

富铜合金与铜的彩色金相研究

Color Metallographic Investigation of Copper-Alloys and Brass

郑廷藻 陈德堂 编著

国防工业出版社

高温合金与钢 的彩色金相研究

Color Metallographic Investigation of Superalloys and Steels

郑运荣 张德堂 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

高温合金与钢的彩色金相研究/郑运荣, 张德堂编著.
—北京: 国防工业出版社, 1999.7

ISBN 7-118-02033-8

I. 高… II. ①郑… ②张… III. ①合金-彩色金相-研究
②合金钢-彩色金相-研究 IV. TG113

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 35630 号

DN26/01

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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 1/4 289 千字

1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 48.00 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，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防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，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

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，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		

出版说明

本书是作者多年科研工作的总结。书中的彩色照片是作者从大量研究照片中精选出来的,极为精彩和难得。

为了保证本书彩色照片的出版质量,特将书中的彩色照片集中放在书后用好纸彩色胶版印刷。

对于由此给读者带来的阅读不便,我们在此深表歉意,并敬请读者谅解。

前 言

彩色金相技术可使金属显微组织中各种相着成鲜明的色彩,是识别相和鉴定相的有力手段,很早就受到金相工作者的重视并得到广泛的应用。60年代初期,在航空材料研究院金属物理研究室就开展了彩色金相研究课题,当时正值我国铸造高温合金迅速发展阶段,在合金成分调整过程中出现了许多新相,使合金的显微组织变得相当复杂,用彩色金相技术有效地显示和区分了各种相。此后,根据钢中非金属夹杂物的光学特性,利用彩色金相技术成功地鉴别了钢中各类夹杂物。到80年代初,我们实验室的一些彩色金相照片在全国金相照片评比中多次获奖并在一些大城市中展出,部分彩色金相照片还收进了《中国大百科全书》(矿冶卷)。为了进一步完善该技术,“七五”期间,在航空工业部科技局的支持下,列了“彩色金相技术研究”课题。经过四年的努力,完成了高温合金中15种相和钢中20种夹杂物的彩色金相图谱。由于长期积累了较多的素材,我们蕴酿写一本彩色金相方面的书,以扩大技术交流。调查表明,以往出版的彩色金相的书或者偏重于方法研究,或者收集几十种牌号材料的彩色金相照片汇成图谱,很少有人对一、二种材料的显微组织变化及相鉴定用彩色金相技术作系统研究的。我们在本书中用彩色金相技术对高温合金和钢这两类材料的显微组织作深入的研究。

本书介绍了高温合金及钢中合金元素的作用与析出相的关系,在不同加工和使用条件下相的转变规律,并用通用的彩色金相技术和其他物理冶金手段对各种相的形貌、成分进入深入研究,解决了多相材料的相区分、相鉴定与相转变规律的问题。本书选中的250余幅彩色金相照片全部取自高温合金和钢。这些照片既是

这两种材料各种相的彩色金相图谱,又是表征材料相变的例证。由于本书的内容是选点进行研究的,在相的知识方面有一定的深度,又因为本书的全部素材来源于科研实践,使它结合实际而又具有广度。

由于彩色金相照片制版耗资较大,使本书的出版面临种种困难,只是由于国防科技图书出版基金的资助才使本书得以出版。作者特别感谢国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社为此所作的努力,同时也感谢航空材料研究院金属物理研究室的同事们对我们研究工作的大力支持。

由于本书涉及的领域较广,而作者的研究领域较窄,难免出现不当之处甚至错误,敬请读者批评指正。

编 著 者

内 容 简 介

本书介绍了热染、化学镀膜、真空蒸镀、离子溅射以及光学方法对高温合金中的相和钢中非金属夹杂物的彩色显示作用，对这些相的成分特点、形成条件、析出与转变规律作了较系统的研究，把彩色金相技术用于凝固过程和涂层的显微组织分析。书中的 250 余幅彩色金相照片组成的图谱对高温合金和钢中 18 类相的形貌作了表征，并利用相的色彩特征有效地区分与鉴定各种相。

本书可供从事材料显微组织分析的科研人员、大专院校材料科学与工程系广大师生以及材料生产、加工部门的质量控制人员参考。

In this book, coloration for the phases in superalloys and the inclusions in steels used by heating tinting, chemical deposition of film, vacuum evaporation, ion sputtering and optical methods has been described. For these phases, their compositional characteristic, formed conditions, precipitated and transformed rule have been investigated systematically. The applications of color metallography to microstructural analysis in solidified process and coatings have been also introduced. The atlas including more than 250 color micro photographs is helpful to characterizes the morphology for 18 sorts of phases in superal-

loys and steels. These phases can be distinguished and identified by means of the color characteristic of phases effectively.

This book is suitable for scientific research personnel, teachers and students of material science and engineering department of colleges and universities, and it is also given a reference to the qualitative control personnel for production and manufacture.

目 录

第一章 高温合金中的相和钢中非金属夹杂物	1
一、高温合金的成分与析出相	1
1. 高温合金的发展概况	1
2. 高温合金的合金元素	5
3. 高温合金中的析出相	10
二、钢中非金属夹杂物的来源与形成	14
1. 氧在钢铁中的行为	17
2. 用合金元素脱氧时夹杂物的形成	17
3. 炼钢过程中夹杂物的形成	27
4. 硫化物的形成	29
5. 氮化物的形成	34
第二章 彩色金相技术概论	37
一、彩色金相技术的发展与现状	38
二、彩色金相原理及显示技术	41
1. 薄膜干涉现象与干涉色	41
2. 颜色视觉与彩色成像原理	43
3. 彩色金相显示技术分类	46
第三章 彩色金相显示技术应用	53
一、热染法	53
1. 热染法的试样制备	53
2. 热染设备与操作	55
3. 热染规范	58
4. 热染法的应用	66
二、化学镀膜法	67
1. 化学镀膜原理	67

2. 成膜试剂及应用方法	69
3. 应用实例	76
三、真空蒸镀与离子溅射	77
四、光学方法	79
1. 明视场观察	79
2. 暗视场观察	85
3. 偏振光观察	91
第四章 彩色金相技术的应用研究	115
一、高温合金凝固过程的研究	115
1. 高温合金凝固研究概要	115
2. 研究凝固过程的方法	117
3. 凝固过程的显微组织变化	126
4. 凝固组织控制	127
二、高温合金涂层的彩色金相研究	131
1. 高温合金涂层的分类	131
2. 涂层的显微组织	133
第五章 高温合金中的析出相及钢中非金属夹杂物 相的彩色金相图谱	141
一、 γ 相	142
二、 γ' 相	144
1. 铸态下的 γ' 相	144
2. 热处理和长时热暴露对 γ' 的影响	149
三、MC 碳化物	153
1. 铸态下的 MC 碳化物	154
2. 热处理和长时热暴露时 MC 的变化	159
四、 M_6C 碳化物	162
1. 初生 M_6C 碳化物	163
2. 次生 M_6C 碳化物	164
五、 $M_{23}C_6$ 碳化物	168
六、 M_3B_2 硼化物	171
七、 M_2SC 碳硫化物	176

八、 Ni_5M 相	178
九、 Ni_3NL 相	185
十、 Ni_3Ti 相	187
十一、 NiAl 相	189
十二、 α 相	192
十三、 σ 相	194
十四、 μ 相	198
十五、氧化物	204
1. 铁的氧化物	204
2. 方锰矿	205
3. 尖晶石型氧化物	205
4. 铝酸钙夹杂物	206
5. 氧化亚铜	207
十六、硫化物	208
1. 硫化锰	208
2. 硫化钙	208
3. 硫化钛	209
十七、硅酸盐	209
十八、氮化物	210
1. 氮化钛	210
2. 氮化铌	210
3. 氮化铝	210
参考文献	212

Contents

Chapter I	Phases in superalloys and Inclusions in steels	1
1.1.	Composition and precipitated phases of superalloys	1
1.1.1.	Survey on development of superalloys	1
1.1.2.	Alloying elements of superalloys	5
1.1.3.	Precipitated phases in superalloys	10
1.2.	Source and formation of non-metallic inclusions	
	in steels	14
1.2.1.	Behavior of oxygen in iron and steel	17
1.2.2.	Formation of inclusions during deoxydation by alloying elements	17
1.2.3.	Formation of inclusions during making steel	27
1.2.4.	Formation of sulfide	29
1.2.5.	Formation of nitride	34
Chapter II	Outline of color metallography	37
2.1.	Development and status on color metallography	38
2.2.	Principle of color metallography and revealing techniques	41
2.2.1.	Interference phenomenon induced by thin film and interference colors	41
2.2.2.	Visual sense to color and principle of formation of color image	43
2.2.3.	Classification of revealing techniques in color metallography	46
Chapter III	Applications of revealing techniques in color metallography	53
3.1.	Heat tinting method	53

3.1.1.	Preparation of specimens for heat tinting	53
3.1.2.	Apparatus and operation of heat tinting	55
3.1.3.	Conditions of heat tinting	58
3.1.4.	Use of heat tinting method	66
3.2.	Deposited film by chemical method	67
3.2.1.	Principle of deposited film by chemical method	67
3.2.2.	Agent for deposited film and its using method	69
3.2.3.	Examples in application	76
3.3.	Vacuum evaporation and ion sputtering	77
3.4.	Optical methods	79
3.4.1.	Observation at bright field	79
3.4.2.	Observation at dark field	85
3.4.3.	Observation at polarized light	91
Chapter IV	Applied investigation on color metallography	115
4.1.	Solidified study of superalloys	115
4.1.1.	Outline of solidified studies for superalloys	115
4.1.2.	Investigation methods for solidified process	117
4.1.3.	Change of microstructure during solidification	126
4.1.4.	Control of solidified structure	127
4.2.	Studies on coatings of superalloys	131
4.2.1.	Classification of coatings for superalloys	131
4.2.2.	Microstructure of coatings	133
Chapter V	Color-metallographic atlas of precipitated phases in superalloys and nonmetallic inclusions in steels	141
5.1.	γ phase	142
5.2.	γ' phase	144
5.2.1.	γ' phase in as cast alloys	144
5.2.2.	Effect of heat treatment and long time exposure on γ' phase	149
5.3.	MC carbide	153
5.3.1.	As-cast MC carbide	154

5.3.2. Transformation of MC carbide during heat treatment and long time exposure	159
5.4. M_6C carbide	162
5.4.1. Primary M_6C carbide	163
5.4.2. Secondary M_6C carbide	164
5.5. $M_{23}C_6$ carbide	168
5.6. M_3B_2 boride	171
5.7. M_2SC carbon-sulfide	176
5.8. Ni_5M phase	178
5.9. Ni_3Nb phase	185
5.10. Ni_3Ti phase	187
5.11. $NiAl$ phase	189
5.12. α phase	192
5.13. σ phase	194
5.14. μ phase	198
5.15. Oxide	204
5.15.1. Iron oxide	204
5.15.2. Manganosite	205
5.15.3. Spinel	205
5.15.4. Calcium aluminate	206
5.15.5. Copper oxide	207
5.16. Sulfide	208
5.16.1. Manganese Sulfide	208
5.16.2. Calcium sulfide	208
5.16.3. Titanium sulfide	209
5.17. Silicate	209
5.18. Nitride	210
5.18.1. Titanium nitride	210
5.18.2. Niobium nitride	210
5.18.3. Aluminium nitride	210
Bibliography	212