

金属超塑性变形理论

吴诗婷 著

国防工业出版社

金属超塑性变形理论

吴诗惇 著

国家自然科学基金、航空基础科学基金
和高校博士学科点科研基金资助项目

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

金属超塑性变形理论/吴诗惇著. —北京:国防工业出版社,1997.4

ISBN 7-118-01629-2

I. 金… II. 吴… III. 金属-塑性变形-理论 IV. TG111.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 08597 号

011801629-2

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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{3}{4}$ 248 千字

1997 年 4 月第 1 版 1997 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:17.80 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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,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. 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,内容明确、具体、有突出创见,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作,职责是: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,由国防工业出版社选出版。

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,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工业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

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允

曾铎

秘书长 刘琯德

委员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序) 刘仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

作者简介



吴诗惇,1933年3月出生于江苏省苏州市。祖籍安徽省安庆市。西北工业大学材料科学与工程学院教授。1990年被国务院学位委员会批准为博士生导师。兼任职务有:全国高校锻压专业教学指导委员会委员、中国兵工学会压力加工学会委员、全国冷锻专业委员会委员、《金属成形工艺》编委、陕西省金属学会压力加工专业委员会副主任、陕西省科协国际会议中心顾问等。被1991年9月在新加坡召开的固体力学和结构力学国际学术会议组织委员会聘请担任国际顾问委员会委员。1955年北京航空学院(现改为北京航空航天大学)本科毕业,1957年北京航空学院研究生毕业。毕业后一直在西北工业大学从事金属塑性加工领域的教学与科研工作,特别对金属的挤压、冲压、超塑性成形以及塑性成形原理等方面进行过长期系统的研究。曾先后获国家级科技进步奖1项、省部级科技进步奖6项。1992年还曾获国防科工委光华基金奖。主编的教材《冲压工艺学》(西北工业大学出版社,1987年),1991年获原航空航天工业部优秀教材奖。1992年被陕西省科协授予陕西科技精英称号。1993年被原航空航天工业部评为部级优秀研究生导师。享受国务院颁发的政府特殊津贴。在国内外学术刊物和国际学术会议上发表论文120余篇,出版专著、教材和译著等10余部(包括合作的在内)。1994年以来,《挤压理论》、《冷温挤压技术》和《金属超塑性变形理论》三本专著连续由国防工业出版社出版。其中《挤压理论》和《金属超塑性变形理论》均获国防科工委设立的国防科技图书出版基金资助。

前 言

本书是关于金属超塑性变形理论的学术专著。

本书在充分反映国内外其他学者最新研究成果的同时,以大量的篇幅介绍了本书作者以及作者指导的博士生和硕士生近几年来在这方面的研究成果。这些成果分别属于作者得到的国家自然科学基金、航空基础科学基金和高校博士学科点科研基金的资助课题。其中绝大多数成果的内容已在国内外著名学术刊物或国际学术会议上发表。

在本书中,作者提出了将超塑性板料作为含空洞材料的屈服准则;根据变分原理计算空洞长大的模型;将损伤力学的概念、原理和方法应用于超塑性变形而导出的金属材料在超塑性变形时的损伤演变方程;超塑性板料在破坏以前的四个变形发展阶段;超塑性板料受拉失稳的成形极限计算方法和成形极限图的预测;分析超塑性自由胀形过程的新的解析-数值计算方法以及作者在强电场中进行超塑性变形的研究进展等。

这些研究成果是作者和作者指导的研究生李森泉博士、杜志孝博士、刘马宝博士、李园春博士、贺咏梅硕士和吴小伟硕士等共同完成的。

作者感谢国家自然科学基金、航空基础科学基金和高校博士学科点科研基金给予课题研究资助和国防科技图书出版基金评审委员会给予本书出版资助。作者特别感到荣幸的是,这次是作者第二次获得国防科技图书出版基金的资助。上次资助出版的《挤压理论》一书,已于1994年由国防工业出版社出版。作者还要感谢国防工业出版社以及本书责任编辑蒋怡女士对本书出版给予的支持、帮助与辛勤工作。最后作者还要感谢作者的妻子秦毓琴女士,她几

十年如一日对作者的工作给予关心、支持与帮助。

在编写本书时,作者参考了我校杨振恒和陈诗荪两位教授合编的校内讲义《金属超塑性与超塑成形》中的个别章节,特此说明并致谢意。

由于金属超塑性变形理论涉及的研究领域是一个比较新颖的领域,其中有不少部分甚至还是空白,因此本书作者等提出的一些研究结果很可能还不够完善。作者欢迎读者提出宝贵意见并共同进行进一步的探讨与研究,以便推动这一研究领域的发展与应用。

本书适合高等院校机械、冶金、材料和力学等类有关专业的研究生、高年级本科生和教师阅读或参考,也可以选作有关专业的研究生教材,也可供有关专业的广大科技人员阅读或参考。

吴诗惇

1996年10月

于西北工业大学

内 容 简 介

本书是关于金属超塑性变形理论的学术专著。它在充分反映国内外其他学者最新研究成果的同时,以大量的篇幅介绍了本书作者近几年来在这方面的研究成果。在本书中,作者提出了将超塑性板料作为含空洞材料的屈服准则、根据变分原理计算空洞长大的数学模型、根据损伤力学的概念与原理导出的超塑性变形时的材料损伤演变方程、超塑性板料在破坏以前的四个变形发展阶段、超塑性板料受拉失稳的成形极限计算方法和成形极限图的预测、分析超塑性自由胀形过程的一种新的解析-数值计算方法以及作者在强电场中进行超塑性变形的研究进展等。

全书共分九章,除了绪论以外,分别论述金属超塑性的力学特性、变形机理、变形过程中的空洞与断裂、变形时的损伤演变方程、超塑性成形的力学计算、板料拉伸失稳和成形极限图的理论预测、在强电场中的超塑变形以及金属基复合材料的超塑性变形等。本书在国内外首次全面而系统地阐述了金属超塑性变形理论的各个方面。

本书适合高等院校机械、冶金、材料和力学等类有关专业的研究生、高年级本科生和教师阅读或参考,可以作为有关专业的研究生教材,也可供有关专业的广大科技人员阅读或参考。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 塑性与超塑性	1
1.2 金属超塑性的发展概况	2
1.3 超塑成形的优点和存在的问题	5
1.4 超塑性的分类	7
1.4.1 组织超塑性	7
1.4.2 相变超塑性	8
1.4.3 其他超塑性	9
本章参考文献	10
第二章 金属超塑性的力学特性	11
2.1 拉伸试验的应力应变曲线	11
2.2 超塑性变形本构方程	13
2.3 超塑性变形的状态方程分析	15
2.4 超塑性单向拉伸的稳定性	18
2.4.1 基本概念	18
2.4.2 Hart 准则	19
2.4.3 m 值与均匀变形的关系	19
2.4.4 m 值与拉伸试件断面变化的关系	21
2.4.5 稳定变形到准稳定变形的转变点	23
2.4.6 准稳定变形	26
2.4.7 邢-王的研究结果	29
2.5 影响超塑性和应变速率敏感性指数 m 的各种因素	32
2.5.1 应变速率的影响	32

2.5.2	温度的影响	33
2.5.3	晶粒度的影响	37
2.5.4	变形程度的影响	39
2.6	应变速率敏感性指数 m 与延伸率的关系	42
2.7	超塑性状态下的压缩特性	45
2.8	超塑性状态时的屈服准则	47
2.8.1	泽田的研究结果	47
2.8.2	王仲仁等的研究结果	47
2.8.3	本书作者等的超塑性板料屈服准则	49
2.9	一般应力状态下的应力与应变速率关系	54
2.10	应力状态对最佳应变速率的影响	56
2.11	关于 $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$ 方程中 K 与 m 值的讨论	61
2.12	超塑性参数的测定	62
2.12.1	高温拉伸试验机	63
2.12.2	超塑性拉伸试件	63
2.12.3	超塑性加热时用的防护涂层	65
2.12.4	应变速率敏感性指数 m 值的测定	66
2.12.5	超塑性变形激活能 Q 的测定	74
2.13	高应变速率超塑性	76
	本章参考文献	77
第三章 金属超塑性的变形机理		80
3.1	超塑性变形过程中金属组织变化的特点	80
3.2	超塑性变形机理	83
3.2.1	扩散蠕变机理	84
3.2.2	位错蠕变机理	87
3.2.3	伴随扩散蠕变的晶界滑移机理	88
3.2.4	伴随位错蠕变的晶界滑移机理	91
3.2.5	“心部-表层”机理	96
3.2.6	晶粒转出机理	96

3.2.7 对超塑性变形各种机理的评论	98
3.3 综合变形机理的定量计算	99
本章参考文献	100
第四章 超塑性变形过程中的空洞与材料断裂	102
4.1 概述	102
4.2 空洞的形态观察和体积分数测定	105
4.2.1 空洞的形态演变	106
4.2.2 工艺因素对空洞演变的影响	109
4.2.3 断裂处附近的空洞	110
4.3 空洞的形核	113
4.4 空洞的长大	117
4.4.1 空洞的长大机制	117
4.4.2 应用变分原理和 Rayleigh-Ritz 法导出的空洞长大模型	121
4.5 空洞的聚合或连接和材料的断裂	140
4.6 空洞对材料室温使用性能的影响	142
4.7 抑制与减少空洞的措施	152
本章参考文献	154
第五章 超塑性变形时的损伤演变方程	158
5.1 连续损伤力学	158
5.2 损伤变量、有效应力和应变等效性假设	160
5.3 含内变量的不可逆过程热力学本构方程	161
5.4 超塑性变形时的材料损伤演变方程	165
5.5 损伤测量与常数确定	169
5.5.1 损伤测量	169
5.5.2 材料常数确定	170
本章参考文献	172
第六章 超塑性成形的力学计算	174

6.1	超塑性自由胀形的解析法计算	174
6.1.1	Jovane 解析法	175
6.1.2	宋玉泉解析法	180
6.2	考虑空洞化的超塑性自由胀形的解析—数值法 计算	194
6.2.1	基本方程	195
6.2.2	计算步骤	203
6.2.3	计算结果	211
6.3	加强槽的超塑性胀形	213
6.3.1	圆柱面加强槽的胀形	213
6.3.2	V 形加强槽的胀形	217
6.4	圆板的超塑性压缩	222
6.5	超塑性正挤压	225
	本章参考文献	230
第七章 超塑性板料的拉伸失稳和成形极限图的理论		
	预测	231
7.1	引言	231
7.2	试验研究	234
7.2.1	试验材料与方法	234
7.2.2	试验结果与讨论	235
7.3	计算超塑性板料成形极限的数学模型	241
7.4	预测成形极限的基本方程	242
7.5	稳定变形阶段极限应变的计算	243
7.6	准稳定变形阶段极限应变的计算	245
7.7	集中性失稳发生时的极限应变计算	247
	本章参考文献	250
第八章 在强电场中的超塑变形		
8.1	引言	253

8.2 LY12CZ 铝合金在强电场中超塑性变形时的工艺 参数与超塑性能	257
8.2.1 LY12CZ 铝合金在强电场中超塑性变形时的最佳条件	257
8.2.2 工艺参数对 LY12CZ 铝合金在强电场中超塑性变形的 影响	257
8.2.3 LY12CZ 铝合金在强电场中的超塑性胀形	265
8.2.4 LY12CZ 铝合金在强电场中超塑性变形后的室温机械 性能	268
8.3 LY12CZ 铝合金在强电场中超塑性变形时的微观 变化	270
8.3.1 显微组织的演变	270
8.3.2 晶粒尺寸与轴比的变化	270
8.3.3 位错密度的变化	274
8.3.4 微区成分的变化	275
8.4 LY12CZ 铝合金在强电场中超塑性变形时的空洞 演变	276
8.4.1 空洞形态	276
8.4.2 工艺参数对空洞形核和长大的影响	276
8.4.3 工艺参数对断裂时空洞体积分数的影响	280
本章参考文献	283
第九章 金属基复合材料的超塑性变形	286
9.1 金属基复合材料的特点	286
9.2 金属基复合材料的制备	287
9.3 铝基复合材料的超塑性	289
9.4 金属基复合材料的超塑性变形机理	291
本章参考文献	294

第一章 绪 论

1.1 塑性与超塑性

塑性是金属的重要属性之一,它指的是金属在外力作用下,无损而永久地改变形状的能力。

如果用延伸率来表示塑性大小,一般黑色金属在室温下的延伸率不大于40%,铝、铜等有色金属约为50%~60%,即使在高温下,也难以达到100%。

据统计,从1928年到1969年,人们为了提高金属的塑性,经过40多年的努力,工业用金属材料的平均延伸率,提高不超过10%。常规的冶金学对塑性的提高并未取得明显的效果。

金属材料的塑性是随着本身组织状态和变形条件而变化的,如材料的化学成分及相的状态、塑性加工时金属的晶体取向、变形时的应力状态、变形温度和变形速度、金属内部组织的不均匀性以及加工时周围的介质等,都会对金属的塑性有影响。

金属和合金在特定组织结构和变形温度速度条件下,可以呈现异常高的塑性,延伸率可达百分之几百,甚至达百分之一千或二千以上,变形抗力也很小,这种现象称为超塑性。例如Zn-22%Al合金在250℃时的延伸率达1500%以上,强度极限 $\sigma_s \approx 2\text{MPa}$;Ti-6Al-4V合金在950℃时的延伸率达1600%, $\sigma_s \approx 10\text{MPa}$ 。对一般所说的组织超塑性而言,要具备这种超塑性的特定条件是晶粒细小、等轴、变形温度为 $(0.5 \sim 0.7)T_m$ (T_m :材料熔点温度,以热力学温度表示)以及低的应变速率等。

现已发现,超塑性并非金属材料所独有。一些非金属材料,如陶瓷、有机材料等也都能在特定条件下呈现超塑性。

金属具有这种特殊的、巨大的延伸的超塑性现象,引起了人们广泛的兴趣和重视。国内外的许多科技工作者从金属的超塑性机理、冶金学、力学特性和应用技术等方面,开展了广泛的研究。人们认为开展超塑性的研究对金属学、冶金学、热加工工艺和生产应用等方面将会产生深远的影响。

本书将从金属超塑性变形理论的角度研究金属超塑性问题。对超塑性变形理论的研究,不仅对超塑性成形技术具有指导与推动的作用,而且对超塑性这一现象本身的认识也会提高到一个新的高度。只是由于关于超塑性变形理论的研究起步较晚,尚有待于人们作更多的探索。

1.2 金属超塑性的发展概况

回顾 20 世纪 20 年代以来,金属超塑性发展是从观察某些金属超塑性现象开始,进而研究其力学性能、变形机理,直到应用研究。其中经过了漫长岁月,现已取得可喜的成绩。

早在 1920 年,德国 W. Rosenhain 等人在研究 Zn-4%Cu-7%Al 三元共晶合金板材时,发现快速弯曲冷轧板材会很快折断,而在慢速弯曲时,即使弯至 180°仍未出现裂纹。将其进行拉伸试验,也发现材料的塑性与加载速度密切相关的类似现象。

1924 年英国 A. Sauveur 将铁棒加热扭曲,发现在 α - γ 相变温度区域内,扭转变形量特别大,并得出结论:“当铁进行 α - γ 转变时,它获得一暂时的塑性,此暂时塑性大大超过了高温下 γ 铁的塑性”。

1934 年英国学者 C. E. Pearson 对 Sn-37%Pb 和 Bi-44%Sn 共晶合金的挤压材料进行慢速拉伸试验时,得到了 1900%以上的延伸率,即伸长到原始长度的 19 倍以上,成了一根均匀的细丝。在 Pearson 的著作^[1,1]中有一张 Bi-Sn 共晶合金试样拉伸到 1950%尚未断裂的绕成卷的细丝照片,这是第一次在金属材料史上获得的最高延伸率,是超塑性研究史上一张具有重大历史意义的照片。当