



国防科技图书出版基金

Recrystallization of
Directionally Solidified Superalloy

定向凝固

高温合金的再结晶

(第2版)

■ 陶春虎 张兵 张卫方 施惠基 张宗林 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

定向凝固高温合金的再结晶

Recrystallization of Directionally Solidified Superalloy

(第2版)

陶春虎 张兵 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. —2 版.
—北京: 国防工业出版社, 2014. 9
ISBN 978 - 7 - 118 - 09536 - 4

I. ①定... II. ①陶... III. ①定向凝固 - 耐热
合金 - 再结晶 IV. ①TG111. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 210114 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 × 1000 1/16 印张 14¼ 字数 250 千字
2014 年 9 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 68.00 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
第七届评审委员会组成人员**

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆 军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

定向凝固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,某型发动机用的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,造成了大量发动机返厂检修和飞机停飞。研究表明,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。

鉴于定向凝固和单晶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和单晶高温合金再结晶,尤其是对叶片工程应用中出现的再结晶的研究尚未有系统的报道,本书作者在对叶片故障分析及定向凝固和单晶高温合金再结晶及其预防研究的基础上,撰写了这本关于定向凝固和单晶高温合金再结晶的书籍。

本书第1版出版前,单晶高温合金在国内应用较少,对于单晶高温合金再结晶的研究很少,因此第1版中关于单晶高温合金再结晶的内容很少。近年来,随着单晶高温合金逐渐得到广泛应用,再结晶所引发的失效案例也逐渐增多,单晶高温合金再结晶问题日益受到重视。因此,本次修订版在第1版的基础上增加了近年来对于单晶高温合金再结晶的研究成果。主要新增内容如下:①在第1版的基础上新增了两章内容:第5章“再结晶对单晶高温合金性能的影响”和第10章“定向凝固和单晶高温合金再结晶的抑制方法”,全书由第1版的9章增加到11章;②第1章“概论”中增加了单晶高温合金的发展、应用和常见缺陷等方面的内容;第3章“定向凝固和单晶高温合金再结晶的主要影响因素”中增加了第二相粒子、变形程度、热处理温度、变形温度和热处理气氛对单晶高温合金再结晶的影响等内容;第8章“定向凝固和单晶高温合金的动态再结晶”中增加了单晶高温合金动态再结晶方面的研究成果;第11章“定向凝固和单晶高温合金再结晶的检测与控制”中增加了单晶高温合金再结晶的检测方法与控制标准方面的内容。

本书共分11章。第1章简要介绍了定向凝固和单晶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和单晶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章和第5章分别介绍了再结晶对定向凝固和单晶高温合金持久、疲劳等力学性能的影响。第6章和第7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8章介绍了有关定向凝固和单晶高温合金动态再结晶的基本概念及其一些研究进展。第9章以工程上再结晶引发的定向凝固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10章主要介绍了国内外有关定向凝固和单晶高温合金再结晶抑制方法的研究进展。第11章则从定向凝固和单晶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,并介绍了定向凝固和单晶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章由张卫方和张兵撰稿,第4章由张卫方撰稿,第5章由张兵撰稿,第6章由施惠基和梅海霞撰稿,第7章由聂景旭和李海燕撰稿,第8章由李运菊和张兵撰稿,第9章和第11章由陶春虎和张宗林撰稿,第10章由张兵撰稿。全书由陶春虎、张兵统稿,孙传棋对全书进行了审定。李运菊、张海风、李伟和梁菁参加了第4章和第11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八年多的研究成果。钟群鹏院士和才鸿运院士对本书的第1版和第2版均给予了很高的评价。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和单晶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。

作者

2014.4.1

内 容 简 介

本书系统阐述了定向凝固和单晶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和单晶高温合金性能的影响、含再结晶层定向凝固和单晶高温合金的损伤行为以及再结晶对定向凝固和单晶叶片损伤行为的影响。同时分析了定向凝固和单晶高温合金再结晶损伤的物理本质,提出了再结晶的检测方法与控制标准。

本书是国内外第一本系统介绍定向凝固和单晶高温合金再结晶的专著,适用于从事定向凝固和单晶高温合金研制、生产和应用的工程技术人员参考,也可供高等院校相关专业的师生参考。

This book systematically describes the basic characteristics and main influencing factors of the recrystallization of directionally solidified(DS) and single crystal(SC) superalloys. Emphasis is put on the damage behavior of DS and SC superalloys with recrystallized layer, the effect of recrystallization on the properties of DS and SC superalloys, and the damage behavior of DS and SC blades with recrystallized grains. This book also analyzes the physical essence of recrystallization damage on DS and SC superalloys, and puts forward testing methods and controlling standards for recrystallized grains of DS and SC blades.

As the first monograph systematically describing the recrystallization of DS and SC superalloys, this book is suitable for the engineers and technicians in the fields of development, manufacture and application of DS and SC superalloys, as well as the relevant teachers and students in colleges.

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 高温合金的概念与分类	1
1.2 定向凝固和单晶高温合金的技术发展	2
1.3 定向凝固和单晶高温合金的基本特点	6
1.4 定向凝固和单晶高温合金的应用	9
1.5 定向凝固和单晶高温合金的常见缺陷	11
1.6 定向凝固和单晶高温合金的发展前景	13
参考文献	15
第 2 章 定向凝固高温合金再结晶及其基本特点	16
2.1 变形金属再结晶的基本概念	16
2.1.1 回复	16
2.1.2 再结晶及晶粒长大	17
2.1.3 影响再结晶的主要因素	19
2.1.4 金属再结晶温度的测定	20
2.1.5 动态再结晶	21
2.2 定向凝固高温合金再结晶的基本特点	21
2.3 定向凝固高温合金再结晶温度及其测定	24
2.3.1 再结晶温度	24
2.3.2 再结晶温度的确定方法	25
2.3.3 动态再结晶及其测定	28
2.3.4 常见定向凝固和单晶高温合金的再结晶温度	29
参考文献	29
第 3 章 定向凝固和单晶高温合金再结晶的主要影响因素	30
3.1 合金元素对再结晶的影响	30
3.2 第二相粒子对再结晶的影响	31
3.3 变形程度对再结晶的影响	33

3.3.1 弯曲变形量	33
3.3.2 扭转变形量	35
3.3.3 喷丸工艺	37
3.3.4 压缩变形	38
3.4 热处理温度对再结晶的影响	41
3.4.1 对再结晶厚度的影响	41
3.4.2 对再结晶组织的影响	42
3.5 保温时间对再结晶的影响	45
3.5.1 对再结晶厚度的影响	45
3.5.2 再结晶组织的演变规律	49
3.6 变形速率对再结晶的影响	53
3.7 变形保持时间对再结晶的影响	54
3.8 变形温度对再结晶的影响	56
3.9 热处理气氛对再结晶的影响	58
3.10 不同工艺对再结晶的影响	59
3.11 再结晶的物理本质	60
参考文献	61
第4章 再结晶对定向凝固高温合金性能的影响	63
4.1 持久行为	63
4.1.1 圆棒持久行为	63
4.1.2 板材持久行为	65
4.2 室温低周疲劳行为	68
4.3 高温低周疲劳行为	72
4.3.1 圆棒低周疲劳行为	72
4.3.2 板材低周疲劳行为	76
4.4 含再结晶叶片的高周疲劳行为	79
4.5 再结晶对弹性模量的影响	80
参考文献	82
第5章 再结晶对单晶高温合金性能的影响	83
5.1 持久行为	83
5.1.1 高温持久行为	83
5.1.2 中温持久行为	89
5.2 疲劳行为	92

5.3 疲劳-蠕变行为	95
5.4 含再结晶单晶高温合金叶片断裂的实例分析	97
5.4.1 叶片断裂故障的特点	97
5.4.2 叶片断裂失效的模式和原因	100
参考文献	102
第6章 含再结晶层定向凝固高温合金的力学行为	104
6.1 “表层/基体”材料系统失效分析的力学基础	104
6.2 多层结构系统的应力分析	105
6.2.1 多层结构系统	105
6.2.2 许可的应力状态	105
6.3 简化结构的应力分析	107
6.3.1 简化后的结构	107
6.3.2 结构应力状态的分析	107
6.3.3 结构的应变余能	111
6.3.4 变分力学的分析方法	114
6.4 含再结晶表层定向凝固高温合金的计算结果与分析	115
6.4.1 扰动应力随裂纹间距 ρ 的变化关系	117
6.4.2 扰动应力随厚度比 λ 的变化关系	121
6.5 材料性能的差异对扰动应力的影响	125
参考文献	127
第7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	128
7.1 再结晶对定向凝固高温合金叶片应力场和损伤演化过程的影响 规律	129
7.1.1 表面再结晶对定向凝固高温合金构件应力场的影响	129
7.1.2 再结晶对DZ4叶片损伤演化行为的影响	132
7.2 再结晶对定向凝固高温合金高温低周疲劳寿命影响的理论计算	138
7.3 再结晶对定向凝固高温合金叶片高温疲劳/蠕变寿命的影响	142
参考文献	147
第8章 定向凝固和单晶高温合金的动态再结晶	148
8.1 动态再结晶的基本概念	148
8.2 动态再结晶的基本过程	149
8.2.1 一般金属材料的动态回复和动态再结晶	149

8.2.2	定向凝固高温合金的动态再结晶	151
8.2.3	单晶高温合金的动态再结晶	156
8.3	动态再结晶的基本形态	160
8.3.1	表面氧污染导致的动态再结晶	160
8.3.2	铸造等轴晶和雀斑引发的动态再结晶	161
8.3.3	枝晶间的动态再结晶	163
8.4	动态再结晶的控制	163
	参考文献	164
第9章	含再结晶层定向凝固高温合金叶片的疲劳断裂	165
9.1	含再结晶层定向凝固高温合金叶片的疲劳断口	165
9.2	含再结晶层定向凝固高温合金叶片的疲劳裂纹萌生	167
9.3	含再结晶层定向凝固高温合金叶片的疲劳裂纹扩展	169
9.4	含再结晶层定向凝固高温合金叶片断裂的实例分析	170
9.4.1	叶片叶身裂纹和断裂故障的特点	170
9.4.2	定向凝固高温合金叶片的再结晶模拟	171
9.4.3	叶片再结晶形成过程及原因分析	172
9.4.4	叶片细节结构设计分析	172
9.4.5	瞬断区大的影响因素分析	174
9.4.6	再结晶对定向凝固高温合金叶片疲劳寿命的影响	174
9.4.7	定向凝固高温合金叶片裂纹与断裂失效的基本模式与原因	176
9.5	改善定向凝固高温合金叶片疲劳抗力的技术措施	176
9.5.1	改善合金纯净度	177
9.5.2	控制合金固溶处理冷却速率	177
	参考文献	180
第10章	定向凝固和单晶高温合金再结晶的抑制方法	181
10.1	预回复热处理对再结晶的抑制作用	181
10.2	渗碳对再结晶的抑制作用	187
10.3	涂层对再结晶的抑制作用	188
10.3.1	涂层对再结晶行为的影响	188
10.3.2	涂层对再结晶试样持久性能的影响	191
10.4	去除表面变形层对再结晶的抑制作用	193
10.5	晶界强化元素对再结晶危害的抑制作用	194

参考文献	194
第 11 章 定向凝固和单晶高温合金再结晶的检测与控制	196
11.1 金相检测	196
11.1.1 再结晶宏观检查	196
11.1.2 再结晶深度检测	197
11.2 X 射线衍射	199
11.3 无损检测	201
11.4 工艺控制	203
11.5 定向凝固和单晶高温合金叶片再结晶的控制标准	204
11.5.1 标准中特定的术语和定义	205
11.5.2 再结晶的评定	206
参考文献	207

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Concept and classification of superalloy	1
1.2	Development of directionally solidified(DS) and single crystal(SC) superalloy	2
1.3	Basic characteristics of DS and SC superalloy	6
1.4	Application of DS and SC superalloy	9
1.5	Common defects in DS and SC superalloy	11
1.6	Future of DS and SC superalloy	13
	References	15
Chapter 2	Recrystallization of DS superalloy and its basic characteristics	16
2.1	Basic concepts of recrystallization of deformed metals	16
2.1.1	Recovery	16
2.1.2	Recrystallization and growth of recrystallized grains	17
2.1.3	Major influencing factors of recrystallization	19
2.1.4	Measurement of recrystallization temperature	20
2.1.5	Dynamic recrystallization	21
2.2	Basic characteristics of recrystallization of DS superalloy	21
2.3	Recrystallization temperature and its measurement of DS superalloy	24
2.3.1	Recrystallization temperature	24
2.3.2	Measurement methods of recrystallization temperature	25
2.3.3	Dynamic recrystallization and its measurement	28
2.3.4	Recrystallization temperatures of several engineering DS and SC superalloy	29
	References	29
Chapter 3	Major influencing factors of recrystallization of DS and	

SC superalloy	30
3.1 Influence of alloying elements on recrystallization	30
3.2 Influence of second-phase particles on recrystallization	31
3.3 Influence of deformation degree on recrystallization	33
3.3.1 Three-bending deformation	33
3.3.2 Distortion deformation	35
3.3.3 Shot peening deformation	37
3.3.4 Compression deformation	38
3.4 Influence of heat treatment temperature on recrystallization	41
3.4.1 Influence on recrystallization depth	41
3.4.2 Influence on recrystallized microstructure	42
3.5 Influence of heat treatment holding time on recrystallization	45
3.5.1 Influence on recrystallization depth	45
3.5.2 Evolution of recrystallized microstructure	49
3.6 Influence of deformation speed on recrystallization	53
3.7 Influence of deformation holding time on recrystallization	54
3.8 Influence of deformation temperature on recrystallization	56
3.9 Influence of heat treatment atmosphere on recrystallization	58
3.10 Influence of processes on recrystallization	59
3.11 Physical essence of recrystallization	60
References	61
Chapter 4 Influence of recrystallization on mechanical properties of	
DS superalloy	63
4.1 Stress-rupture behavior	63
4.1.1 Stress-rupture behavior of cylindrical specimens	63
4.1.2 Stress-rupture behavior of plate specimens	65
4.2 LCF behavior at room temperature	68
4.3 LCF behavior at high temperature	72
4.3.1 LCF behavior of cylindrical specimens	72
4.3.2 LCF behavior of plate specimens	76
4.4 HCF behavior of DS blades with surface recrystallized layer	79
4.5 Influence of recrystallization on elastic modulus	80
References	82

Chapter 5	Influence of recrystallization on mechanical properties of SC superalloy	83
5.1	Stress-rupture behavior	83
5.1.1	High temperature stress-rupture behavior	83
5.1.2	Intermediate temperature stress-rupture behavior	89
5.2	LCF behavior	92
5.3	Fatigue-creep behavior	95
5.4	Analysis of fractured SC blades with surface recrystallized layer	97
5.4.1	Characteristics of fractured SC blades	97
5.4.2	Failure mode and cause of fractured SC blades	100
	References	102
Chapter 6	Damage model of DS superalloy with surface recrystallized layer	104
6.1	Mechanical basis for the failure of layer/substrate material system	104
6.2	Stress analysis of multilayer structure system	105
6.2.1	Multilayer structure system	105
6.2.2	Allowable stress condition	105
6.3	Stress analysis of simplified structure system	107
6.3.1	Simplified structure	107
6.3.2	Analysis on stress condition of simplified structure	107
6.3.3	Residual energy of simplified structure	111
6.3.4	Analysis methods of variational mechanics	114
6.4	Calculated result and analyses of DS superalloy with surface recrystallized layer	115
6.4.1	Functional dependency of disturbance stress and crack distance ρ	117
6.4.2	Functional dependency of disturbance stress and thickness ratio λ	121
6.5	Influence of material property difference on disturbance stress	125
	References	127
Chapter 7	Computer simulation of damage behavior of surface recrystallized layer on DS blade	128