



先进核电技术与核安全系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

核电大型锻件 SA508 Gr.3 钢金相图谱

Metallographic Atlas of
SA508 Gr.3 Steel for Nuclear
Power Heavy Forging

韩利战 顾剑锋 潘健生 等 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



先 进 核 电 技 术 与 核 安 全 系 列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

核电大型锻件 SA508 Gr.3 钢金相图谱

Metallographic Atlas of SA508 Gr.3 Steel
for Nuclear Power Heavy Forging

韩利战 顾剑锋 潘健生 等 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为“十二五”国家重点图书出版规划项目“核能与核技术出版工程”之一。本书从核电大型锻件 SA508 Gr. 3 钢相变动力学曲线测试出发,系统地开展了 SA508 Gr. 3 钢过冷奥氏体等温转变、连续冷却转变以及回火过程的金相组织分析研究,结合 AP1000 核电大型锻件试制过程中的金相检验工作,从积累的大量金相照片中,选出一部分编成 SA508 Gr. 3 钢金相图谱,以期从形貌学的角度反映该钢种的组织特征和变化规律。

本书可供从事核电装备研发、设计、核电大锻件的制造和质量检验的有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核电大型锻件 SA508 Gr. 3 钢金相图谱/韩利战等著.

—上海:上海交通大学出版社, 2016

核能与核技术出版工程

ISBN 978-7-313-14192-7

I. ①核… II. ①韩… III. ①核电站—大型锻件—图集 IV. ①TG316-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 299309 号

核电大型锻件 SA508 Gr. 3 钢金相图谱

著 者: 韩利战 顾剑锋 潘健生 等

出版发行: 上海交通大学出版社

地 址: 上海市番禺路 951 号

邮政编码: 200030

电 话: 021-64071208

出 版 人: 韩建民

印 制: 山东鸿君杰文化发展有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

印 张: 17

字 数: 281 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版

印 次: 2016 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-313-14192-7/TG

定 价: 88.00 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0533-8510898

丛书编委会

总主编

杨福家(复旦大学原校长,中国科学院院士)

编委(按姓氏笔画排序)

于俊崇(中国核动力研究设计院,中国工程院院士)

马余刚(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

马栩泉(清华大学核能技术设计研究院,教授)

王大中(清华大学原校长,中国科学院院士)

韦悦周(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

申 森(上海核工程研究设计院,研究员级高工)

朱国英(复旦大学放射医学研究所,研究员)

华跃进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

许道礼(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

孙 扬(上海交通大学物理与天文系,教授)

苏著亭(中国原子能科学研究院,研究员级高工)

肖国青(中国科学院近代物理研究所所长,研究员)

吴国忠(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

沈文庆(中国科学院上海分院,中国科学院院士)

陆书玉(上海市环境科学学会副理事长,教授)

周邦新(上海大学材料研究所所长,中国工程院院士)

郑明光(上海核工程研究设计院院长,研究员级高工)

赵振堂(中国科学院上海应用物理研究所所长,研究员)

胡立生(上海交通大学电子信息与电气工程学院,教授)

胡思得(中国工程物理研究院,中国工程院院士)

徐步进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

徐洪杰(中国科学院上海应用物理研究所原所长,研究员)

黄 钢(上海健康医学院院长,教授)

曹学武(上海交通大学机械与动力工程学院,教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

潘健生(上海交通大学材料科学与工程学院,中国工程院院士)

总 序

1896 年法国物理学家贝可勒尔对天然放射性现象的发现,标志着原子核物理学的开始,直接导致了居里夫妇镭的发现,为后来核科学的发展开辟了道路。1942 年人类历史上第一个核反应堆在芝加哥的建成被认为是原子核科学技术应用的开端,至今已经历了 70 多年的发展历程。核技术应用包括军用与民用两个方面,其中民用核技术又分为民用动力核技术(核电)与民用非动力核技术(即核技术在理、工、农、医方面的应用)。在核技术应用发展史上发生的两次核爆炸与三次重大核电站事故,成为人们长期挥之不去的阴影。然而全球能源匮乏以及生态环境恶化问题日益严峻,迫切需要开发新能源,调整能源结构。核能作为清洁、高效、安全的绿色能源,还具有储量最丰富、高能量密集度、低碳无污染等优点,受到了各国政府的极大重视。发展安全核能已成为当前各国解决能源不足和应对气候变化的重要战略。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》明确指出“大力发展核能技术,形成核电系统技术的自主开发能力”,并设立国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项”,把“钍基熔盐堆”核能系统列为国家首项科技先导项目,投资 25 亿元,已在中国科学院上海应用物理研究所启动,以创建具有自主知识产权的中国核电技术品牌。

从世界来看,核能应用范围正不断扩大。目前核能发电量美国排名第一,中国排名第六;不过核能发电的占比方面,法国占比约 74%,排名第一,中国仅约 2%,排名几乎最后。但是中国在建、拟建和提议的反应堆数比任何国家都多。相比而言,未来中国核电有很大的发展空间。2015 年为中国核电重启的关键年,据中国核能行业协会发布的最新数据显示,截至 2015 年 6 月底,中国投入商业运行的核电机组共 25 台,总装机容量为 2 334 万千瓦。值此核电发展的历史机遇期,中国应大力推广自主开发的第三代以及第四代的“快堆”、

“高温气冷堆”、“钍基熔盐堆”核电技术,努力使中国核电走出去,带动中国由核电大国向核电强国跨越。

随着先进核技术的应用发展,核能将成为逐步代替化石能源的重要能源。受控核聚变技术有望从实验室走向实用,为人类提供取之不尽的干净能源;威力巨大的核爆炸将为工程建设、改造环境和开发资源服务;核动力将在交通运输及星际航行等方面发挥更大的作用。核技术几乎在国民经济的所有领域得到应用。原子核结构的揭示,核能、核技术的开发利用,是 21 世纪人类征服自然的重大突破,具有划时代的意义。然而,日本大海啸导致的福岛核电站危机,使得发展安全级别更高的核能系统更加急迫,核能技术与核安全成为先进核电技术产业化追求的核心目标,在国家核心利益中的地位愈加显著。

在 21 世纪的尖端科学中,核科学技术作为战略性高科技学科,已成为标志国家经济发展实力和国防力量的关键学科之一。通过学科间的交叉、融合,核科学技术已形成了多个分支学科并得到了广泛应用,诸如核物理与原子物理、核天体物理、核反应堆工程技术、加速器工程技术、辐射工艺与辐射加工、同步辐射技术、放射化学、放射性同位素及示踪技术、辐射生物等,以及核技术在农学、医学、环境、国防安全等领域的应用。随着核科学技术的稳步发展,我国已经形成了较为完整的核工业体系。核科学技术已走进各行各业,为人类造福。

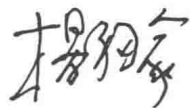
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统总结、整理一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需有一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

这套丛书的编委及作者都是活跃在核科学前沿领域的优秀学者,如核反应堆工程及核安全专家王大中院士、核武器专家胡思得院士、实验核物理专家沈文庆院士、核动力专家于俊崇院士、核材料专家周邦新院士、核电设备专家潘健生院士,还有“国家杰出青年”科学家、“973”项目首席科学家、“国家千人计划”特聘教授等一批有影响的科研工作者。他们都来自各大高校及研究单

位,如清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、上海大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、上海市辐射环境监督站等。本丛书是他们最新研究成果的荟萃,其中多项研究成果获国家级或省部级大奖,代表了国内甚至国际先进水平。丛书涵盖军用核技术、民用动力核技术、民用非动力核技术及其在理、工、农、医方面的应用。内容系统而全面且极具实用性与指导性,例如,《应用核物理》就阐述了当今国内外核物理研究与应用的全貌,有助于读者对核物理的应用领域及实验技术有全面的了解,其他书目也都力求做到了这一点,极具可读性。

由于本丛书良好的立意和高品质的学术成果,使得本丛书在策划之初就受到国家的重视,成功入选了“十二五”国家重点图书出版规划项目。另外,本丛书也受到上海新闻出版局的高度肯定,部分书目成功入选了“上海高校服务国家重大战略出版工程”。

在丛书出版的过程中,我们本着追求卓越的精神,力争把丛书从内容到形式上做到最好。希望这套丛书的出版能为我国大力发展核能技术提供上游的思想、理论、方法,能为核科技人才的培养与科创中心建设贡献一份力量,能成为不断汇集核能与核技术科研成果的平台,推动我国核科学事业不断向前发展。



2015 年 11 月

前 言

金相分析是一种在不同放大倍数下观察金属材料组织形貌的表征技术。说到金相,不由令人想起我国冶金界泰斗,已故周志宏院士感人至深的往事。抗战期间,周老在重庆兵工署主持技术工作,每当空袭警报拉响,人们都赶紧跑向防空洞,唯独周老总是奔向相反方向,冲入实验室,紧抱金相显微镜进防空洞躲避日寇的狂轰滥炸。这种视金相显微镜重于自己生命的光辉事迹,成为激励一代又一代后辈的强大精神力量。

金相为何如此重要,乃因许多金属材料的性能,尤其是钢铁材料的力学性能并非唯独与其成分有关,而在很大程度上取决于材料内部的组织,这就有必要深入研究制造过程中材料组织转变的规律,以及组织与性能之间的关系。金相显微镜是观察材料组织的工具,能在微观尺度上显示不同组织的形貌、大小和分布。金属材料理论体系的发展、制造工艺的进步都和金相分析技术密切相关。

钢铁构件制造不仅是一个成形过程,更是一种复杂的组织转变过程,工艺参数对组织的影响十分敏感,导致钢铁的组织复杂而多样,不同钢种的组织各有特色。金相图谱是将某种钢的金相图片编辑成册,从形貌学的角度反映该钢种的组织特征和变化规律,成为选用钢材、制订热处理工艺、质量检验与控制、废品分析等工程应用的重要工具,也是相变理论研究中用以印证相变机理的重要参考资料。国内已出版过一些高质量的金相图谱,但 SA508 Gr. 3 钢的金相图谱在我国尚属空白。

本书作者配合上海重型机器厂 AP1000 大型锻件的试制,承担了大量的

金相检验工作,并结合 SA508 Gr. 3 钢相变动力学曲线测试,对等温转变和连续冷却转变组织开展了比较系统的金相分析研究,积累了大量的金相照片,从中选出一部分编成 SA508 Gr. 3 钢金相图谱。本图谱反映了 SA508 Gr. 3 钢中的先共析铁素体、粗大上贝氏体、条束状上贝氏体、下贝氏体、马氏体、马氏体与贝氏体混合组织,不同类型贝氏体的混合组织,回火状态组织等不同的组织形貌特征及其形成条件,可供与核电装备研发、设计、核电大锻件的制造和质量检验有关的工程技术人员参考。

SA508 Gr. 3 钢的过冷奥氏体转变曲线出现 3 个“鼻尖”、2 个“海湾”,颇具特色,其中先共析铁素体的孕育期比贝氏体孕育期长,在大锻件实际生产的淬火冷却速度范围内形成的组织主要是贝氏体,而贝氏体则是钢铁材料中最复杂的一类组织,尤其是 SA508 Gr. 3 钢贝氏体,其转变温度范围宽达 200°C 左右,在等温转变条件下,每相隔 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 贝氏体的形貌就有明显差异。在连续冷却条件下,各种贝氏体的发育程度因冷却速度不同而不同,在温度下降过程中依次生成的不同组织交织在一起,识别难度大。为此在书中对一些金相照片作了文字诠释。贝氏体转变乃是相变研究中最活跃的领域,不同学派的观点针锋相对,迄今未取得共识。本书的作者并未从事相变理论研究,无意参与不同学派的争论,只是如实地展示了已观察到的 SA508 Gr. 3 钢千姿百态的组织形貌,希望能成为相变研究者感兴趣的参考资料。

本书由韩利战(第 1, 2, 3, 4, 5 章)、潘健生(第 3, 4, 7 章)、李传维(第 5 章)、晏广华(第 6 章)和顾剑锋(第 6 章)共同执笔,全书由顾剑锋负责统稿。

作者衷心感谢上海机械制造工艺研究所有限公司任颂赞教授级高工的技术指导;感谢上海重型机器厂有限公司的实验支持;感谢国家重点基础研究发展计划“973”项目“新型能源装备中大型锻件均质化热制造的科学基础”之“大型锻件固态相变的均质化协同调控”(2011CB012904)课题的经费资助。

由于时间仓促,加之作者水平有限,书中存在的错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 核电发展现状	001
1.2 核电大型锻件的特点	003
1.2.1 压水堆 PWR 核电站的大型锻件	003
1.2.2 核压力容器大锻件的特点	007
1.3 核电大型锻件制造过程简介	008
1.4 核电大型锻件用钢及其热处理	009
1.4.1 核电大型锻件用钢	009
1.4.2 核电大型锻件的热处理	013
第 2 章 SA508 Gr. 3 钢相变动力学	017
2.1 引言	017
2.2 实验原理与实验材料	017
2.2.1 实验原理	017
2.2.2 实验仪器	018
2.2.3 试样材料	018
2.3 实验结果与分析	020
2.3.1 SA508 Gr. 3 Cl. 2 的相变动力学	020
2.3.2 SA508 Gr. 3 Cl. 1 的相变动力学	030
2.4 SA508 Gr. 3 钢连续冷却条件下的奥氏体分解转变产物	033
2.5 低碳低合金钢过冷奥氏体转变产物金相组织分类	035

第 3 章	SA508 Gr.3 钢过冷奥氏体等温转变组织	037
3.1	试样制备与实验方法	037
3.2	700℃至 600℃等温转变的金相组织	038
3.3	580℃至 540℃等温转变的金相组织	047
3.4	SA508 Gr.3 钢 520℃至 460℃等温转变的金相组织	053
3.5	SA508 Gr.3 钢在略高于 M_s 温度等温转变的金相组织	054
3.6	SA508 Gr.3 钢等温转变金相组织的演化规律	072
第 4 章	SA508 Gr.3 钢过冷奥氏体连续冷却转变金相组织	077
4.1	SA508 Gr.3 钢马氏体金相组织	077
4.2	SA508 Gr.3 钢马氏体与少量贝氏体混合组织	078
4.3	SA508 Gr.3 钢板条贝氏体马氏体复合组织	091
4.4	SA508 Gr.3 钢板条贝马与混杂贝氏体的混合组织	091
4.5	SA508 Gr.3 钢粗大 α_B 为主的混合贝氏体组织	097
4.6	SA508 Gr.3 钢先共析铁素体、贝氏体与 M/A 的混合组织	109
4.7	SA508 Gr.3 钢先共析铁素体、混合贝氏体、M/A 混合组织	123
4.8	SA508 Gr.3 钢连续冷却金相组织的演化规律	134
第 5 章	SA508 Gr.3 钢回火金相组织	137
5.1	试样制备及实验方法	137
5.2	SA508 Gr.3 钢回火金相组织	137
5.2.1	SA508 Gr.3 钢在 650℃回火不同时间后的金相组织	137
5.2.2	SA508 Gr.3 钢在不同回火温度回火 5 h 后的金相组织	180
5.3	SA508 Gr.3 钢回火转变的特点	201
第 6 章	SA508 Gr.3 钢核电大型锻件枝晶偏析对组织的影响	205
6.1	核电大型锻件中枝晶偏析的低倍组织	205

6.2 枝晶偏析不同区域的金相组织	208
6.2.1 正偏析区的组织	208
6.2.2 负偏析区的组织	218
6.3 核电大型锻件中的组织对低温冲击性能的影响	228
6.4 核电大型锻件性能热处理的组织复杂性	235
 第7章 SA508 Gr.3 钢金相组织演变规律总结与核电大型锻件制造 展望	 237
7.1 SA508 Gr.3 钢金相组织演变规律总结	237
7.2 核电大型锻件制造展望	239
 参考文献	 243
 索引	 247

图 表 索 引

图 1-1	压水堆 PWR 核电站工况	003
图 1-2	核岛主设备结构	004
图 1-3	核反应堆压力容器结构	005
图 1-4	核反应堆蒸发器结构	006
图 1-5	核电站稳压器结构	007
图 1-6	SA508 Gr. 3 钢核电大型锻件锻后热处理工艺	014
图 1-7	SA508 Gr. 3 钢核电大型锻件性能热处理工艺	015
图 2-1	锻后热处理状态的 SA508 Gr. 3 Cl. 2 蒸发器大锻件(试样未经 扩散退火)	019
图 2-2	锻后热处理状态的 SA508 Gr. 3 Cl. 1 核岛压力容器大锻件 (试样经扩散退火与正火处理后的组织)	019
图 2-3	A_{C1}/A_{C3} 点测试的膨胀曲线	020
图 2-4	M_s/M_f 点测试的膨胀曲线	021
图 2-5	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的连续冷却转变曲线 (CCT) (取自锻后热处理状态的蒸发器大锻件, 试样未经扩散退火)	021
图 2-6	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的马氏体转变量与温度之间的关系	022
图 2-7	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的 KM 方程中系数与温度之间的关系	023
图 2-8	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的等温转变产物 SEM 照片	024
图 2-9	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的贝氏体区间等温转变量与时间关系	025
图 2-10	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的等温温度与最大转变量之间的关系	025
图 2-11	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的 200℃/s 快速冷却组织	026
图 2-12	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的 400℃等温结束后组织	026
图 2-13	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢的贝氏体相变 JMAK 动力学参数与	

转变温度的关系	027
图 2-14 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢在贝氏体区间的 TTT 曲线	027
图 2-15 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢在贝氏体转变区间归一化的 TTT 曲线	028
图 2-16 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢在高温区不同温度等温的膨胀曲线	028
图 2-17 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢在高温阶段不同温度等温的转变量曲线	029
图 2-18 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢过冷奥氏体等温转变曲线 (TTT) (取自锻 后热处理状态的蒸发器大锻件, 试样未经扩散退火)	029
图 2-19 SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢的膨胀实验结果	030
图 2-20 SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢的连续冷却转变动力学曲线 (取自锻后热 处理状态的核岛压力容器大锻件, 试样经过扩散退火)	031
图 2-21 SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢的过冷奥氏体等温转变曲线 (TTT) (取自 锻后热处理状态的核岛压力容器大锻件, 试样经过扩散 退火)	031
图 2-22 SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢在不同冷却速度下室温组织的金相 照片	032
图 2-23 SA508 Gr. 3 钢不同冷却速度下组织转变过程	033
图 2-24 钢过冷奥氏体转变产物金相组织分类	036
图 3-1 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢 900℃保温 20 min, 700℃等温 380 min 转变 组织	039
图 3-2 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢 900℃保温 20 min, 675℃等温 450 min 的 转变组织	041
图 3-3 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢 900℃保温 20 min, 650℃等温转变 80 min 的 转变组织	042
图 3-4 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢 900℃保温 20 min, 625℃等温 630 min 的 转变组织	045
图 3-5 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢 900℃保温 20 min, 600℃等温 630 min 的 转变组织	047
图 3-6 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢 900℃保温 20 min, 580℃与 560℃等温 转变的光学金相照片	048
图 3-7 SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢预先经过扩散退火试样, 过冷奥氏体在	

540℃等温 90 min 转变的扫描电镜照片	050
图 3-8 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经过扩散退火试样, 过冷奥氏体在 580℃ 等温 630 min 转变的扫描电镜照片	051
图 3-9 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经过扩散退火试样, 过冷奥氏体在 560℃ 等温 180 min 转变的扫描电镜照片	052
图 3-10 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min 后 等温转变的光学金相照片	055
图 3-11 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经过扩散退火试样, 过冷奥氏体在 520℃等温 60 min 转变的扫描电镜照片	057
图 3-12 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 500℃等温 30 min 的扫描电镜照片	059
图 3-13 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 500℃等温 30 min 的扫描电镜照片[图 3-12(c)中间偏上区域 的放大]	060
图 3-14 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 500℃等温 30 min 的扫描电镜照片(大片 M/A 组成物)	061
图 3-15 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 500℃等温 30 min 的扫描电镜照片(典型羽毛状贝氏体 组织)	061
图 3-16 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 480℃等温 30 min 的光学金相照片	062
图 3-17 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 480℃等温 30 min 的扫描电镜照片	065
图 3-18 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 460℃等温 20 min 的光学金相照片	066
图 3-19 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 460℃等温 20 min 的扫描电镜照片(羽毛状贝氏体组织)	067
图 3-20 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 460℃等温 20 min 的扫描电镜照片(板条状贝氏体、马氏体复 合组织)	068
图 3-21 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 460℃等温 20 min 的扫描电镜照片(460℃等温转变组织的不	

	均匀性特征)	070
图 3-22	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 420℃等温 20 min 的光学金相照片	071
图 3-23	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火试样 900℃保温 20 min, 420℃等温 20 min 的扫描电镜照片	075
图 4-1	SA508 Gr. 3 钢马氏体光学金相照片	080
图 4-2	SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢板条马氏体的扫描电镜照片(900℃保温 20 min, 50℃/s 冷却至室温)	082
图 4-3	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢板条马氏体扫描电镜照片(900℃奥氏体化 20 min, 200℃/s 冷却至室温)	084
图 4-4	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢片状马氏体扫描电镜照片(900℃奥氏体化 20 min, 200℃/s 冷却至室温)	085
图 4-5	SA508 Gr. 3 钢的马氏体与少量贝氏体的混合组织的光学金相照片(900℃奥氏体化 20 min, 50℃/s 冷却至室温)	087
图 4-6	SA508 Gr. 3 钢的马氏体与少量贝氏体的混合组织的扫描电镜照片(900℃奥氏体化 20 min, 50℃/s 下冷却至室温)	090
图 4-7	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢板条状贝氏体、马氏体复合组织的扫描电镜照片	092
图 4-8	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火, 900℃奥氏体化 20 min, 20℃/s 冷却至室温的扫描电镜照片	094
图 4-9	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火, 900℃奥氏体化 20 min, 10℃/s 冷却至室温的扫描电镜照片	096
图 4-10	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散退火, 900℃奥氏体化 20 min, 5℃/s 冷却至室温的扫描电镜照片	100
图 4-11	以粗大 α_B 为主的混合贝氏体 SA508 Gr. 3 钢 900℃保温 20 min, 2℃/s 冷却至室温的光学金相照片	102
图 4-12	以粗大 α_B 为主的混合贝氏体 SA508 Gr. 3 Cl. 1 试样, 900℃保温 20 min, 1℃/s 冷却至室温的光学金相照片	103
图 4-13	以粗大 α_B 为主的混合贝氏体 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢 900℃保温 20 min, 2℃/s 冷却至室温的扫描电镜照片(正负偏析区之间的过渡区)	106
图 4-14	以粗大 α_B 为主的混合贝氏体 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散	

	退火, 900℃保温 20 min, 2℃/s 冷却至室温的扫描电镜	
	照片 1	109
图 4-15	以粗大 α_B 为主的混合贝氏体 SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢未经扩散	
	退火, 900℃保温 20 min, 2℃/s 冷却至室温的扫描电镜	
	照片 2	113
图 4-16	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢先共析铁素体、贝氏体及 M/A 混合组	
	织光学金相照片 1(未经扩散退火, 900℃保温 20 min 后冷却	
	至室温).....	115
图 4-17	SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢先共析铁素体、贝氏体及 M/A 混合组织	
	光学金相照片(预先经过扩散退火, 900℃保温 20 min 后冷却	
	至室温).....	117
图 4-18	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢不同类型贝氏体、M/A 组成物与少量先共	
	析铁素体的混合组织扫描电镜照片(未经扩散退火, 900℃保温	
	20 min, 0.5℃/s 冷却至室温).....	118
图 4-19	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢不同类型贝氏体、M/A 组成物与先共析铁	
	素体的混合组织扫描电镜照片(未经扩散退火, 900℃保温	
	20 min, 0.5℃/s 冷却至室温).....	120
图 4-20	SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢先共析铁素体、贝氏体及 M/A 混合组织	
	扫描电镜照片(预先经过扩散退火, 900℃保温 20 min,	
	0.2℃/s 冷却至室温).....	123
图 4-21	SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢先共析铁素体、贝氏体、M/A 混合组织的	
	光学金相照片(预先扩散退火, 900℃保温 20 min, 0.05℃/s 冷	
	却至室温).....	125
图 4-22	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢先共析铁素体、贝氏体、M/A 混合组织的	
	光学金相照片 2(未经扩散退火, 900℃保温 20 min 冷却).....	128
图 4-23	SA508 Gr. 3 Cl. 1 钢先共析铁素体、贝氏体、M/A 混合组织的	
	扫描电镜照片(预先扩散退火, 900℃保温 20 min, 0.05℃/s 冷	
	却至室温).....	130
图 4-24	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢先共析铁素体、贝氏体、M/A 混合组织扫	
	描电镜照片(未经扩散退火, 900℃保温 20 min, 0.05℃/s 冷却	
	至室温).....	131
图 4-25	SA508 Gr. 3 Cl. 2 钢先共析铁素体、贝氏体、M/A 混合组织扫	