模锻下动态凝固过程;低碳钢液态模锻下凝固方式;液态模锻件收缩过程;液态模锻的凝固时间和方程等。

(3) 液态模锻下的力学成形理论。包括液态模锻组合体的力学模型;液态模锻过程中的塑性流动;液态模锻过程的力-位移曲线;力、位移与时间关系曲线;压力-行程、行程-时间理论曲线;冲头下移和凝固补缩的相关关系;液态模锻过程的压力损失;液态模锻过程的力学分析;液态模锻比压值的解析解;作用于液态金属上的有效压力等。

纵观液态模锻工艺发展的史实,工艺开拓为先导,理论研究随之跟进,协同发展,促进了工艺的开拓和应用。

1.1.2 液态模锻工艺应用

液态模锻工艺对所加工材料没有限制,适用于低熔点合金(如镁、锌、铝和铜等),也适用于高温合金(如铁、高温合金等)。如前所述,铝合金液态模锻最有代表性莫过于铝活塞,表 1-1 为液态模锻和金属型铸造铝合金活塞性能的比较,各项性能指标均有提高,尤其是疲劳强度提高数十倍,表 1-2 给出了铸铝合金铸态与液态模锻性能比较,图 1-1 为 Al-Si 系合金在各种工艺状态下的力学性

能比较,图 1-2 为变形铝合金挤压或锻造与液态模锻后性能比较。显而易见,液态模锻后强度与塑性基本上均优于铸件或锻件。

表 1-1 液态模锻、金属型铸造铝活塞性能比较^[2]

项 目 \ 工 艺 方 法	液 态 模 锻		金 属 型 铸 造	
直径/mm	0.400	0.220	0.400	0.220
热处理	调质	调质	调质	调质
抗拉强度/MPa	258~337	271~338	180~260	230~280
伸长率/%	0.3~0.7	0.4	0.2~0.4	0.2~0.4

表 1-2 液态模锻活塞疲劳强度的提高^[2]

试验结果 \ 工 艺 方 法	21℃			204℃		
	最大应力 /MPa	循环次数 /次	结果	最大应力 /MPa	循环次数 /次	结果
液 态 模 锻	172.4	102×10 ³	破坏	103.4	336×10 ³	破坏
	151.7	386×10 ³	破坏	89.6	830×10 ³	破坏
	151.7	6861×10 ³	破坏	75.8	2231×10 ³	破坏
	137.9	28842×10 ³	破坏	62.0	4752×10 ³	破坏
	137.9	31970×10 ³	破坏	55.2	3178×10 ³	破坏
	131.0	56133×10 ³	超过指标	55.2	17613×10 ³	破坏
	103.4	57378×10 ³	超过指标	48.3	53981×10 ³	超过指标
金 属 型 铸 造	103.4	1107×10 ³	破坏	75.8	1051×10 ³	破坏
	103.4	1355×10 ³	破坏	62.0	2040×10 ³	破坏
	89.6	2754×10 ³	破坏	48.3	3600×10 ³	破坏
	89.6	50013×10 ³	超过指标	34.5	44365×10 ³	破坏
	82.7	50150×10 ³	超过指标	34.5	50001×10 ³	超过指标

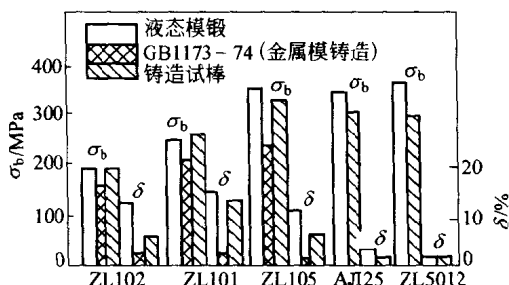


图 1-1 Al-Si 系合金在各种工艺状态下的力学性能比较

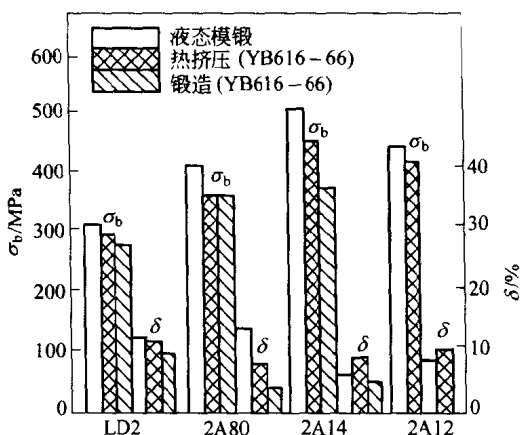


图 1-2 变形铝合金在各种工艺状态下的力学性能比较

采用液态模锻成形锌合金制件,具有广阔的应用前景。

不同成分锌合金铸态与液态模锻的力学性能见表 1-3~表 1-6,可以看出,液态模锻后锌合金的力学性能有较大的提高,硬度略有升高,强度指标提高了 18%~84%,塑性和冲击韧性提高幅度更大。ZA27 合金的性能提高尤为显著,强度指标提高了 33.4%,而伸长率和冲击韧性比铸态增加了近 5 倍。其强化机制为:液态模锻使组织均匀细化所致^[3]。表 1-7 给出了 ZA27 不同工艺摩擦磨损的实验结果。表明随着比压值增大,摩擦系数减小,磨损量降低。基于此,洛阳工学院采用该工艺,进行轴承保持架成形^[3]。