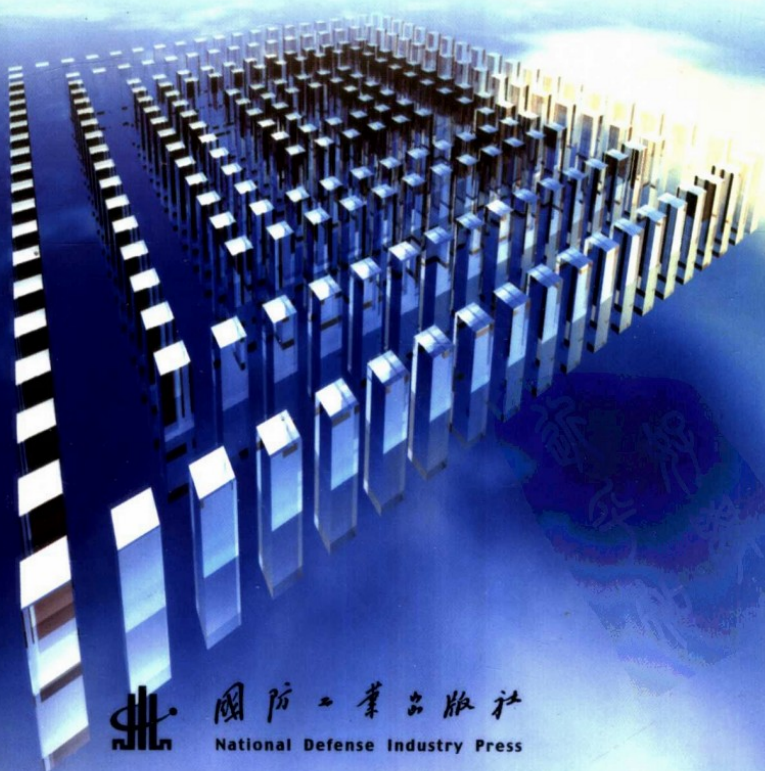


定向凝固 高温合金的再结晶

Recrystallization of Directionally
Solidified Superalloy

陶春虎 张卫方 施惠基 张宗林 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

责任编辑：刘 新 llxyyxx@126.com
文字编辑：李玉昌
责任校对：钱辉玲
封面设计：王晓军 xjwang@ndip.cn

定向凝固 高温合金的再结晶

Recrystallization of Directionally Solidified Superalloy



定向凝固 高温合金的再结晶

Recrystallization of Directionally
Solidified Superalloy

陶春虎 张卫方 施惠基 张宗林 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

定向凝固高温合金的再结晶/陶春虎等著. —北京:国防工业出版社, 2007. 10

ISBN 978-7-118-05227-5

I. 定... II. 陶... III. 定向—凝固—耐热合金—再结晶(冶金)—研究 IV. TG132.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 097006 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 7½ 字数 185 千字

2007 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 26.00 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 言

与普通铸造高温合金相比,定向凝固高温合金由于消除了与应力轴垂直的横向晶界,具有优异的抗蠕变性能和疲劳性能等,是高性能航空航天等武器装备用先进发动机及地面燃机涡轮叶片的主要用材。定向凝固高温合金的再结晶晶界缺乏强化元素,垂直于应力轴的再结晶晶界很容易成为裂纹的发源地,因此应严格控制定向凝固高温合金部件上的再结晶。但在实际工程中,定向凝固高温合金叶片的制造、加工和热处理特性为再结晶的发生和长大提供了条件。因此,对于工程技术人员,只有在认真把握定向凝固高温合金再结晶的规律和物理本质、熟练掌握再结晶的特征及其检测方法等基础上,才能对定向凝固高温合金叶片的再结晶进行有效的控制。然而迄今为止,国内外尚未有系统介绍定向凝固高温合金再结晶的专著。

本书在简要介绍定向凝固高温合金应用领域和发展前景的基础上,系统阐述了定向凝固高温合金再结晶的基本特点、影响再结晶的主要因素,重点介绍了再结晶对定向凝固高温合金性能的影响,在国内首次力学模拟分析了含再结晶层定向凝固高温合金的损伤行为以及计算机模拟了再结晶对定向凝固高温合金叶片损伤行为的影响。本书同时还以工程上再结晶引起的定向凝固高温合金叶片疲劳断裂故障为例,分析了定向凝固高温合金再结晶损伤的物理本质,给出了定向凝固高温合金再结晶的检测方法与控制标准。本书虽主要针对定向凝固高温合金,但其内容同样适用于单晶高温合金。

本书关于定向凝固高温合金再结晶理论的基础性研究,填补了国内在该研究领域的空白,有力地推动了各向异性材料损伤特

征研究的深入化和系统化;本书关于预防定向凝固高温合金叶片再结晶的工程技术研究,有利于叶片综合质量的提高和航空航天等发动机使用安全可靠性的提高。

本书是目前国内外第一部系统介绍定向凝固高温合金再结晶的专著,学术思想新颖,内容具体实用。它将不仅成为从事定向凝固高温合金研制与生产的科技人员、定向凝固高温合金部件的设计人员以及检测和维修的技术人员的重要参考书,也可供高等院校材料、力学等有关专业的师生参考。

本书的出版对提高我国定向凝固高温合金和单晶高温合金叶片的研制、应用和维修水平具有极其重要的参考价值,对我国航空发动机性能快速稳定提高有积极的促进作用。

胡北祺

前 言

定向凝固高温合金和单晶高温合金是现代航空燃气涡轮、舰艇燃气涡轮、火箭发动机以及地面燃气轮机叶片的关键材料,其安全可靠使用直接影响国防武器装备的功能与可靠性。1999年,某型发动机用定向凝固高温合金涡轮叶片发生了多起叶片叶身裂纹和断裂故障,造成大量发动机返厂检修和飞机停飞。研究结果表明,这些故障主要和再结晶有关,再结晶削弱了定向凝固高温合金涡轮叶片的持久性能及热疲劳抗力等,加速了裂纹的萌生,从而严重降低了叶片的使用可靠性。

鉴于定向凝固高温合金在国防武器装备上的重要性,以及国内外对定向凝固高温合金再结晶,尤其是叶片工程应用中出现的再结晶的研究尚未系统地报道,本书作者在对叶片故障分析和定向凝固高温合金再结晶及其预防研究的基础上撰写了本书。本书介绍的定向凝固高温合金的再结晶问题,同样也适用于单晶高温合金。

本书共分9章。第1章简要介绍了定向凝固高温合金的技术发展、基本特点、常见缺陷和发展前景。第2章和第3章在简要介绍变形金属再结晶基本概念的基础上,从工程实践角度出发,重点阐述了定向凝固高温合金再结晶温度的定义、再结晶的产生条件、基本特点以及主要影响因素。第4章主要介绍了再结晶对定向凝固高温合金持久、疲劳等力学性能的影响。第5章和第6章分别介绍了含再结晶层定向凝固高温合金的损伤行为模拟分析,以及再结晶对定向凝固高温合金叶片损伤行为影响的计算机模拟。第7章介绍了有关定向凝固高温合金动态再结晶的基本概念及其一些研究进展。第8章以工程上再结晶引发的定向凝固高温合金叶

片疲劳断裂故障为例,详细介绍了含再结晶层的定向凝固高温合金叶片的疲劳断裂特征,并探讨了定向凝固高温合金叶片再结晶损伤的物理本质。第9章则从定向凝固高温合金工程应用和再结晶的预防检测角度出发,重点介绍了再结晶的金相检测、X射线衍射、无损检测等技术,并介绍了定向凝固高温合金叶片中再结晶的检测与控制标准。

本书第1章由陶春虎和孙传棋撰稿,第2章由陶春虎撰稿,第3章和第4章由张卫方撰稿,第5章由施惠基和梅海霞撰稿,第6章由聂景旭和李海燕撰稿,第7章由李运菊撰稿,第8章和第9章由陶春虎和张宗林撰稿。全书由陶春虎、张卫方统稿。李运菊、张海风、李伟和梁菁参加了第4章和第9章的撰稿工作。

本书是集体智慧的结晶,凝聚着上百名科研人员长达6年多的研究成果。我国著名高温合金专家胡壮麒对本书内容进行了审阅,并为本书作序,并对一些内容也提出了具体的修改意见。作者向为本书出版做出贡献的所有科技工作者致以衷心的感谢。愿本书的出版能对我国定向凝固高温合金叶片的设计、制造、检测、维修和使用安全可靠性的提高起到积极的推动作用。

由于作者水平的限制以及国内外有关资料的欠缺,本书的缺点、错误在所难免,恳请读者提出批评指正。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 高温合金的概念与分类	1
1.2 定向凝固高温合金的技术发展	2
1.3 定向凝固高温合金的基本特点	7
1.4 定向凝固高温合金的应用	12
1.5 定向凝固高温合金的常见缺陷	14
1.6 定向凝固高温合金的发展前景	16
参考文献	18
第 2 章 定向凝固高温合金的再结晶及其基本特点	20
2.1 变形金属再结晶的基本概念	20
2.1.1 回复	20
2.1.2 再结晶及晶粒长大	22
2.1.3 影响再结晶的主要因素	23
2.1.4 金属再结晶温度的测定	25
2.1.5 动态再结晶	26
2.2 定向凝固高温合金再结晶的基本特点	27
2.3 定向凝固高温合金再结晶温度及其测定	32
2.3.1 再结晶温度	32
2.3.2 再结晶温度的确定方法	32
2.3.3 动态再结晶及其测定	37
2.3.4 常见定向凝固和单晶高温合金的再结晶 温度	38
2.4 小结	38
参考文献	39

第3章 定向凝固高温合金再结晶的主要影响因素	40
3.1 合金元素对再结晶的影响	40
3.2 变形程度对再结晶的影响	42
3.2.1 三点弯曲变形量	42
3.2.2 扭转变形量	43
3.2.3 喷丸工艺	47
3.3 热处理温度对再结晶的影响	49
3.4 热处理保温时间对再结晶的影响	51
3.5 变形速率对再结晶的影响	51
3.6 变形保持时间对再结晶的影响	54
3.7 不同工艺对再结晶的影响	57
3.8 再结晶的物理本质	58
3.9 小结	60
参考文献	60
第4章 再结晶对定向凝固高温合金性能的影响	62
4.1 持久行为	62
4.1.1 圆棒持久行为	62
4.1.2 板材持久行为	65
4.2 室温低周疲劳行为	69
4.3 高温低周疲劳行为	75
4.3.1 圆棒低周疲劳行为	75
4.3.2 板材低周疲劳行为	81
4.4 含再结晶叶片的高周疲劳行为	85
4.5 再结晶对弹性模量的影响	86
4.6 小结	89
参考文献	89
第5章 含再结晶层定向凝固高温合金的力学行为	91
5.1 “表层/基体”材料系统失效分析的力学基础	91
5.2 多层结构系统的应力分析	92
5.2.1 多层结构系统	92

5.2.2	许可的应力状态	93
5.3	简化结构的应力分析	94
5.3.1	简化后的结构	94
5.3.2	结构应力状态的分析	95
5.3.3	结构的应变余能	100
5.3.4	变分力学的分析方法	103
5.4	含再结晶表层定向凝固高温合金的计算结果与分析	105
5.4.1	扰动应力随裂纹间距 ρ 的变化关系	107
5.4.2	扰动应力随厚度比 λ 的变化关系	109
5.5	材料性能的差异对扰动应力的影响	116
5.6	小结	118
	参考文献	119
第6章	再结晶对定向凝固高温合金叶片损伤行为的计算机模拟	121
6.1	再结晶对叶片应力场和损伤演化过程的影响规律	122
6.1.1	表面再结晶对定向凝固高温合金构件应力场的影响	122
6.1.2	再结晶对 DZ4 叶片损伤演化行为的影响	127
6.2	再结晶对高温低周疲劳寿命影响的理论计算	137
6.3	再结晶对叶片高温疲劳/蠕变寿命的影响	143
6.4	小结	156
	参考文献	156
第7章	定向凝固高温合金的动态再结晶	157
7.1	动态再结晶的基本概念	157
7.2	动态再结晶的基本过程	158
7.2.1	一般金属材料的动态回复和动态再结晶	158
7.2.2	定向凝固高温合金的动态再结晶	160
7.3	动态再结晶的基本形态	172

7.3.1	表面氧污染导致的动态再结晶	172
7.3.2	铸造等轴晶和雀斑引发的动态再结晶	173
7.3.3	枝晶间的动态再结晶	176
7.4	动态再结晶的控制	176
7.5	小结	177
	参考文献	177
第8章	含再结晶层定向凝固高温合金叶片的疲劳断裂	178
8.1	疲劳断口特征	178
8.2	疲劳裂纹萌生	181
8.3	疲劳裂纹扩展	183
8.4	含再结晶层定向凝固高温合金叶片断裂的实例 分析	184
8.4.1	叶片叶身裂纹和断裂故障的特点	184
8.4.2	叶片的再结晶模拟	186
8.4.3	叶片再结晶形成过程及原因分析	186
8.4.4	叶片细节结构设计分析	188
8.4.5	瞬断区大的影响因素分析	190
8.4.6	再结晶对叶片疲劳寿命的影响	191
8.4.7	叶片裂纹与断裂失效的基本模式与原因 ...	193
8.5	改善定向凝固高温合金叶片疲劳抗力的技术 措施	193
8.5.1	改善合金纯净度	194
8.5.2	控制合金固溶处理冷却速率	195
8.6	小结	198
	参考文献	199
第9章	定向凝固高温合金再结晶的检测与控制	201
9.1	金相检测	201
9.1.1	再结晶宏观检查	202
9.1.2	再结晶深度检测	203
9.2	X射线衍射	204

9.3 无损检测	206
9.4 工艺控制	209
9.5 定向凝固高温合金叶片再结晶的控制标准	211
9.5.1 标准中特定的术语和定义	212
9.5.2 再结晶的评定	213
9.6 小结	215
参考文献	216
附录 与本书内容相关的论文	217

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1. 1 Concept and classification of superalloy	1
1. 2 Technical development of directionally solidified (DS) superalloy	2
1. 3 Basic characteristics of DS superalloy	7
1. 4 Application of DS superalloy	12
1. 5 Common defects in DS superalloy	14
1. 6 Future of DS superalloy	16
References	18
Chapter 2 Recrystallization of DS superalloy and its basic characteristics	20
2. 1 Basic concepts of recrystallization on deformed metals	20
2. 1. 1 Recovery	20
2. 1. 2 Recrystallization and growth of the recrystallized grains	22
2. 1. 3 Major influencing factors of recrystallization ...	23
2. 1. 4 Measurement of recrystallization temperature	25
2. 1. 5 Dynamic recrystallization	26
2. 2 Basic Characteristics of recrystallization on DS superalloy	27
2. 3 Recrystallization temperature and its measurement of DS superalloy	32

2.3.1	Recrystallization temperature	32
2.3.2	Measurement methods of the recrystallization temperature	32
2.3.3	Dynamic recrystallization and its measurement	37
2.3.4	Recrystallization temperatures of several engineering DS superalloys and single crystals	38
2.4	Brief summary	38
	References	39

Chapter 3 Major influencing factors of DS superalloy'

	recrystallization	40
3.1	Influence of alloying elements on recrystallization	40
3.2	Influence of deformation degrees on recrystallization	42
3.2.1	Three-point bending deformation	42
3.2.2	Distortion deformation	43
3.2.3	Shot peening deformation	47
3.3	Influence of heat treatment temperatures on recrystallization	49
3.4	Influence of heat treatment-holding times on recrystallization	51
3.5	Influence of deformation speeds on recrystallization	51
3.6	Influence of deformation-holding times on recrystallization	54
3.7	Influence of processes on recrystallization	57
3.8	Physical essence of recrystallization	58
3.9	Brief summary	60
	References	60

Chapter 4 Influence of recrystallization on mechanical

properties of DS superalloy	62
4. 1 Stress-rupture behavior	62
4. 1. 1 Stress-rupture behavior of cylindrical specimens	62
4. 1. 2 Stress-rupture behavior of plate specimens	65
4. 2 LCF behavior at room temperature	69
4. 3 LCF behavior at high temperature	75
4. 3. 1 LCF behavior of cylindrical specimens	75
4. 3. 2 LCF behavior of plate specimens	81
4. 4 HCF behavior of DS blade with surface recrystallized layer	85
4. 5 Influence of recrystallization on elastic modulus ...	86
4. 6 Brief summary	89
References	89
Chapter 5 Mechanical behavior of DS superalloy with surface recrystallized layer	91
5. 1 Mechanical basis for the failure of "layer/ substrate" material system	91
5. 2 Stress analysis of multilayer structure system	92
5. 2. 1 Multilayer structure system	92
5. 2. 2 Allowable stress condition	93
5. 3 Stress analysis of simplified structure system	94
5. 3. 1 Simplified structure	94
5. 3. 2 Analysis on stress condition of simplified structure	95
5. 3. 3 Residual energy of simplified structure	100
5. 3. 4 Analysis methods of variational mechanics ...	103
5. 4 Calculated result and analyses of DS superalloy with surface recrystallized layer	105
5. 4. 1 Functional dependence of disturbance	

stress and crack distance ρ	107
5.4.2 Functional dependence of disturbance	
stress and thickness ratio λ	109
5.5 Influence of material property difference on the	
disturbance stress	116
5.6 Brief summary	118
References	119
Chapter 6 Computer simulation of surface recrystallized	
 layer on damage behavior of DS blade	121
6.1 Influence law of surface recrystallized layer on	
stress field and damage evolution of DS blade	122
6.1.1 Influence of surface recrystallized layer on	
stress field of DS blade	122
6.1.2 Influence of surface recrystallized layer	
on damage evolution of DS blade made of	
DZ4	127
6.2 Theoretical calculation of influence of surface	
recrystallized layer on LCF of high temperature	137
6.3 Influence of surface recrystallized layer on	
fatigue-creep life of DS blade	143
6.4 Brief summary	156
References	156
Chapter 7 Dynamic recrystallization of DS superalloy	157
7.1 Basic concept of dynamic recrystallization	157
7.2 Basic processes of dynamic recrystallization	158
7.2.1 Dynamic recovery and recrystallization of	
common metal	158
7.2.2 Dynamic recrystallization of DS superalloy ...	160
7.3 Basic morphology of dynamic recrystallization	172
7.3.1 Dynamic recrystallization from surface	