

高性能大锻件控形 控性理论及应用

蔺永诚 陈明松 著



科学出版社

高性能大锻件控形 控性理论及应用

蔺永诚 陈明松 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

制造大锻件的关键是要解决成形性问题,锻造操作机的运动功能设计要满足锻造工艺的要求,而材料高温变形中缺陷与组织演化的定量分析是制定大锻件控形控性工艺的基础,也是目前大锻件研究与生产中最薄弱的环节。本书围绕大锻件控形控性研究展开论述,主要包括:锻件材料的高温流变规律与再结晶行为及其数学建模方法;椭圆柱形(含圆柱形)空洞演变的代表性体元模型的建立与求解方法;远场应力条件下空洞演变规律;采用空洞形状估计参数预测椭球形(含球形)空洞形状系数的方法和空洞在拔长过程中的演变规律;材料高温变形过程中损伤的演变规律及其数学表征;矩形截面类锻件的拔长形变规律与预测方法及锻件内部应力应变场分析;锻造操作机-压机联动轨迹的规划方法与评价以及联动轨迹规划软件的开发与工程应用。

本书可供从事材料加工、金属塑性成形专业的高等院校教师、研究生和科研人员等阅读和参考,也可供从事塑性加工行业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高性能大锻件控形控性理论及应用/蔺永诚,陈明松著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-036437-1

I. 高… II. ①蔺…②陈… III. 锻件-锻造-研究 IV. ①TG316

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 008777 号

责任编辑:陈 捷 / 责任校对:张凤琴

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:332 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

大锻件是核能、电力、石油、化工、冶金、造船、航空航天和国防军工等领域大型成套设备的核心零部件。大锻件的制造作为一个国家大型成套设备制造的基础,在国民经济建设、国防装备发展和现代尖端学科技术的建设中,起着非常重要的作用。大锻件的制造能力反映了一个国家在国民经济和国防军事等高端领域的综合实力,是我国大型装备制造的瓶颈。

制造大锻件的关键是要解决成形性问题,操作机的运动功能设计要满足锻造工艺的要求,而材料高温变形中的缺陷与组织演化的定量分析是制定大锻件控形控性工艺的基础,也是目前大锻件研究与生产中最薄弱的环节。因此,本书针对大锻件成形性所面临的瓶颈问题,以实现自动化锻造为目标,深入地研究了大锻件的控形控性规律;提出了锻造操作机-压机联动轨迹的规划方法;通过集成大锻件的控形控性理论成果,开发了锻造操作机-压机联动轨迹的规划软件。本书的具体内容如下:第1章介绍了大锻件的迫切需求与特点,以及成形工艺的研究现状与发展趋势;第2章介绍了影响材料流变行为的主要因素与作用机理,以及材料高温流变应力本构模型的建立方法;第3章介绍了典型锻件材料的动态、静态、亚动态再结晶现象与晶粒长大行为及其数学表征方法;第4章介绍了椭圆柱形(含圆柱形)空洞演变的代表性体元模型的建立与求解方法,以及远场应力条件下的空洞演变规律;第5章介绍了采用空洞形状估计参数预测椭球形(含球形)空洞形状系数的方法与空洞在拔长过程中的演变规律;第6章介绍了材料在高温变形过程中损伤的演化规律及其数学表征;第7章介绍了矩形截面类锻件拔长形变规律及预测方法;第8章介绍了矩形截面类锻件在平砧拔长过程中的应力应变场的演变规律,给出了锻件变形区特殊位置纵向应力由拉应力转为压应力的临界压下率的计算模型;第9章集成了本书研究所获得的大锻件控形控性规律,提出了锻造操作机-压机联动轨迹的规划方法,给出了联动轨迹的评价准则;第10章基于锻造操作机-压机联动轨迹的规划方法,开发了联动轨迹的规划软件,并给出该规划软件的工程应用实例;第11章总结了本书的内容,并展望了下一步需开展的工作。本书各章内容相辅相成,关系紧密,有机结合。

本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划(973计划)项目子课题(2006CB705401、2013CB035801)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0838)、中南大学升华育英计划优秀人才资助项目、中国博士后科学基金一等奖项目(20070410303)、中国博士后科学基金特别资助项目(200902480)、中南大学博

士后科学基金项目(117327)的联合资助。感谢刘革、金浩、丁艳宝、陈小敏、方晓南、李齐飞、夏雨驰、李雷霆、邓姣、姜玉强等硕士、博士研究生为本书所做的部分锻压实验及材料高温形变机理分析等方面的工作。感谢钟掘院士、黄明辉教授、邓华教授、李晓谦教授、段吉安教授、吴运新教授、易幼平教授、毛大恒教授、唐进元教授、帅词俊教授、周亚军副教授在本书研究工作开展过程中给予的有益建议和帮助。本书研究内容为国家 973 计划项目子课题“大型构件制造操作运动轨迹建模”的部分工作,特别地感谢国家 973 计划项目“巨型重载操作装备的基础科学问题”的首席科学家林忠钦院士(上海交通大学)、课题组长崔振山教授(上海交通大学)以及项目专家组为本书研究工作严格把关,并提出了很多宝贵建议。

虽然本书撰写过程中力求尽善尽美,但限于作者的学识与经验,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2012 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大锻件的迫切需求与特点	1
1.2 大锻件的锻造工艺	2
1.2.1 镦粗	2
1.2.2 拔长	3
1.3 自由锻造设备的发展现状	4
1.4 大锻件成形工艺的发展趋势	5
1.5 本书研究的主要内容	6
1.6 本章小结	7
参考文献.....	7
第 2 章 材料高温流变特性与本构模型	9
2.1 引言	9
2.2 材料高温流变特性	9
2.2.1 材料高温流变行为	9
2.2.2 材料高温流变应力的影响因素	10
2.3 高温流变本构模型.....	11
2.3.1 宏观唯象学模型	11
2.3.2 微观机理模型	20
2.3.3 人工神经网络模型	26
2.4 本章小结.....	28
参考文献	28
第 3 章 热加工中的再结晶现象及数学建模	31
3.1 引言.....	31
3.2 再结晶现象与晶粒长大行为.....	31
3.2.1 动态再结晶现象	31
3.2.2 静态再结晶现象	39
3.2.3 亚动态再结晶现象	41
3.2.4 晶粒长大行为	42
3.3 典型锻件材料的再结晶现象与晶粒长大行为.....	43

3.3.1	热模拟实验	43
3.3.2	42CrMo 钢动态再结晶现象	45
3.3.3	42CrMo 钢静态再结晶现象	52
3.3.4	42CrMo 钢亚动态再结晶现象	56
3.3.5	42CrMo 钢的晶粒长大行为	61
3.4	本章小结	64
	参考文献	64
第4章	基于细观损伤力学的锻件内部空洞缺陷演变规律	68
4.1	引言	68
4.2	大铸锭内部空洞缺陷的研究现状	68
4.2.1	物理模拟	68
4.2.2	数值模拟	69
4.2.3	解析分析	70
4.2.4	闭合条件	72
4.3	基于细观损伤力学的锻件内部空洞缺陷演变模型	75
4.3.1	代表性体元模型	75
4.3.2	线黏性基体材料	77
4.3.3	非线性黏性基体材料	80
4.3.4	空洞演变计算结果分析	90
4.3.5	代表性体元模型计算结果的验证	111
4.4	本章小结	112
	参考文献	113
第5章	锻件内部空洞演变的有限元数值模拟与实验验证	117
5.1	引言	117
5.2	热力耦合的有限元模型	117
5.2.1	有限元基本理论	117
5.2.2	有限元模型的建立	118
5.3	空洞演变的影响因素	118
5.3.1	空洞大小的影响	119
5.3.2	空洞形状的影响	121
5.3.3	空洞位置的影响	122
5.4	空洞形状系数预测模型	123
5.4.1	空洞形状估计参数的提出	123
5.4.2	空洞形状估计参数的验证	124
5.4.3	空洞形状系数的预测模型	125

5.5 拔长工艺参数对空洞估计参数的影响	126
5.5.1 有限元模型的建立	126
5.5.2 压下率的影响	127
5.5.3 砧宽比的影响	128
5.5.4 料宽比的影响	129
5.5.5 摩擦因数的影响	130
5.6 有限元模型的实验验证	132
5.6.1 空洞的锻合实验	132
5.6.2 有限元结果的实验验证	133
5.7 本章小结	141
参考文献	141
第6章 热加工中锻件的损伤演化规律	143
6.1 引言	143
6.2 损伤现象及理论研究	143
6.2.1 锻件高温成形过程中的开裂现象	143
6.2.2 损伤理论	143
6.2.3 材料的韧性断裂	145
6.2.4 韧性断裂的外部影响因素	145
6.2.5 常用的韧性断裂准则	146
6.2.6 断裂准则中材料常数的确定	149
6.2.7 韧性断裂的国内外研究现状	150
6.3 典型锻件材料的损伤开裂模型	151
6.3.1 材料的高温拉伸实验	151
6.3.2 高温拉伸特性分析	151
6.3.3 材料流变应力曲线的确定	157
6.3.4 韧性开裂损伤模型的建立	160
6.4 典型锻件材料锻压过程中的损伤开裂研究	165
6.4.1 锻压实验	165
6.4.2 有限元数值模拟	165
6.4.3 实验结果与有限元数值模拟结果的比较	168
6.5 本章小结	171
参考文献	171
第7章 大锻件拔长过程中的形变规律及预测	175
7.1 引言	175
7.2 宽展理论的研究现状	175

7.3 矩形截面类锻件拔长过程的形状变化规律	176
7.3.1 刚黏塑性有限元模型的建立	176
7.3.2 锻件单工步拔长的形变规律	179
7.3.3 矩形截面类锻件拔长形变的预测模型	183
7.4 有限元数值模拟结果的实验验证	184
7.4.1 矩形截面类锻件的拔长实验	184
7.4.2 矩形截面类锻件拔长形变预测模型的实验验证	184
7.4.3 矩形截面类锻件单工步拔长过程的实验验证	184
7.4.4 矩形截面类锻件一道次拔长过程的实验验证	185
7.5 本章小结	186
参考文献	186
第8章 大锻件拔长过程中的应力应变场	188
8.1 引言	188
8.2 有限元模型的建立与模拟方案	188
8.3 大锻件拔长过程中的应力场分析	189
8.3.1 工艺参数对轴向应力的影响规律	190
8.3.2 工艺参数对横向应力的影响规律	196
8.3.3 拉-压应力转变的临界压下率	202
8.4 大锻件拔长过程中的应变场分析	203
8.4.1 压下率对大锻件心部等效应变的影响规律	204
8.4.2 砧宽比对大锻件心部等效应变的影响规律	205
8.4.3 料宽比对大锻件心部等效应变的影响规律	206
8.4.4 剪切摩擦对大锻件心部等效应变的影响规律	206
8.5 本章小结	207
参考文献	207
第9章 锻造操作机-压机联动轨迹的规划	209
9.1 引言	209
9.2 操作机-压机联动轨迹规划的目标与思路	209
9.2.1 操作机-压机联动轨迹规划的目标	209
9.2.2 操作机-压机联动轨迹规划的思路	209
9.3 锻造工艺方案的设计	211
9.3.1 平砧拔长大锻件的形状预测	211
9.3.2 工艺设计流程	212
9.4 锻造操作机-压机联动轨迹的规划方法	213
9.4.1 锻造操作机-压机联动轨迹类型	213

9.4.2 规划流程	218
9.5 锻造操作机-压机联动轨迹的评价	219
9.5.1 应变评价模块	219
9.5.2 微观组织演变评价模块	223
9.5.3 空洞缺陷闭合评价模块	225
9.6 本章小结	227
参考文献	227
第 10 章 锻造操作机-压机联动轨迹规划软件介绍	229
10.1 引言	229
10.2 联动轨迹规划软件的整体介绍	229
10.3 锻造工艺方案设计模块	230
10.3.1 输入第一道次锻造工艺信息	231
10.3.2 查看第一道次工艺方案	232
10.3.3 增加一个道次的锻造方案	233
10.3.4 查看设计的锻造工艺方案	233
10.3.5 压下率的计算	234
10.4 锻造操作机-压机联动轨迹规划模块	235
10.4.1 输入锻造操作机与压机的技术参数	235
10.4.2 规划锻造操作机-压机的联动轨迹	237
10.4.3 查看锻造操作机-压机联动轨迹	241
10.4.4 输出锻造操作机-压机联动轨迹	242
10.5 锻造操作机-压机联动轨迹评价模块	244
10.5.1 应变预测模块	244
10.5.2 缺陷演化预测模块	246
10.5.3 微观组织预测模块	248
10.6 软件的工程应用实例	254
10.6.1 工艺方案设计与操作机-压机联动轨迹的规划	254
10.6.2 锻造操作机与压机联动轨迹的合理性评价	256
10.7 本章小结	260
参考文献	260
第 11 章 总结与展望	261
11.1 总结	261
11.2 展望	263

第 1 章 绪 论

1.1 大锻件的迫切需求与特点

大锻件是核能、电力、石油、化工、冶金、造船、航空航天和国防军工等领域大型成套设备的核心零部件。大锻件的制造作为一个国家大型成套设备制造的基础，在国民经济建设、国防装备发展和现代尖端学科技术的建设中，起着非常重要的作用。大锻件的制造能力反映了一个国家在国民经济和国防军事等高端领域的综合实力，是我国大型装备制造的瓶颈^[1~3]。

发展清洁能源，核能承担着主力作用。根据我国《核电中长期发展规划（2005~2020年）》和目前发展速度，预计我国核电装机容量在2015年将达到4000万kW，在2020年将超过8000万kW，这意味着我国核电建设即将步入新的建设高潮。同时，日本核泄漏事故的发生，促使世界各国更加重视核电站的安全性。因此，核电安全高效发展对新一代核电大锻件的制造水平和极端服役性能提出了更高的要求。预计今后平均每年需新增核电机组6~8台或以上。按照每套百万千瓦核电机组至少需要1台反应堆压力容器计算，每年需要反应堆压力容器6~8个。制造一个反应堆压力容器约需要3000t铸锻件，2012年后我国每年需要2万~3万t核电设备锻件，成品收得率按照50%计算，年均需核电设备毛坯锻件约5万t。核电设备用铸锻件的成本占整个核电站总成本的36%，例如一座百万千瓦双堆核电站，核岛一回路的铸锻件毛坯价值约10亿元，对应铸锻件价值金额为70亿~80亿元人民币。大锻件是核电站中核岛和常规岛主设备的关键原材料。在百万千瓦级核电机组中，无论是二代加，还是三代AP1000与EPR，都含有大量超重超大、形状复杂、质量要求高、制造困难和成本极高的整体锻件。图1.1所示为某型号反应堆压力容器简体，由法兰接管段、堆芯段简体、底封头过渡段和底封头组成，堆芯内径为4m，壳体高10m、重300t左右。图1.2所示为形状复杂的AP1000压力容器整体顶盖，需要整体锻造，其技术难度很大。目前，国产大型复杂整体核电锻件质量不稳定，无法满足国家发展核电事业的需求，因此迫切需要开展新一代核电高性能大锻件制造的基础研究。

此外，大锻件在石油化工设备中也有着广泛的应用。如对焊法兰催化裂化反应器的整锻简体（压力容器），加氢反应器所用的筒节，化工设备所需的顶盖、底盖、封头等均为大锻件；火力发电设备的汽轮发电机转子和护环，以及汽轮机中的叶轮与转子也均为关键锻件；水力发电设备的大型低压转子，水轮发电机主轴、大轴、镜

板与推力头等也都采用大锻件;大型航母和船用曲轴、大型冶金设备用冷轧棍等都是超大型铸锻件。

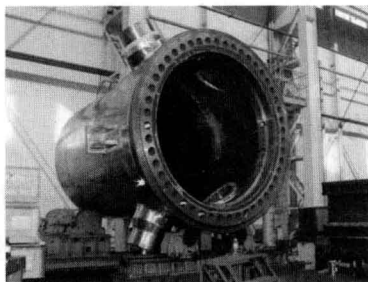


图 1.1 核反应堆压力容器壳体

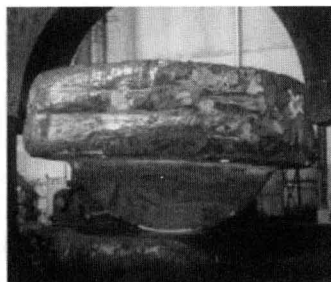


图 1.2 AP1000 核电一体化顶盖锻件

1.2 大锻件的锻造工艺

大锻件通常由大铸锭直接锻压成形。大铸锭内部通常存在严重的偏析、缩孔、夹杂与晶粒粗大等铸造缺陷,且随着大锻件的规格不断增大,铸造缺陷越来越严重。因此,改形与改性是大锻件锻造的两大关键任务。大锻件一般采用自由锻成形。根据锻造方式的不同,大锻件的自由锻工艺分为镦粗和拔长两类。

1.2.1 镦粗

镦粗是使坯料高度减小、横截面积增加的锻造工艺。除了饼类锻件的成形主要应用镦粗工序之外,许多重要轴类锻件的成形也常采用镦粗工序。镦粗的主要目的是增大坯料横截面积,提高拔长的锻造比,改善锻件的横向力学性能和减少力学性能的异向性。镦粗方法有普通平砧镦粗、凹形砧镦粗、锥形板镦粗与 M 形板镦粗等^[3]。

1. 普通平砧镦粗

普通平砧镦粗是最早采用的镦粗工艺。传统的理论认为,镦粗过程中锻件中心点处于三向压应力状态,镦粗有利于压实心部孔隙缺陷,且不会在心部产生新的裂纹缺陷。但是在实际生产中却发现,大型饼类锻件在经历大变形的普通平砧镦粗工艺后,超声波探伤不合格率仍较高,主要原因是其内部出现横向裂纹缺陷。显然,普通平砧镦粗过程中锻件中心部位并不是一直处于三向压应力状态。为此,Liu 等^[4]从主动和被动塑形变形区等概念出发,于 20 世纪 90 年代初提出了普通平砧镦粗圆柱体的两个新理论——刚塑性力学模型的拉应力理论和静水应力力学模型的切应力理论。邓冬梅^[5]采用有限元数值模拟的方法,定量地分析了普通平

砧镦粗过程中圆柱体中心点部位应力场的演变规律,结果表明,原始高径比大于1.6的圆柱体毛坯中心点在镦粗过程中出现了两向拉应力状态,随着压下率的增大,圆柱体毛坯中心点的拉应力先增大后减小,并达到临界压下率时拉应力转变为压应力,且该临界压下率随着原始高径比的减小而减小。对于原始高径比为2.33的圆柱体而言,该临界压下率为35%,对应的锻件瞬时高径比为1.129。因此,开坯时,压下率应该大于40%,但是每次压下率应该在材料容许的塑性范围之内。所以,圆柱体毛坯的原始高径比最好为2~2.2。普通平砧镦粗过程中,锻件高径比小于1时,锻件心部易产生“夹馅饼”缺陷,或称RST效应。

2. 凹形砧镦粗

凹形砧镦粗法包括球形砧、碟形砧等镦粗工艺,是在普通平砧镦粗的基础上发展起来的。相对于普通平砧镦粗,凹形砧镦粗法可以提高镦粗过程中圆柱体毛坯内部的静水压力,避免产生拉应力以防止产生新裂纹。因此,可以增强锻合心部缺陷的能力。但是,靠近球形砧和碟形砧附近会出现范围较大的难变形区,致使该区域内铸态组织难以破碎,晶粒无法细化,空洞难以闭合。

3. 锥形板镦粗

锥形板镦粗方法首先由罗昊^[6]在实际生产中总结出来。后来,刘助柏和王连东^[7]对其进行了力学分析。锥形板镦粗方法有利于消除圆柱体端部的变形死区,并由于消除了由端部变形死区而引起的径向拉应力,增大了镦粗过程中轴线附近的静水应力;但是,锥形板镦粗使得锻件沿轴线方向变形量减小,因此,不能作为消除孔隙缺陷的主要锻造方法。

4. M形板镦粗

M形板镦粗^[8]是综合利用了球形板产生的三向压应力和锥形板有效消除难变形区的优点而设计的锻造方法。M形板镦粗能够大大减少难变形区体积,使锻件变形更均匀,增大锻件内部变形程度,有利于锻合内部孔隙缺陷。

1.2.2 拔长

拔长是大锻件最主要的变形工序,许多缺陷均需 在拔长过程中消除。传统的拔长工艺只考虑锻件内轴向应力,而忽略了横向应力。因而,传统的拔长工艺参数只包括砧宽比(砧宽比是指锻件平砧拔长时锻件变形区长度与高度的比值)与压下率。一般认为,上下平砧拔长矩形截面大锻件时砧宽比在0.5~0.8比较合适,砧宽比小于0.5时锻坯心部轴向应力为拉应力且心部变形程度较小,易产生横向裂纹且不易消除缺陷;砧宽比大于1时易产生表面裂纹和角裂,并且拔长效率较低。

传统的平砧拔长方法主要有 WHF 锻造法^[9]、SUF 锻造法^[10]与 TER 锻造法^[11]，这些方法的共同特点是大砧宽比和大压下率，其优点是能有效消除坯料心部的孔隙缺陷、细化晶粒，缺点是锻造载荷高，需要大吨位的液压机。

刘助柏^[12]发现传统的锻造理论只关注锻造过程中的轴向应力，而忽略了横向应力，提出了同时考虑轴向应力与横向应力的 LZ 法。LZ 锻造法的实质是同时控制砧宽比和料宽比(料宽比是指锻件平砧拔长时锻件变形区宽度与高度的比值)的成形方法。对料宽比加以控制是为了避免锻件心部出现横向拉应力。刘助柏指出，平砧拔长矩形截面毛坯，要实现毛坯中心无轴向与横向拉应力作用，应控制砧宽比不小于 0.8，料宽比为 0.85~1.18。梁晨通过有限元数值模拟的方法发现，实现毛坯中心无拉应力需要砧宽比、料宽比及压下率三者的合理匹配^[13]。

采用上平砧下平台的锻造方法主要有 FM 法^[14]、新 FM 法^[15]、FML 法^[3]与 JTS 法^[16]。其中 FM 法是 20 世纪 70 年代日本学者河合正吉和佐藤一木根据滑移线理论的解析结果，提出的无曼内斯曼效应的锻造方法。由于 FM 法上平砧和下平台不对称，下平台对锻件的摩擦阻力较大，变形由上到下逐步进行，使拉应力移到变形体与下平台接触面附近，增加了心部的压应力和变形。刘助柏在 FM 法的基础上提出增加料宽比的控制，使锻件心部不产生横向拉应力的锻造方法——新 FM 法。FML 法与 JTS 法实际上均是纵向布砧的锻造方法^[3]，它们之间的区别在于 JTS 法锻造前使锻坯外壳急冷至终锻温度，在表面形成一层硬壳，这层硬壳在锻造中如同模锻中的锻模一样，使变形集中在锻件心部，增加心部的压实效果^[13]。FM 法、新 FM 法、FML 法与 JTS 法的优点是能够实现利用较小锻比和较低压机吨位锻合孔隙，缺点是容易造成轴线偏移。

KD 法^[17]是中国第一重型机械集团公司于 1966 年在 WHF 法基础上提出的高温扩散加热与宽砧大压下率的锻造方法。1975 年，改为采用 135°的上下宽 V 形砧。KD 法的优点是能在锻件心部产生大的静水压力和变形量，有利于锻合锻件心部孔隙缺陷；缺点是所适用的坯料尺寸受到限制，需要经常换砧，增加了火次和工具投入，而且宽砧和大压下率也要求有较高吨位的锻造设备^[3]。

AVO 法^[13]是用不对称的上下 V 形砧对八角形锻坯进行拔长的方法。其优点是上下砧不对称在心部产生较大的剪切变形，增大了心部的变形量，有利于一定程度地消除缺陷；缺点是工艺不合理易导致锻件轴线弯曲和缺陷外移，影响大锻件的使用性能^[3]。

1.3 自由锻造设备的发展现状

大锻件生产能力与锻造设备力能参数、锻造工艺相关。大型锻造设备包括巨型液压机与其辅助操作设备(巨型锻造操作机、巨型工具操作机等)，是一个企业生

产能力的重要标志,也是一个国家工业实力的象征。

经过 60 余年的发展,我国自由锻造设备的力能参数已处于世界领先水平。其中,我国第一重型机械集团公司拥有 150MN、100MN 与 60MN 的巨型自由锻液压机各一台,并分别配有 6.3MN·m、4MN·m 与 2MN·m 的锻造操作机;中国第二重型机械集团公司拥有 160MN 与 125MN 巨型自由锻液压机各一台,其中 160MN 液压机配有 4MN·m 锻造操作机;上海重型机器厂有限公司拥有 165MN 与 120MN 巨型自由锻液压机各一台,其中 165MN 液压机配有 6.3MN·m 锻造操作机;中信重工机械股份有限公司拥有 185MN 巨型自由锻液压机一台,配有 7.5MN·m 锻造操作机。我国能锻造的最大钢锭达 600t,最大锻件达 400t。

日本有日本制钢所室兰工厂(JSW)、神户制钢(KOBE)与日本铸锻钢(JCFC)等大锻件生产厂家,拥有 10~130MN 自由锻液压机约 40 台,大多数压机都配有锻造操作机。其中,JSW 的 140MN 液压机配备了 4MN·m 锻造操作机,可实现联动,即采用计算机控制,自动测量和自动控制锻造尺寸、切料,自动记录生产管理数据,在锻造阶梯轴、中间轴、平板与模块等锻件时可进行全自动锻造^[3]。韩国拥有斗山重工、HHI、SHI 与太熊等大锻件生产厂家。其中,韩国斗山重工拥有 130MN 的自由锻液压机一台,配备 4MN·m 锻造操作机;HHI 拥有 100MN 的自由锻液压机一台,并配有 2.5MN·m 锻造操作机;韩国大锻件生产企业能浇注 496t 重的钢锭来生产 1000MW 核电汽轮机低压整体转子锻件。英国和德国也是世界上的大型铸锻件生产强国,尤其在超临界机组和风电机组的开发和生产制造中具有较大的优势。英国的谢菲尔德福格马斯特拥有 100MN 液压机一台,配有 2.2MN·m 锻造操作机,其生产的最大成品锻件为 200t,最长的轴类锻件为 22m,最大管类锻件的直径为 2m。其他如法国、意大利、乌克兰、俄罗斯、美国与印度等国均具有较强的大锻件生产能力。

1.4 大锻件成形工艺的发展趋势

现代装备制造业的一个突出技术发展趋势是极端制造,大锻件尺寸与重量越来越大,性能要求越来越高,从而导致其锻造过程变得更加困难^[18]。如图 1.3 所示的核电机组用 1000MW 超临界低压转子锻件,其重量为 170t,需 600t 级钢锭。大锻件的制造体现了世界制造科技的前沿,采用的是现有技术条件下的极端制造技术。由于我国的工艺技术相对落后,在大锻件制造方面滞后于世界先进水平。目前,我国钢锭的制造能力相对较弱,大锻件制造的材料利用率也远远落后于世界先进水平,导致我国船舶、电力等许多工业装备制造难以摆脱对进口技术的依赖。大力发展极端条件下制造科学的基础研究,提升我国大型装备及其关键零部件的独立制造能力和制造水平,是建设“制造强国”的基础,体现了我国现阶段国家的迫切需求。

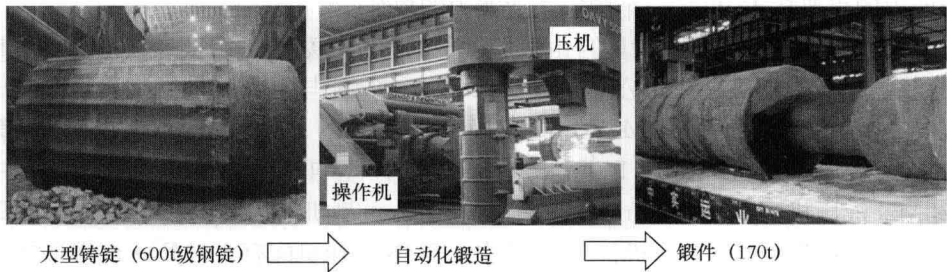


图 1.3 1000MW 超临界低压转子锻件的锻造过程

目前,在大锻件的实际生产中,拔长工艺各式各样,其共同的理论基础为高静水压力和大变形量有利于压实疏松、消除空洞、细化晶粒,且过大的拉应力容易诱发新缺陷。由于大铸造缺陷主要集中在心部区域,因而拔长工艺的目的在于尽量使铸锭心部在高静水压力下产生大的变形量,尽量避免产生横向与纵向拉应力。达到这些目标的基本途径有三种^[3]:一是控制锻砧的形状和尺寸,如 FM 法、KD 法、TER 法与 WHF 法等;二是控制锻坯的几何形状,如 AVO 法与 LZ 法等;三是控制锻坯内部的温度场,如 JTS 法等。但是这些锻造方法除 TER 法外,均只考虑了一次压下过程中锻件心部变形,而没有考虑锻件在整个锻造过程中的变形。然而,锻件的成形精度、成性质量与整个锻造过程密切相关,不仅要考虑整个制造过程中锻件心部的静水压力与变形量,而且要考虑道次间隔时间和各次变形之间的相互影响。因此,必须以锻造全过程的形性演变为核心优化锻造工艺是提升我国大锻件制造能力的重要途径,同时,实现大锻件制造全过程的自动化是精确控制锻造全过程和提高生产效率的必要手段,也是大锻件工作者一直以来的愿望和努力追求的目标。

近年来,随着我国锻造设备力能的不断提升,尤其是大型锻造操作机等辅助设备的广泛应用,实现了锻造操作机与压机在人工控制下的制造模式,初步具备了通过控制锻造操作机与压机联动轨迹来实现锻件成形成性目标的设备基础。因此,如何编制合理的锻造操作机-压机联动轨迹成为了大锻件制造工作者必须面对的新挑战。为此,首先必须解决一系列的科学与技术难题。例如,考虑锻造全过程与只考虑单次压下时的理论基础有何异同?采用什么样的锻造操作机-压机联动轨迹才能制造出高品质大锻件?

1.5 本书研究的主要内容

本书针对目前我国在大锻件制造方面理论研究不深入、成形工艺落后、先进装备尚不能得到充分利用等现状,以实现自动化锻造为目标,深入研究了大锻件的控

形控性规律,提出了锻造操作机-压机联动轨迹的规划方法,开发了便于工业应用的锻造操作机-压机联动轨迹的规划软件。本书的章节安排如下:

第1章介绍了大锻件的迫切需求与特点,以及成形工艺的研究现状与发展趋势。

第2章介绍了影响材料流变行为的主要因素与作用机理、材料高温流变应力本构模型的建立方法。

第3章介绍了典型锻件材料的动态、静态、亚动态再结晶与晶粒长大行为及其数学表征方法。

第4章介绍了椭圆柱形(含圆柱形)空洞演变的代表性体元模型的建立与求解方法、远场应力条件下的空洞演变规律。

第5章介绍了采用空洞形状估计参数预测椭球形(含球形)空洞形状系数的方法、空洞在拔长过程中的演变规律。

第6章介绍了材料高温变形过程中损伤的演变规律及其数学表征。

第7章介绍了矩形截面类锻件的拔长形变规律及预测模型。

第8章介绍了矩形截面类锻件在平砧拔长过程中应力应变场的演变规律,给出了锻件变形区特殊位置纵向应力由拉应力转为压应力的临界压下率的计算模型。

第9章集成了本书所获得的大锻件控形控性理论成果,提出了锻造操作机-压机联动轨迹的规划方法,给出了操作机与压机联动轨迹的评价准则。

第10章基于锻造操作机-压机联动轨迹规划方法开发了规划联动轨迹的软件系统,并给出该规划软件的工程应用实例。

第11章总结了本书的内容,并展望了下一步需开展的工作。

1.6 本章小结

本章主要介绍了大锻件的迫切需求和特点、大锻件拔长工艺的分类和研究现状,以及国内外自由锻设备发展与应用情况,并讨论了大锻件成形工艺的发展趋势,最后介绍了本书的章节安排。

参 考 文 献

- [1] Tyurin V A, Ovechkin V V. World achievements in forgings production for power and petroleum-chemical mechanical engineering. Tyazh Mashinost, 2001, (1): 34-37.
- [2] 任运来. 大型锻件内部缺陷修复条件和修复方法研究[博士学位论文]. 秦皇岛:燕山大学,2003.
- [3] 张效迅. 大锻件锻造成形过程中内部空洞型缺陷演化规律的研究[博士学位论文]. 上海: