



国防科技图书出版基金

粘塑性 本构理论及其应用

Viscoplastic Constitutive
Theory and Application

杨晓光 石多奇 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

粘塑性本构理论及其应用

Viscoplastic Constitutive Theory and Application

杨晓光 石多奇 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

粘塑性本构理论及其应用 / 杨晓光, 石多奇编著.
—北京: 国防工业出版社, 2013. 6
ISBN 978 - 7 - 118 - 07626 - 4

I. ①粘... Ⅱ. ①杨... ②石... Ⅲ. ①粘塑性 -
研究 IV. ①O345

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 153804 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)
北京嘉恒彩色印刷责任有限公司
新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 13¼ 字数 222 千字
2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777
发行传真: (010) 88540755

发行邮购: (010) 88540776
发行业务: (010) 88540717

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 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

本书是作者从事该领域研究近十五年的总结,最初的研究目的主要是针对航空发动机热端部件(涡轮叶片、涡轮盘等)解决在高温复杂载荷环境下应力应变准确计算的问题,这是结构设计、强度评价和寿命预测的基础;特别是航空发动机不但要求质量轻,还要求强度高和寿命长,任何结构的细节设计都需要准确把握,而传统的基于线弹性或经典弹塑性理论的结构设计和分析方法明显不足。实际上早在“八五”期间,我国航空发动机行业从美国 20 世纪 80 年代开展的“航空发动机热端部件技术计划”中就已获知其开展了关于粘塑性本构模型的研究。多年来我国行业主管部门也持续支持了这方面的研究,作者也得到了开展这方面研究的资助,并在“十五”期间与 Rolls - Royce 德国公司合作,进一步深入了解了先进航空发动机研制国家开展相关工作的情况。长达 10 多年的研究,使得该领域不论在理论基础,还是在工程应用方面都得到了长足发展,形成了可用于型号研制的一种成熟技术。

从本质上说,开展这样的研究,本构理论是其核心。所以,本书主要以先进的粘塑性统一型本构理论为对象,较为全面、系统地介绍了其理论框架、主要模型以及我们对其进行的改进;并且针对我国发动机型号上的实际应用情况,给出了涡轮盘用变形高温合金(材料牌号 ZSGH4169)和涡轮叶片用镍基定向凝固(材料牌号 DZ125)及单晶合金(材料牌号 DD6)的高温复杂循环变形行为本构建模结果。

本书分为三部分。第一部分包括第 1 章至第 7 章。该部分的第 1 章至第 3 章,在说明了热端部件结构在高温复杂循环载荷下的应力应变特点之后,指出了采用现有工程方法的不足和问题,进而引入先进的粘塑性理论框架体系,说明其理论基础、模型方程、建模能力,并详细介绍了已在美国和欧洲得到应用的 Chaboche 本构模型和 Bodner-Partom 本构模型。在第 4 章,特别针对典型航空发动机载荷谱下的结构循环非弹性变形行为——棘轮现象,介绍了有关的理论方法和我们的研究结果。在第 5 章至第 7 章,结合我国在实际结构设计中采用的有限元技术,给出了将粘塑性本构模型与有限元结合的方法,以及为获取材料本构参数所需的实验种类、参数识别和优化方法。并针对先进航空发动机热端部

件采用的三种镍基合金,包括高温变形合金、定向凝固合金和单晶合金,给出了其相应的粘塑性模型、材料参数及本构建模结果,特别是采用一套材料参数,可同时计算与时间相关的蠕变和与时间不相关的塑性。第二部分,第8章和第9章,主要是针对单晶镍基合金的本构建模工作,其特殊性来自于各向异性,除变形抗力的描述继续采用粘塑性框架外,还结合了单晶变形的滑移理论和胞元方法。最后部分,第10章,针对的是热障涂层,也是目前航空发动机涡轮叶片采用的一项关键技术,解决的是多层材料结构的分析方法问题,包括基体镍基合金的粘塑性建模和陶瓷层的拉伸压缩不对称行为的建模。

此书可作为航空航天动力装置领域从事结构设计和分析、强度评价和寿命预测工作人员的参考书,也可作为高等学校和研究所相关研究领域的教师和研究生参考书或教科书;由于书中所含内容的一般性,也可作为从事热机结构,如地面燃机、舰船动力、核反应堆结构和车用动力装置等行业的结构分析、强度技术人员的参考书。

作者愿借此机会对资助本研究的沈阳航空发动机设计研究所、北京航空材料研究院、中国人民解放军总装备部、空军装备部等单位表示感谢;也感谢一直支持作者开展此项工作的吴学仁总工程师、于慧臣研究员、杨士杰副总师、周柏卓副总师、蔚夺魁副总师和王延荣教授等。杨晓光教授的博士研究生魏洪亮博士、周天朋博士、白露博士、王庆五博士也参与了其中的工作,在此也一并表示感谢。最后要向国防工业出版社程邦仁编辑表示诚挚的谢意,感谢他自始至终所给予的热情关怀和不遗余力的帮助以及他的同事们所给予的鼎力协助。

全书由杨晓光教授统稿,其中第1章~第6章由石多奇副教授编写,第7章~第10章由杨晓光教授编写。限于作者水平和经验,不妥之处在所难免,特别是对一些名词术语,虽经仔细比较和反复推敲,仍不乏偏颇之处,敬请读者予以批评指正。作者愿把此书献给我国的航空发动机事业。

作者

2013年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 本构理论发展历史简述	2
1.3 固体本构理论的基本要求	4
1.4 粘塑性本构理论研究现状	5
1.4.1 第一类粘塑性本构理论	6
1.4.2 第二类粘塑性本构理论	8
1.5 Bodner – Partom 粘塑性模型的发展	9
1.6 Chaboche 粘塑性模型的发展	10
第 2 章 粘塑性统一本构理论框架	13
2.1 引言	13
2.2 弹—粘塑性统一本构方程的一般特征	14
2.2.1 基本流动法则	16
2.2.2 运动方程	17
2.3 内变量演化方程	18
2.3.1 各向同性硬化	19
2.3.2 方向性或运动硬化	19
2.4 稳定性与单值性准则	19
第 3 章 Chaboche 和 Bodner – Partom 型粘塑性统一本构模型	21
3.1 Chaboche 粘塑性统一本构模型	21
3.1.1 流动法则	21
3.1.2 运动方程	22
3.1.3 内变量演化方程	22
3.1.4 考虑棘轮现象的运动硬化演化方程	24
3.1.5 温度历史效应	26
3.2 Bodner – Partom 粘塑性统一本构理论	26

3.2.1	流动法则	27
3.2.2	运动方程	27
3.2.3	内变量演化方程	28
3.2.4	温度历史效应	29
3.3	粘塑性统一本构模型的有限元实现	29
3.3.1	粘塑性本构方程的积分方法	30
3.3.2	粘塑性统一本构模型在 ABAQUS 程序中的实现	31
3.4	考虑各向异性的 Chaboche 本构模型	34
3.4.1	正交各向异性 M 矩阵	34
3.4.2	横观各向同性 M 矩阵	36
第 4 章	棘轮现象建模	41
4.1	引言	41
4.2	棘轮现象	43
4.2.1	概论	43
4.2.2	棘轮变形的常见形式	48
4.2.3	单轴与多轴的差别	50
4.3	不同硬化模型建模棘轮行为的能力	51
4.3.1	线性运动硬化(LK)	51
4.3.2	多线性运动硬化模型(MLK)	52
4.3.3	非线性运动硬化模型(AF - NLK)	53
4.3.4	Chaboche 运动硬化法则	54
4.3.5	Ohno/Wang 硬化法则	56
4.3.6	RRD/BUAA 运动硬化法则	57
4.3.7	多轴与单轴的协调	59
4.4	典型模型对 Udimet720Li 高温合金棘轮行为的预测	59
4.5	结论	63
第 5 章	粘塑性本构参数获取方法	65
5.1	对试验数据的要求	65
5.2	B - P 本构参数获取方法	66
5.2.1	基本思路	66
5.2.2	硬化系数 m_1, m_2	69
5.2.3	硬化参数 Z_0, Z_1, Z_3 与粘塑性指数 n	70

5.2.4	热恢复参数 A, r	70
5.3	Chaboche 本构参数获取方法	71
5.3.1	基本思路	71
5.3.2	单调拉伸获得的参数	73
5.3.3	循环硬化获得的参数	75
5.3.4	棘轮效应获得的参数	76
5.3.5	蠕变获得的参数	76
5.4	材料参数优化方法	77
第 6 章	粘塑性本构模型在镍基高温合金中的应用	80
6.1	耦合损伤的粘塑性统一本构模型	80
6.2	镍基合金 UDIMET720Li 材料的本构建模	82
6.3	变形高温合金 ZSGH4169 材料的本构建模	90
6.4	定向凝固合金 DZ125 的本构建模	96
第 7 章	镍基单晶合金循环粘塑性本构模型	100
7.1	引言	100
7.2	基于晶体滑移的循环粘塑性本构模型	100
7.2.1	面心立方晶体中的滑移系	100
7.2.2	基本方程	103
7.2.3	坐标变换	104
7.3	本构模型的有限元实现	106
7.3.1	计算流程	106
7.3.2	本构方程积分法及与有限元结合	107
7.4	材料本构参数的确定	108
7.4.1	[001] 方向加载简化的本构方程	109
7.4.2	[111] 方向加载简化的本构方程	110
7.4.3	材料参数获取及优化	111
7.5	镍基单晶合金各向异性循环塑性模拟	112
7.5.1	镍基单晶合金 PWA1480 的循环应力应变计算	113
7.5.2	镍基单晶合金 DD6 循环塑性模拟	116
第 8 章	基于滑移和机制的镍基单晶合金蠕变本构模型	121
8.1	引言	121
8.2	镍基单晶合金蠕变本构模型的发展	121

8.2.1	宏观唯象蠕变本构模型	122
8.2.2	宏观—滑移系蠕变模型	123
8.2.3	基于微结构的本构模型	125
8.3	蠕变变形机制	128
8.3.1	位错的切割、攀移与绕越机制	128
8.3.2	高温下与筏化相关的蠕变机理	133
8.4	晶体滑移变形理论	137
8.4.1	晶体滑移变形的几何理论	137
8.4.2	镍基单晶高温合金的滑移系	138
8.5	镍基单晶高温合金的蠕变模型	140
8.5.1	蠕变本构模型需要解决的问题	140
8.5.2	状态变量的选择及其演化规律	141
8.5.3	本构模型中微观变形机制的引入	143
8.6	模型材料参数的获取方法	145
8.6.1	宏观曲线的拟合	145
8.6.2	滑移系上材料参数获取	147
8.7	镍基单晶合金高温蠕变模拟	148
8.7.1	CMSX-4 材料蠕变模拟	148
8.7.2	DD3 材料蠕变模拟	150
第9章	镍基单晶合金胞元本构模型	153
9.1	三维胞元模型	153
9.1.1	胞元模型的基本假设与组成部分	154
9.1.2	界面条件	156
9.1.3	胞元模型的线弹性行为及其方程	156
9.1.4	胞元模型的非弹性行为及其方程	158
9.2	微观组织的几何特征与材料宏观力学行为模拟	159
9.2.1	计算模型	159
9.2.2	微观几何因素对弹性行为的影响	161
9.2.3	微观几何因素对塑性行为的影响	164
9.2.4	微观几何形态对蠕变行为的影响	166
9.3	胞元模型的局限	169

第 10 章 热障涂层粘塑性本构模型及应用	170
10.1 等离子工艺热障涂层结构及高温变形特征	170
10.2 基于有限变形理论的粘塑性统一本构方程	172
10.2.1 陶瓷层材料的弹性本构关系	172
10.2.2 陶瓷层材料拉压不对称特性粘塑性本构模型	173
10.2.3 陶瓷层材料粘塑性本构模型的建立	175
10.3 陶瓷层本构模型在 ABAQUS 程序中的实现	178
10.4 陶瓷层结构计算结果与分析	179
参考文献	182

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Brief History of Constitutive Theory	2
1.3 Constraints for Constitutive Model	4
1.4 The Current State of Viscoplastic Constitutive Theory	5
1.4.1 The First Type of Viscoplastic Constitutive Theory	6
1.4.2 The Second Type of Viscoplastic Constitutive Theory	8
1.5 Bodner-Partom Type Viscoplastic Constitutive Model	9
1.6 Chaboche Type Viscoplastic Constitutive Model	10
Chapter 2 Framework of Unified Viscoplastic Theory	13
2.1 Introduction	13
2.2 General Characteristics of Elastic Viscoplastic Unified Constitutive Model	14
2.2.1 Basic Flow Rule	16
2.2.2 Kinematic Equation	17
2.3 Internal State Variable and Evolution	18
2.3.1 Isotropic Hardening Variable and Its Evolution Equation	19
2.3.2 Kinematic Hardening Variable and Its Evolution Equation	19
2.4 Singularity and Stability	19
Chapter 3 Chaboche and Bodner-Partom Type Unified Viscoplastic Constitutive Model	21
3.1 Chaboche Unified Viscoplastic Constitutive Model	21
3.1.1 Flow Rule	21
3.1.2 Kinematic Equation	22
3.1.3 Evolution Equation of Internal State Variable	22
3.1.4 Kinematic Hardening Evolution Equation Considering Ratcheting	24

3. 1. 5	Temperature History Effect	26
3. 2	Bodner-Partom Viscoplastic Constitutive Model	26
3. 2. 1	Flow Rule	27
3. 2. 2	Kinematic Equation	27
3. 2. 3	Evolution Equation of Internal State Variable	28
3. 2. 4	Temperature History Effect	29
3. 3	Implementation of Viscoplastic Model Into	
Finite Element Software		29
3. 3. 1	Integrate Method of the Constitutive Models	30
3. 3. 2	Implementation into ABAQUS/UMAT	31
3. 4	Anisotropic Constitutive Model	34
3. 4. 1	Anisotropic M Matrix	34
3. 4. 2	Transversely Isotropic M Matrix	36
Chapter 4	Modeling of Ratcheting Phenomenon	41
4. 1	Introduction	41
4. 2	Ratcheting Phenomenon	43
4. 2. 1	Briefing	43
4. 2. 2	Common Phenomenon of Ratcheting	48
4. 2. 3	The Difference between Uniaxial and MultiAxial Ratcheting	50
4. 3	Modeling Capability of Different Models for Ratcheting	51
4. 3. 1	Linear Kinematic Hardening Rule(LK)	51
4. 3. 2	Multi-Linear Kinematic Hardening Rule(MLK)	52
4. 3. 3	Non-Linear Kinematic Hardening Rule(AF-NLK)	53
4. 3. 4	Chaboche Kinematic Hardening Rule	54
4. 3. 5	Ohno/Wang Hardening Rule	56
4. 3. 6	RRD/BUAA Kinematic Hardening Rule	57
4. 3. 7	Coordination of Uniaxial and Multiaxial Ratcheting	59
4. 4	Modeling of Ratcheting of Udimet 720 Li Superalloy	59
4. 5	Conclusion	63
Chapter 5	Identification of Model Parameter	65
5. 1	Requirement for Experimental Data	65
5. 2	Identification of material Parameters in B-P Model	66

5.2.1	Strategy	66
5.2.2	Hardening Coefficient m_1, m_2	69
5.2.3	Hardening Parameter Z_0, Z_1, Z_3 and Visco-Parameter n	70
5.2.4	Thermal Recovery Parameters	70
5.3	Identification of material parameters in Chaboche Model	71
5.3.1	Strategy	71
5.3.2	Parameters Identified from Uniaxial Test Data	73
5.3.3	Parameters Identified from Cyclic Test Data	75
5.3.4	Parameters Identified from Ratcheting Test Data	76
5.3.5	Parameters Identified from Creep	76
5.4	Optimization of Parameters	77

Chapter 6 Application of the Models for High Temperature

	Ni-based Superalloy	80
6.1	Damage-Coupled Unified Viscoplastic Constitutive Model	80
6.2	Constitutive Modeling of Turbine Disk Material; Udimet 720 Li Superalloy	82
6.3	Constitutive Modeling of Turbine Disk Material; ZSGH4169 Superalloy	90
6.4	Constitutive Modeling of Turbine Blade Material; Directionally Solidified Superalloy DZ125	96

Chapter 7 Viscoplastic Model for Ni-based Single Crystal

	Superalloy	100
7.1	Introduction	100
7.2	Slip-Based Cyclic Viscoplastic Constitutive Model	100
7.2.1	Slip System in FCC Crystal	100
7.2.2	Basic Equation	103
7.2.3	Coordinate Transform	104
7.3	Implementation into Finite Element Software	106
7.3.1	Calculation Flowchart	106
7.3.2	Integrating Algorithm of the Constitutive Models and Implementation into MARC	107
7.4	Identification of Material Parameters	108

7.4.1	The Simplified Model in $[001]$ Orientation	109
7.4.2	The Simplified Model in $[111]$ Orientation	110
7.4.3	Identification and Optimization of the Parameters	111
7.5	Anisotropic Cyclic Plastic Constitutive Modeling for Single Crystal Superalloy	112
7.5.1	Cyclic Stress-strain Calculation of PWA1480 Superalloy	113
7.5.2	Cyclic Plasticity Simulation of DD6 Superalloy	116
Chapter 8 Slip and Mechanism-Based Creep Model for Ni-based Single Crystal Superalloy		
8.1	Introduction	121
8.2	Development of Creep Model of Ni-based Single Crystal Superalloy	121
8.2.1	Phenomenological-based Creep Model	122
8.2.2	Phenomenological and Slip-based Creep Model	123
8.2.3	Microstructure-based Creep Model	125
8.3	Creep Deformation Mechanism	128
8.3.1	Dislocation Cutting, Climbing and by-passing	128
8.3.2	Rafting-related Mechanism	128
8.4	Slip Deformation Theory of Crystal	137
8.4.1	Geometrical Equation	137
8.4.2	Slip Systems of Ni-based Superalloy	138
8.5	Ni-based Single Crystal Creep Model	140
8.5.1	The to-be Solved Problems for Creep Modeling	140
8.5.2	The Internal State Variables and Their Evolution	141
8.5.3	Implementation of the Deformation Mechanism into Creep Models	143
8.6	Identification of Material Parameters	145
8.6.1	Creep Curve Fitting	145
8.6.2	Parameters in Slip System	147
8.7	Simulation of Creep of Ni-Base single Crystal Superalloy at High Temperature	148
8.7.1	Creep Simulation of CMSX-4	148
8.7.2	Creep Simulation of DD3	150