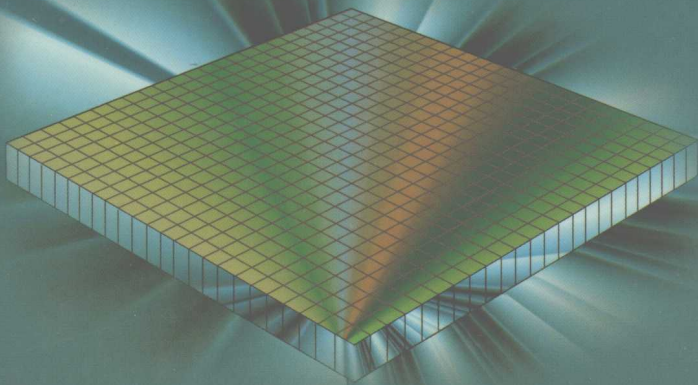


国防科技图书出版基金资助出版

静液挤压技术

Hydrostatic Extrusion

王富耻 张朝晖 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国防科技图书出版基金资助出版

静液挤压技术

Hydrostatic Extrusion

王富耻 张朝晖 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

静液挤压技术 / 王富耻, 张朝晖著. —北京: 国防工业出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-118-05465-1

I. 静... II. ①王... ②张... III. 等静压挤压 IV. TG376.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 179305 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 字数 213 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡镛

委员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 赵凤起

前 言

通过高压介质给坯料施加外力而实现挤压的方法,称为静液挤压。它是普通挤压方法的进一步发展。高压介质可以使用液体,也可以使用剪切强度较低的粘塑性体,整个静液挤压过程可以是连续的,也可以是半连续的。利用该技术不仅可以制备形状简单的制品,也可以获得形状复杂的制品。

金属静液挤压的思想早在 19 世纪就已经出现,英国人 Robertson 在 1893 年发表了相关专利,其中阐述了高压液体对金属材料塑性流动的影响规律和高压液体的润滑作用,指出金属材料的塑性随液体静压力的增加而增大。20 世纪 40—50 年代, Bridgman 开展了最初的试验研究工作。但静液挤压技术作为一种压力加工方法直到 20 世纪 60 年代才开始在苏联、美、英等国进行研究。随着研究的深入,人们逐步清楚了这种方法的基本特性及其优越性。1972 年,大型静液挤压厂在苏格兰博斯建立,标志着静液挤压技术走向工业化。20 世纪 60—70 年代,是静液挤压技术的鼎盛时期,这一时期共产生相关专利技术 300 多项,美国和苏联占 80%。我国自 20 世纪 60 年代开始研究静液挤压技术,70 年代开始工艺、性能、设备等方面的开发。进入 90 年代后,由于产品市场的需求,迫切要求新材料加工技术发展,静液挤压再次成为应用研究的热点。尤其是室温静液挤压技术更为引人注目。随着高压装置及其配套技术的不断发展与完善,静液挤压技术日渐成熟并得到广泛应用。

静液挤压作为一种少或无切削的新型加工方法,与传统的机械挤压工艺相比具有很大优势:静液挤压采用的压力介质为粘性液体或粘塑性体,由高压介质将负荷施于工件之上,从而使坯料变

形处于很高的三向压应力包围中,产生极为有利的压应力状态,这就使得坯料在挤压前没有普通挤压的墩粗阶段,变形相对比较均匀,提高了材料的工艺塑性;由于高压液体的润滑效果,使得挤压模具和工件之间的摩擦降低,尤其是在挤压模具与坯料之间形成流体动力润滑状态时,二者之间的摩擦就会降低到最低限度,同时坯料和挤压筒之间完全没有摩擦。正因为如此,静液挤压大大减轻了产品表面严重受剪的状况,在很大程度上避免了在一般挤压过程中产品的表面缺陷;静液挤压时,凹模采用高压液体支撑,因此可以使用薄壁凹模,一般不需在凹模外围加套预应力圈,不会发生凹模纵向开裂,大大提高了模具的使用寿命;挤压坯料与挤压筒不直接接触,因此静液挤压可以适应各种形状的毛坯,且对毛坯的尺寸精度无过高要求;坯料被高压液体介质包围,增加了坯料的纵向稳定性,因此可以挤压长径比很大的坯料;高的静水压力可防止坯料内部缩孔及裂纹的形成,并有助于坯料内部微观缺陷的回复。

由于静液挤压工艺上的明显优势,使得它可以加工各种型材、薄壁材和复合材,可以挤压多种产品,包括管件、阶梯形件、线材以及带螺旋槽的零件(螺旋齿轮、花键槽)等;可以加工钼、镁等各种脆性材料和钼、钛、锆等热粘结材料;可以选用很大的挤压比,根据材料性能不同,挤压比可达 $2 \sim 400$,对纯铝可达 20000 ,甚至更大;可以实现高速挤压,挤压钢材时挤压速度可达 3300 m/min 。静液挤压技术对超导材料、磁性材料等功能材料的开发也具有重要意义,已引起国内外该领域专家的关注。未来对静液挤压技术研究将集中于以下几个方面:超高压的形成方式和装备水平;耐超高压的挤压容器的结构与材料设计;工作介质材料及交换方式研究;超高压条件下密封材料及方法研究。

钨基高密度合金是一种以W为基体,同时加入少量Ni、Fe等元素组成的一种双相合金。钨合金的密度一般为 $16.0\text{g/cm}^3 \sim 18.8\text{g/cm}^3$,相当于钢密度的2倍以上,由于它具有密度高、高强度、塑性好及良好的导电性和导热性等综合优异性能而在国防工业、航空航天和民用工业等领域得到了广泛应用,成为一种备受关

注的军民两用材料。钨合金传统采用粉末冶金工艺制备而成,烧结态钨合金经真空热处理后其静态拉伸强度一般为 850MPa ~ 1000MPa,对于一般的工业应用足以满足使用要求。但是随着现代科学技术日新月异的发展,对钨合金材料的力学性能提出了越来越高的要求,尤其是钨合金作为军工用穿甲弹材料,随着尖端技术和军事工业的发展,为对付装甲日益强化的主战坦克,对穿甲弹用高密度钨合金材料的性能也提出了更为苛刻的要求。为进一步提高钨合金材料的综合力学性能,采用形变强化工艺是可行的技术途径。20 世纪 90 年代俄罗斯将冷静液挤压工艺成功应用于钨合金材料,通过工艺参数优化设计使其一次挤压变形量达到了 80%,使钨合金的静态拉伸强度提高到 1800MPa,同时保持一定的塑性,取得了理想的变形强化效果。随着超高压装置及其配套技术的不断发展,静液挤压技术将成为钨合金材料形变强化的主要技术手段。

本书对静液挤压技术进行了全面系统的阐述,主要包括静液挤压技术基本理论、静液挤压技术工装设计、静液挤压技术的应用、静液挤压过程工艺力学分析、静液挤压过程数值模拟及静液挤压技术在钨合金材料中的应用。本书内容全面、新颖,既有丰富的基本理论知识,又有很强的工程实践性,对致力于挤压技术研究及难变形材料形变强化技术研究的工程技术人员及研究学者具有很强的参考价值。

作者从国家“九五”计划开始就致力于钨合金材料及其强化工艺的研究,因此本书是作者 10 余年来研究工作的积累,也凝聚了作者 10 余年来的研究心血,在这 10 余年艰苦的研究过程中,作者得到了中国工程院院士才鸿年教授的很多理论指导,受益匪浅,作者在此向才鸿年院士表示由衷的感谢!同时作者也感谢北京理工大学的李树奎教授、兵器工业集团第 52 研究所的王奂玉研究员、史洪刚研究员等多位同行在作者研究过程中所给予的协助与支持。

作者

2007 年 10 月于北京

目 录

第 1 章 静液挤压基本理论	1
1.1 概述	1
1.1.1 静液挤压原理	1
1.1.2 静液挤压方法	2
1.1.3 静液挤压特点	5
1.1.4 静液挤压对材料塑性的影响	8
1.2 静液挤压金属流动规律	10
1.2.1 坯料受力分析	10
1.2.2 金属流动特征	11
1.3 静液挤压变形的应力与应变	12
1.3.1 基本应力应变	12
1.3.2 附加应力与残余应力	13
1.3.3 应力状态对变形的影响	15
1.3.4 挤压变形程度表征方法	17
1.4 静液挤压力	18
1.4.1 静液挤压力-位移曲线	18
1.4.2 静液挤压力的理论计算	20
1.4.3 复合材料静液挤压力	22
1.5 静液挤压工艺参数	23
1.5.1 挤压速度	24
1.5.2 坯料几何形状	24
1.5.3 模具角度	25
1.5.4 挤压变形比	28
1.6 静液挤压摩擦润滑特征	29

1.6.1	高压介质	29
1.6.2	摩擦润滑条件	30
1.7	静液挤压过程数值模拟	33
第2章	静液挤压工装设计	37
2.1	挤压筒设计	37
2.1.1	单挤压筒设计	37
2.1.2	组合挤压筒设计	39
2.1.3	挤压筒材料	43
2.2	挤压轴设计	43
2.2.1	挤压轴尺寸	43
2.2.2	挤压轴刚度计算	44
2.2.3	挤压轴强度计算	44
2.2.4	挤压轴材料	45
2.3	挤压模具设计	45
2.3.1	整体式凹模受力分析	48
2.3.2	组合式凹模受力分析	49
2.3.3	组合凹模特点及压合工艺	52
2.3.4	模具材料	53
2.4	穿孔针设计	58
2.4.1	穿孔针尺寸	58
2.4.2	穿孔针强度计算	59
2.4.3	穿孔针材料	60
2.5	密封设计	60
2.5.1	静液挤压密封形式	60
2.5.2	静液挤压密封装置	63
2.6	挤压介质交换装置设计	64
2.7	静液挤压机	65
2.7.1	静液挤压机分类	65
2.7.2	典型的静液挤压机	67
第3章	静液挤压应用	72

3.1	异型材静液挤压	72
3.2	难加工材料静液挤压	74
3.2.1	难加工材料静液挤压方法	74
3.2.2	难加工材料静液挤压技术	74
3.3	粉末材料静液挤压	87
3.4	复合材料静液挤压	89
3.4.1	静液挤压复合材料类型	89
3.4.2	典型复合材料的静液挤压	90
3.5	线材静液挤压	95
3.6	静液挤压前坯料处理	98
3.6.1	软化处理	98
3.6.2	表面处理	101
第4章	静液挤压工艺力学分析	106
4.1	工件与模具表面间的润滑状态	106
4.1.1	粘着-变形二元摩擦理论	106
4.1.2	静液挤压过程中的润滑状态	107
4.2	流体动力润滑形成条件	109
4.2.1	临界速度	109
4.2.2	工程算例	112
4.3	润滑油膜厚度	113
4.3.1	入口油膜厚度	113
4.3.2	出口油膜厚度	114
4.4	流体动力润滑状态下的摩擦应力	116
4.5	流体动力润滑状态下的材料变形功率	117
4.5.1	坯料变形功率	117
4.5.2	挤压介质功率损耗	119
4.6	缺陷动力学分析	119
4.6.1	表面裂纹	119
4.6.2	内部裂纹	121
4.6.3	表面粘结	122

CONTENTS

Chapter 1 Theory of hydrostatic extrusion	1
1.1 Introduction	1
1.1.1 Hydrostatic extrusion theory	1
1.1.2 Hydrostatic extrusion method	2
1.1.3 Characteristic of hydrostatic extrusion	5
1.1.4 Effect of hydrostatic extrusion on plasticity of material	8
1.2 Flowing laws of metals deformed by hydrostatic extrusion	10
1.2.1 Mechanical analysis	10
1.2.2 Flowing characteristic	11
1.3 Stress and strain conditions in the process of hydrostatic extrusion	12
1.3.1 Fundamental stress and strain	12
1.3.2 Additive Stress and residual stress	13
1.3.3 Effect of stress condition on deformation	15
1.3.4 Characterization method of extrusion deformation	17
1.4 Hydrostatic extrusion pressure	18
1.4.1 Pressure-displacement curve in hydrostatic extrusion process	18
1.4.2 Theoretical calculation of hydrostatic extrusion pressure	20
1.4.3 Hydrostatic extrusion pressure to composite	

5.7.4	挤压压力	159
5.7.5	工件内部应力应变场	160
5.8	双金属静液挤压数值模拟	162
5.8.1	有限元计算模型	162
5.8.2	计算结果及分析	164
5.8.3	试验验证	166
第6章	钨合金静液挤压技术	186
6.1	概述	186
6.1.1	钨合金制备及性能	188
6.1.2	钨合金强化技术	189
6.1.3	钨合金静液挤压技术	191
6.2	静液挤压钨合金性能测试	193
6.2.1	静态拉伸实验	193
6.2.2	原位拉伸实验	194
6.2.3	动态拉伸实验	196
6.3	静液挤压钨合金微观组织与力学性能	197
6.3.1	微观组织	197
6.3.2	力学性能	197
6.4	静液挤压钨合金变形与断裂分析	200
6.4.1	裂纹萌生位置	201
6.4.2	变形与滑移线	203
6.4.3	裂纹扩展过程	205
6.4.4	断口形貌分析	210
6.5	静液挤压钨合金模拟弹靶试验	213
6.5.1	模拟弹体材料力学性能及弹体结构	213
6.5.2	模拟弹靶试验结果及分析	214
6.6	钨合金静液挤压强化机理	216
6.6.1	界面强化	217
6.6.2	组成相强化	221
参考文献		228

4.6.4	竹节状表面缺陷	122
第5章	静液挤压过程数值模拟	126
5.1	计算方法	126
5.1.1	有限元数值模拟技术	126
5.1.2	有限元常用术语	127
5.1.3	有限元分析基本步骤	128
5.2	ANSYS 有限元程序简介	129
5.2.1	ANSYS 发展过程	129
5.2.2	ANSYS 使用环境	130
5.2.3	ANSYS 程序功能	130
5.3	材料本构关系及计算模型	131
5.3.1	本构关系	131
5.3.2	计算模型	132
5.3.3	计算原理	133
5.4	数值模拟计算结果	134
5.4.1	挤压压力随模具参数变化规律	135
5.4.2	应力应变场随模具参数变化规律	137
5.5	不同型线凹模静液挤压数值模拟	142
5.5.1	凹模型线数学方程	143
5.5.2	数值模拟计算参数	144
5.5.3	载荷位移曲线	144
5.5.4	应力应变分布	145
5.5.5	模具表面压力分布	149
5.6	数值模拟试验验证	149
5.6.1	挤压压力试验验证	150
5.6.2	应变场试验验证	151
5.7	理论分析综合应用	154
5.7.1	初始条件	154
5.7.2	流体动力润滑形成条件	156
5.7.3	表面缺陷预测分析	157

material	22
1.5 Process parameters of hydrostatic extrusion	23
1.5.1 Extrusion velocity	24
1.5.2 Geometrical characteristics of the billet	24
1.5.3 Mould angle	25
1.5.4 Extrusion ratio	28
1.6 Friction and lubrication characteristic in process of hydrostatic extrusion	29
1.6.1 High pressure medium	29
1.6.2 Friction and lubrication conditions	30
1.7 Numerical simulation to the process of hydrostatic extrusion	33
Chapter 2 Processing equipment design	37
2.1 Extrusion cylinder design	37
2.1.1 Single extrusion cylinder design	37
2.1.2 Combined extrusion cylinder design	39
2.1.3 Extrusion cylinder material	43
2.2 Extrusion axes design	43
2.2.1 Dimension design of extrusion axes	43
2.2.2 Rigidity design of extrusion axes	44
2.2.3 Strength design of extrusion axes	44
2.2.4 Extrusion axes material	45
2.3 Extrusion mould design	45
2.3.1 Mechanical analysis to single mould	48
2.3.2 Mechanical analysis to combined mould	49
2.3.3 Characteristic of the combined mould and assembling technology	52
2.3.4 Mould material	53
2.4 Perforation needle design	58
2.4.1 Dimension design of the perforation needle	58

2.4.2	Strength design of the perforation needle	59
2.4.3	Perforation needle material	60
2.5	Sealing design	60
2.5.1	Sealing form for hydrostatic extrusion	60
2.5.2	Sealing device for hydrostatic extrusion	63
2.6	Extrusion medium conversion device design	64
2.7	Hydrostatic extrusion machine	65
2.7.1	Classification of hydrostatic extrusion machine	65
2.7.2	Typical hydrostatic extrusion machine	67
Chapter 3	Application of hydrostatic extrusion	72
3.1	The profile deformed by hydrostatic extrusion	72
3.2	Difficult-to-process materials deformed by hydrostatic extrusion	74
3.2.1	Hydrostatic extrusion method of difficult-to-process materials	74
3.2.2	Hydrostatic extrusion technology of difficult-to-process materials	74
3.3	Powder materials deformed by hydrostatic extrusion	87
3.4	Composite materials deformed by hydrostatic extrusion	89
3.4.1	Composite materials that can be processed by hydrostatic extrusion	89
3.4.2	Typical composite materials deformed by hydrostatic extrusion	90
3.5	Wire material deformed by hydrostatic extrusion	95
3.6	Billet treatment before Hydrostatic extrusion	98
3.6.1	Softening treatment	98
3.6.2	Surface treatment	101
Chapter 4	Mechanical analysis to hydrostatic extrusion process	106