



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

先进航空材料 及构件锻压成形技术

Forging Techniques of Advanced Aeronautical
Materials and Components

郭灵 王淑云 林海 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

先进航空材料 及构件锻压成形技术

郭灵 王淑云 林海 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书通过总结北京航空材料研究院锻压专业在先进航空材料塑性变形特性研究和特种锻压成形工艺方法研究方面取得的科研成果,着重对近十年来的创新性成果进行了系统展示。

本书共分为6章,内容包括超塑性等温锻造技术、精密锻造技术、先进耐高温材料挤压技术、精密环轧技术、锻造成形过程计算机仿真技术、大型航空锻件及锻压设备等。

本书适合于从事航空材料及金属塑性成形研究的科技人员阅读,也可作为相关专业高年级学生、硕士、博士研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

先进航空材料及构件锻压成形技术 / 郭灵,王淑云,
林海著. —北京:国防工业出版社, 2011.5

(先进航空材料与技术丛书)

ISBN 978-7-118-07463-5

I. ①先... II. ①郭... ②王... ③林... III. ①航空
材料—锻压 IV. ①V25②TG31

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第077579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 710×960 1/16 印张 19½ 字数 365 千字

2011年11月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 48.00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

序

一部人类文明史从某种意义上说就是一部使用和发展材料的历史。材料技术与信息技术、生物技术、能源技术一起被公认为是当今社会及今后相当长时间内总揽人类发展全局的技术,也是一个国家科技发展和经济建设最重要的物质基础。

航空工业领域从来就是先进材料技术展现风采、争奇斗艳的大舞台,自美国莱特兄弟的第一架飞机问世后的 100 多年以来,材料与飞机一直在相互推动不断发展,各种新材料的出现和热加工工艺、测试技术的进步,促进了新型飞机设计方案的实现,同时飞机的每一代结构重量系数的降低和寿命的延长,发动机推重比量级的每一次提高,无不强烈地依赖于材料科学技术的进步。“一代材料,一代飞机”就是对材料技术在航空工业发展中所起的先导性和基础性作用的真实写照。

回顾中国航空工业建立 60 周年的历程,我国航空材料经历了从无到有、从小到大的发展过程,也经历了从跟踪仿制、改进改型到自主创新研制的不同发展阶段。新世纪以来,航空材料科技工作者围绕国防,特别是航空先进装备的需求,通过国家各类基金和项目,开展了大量的先进航空材料应用基础和工程化研究,取得了许多关键性技术的突破和可喜的研究成果,《先进航空材料与技术丛书》就是这些创新性成果的系统展示和总结。

本套丛书的编写是由北京航空材料研究院组织完成的。19 个分册从先进航空材料设计与制造、加工成形工艺技术以及材料检测与评价技术三方面入手,使各分册相辅相成,从不同侧面丰富了这套丛书的整体,是一套较为全面系统的大型系列工程技术专著。丛书凝聚了北京航空材料研究院几代专家和科技人员的辛勤劳动和智慧,也是我国航空材料科技进步的结晶。

当前,我国航空工业正处于历史上难得的发展机遇期。应该看到,和国际航空材料先进水平相比,我们尚存在一定的差距。为此,国家提出“探索一代,预研一代,研制一代,生产一代”的划代发展思想,航空材料科学技术作为这四个“一代”发展的技术引领者和技术推动者,应该更加强化创新,超前部署,厚积薄发。衷心希望此套丛书的出版能成为我国航空材料技术进步的助推器。可以相信,随着国民经济的进一步发展,我国航空材料科学技术一定会迎来一个蓬勃发展的春天。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李锐' (Li Rui), written in a cursive style.

2011 年 3 月

前 言

塑性成形是人类发明的最古老的生产技术之一,千百年来,塑性成形技术在推进制造技术进步、支持科学技术发展乃至人类社会文明等方面做出了极其重要的贡献。塑性成形技术是通过塑性变形的方式实现构件的成形,不仅可以使所成形的制件获得一定的结构形状和尺寸,而且还可以改善制件的组织结构和性能,实现零件成形及改性,从而生产出满足各种复杂服役环境和苛刻使用要求的零部件,具有高精度、高性能、高效率 and 低成本的特点。随着科学的发展和工业化程度的提高,塑性成形技术也得到不断的进步与更新,现代塑性成形技术与自动控制、计算机仿真等技术相结合,可以实现复杂构件整体化、近净成形及成形处理一体化。

塑性成形技术已遍及国民经济的各个领域,在航空、航天、舰船和兵器等国防工业中也具有十分广泛的应用前景。塑性成形技术不但在常规金属材料加工中扮演着重要角色,在先进难变形材料与产品的制造中也发挥着日益重要的作用。由于锻件是构成飞机骨架的主要承力构件和发动机转子中的主要组成部分,其制造水平对飞机和发动机所能达到的最高性能水平、可靠性、寿命和技术经济效益有重大影响,西方国家的学者常把塑性成形技术,特别是大型模锻件的整体制造技术,作为衡量一个国家航空工业水平的重要标志,在某种意义上讲,大型模锻件的制造能力代表一个国家国防工业的实力。

在上级领导的重视和关怀下,北京航空材料研究院从建院之初就设立了锻压工艺研究室,对航空材料的塑性成形技术展开了系统的研究。锻压技术专家们用智慧和汗水,突破了一个又一个航空锻造工艺技术难关,为我国研制的新型号飞机不断地突破原有的性能极限提供了强有力的技术支持。在 50 余年的发展历程中,北京航空材料研究院取得了众多具有代表性的技术成果,例如:开展超塑性等温锻造技术研究,突破了粉末高温合金、TiAl 金属间化合物等构件的近净成形技术,解决了先进航空发动机耐高温部件的锻造成形问题;突破了精密锻造技术瓶颈,实现了多个合金系列航空发动机叶片的精密锻造,满足了先进航空发动机对高精度叶片锻件的迫切需求;开展耐高温难变形材料挤压技术研究,实现了粉末高温合金、TiAl 金属间化合物的棒材挤压,并突破了关键的工艺技术;针对航空器对环形件的性能与精度的高要求,开展了精密环轧技术的研究,在精密环轧设备、工艺技术

方面都取得了突破;开展了数值模拟技术在金属塑性成形研究领域的应用研究,对各种新材料、新型号航空锻件的研制进行了更为系统和全面的工艺技术研究,提高了研制效率和缩短了研制流程,并实现了航空锻件研制中控性和控形的双重目标;结合各领域技术的发展,在大型整体航空锻件的研制方面取得了突破,并在钛合金大型框梁结构锻件、起落架整体锻件的研制工作中获得了应用和验证。

本书通过总结北京航空材料研究院塑性成形专业在先进航空材料塑性变形特性研究和特种塑性成形工艺方法研究方面取得的科研成果,着重对近十年来的创新性成果进行了系统展示,突出了先进航空材料塑性变形工艺特性和典型构件成形工艺两大关键内容,并且在结构上进行了有机的融合,具有内容丰富、技术创新强的特点。

全书共分为6章,第1章由王淑云、张敏聪、东赞鹏撰写,第2章由唐志今、林海、林莺莺撰写,第3章由刘趁意、唐志今、刘德林撰写,第4章由郭灵、孙兴撰写,第5章由林海、张敏聪撰写,第6章由张敏聪、陈由红、林莺莺撰写。全书由郭灵、王淑云、林海进行统稿。

本书得到了北京航空材料研究院相关研究室、西北工业大学材料学院的大力支持,在此深表谢意。

北京航空材料研究院塑性成形技术的发展离不开各相关主机厂所和其他从事航空锻件研发、生产单位同行们的鼎力协助,愿借此书出版之际,向各地各单位的同行们致以诚挚的谢意。

由于编写者水平有限,如有错误或疏漏之处,衷心期望读者不吝指正。

作 者

2011年3月1日

目 录

第 1 章 超塑性等温锻造技术	1
1.1 金属超塑性	1
1.1.1 超塑性分类	2
1.1.2 典型材料的超塑性	2
1.1.3 超塑性变形的力学特征	4
1.1.4 超塑性的应用方向	5
1.2 等温锻造技术特点	6
1.2.1 常见材料锻造温度及范围	6
1.2.2 热锻方法分类	7
1.2.3 等温锻造设备及模具加热装置	10
1.2.4 等温锻造防护润滑剂	16
1.2.5 等温锻造模具材料	22
1.2.6 等温锻造的工艺优点	27
1.2.7 等温锻造的应用选择	30
1.3 国外等温锻造技术的应用	32
1.3.1 俄罗斯(苏联)等温锻造技术进展	32
1.3.2 美国粉末高温合金盘件的等温锻造	36
1.3.3 美国钛合金构件等温锻造技术的应用	39
1.4 等温锻造 TiAl 合金晶粒细化与超塑性	40
1.4.1 TiAl 合金超塑性研究进展	40
1.4.2 等温锻造 TiAl 合金晶粒细化机理	41
1.4.3 等温锻造 TiAl 合金超塑性	43
1.4.4 德国 TiAl 合金等温锻造实例	45
1.5 等温锻造 GH710 合金盘件组织与性能	45
1.5.1 铸锻 GH710 合金棒材组织性能	46
1.5.2 等温锻造工艺 GH710 合金组织性能影响	47
1.5.3 等温锻造 GH710 合金盘件组织性能	49
1.6 FGH95 合金盘件等温锻造	51

1.6.1	锻前预热处理工艺	51
1.6.2	高低应变速率组合等温压缩变形	52
1.6.3	等温压缩变形过程微观组织变化	53
1.6.4	FGH95 合金盘件等温锻造	53
1.7	FGH96 合金盘件超塑性等温锻造	55
1.7.1	超塑性组织条件准备	56
1.7.2	FGH96 合金超塑性	57
1.7.3	FGH96 合金超塑性变形过程组织变化	59
1.7.4	FGH96 合金涡轮盘等温模锻件	61
1.8	典型钛合金构件超塑性等温锻造	61
1.8.1	钛合金等温锻造技术进展	62
1.8.2	钛合金典型构件的等温锻造	63
1.9	典型铝合金构件超塑性等温锻造	70
1.9.1	LD11 铝合金超塑性等温锻造	70
1.9.2	新型超高强铝合金超塑性等温锻造	75
1.9.3	SiC 颗粒增强铝基复合材料超塑性等温锻造	77
	参考文献	80
第2章	精密锻造技术	84
2.1	精密锻造工艺的设计与选择	85
2.1.1	精密锻造设备的选择原则	86
2.1.2	常用的精密锻造设备	86
2.1.3	精密锻造模具的加热	89
2.2	精密锻造工艺实现实例	90
2.2.1	航空发动机叶片精密锻造	90
2.2.2	精密锻造技术在生物工程中的应用	96
2.2.3	框梁类锻件等温精密锻造	107
2.3	精密锻件防护用润滑剂	110
2.3.1	水基石磨润滑剂的使用要求	110
2.3.2	玻璃润滑剂的使用要求	110
2.4	精密锻造的质量控制要求	112
	参考文献	112
第3章	先进耐高温材料挤压技术	114
3.1	挤压工艺概述	114
3.1.1	挤压技术的特点	114
3.1.2	国内、外挤压技术	122

3.2 典型耐高温材料挤压技术	124
3.2.1 典型金属间化合物 TiAl 合金的包套挤压锻造	124
3.2.2 高硅镍铜合金挤压技术	134
3.2.3 粉末高温合金挤压制坯技术	150
参考文献	156
第 4 章 精密环轧技术	159
4.1 绪论	159
4.1.1 环件轧制的分类	159
4.1.2 环件轧制应用和发展	160
4.1.3 环件轧制技术经济性	162
4.2 环件轧制力学原理	162
4.2.1 环件轧制静力学	162
4.2.2 环件轧制力计算	167
4.3 环件轧制变形和成形规律	169
4.3.1 矩形截面环件轧制变形规律	169
4.3.2 非矩形截面环件轧制成形规律	171
4.4 环件轧制工艺	173
4.4.1 下料	173
4.4.2 环件锻件与毛坯设计	175
4.4.3 环件轧制孔型设计和调试	187
4.4.4 轧制工艺参数设计	190
4.4.5 环件轧制缺陷和工艺调试	196
4.5 环件轧制设备	199
4.5.1 立式轧环机	199
4.5.2 卧式轧环机	202
4.6 环形件精密轧制技术的发展	206
4.6.1 国外环件精密辗轧技术的现状和发展趋势	206
4.6.2 国内研究现状及其与国外先进水平的对比分析	209
参考文献	213
第 5 章 锻造成形过程计算机仿真技术	216
5.1 引言	216
5.2 锻造成形过程计算机仿真技术的发展概况	217
5.2.1 锻造成形过程计算机仿真技术的分类	218
5.2.2 锻造成形过程计算机仿真技术的研究现状	218
5.3 锻造成形过程中的计算机仿真	219

5.3.1	锻造成形过程中计算机仿真的特点	219
5.3.2	锻造成形过程数值模拟模型的建立	221
5.3.3	锻造成形过程数值模拟关键问题的处理	221
5.4	先进航空材料及构件塑性成形中的计算机仿真应用实例	232
5.4.1	大型航空框梁构件研制过程的计算机仿真	232
5.4.2	盘类锻件锻造过程的计算机仿真	245
5.4.3	钛合金高压容器成形过程的计算机仿真技术	257
5.5	计算机仿真技术在锻造成形中的发展	274
	参考文献	276
第6章	大型航空锻件及锻压设备	277
6.1	大型航空锻件的特点及分类	277
6.1.1	大型航空锻件的特点	277
6.1.2	大型航空锻件的分类	278
6.1.3	大型航空锻件在飞机及发动机上的应用	279
6.2	大型航空锻压设备的发展	280
6.2.1	锻压设备的分类	280
6.2.2	锻造液压机	282
6.2.3	曲柄压力机	287
6.2.4	螺旋压力机	289
6.3	典型大型航空锻件	292
6.3.1	大型钛合金框梁类锻件	292
6.3.2	飞机起落架锻件	294
6.3.3	航空发动机用粉末涡轮盘锻件	295
6.4	大型航空锻件及锻压设备发展趋势与展望	295
	参考文献	297

第 1 章 超塑性等温锻造技术

等温锻造最早是利用材料的超塑性发展出的一种模锻技术,因此又称为超塑性等温锻造,它指对具有超塑性变形特点的材料在进行锻造成形时,首先将合金在接近正常再结晶温度下进行热变形(挤压、轧制或锻造)以获得超细的晶粒组织,然后在合金超塑变形温度下,在与坯料具有相同温度的模具中以极慢的速度模锻成所需要的形状。超塑性等温锻造使材料在锻件成形过程处于超塑性变形状态,有效提高了材料的变形性能,因此可以加工一些采用常规热锻方法无法变形的材料,同时可以实现复杂形状、结构锻件的近净成形或净成形,所以超塑性模锻工艺又被称为近净锻造成形工艺。由于等温锻造是将锻造模具加热到与坯料相同的温度进行变形,便可以采用低的变形速度和长的保压时间使锻件在变形过程中温度变化降到最低程度。因此,在实际应用中等温锻造逐渐超出了传统超塑性模锻的范畴,广义地讲,等温锻造指把锻模的温度控制在和毛坯加热温度大致相同的范围内,使毛坯在温度基本不变的条件下慢速完成锻造全过程的锻造工艺。

1.1 金属超塑性

目前“超塑性”还没有一个确切的定义,可以将金属超塑性理解为超出一般塑性指标的金属特性,延伸率 δ 是衡量材料塑性的重要指标。一般塑性较好的低碳钢拉伸时延伸率只有 30% ~ 40%,塑性好的有色金属也只有 60% ~ 70%,但超塑性状态,一般认为塑性差的金属延伸率在 100% ~ 200% 范围内,塑性好的金属延伸率在 500% ~ 2000% 范围内。

金属材料的超塑性,即在特定的条件下,金属材料能沿一个方向成倍甚至几十倍地伸长或压缩的能力。一般认为,材料在拉伸变形时延伸率超过 100% 时便可以称作超塑性变形;有时也用应变速率敏感指数 m 值来评价材料的超塑性,即材料产生超塑性变形时应变速率敏感指数 m 应不小于 0.3。通常情况下材料应变速率敏感指数 m 值越高,材料的塑性越好。超塑性变形的另一个特征是,因其特殊的变形机理,金属超塑性变形时的变形抗力会远低于普通热塑性变形。因此,材料在进行超塑性变形时,一般具有良好的塑性,高的应变速率敏感性和低的变形抗力。

1.1.1 超塑性分类

按照实现超塑性的条件,金属超塑性可分为三类:细晶超塑性(或组织超塑性)、相变超塑性(或内应力超塑性)和其他超塑性^[1-3]。

1. 细晶超塑性

细晶超塑性指具有均匀等轴细晶组织的材料,在适当的温度和适当的应变速率时金属在某种特定状态下表现出的极高塑性的现象。

实现细晶粒超塑性的必要条件包括内在因素和外界条件。内在因素:超细的等轴晶粒组织,晶粒平均尺寸应在几微米,越小越好。晶粒大小是影响超塑性延伸率大小的重要因素。为了获得微细晶粒,常用变形和热处理细化方法。对于大多数金属与合金,通常的概念是细晶范围应为 $10\mu\text{m}$ 之下。外界条件:①特定的等温变形超塑性的温度条件,即变形自始至终保持在一个恒定的温度下进行,并在此温度下,晶粒不应长大;②对高温合金而言,需要通过合金中的第二相或第三相来限制晶粒长大,超塑性温度一般等于该材料熔点的 $0.6 \sim 0.7$ 左右;③极低的变形速度或应变速率是超塑性的速度条件,即超塑性变形在一定的应变速度范围内,通常超塑性应变速率应在 $10^{-4}/\text{s} \sim 10^{-3}/\text{s}$ 左右。

2. 相变超塑性

相变超塑性是材料受到外载荷作用,在其相变点上、下施以循环温度,而使材料获得一种不同寻常塑性的能力。

实现相变超塑性不需要细晶组织,只要在一定载荷下施以通过相变点的温度循环,就可以获得大延伸率。相变超塑性又称为内应力超塑性,产生内应力的方法很多,一些有固态转变的合金,在转变温度附近进行热循环,可以产生热应力;有些纯金属多晶体和单相合金,由于热膨胀系数的各向异性,通过热循环也可以产生内应力;有些复合材料,由于组元的热膨胀系数不同,通过热循环也可以产生内应力。例如对低碳钢或低合金钢施加一定载荷并在 A_1 或 A_2 温度上反复加热冷却,每次循环发生一次 $\alpha - \gamma$ 转变,得到二次跳跃式均匀伸长。

3. 其他超塑性

其他超塑性又称第三类超塑性,指在消除应力退火过程中,在应力作用下可以得到的超塑性。

1.1.2 典型材料的超塑性

超塑性现象最早的报告是在 1920 年, Rosenhzhin 等发现 $\text{Zn} - 4\text{Cu} - 7\text{Al}$ 合金在低速弯曲时,可以弯曲近 180° 。1934 年,英国的 C. P. Pearson 发现 $\text{Pb} - \text{Sn}$ 共晶合金在室温低速拉伸时可以得到 2000% 的延伸率。但是由于第二次世界大战,这方面的研究没有进行下去。1945 年苏联的 A. A. BOCHVAR 等发现 $\text{Zn} - \text{Al}$ 共析合金

具有异常高的延伸率并提出“超塑性”这一名词。1964年,美国的 W. A. Backofen 对 Zn - Al 合金进行了系统的研究,并提出了应变速率敏感指数 m 值这个新概念。

20 世纪 80 年代,超塑性研究遍及材料加工、力学、机械等许多学科。近 10 年来,除了对传统的铝合金、镁合金、钛合金和高温合金超塑性研究之外,在对新型难变形材料,如金属基复合材料、金属间化合物及陶瓷材料超塑性研究方面也取得很大进展。国内外对材料超塑性的研究工作主要以细晶超塑性为主,目前已知的超塑性金属及合金已有数百种,表 1-1 为国内外研究工作者对典型材料超塑性性能研究方面取得的部分结果^[4-8]。

表 1-1 典型材料的超塑性

材料牌号	超塑性条件		超塑性结果	
	温度/℃	应变速率/ s^{-1}	延伸率/%	m 值
Zn - 22Al	230	8×10^{-3}	3000	0.5
7475 铝合金	515 ~ 530	$5 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-4}$	1500	0.6 ~ 0.8
Ti - 6Al - 4V	927	$5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$	2000	0.85
30CrMnSi	700 ~ 800	1.24×10^{-2}	300 ~ 420	—
IN100	1036 ~ 1093	$5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$	1000	0.6
Rene 95	927	—	360	—
Inconel 718	—	—	—	0.7 ~ 0.9
ЖС - 6К	810 ~ 980	—	> 1000	0.5
MAR - M 200	—	—	—	0.4 ~ 0.6
Undimet 700	1035	—	1000	0.42
FGH96	1050	1.67×10^{-3}	825	—
Ti3Al	940 ~ 980	5×10^{-4}	818	0.69
Al ₂ O ₃ - 0.1MgO	1400	1.2×10^{-4}	40 ~ 80	0.59
Al ₂ O ₃ - 20ZrO	1400	1.2×10^{-5}	50 ~ 150	0.43
Al ₂ O ₃ - 20spinel	1400	1.2×10^{-6}	100 ~ 400	0.59
20Si3N4p/6061Al	545	10^{-1}	450	—
10SiCp/2024Al	515	5×10^{-4}	685	0.4
20Si3N4w/Al - Zn - Mg	545	2×10^{-1}	230	0.4
20Si3N4p/5052Al	545	1	700	0.3
15SiCp/IN9021	550	5	610	0.5
17.8SiCp/2124Al	490	8.3×10^{-2}	425	0.41
20Si3N4p/2124Al	515	4×10^{-2}	840	—
Ti - 24Al - 11Nb	980	5×10^{-5}	810	—

(续)

材料牌号	超塑性条件		超塑性结果	
	温度/℃	应变速率/s ⁻¹	延伸率/%	m 值
Ti-24Al-11Nb	960	1.5×10^{-3}	1240	0.76
Ti-24Al-11Nb	960	8×10^{-4}	1129	0.7
Ti-46.7Al-2.2Cr	1100	5×10^{-4}	340	0.77
Ti-33Al-3Cr	1075	8×10^{-5}	517	—
Ti-25Al-25Cr	900	2.2×10^{-4}	480	0.5
Ni-9Si-3.1V-2Mo	1080	8×10^{-3}	710	0.5
Ni-30Fe-Y	980	1.64×10^{-4}	467	0.52

1.1.3 超塑性变形的力学特征

由于金属超塑性状态的特殊条件使得金属超塑性变形与普通热塑性变形微观机理有很大不同,对于细晶超塑性变形,微观机理是以晶界滑移为主,微缩蠕变和扩散蠕变只起协调的辅助作用。试验表明,如果变形条件偏离了超塑性条件,则材料的超塑性能就会下降;偏离越多,下降越多。超塑性变形的上述特征是由其特殊的微观变形机理决定的。为了描述超塑性变形的力学特征,通常使用如下的金属超塑性一维本构关系:

$$\dot{\varepsilon} = A (\sigma - \sigma_i)^n / D^p \quad (1-1)$$

式中: D 为晶粒度;应变速率敏感指数 $m = 1/n$; p 为晶粒度敏感指数; σ_i 为门槛应力,对于多数情况认为 $\sigma_i = 0$ 。式(1-1)可改写成:

$$\sigma = k \dot{\varepsilon}^m D^{mp} \quad (1-2)$$

当晶粒度、变形温度和应变速率的变化范围不大时,可以认为 m 、 p 为材料常数。试验证明,当晶粒度、变形温度和应变速率在较大范围变化时, m 、 p 的变化特别是 m 值的变化是不能忽略的。理论上可以证明, m 值越高,材料抵抗颈缩的能力越强,拉伸试验的延伸率越高,这是超塑性材料的共同特征,所以也常用应变速率敏感指数 m 值来评价材料的超塑性, m 值越高,材料的超塑性越好。试验证明对于大多数超塑性材料 m 的范围为 $0.3 < m < 1$ 。从式(1-2)可以看出,晶粒细化会降低材料的流动应力,对那些不稳定的材料,超塑变形过程中的晶粒长大会引起应力上升。晶粒长大会破坏超塑性变形条件,使材料的超塑性变差,因此应尽量控制变形过程的晶粒长大。另一方面,对于初始晶粒度比较大、超塑性不好的材料,如果能够促成动态再结晶发生,造成晶粒细化,则有可能将普通的热塑性变形转化为超塑性变形。

图 1-1(a)、(b)分别为 IN718 合金超塑性延伸率随应变速率和温度的变化,

可以看出该合金的超塑性应变速率为 $0.001/\text{s}$, 超塑性温度为 920°C , 其最大延伸率为 1080% ; 图 1-1(c) 为 IN718 合金最大流动应力随应变速率的变化。对于变形过程中晶粒度保持稳定不变的情况, 可以将晶粒度的影响隐含在系数 k 中, 超塑性本构关系式(1-2)可简化为 Backfen 方程: $\sigma = k_1 \dot{\epsilon}^m$, 图 1-1(c) 中的应变速率敏感指数大约为 $0.6^{[8,9]}$ 。

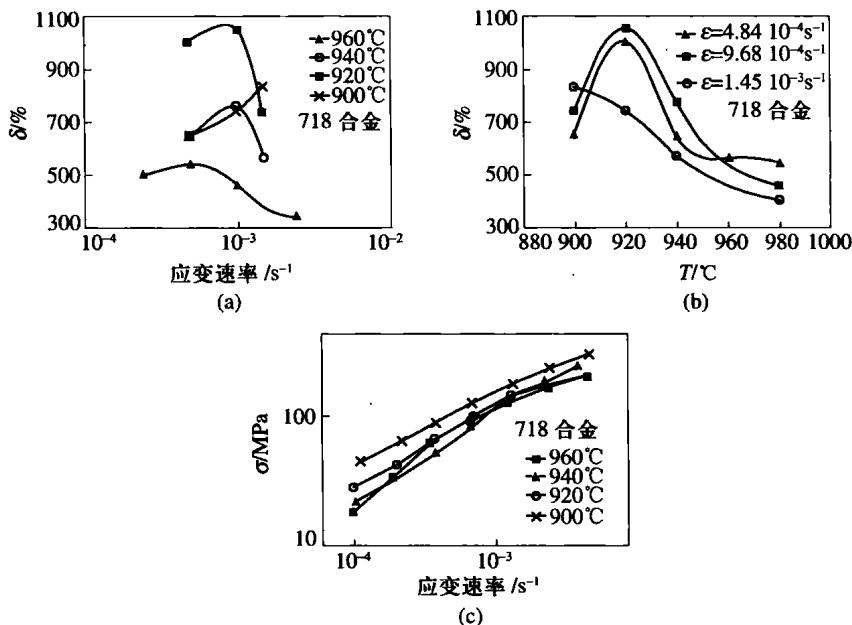


图 1-1 IN718 合金在不同变形条件下的超塑性

(a) 超塑性延伸率随应变速率的变化; (b) 超塑性延伸率随温度的变化;
(c) 流动应力随应变速率的变化。

1.1.4 超塑性的应用方向

超塑性成形技术是金属材料加工技术的一次重大变革, 它的主要特点为工艺简单, 可生产形状极为复杂的构件; 设备简单, 吨位小、成本低、节能, 尤其适用于形状复杂的小批量构件。由于超塑成形可使多个部件一次整体成形, 结构强度明显提高, 重量减轻, 超塑成形技术成为当今航空航天等领域最吸引人的加工新技术之一。

超塑性成形是在材料超塑性状态下进行金属成形, 超塑性成形时由于工件各部位材料处于或接近超塑性状态, 材料具有最好的成形性能, 因此超塑性成形可以一次成形出普通成形工艺需要多道工序才能成形或者根本不能成形的复杂形状零件, 对于锻造成形, 优良的成形性能可以减少加工余量并实现构件的近净成形, 超

塑性成形对于高技术领域难变形材料的成形具有重要意义。目前,国内外超塑性成形技术应用较为广泛的主要为细晶超塑性,超塑性成形技术的应用范围已经发展到锌铝合金、铝合金、钛合金、铜合金、镁合金、镍基合金、黑色金属材料以及新型陶瓷材料、复合材料、金属间化合物等复杂构件的成形^[6,7]。比较常用的超塑性成形工艺主要有以下几种:

(1) 气胀成形。这是最早利用超塑性的工艺,目前应用最多。材料在超塑状态下变形抵抗力较低,塑性极好,可像玻璃和塑料一样用气吹成形,常用于生产薄壁壳体部件,其最大的特点是工艺和设备都很简单。如抛物线状的天线、仪表壳体及美术浮雕等适于此方法生产制造。

(2) 超塑深拉延。由于超塑材料有极高的塑性,因此,可将金属板材一次深拉延成筒形零件。该方法可成形高径比很大的筒形件(高径比 ≥ 10),成形后的薄壁均匀,还可在模腔中再次胀成瓶状部件。

(3) 无模拉伸。即利用材料在超塑状态下具有高抗缩颈能力,拉伸变形中变形均匀的特点,可使加热区部分按要求均匀变形。

(4) 超塑性等温模锻。此方法充分利用了超塑材料变形抵抗力低、塑性好的特点,可使成形载荷大为降低,而且材料的填充性能好,对形状复杂的材料成形有非常好的适应性。

(5) 超塑成形/扩散焊接(SPF/DB)。这种方法是充分发挥超塑材料特点的一种组合技术。材料本身在超塑状态下能高速扩散,超塑成形的同时,也将多个部件扩散焊接成一个整体,使得结构的重量减轻、强度提高、导热性也增强了,所以被认为是航空航天工业中最有潜力的新型技术。

(6) 超塑复合材料。超塑材料本身塑性好,与其他材料复合后可大大提高其整体性。如纯铝与 Zn-22% Al 合金复合后,在 250℃ 拉伸时,延伸率从 50% 提高到 400%,可吹胀成形。同时由于超塑材料高温时扩散能力很强,可用超塑材料作基体,制作颗粒和纤维强化复合材料。日本大量使用的汽车减振、消声材料即为低碳钢和 Zn-Al 的复合板,由于该材料在超塑状态工作时的内耗高,故减振效果明显。

(7) 其他。利用材料在超塑状态下强度低而塑性高的特点,工程技术人员可实现超塑切削加工。一些难加工材料如镍基合金,在超塑状态下切削,加工阻力小,工作效率高,表面粗糙度降低,加工工具的寿命得到了提高。

1.2 等温锻造技术特点

1.2.1 常见材料锻造温度及范围

锻压是指对坯料施加外力,使其产生塑性变形,改变尺寸、形状并改善性能,用