

“新闻出版改革发展项目库”入库项目
“十二五”国家重点图书



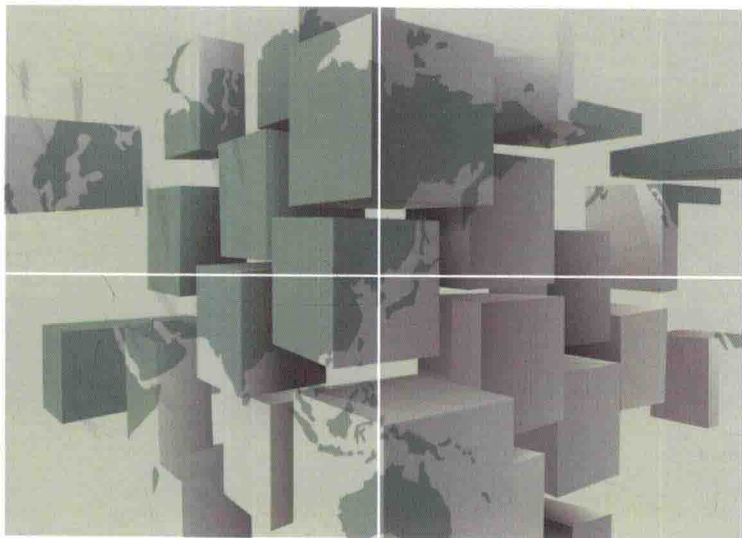
特殊钢 丛书

Special Steel Book Series

55SiMnMo钎钢金属学原理

——B₄型贝氏体形态、力学性能及应用

刘正义 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

“新闻出版改革发展项目库” 入库项目
“ 十 二 五 ” 国 家 重 点 图 书

特 殊 钢 丛 书

55SiMnMo 钎钢金属学原理

—— B_4 型贝氏体形态、力学性能及应用

刘正义 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2017

内 容 提 要

本书论述了 55SiMnMo 钢金属学的有关问题。该钢在奥氏体化后经连续空冷(正火)热处理的金相组织是一种特殊的贝氏体,被命名为 B₄ 型贝氏体,具有板条、粒状形貌,由板条铁素体和板条富碳奥氏体两相近似平行相间,或两相颗粒相邻组成,无碳化物。富碳奥氏体含量可达 20%~30%,它可有效延缓疲劳裂纹的形成和裂纹扩展速率。此外,还比较了该钢等温淬火、B₄ 型贝氏体回火后金相组织和力学性能的变化;对小钎疲劳失效进行分析,讨论了影响钎杆凿岩寿命的主要因素。在书中还以 B₄ 型贝氏体的主要特征为参考,讨论了学术界将板条、粒状贝氏体和粒状组织混为一谈的问题。

本书可供材料物理、金属材料及热处理、金相技术、材料失效分析、钢铁材料产品质量检测方面人员阅读,也可供高等学校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

55SiMnMo 钎钢金属学原理: B₄ 型贝氏体形态、力学性能及应用/刘正义著. —北京:冶金工业出版社, 2017. 10

(特殊钢丛书)

ISBN 978-7-5024-7628-1

I. ①5… II. ①刘… III. ①钎钢—金属学 IV. ①TG142. 45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 232035 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbcs@cnmp. com. cn

策划编辑 张 卫 责任编辑 于昕蕾 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7628-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 10 月第 1 版, 2017 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 15 印张; 4 彩页; 298 千字; 222 页

58.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

《特殊钢丛书》

编辑委员会

主 编 徐匡迪

编 审 刘嘉禾 杨树森

编 委 (按姓氏笔画为序)

马绍弥 王一德 王洪发 王剑志 兰德年

刘正东 刘 宇 刘 苏 刘振清 孙开明

李士琦 李正邦 李依依 李国忠 李鹤林

张晓刚 陈 列 陈国良 陈思联 林慧国

洪及鄙 钱 刚 殷国茂 董学东 董 瀚

谢 蔚

《特殊钢丛书》序言

特殊钢是众多工业领域必不可少的关键材料，是钢铁材料中的高技术含量产品，在国民经济中占有极其重要的地位。特殊钢材占钢材总量比重、特殊钢产品结构、特殊钢质量水平和特殊钢应用等指标是反映一个国家钢铁工业发展水平的重要标志。近年来，在我国社会和经济快速健康发展的带动下，我国特殊钢工业生产和产品市场发展迅速，特殊钢生产装备和工艺技术不断提高，特殊钢产量和产品质量持续提高，基本满足了国内市场的需求。

目前，中国经济已进入重化工业加速发展的工业化中期阶段，我国特殊钢工业既面临空前的发展机遇，又受到严峻的挑战。在机遇方面，随着固定资产投资和汽车、能源、化工、装备制造和武器装备等主导产业的高速增长，全社会对特殊钢产品的需求将在相当长时间内保持在较高水平上。在挑战方面，随着工业结构的提升、产品高级化，特殊钢工业面临着用户对产品品种、质量、交货时间、技术服务等更高要求的挑战，同时还在资源、能源、交通运输短缺等方面需应对日趋激烈的国内外竞争的挑战。为了迎接这些挑战，抓住难得发展机遇，特殊钢企业应注重提高企业核心竞争力以及在资源、环境方面的可持续发展。它们主要表现在特殊钢产品的质量提高、成本降低、资源节约型新产品研发等方面。伴随着市场需求增长、化学冶金学和物理金属学发展、冶金生产工艺优化与技术进步，特殊钢工业也必将日新月异。

从20世纪70年代世界第一次石油危机以来，工业化国家的特殊钢生产、产品开发和工艺技术持续进步，已基本满足世界市场需求、资源节约和环境保护等要求。近年来，在国家的大力支持下，我国科研院所、高校和企业的研发人员承担了多项国家科技项目工作，在特殊钢的基础理论、工艺技术、产品应用等方面也取得了显著成绩，特

别是近 20 年来各特钢企业的装备更新和技术改造促进了特殊钢行业进步。为了反映特殊钢技术方面的进展,中国金属学会特殊钢分会、先进钢铁材料技术国家工程研究中心和冶金工业出版社共同发起,并由先进钢铁材料技术国家工程研究中心和中国金属学会特殊钢分会负责组织编写了新的《特殊钢丛书》,它是已有的由中国金属学会特殊钢分会组织编写《特殊钢丛书》的继续。由国内学识渊博的学者和经验丰富的专家组成编辑委员会,指导丛书的选题、编写和出版工作。丛书编委会将组织特殊钢领域的学者和专家撰写人们关注的特殊钢各领域的技术进展情况。我们相信本套丛书能够在推动特殊钢的研究、生产和应用等方面发挥积极作用。本套丛书的出版可以为钢铁材料生产和使用部门的技术人员提供特殊钢生产和使用的技术基础,也可对相关大专院校师生提供教学参考。本套丛书将分卷撰写,陆续出版。丛书中可能会存在一些疏漏和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

《特殊钢丛书》编委会主编
中国工程院院长

徐匡迪

2008 年夏

前 言

B_4 型贝氏体是本书作者刘正义建议命名的，命名并不重要，只是一个符号而已，然而 55SiMnMo 钢 B_4 型贝氏体所具有本质特征使它不同于经典 B_2 型贝氏体（形态），本质是 55SiMnMo 钢有如下特征：（1）由铁素体和富碳奥氏体两个相组成；（2）无碳化物；（3）具有板条和颗粒形貌，板条的铁素体和板条富碳奥氏体相间、近似平行或颗粒相邻，在金相试样中，通常都是板条和颗粒状混合的形貌，没有看见过 100%板条或 100%颗粒状形貌；（4）过冷奥氏体在连续空冷到室温可获得 100% B_4 型贝氏体，在 C 曲线上贝氏体区等温只能获得部分 B_4 型和部分 B_2 型的混合贝氏体组织。

在 20 世纪 50 年代初，柯俊将过冷奥氏体在不同冷却温度区间所转变的贝氏体分别称为无碳化贝氏体（高温区转变的针状铁素体）、上贝氏体（中温区转变的羽毛状铁素体+ Fe_3C ）和下贝氏体（低温区转变的下贝氏体，由针状铁素体和 $\epsilon-Fe_2C$ 组成）。到了 60 年代末，邦武立郎和大森等将其分别用符号 B_I 、 B_{II} 、 B_{III} 表示柯俊的经典贝氏体，方便了应用，这些都已经为国际学术、工程界广泛认可。

就贝氏体转变温度而言， B_4 型贝氏体是过冷奥氏体在 B_I 和 B_{II} 之间温度范围的转变产物，但不能将它归于 B_I 型贝氏体，因后者只是由单相铁素体组成， B_4 型贝氏体则是由铁素体和奥氏体两个相组成而无碳化物。更不能将它归于 B_2 型贝氏体，因后者是由铁素体和碳化物组成。而邦武立郎对应命名 $B_I(B_1)$ 、 $B_{II}(B_2)$ 、 $B_{III}(B_3)$ 型贝氏体又是大家认可的，不宜于更改其顺序，因此，作者建议将它命名为 B_4 型贝氏体，今后再发现新形态贝氏体，则往后顺序排，如可命名为 B_5 、…型贝氏体，这个建议既考虑到经典贝氏体的排序，又考虑到今后的新发现。尽管有不合理之处（将在中温区转变的上贝氏体排在低温区转变的下贝氏体后面），但可行。

B_4 型贝氏体具有粒状和板条状的形貌，作者不主张叫它粒状或板

条状贝氏体。在 20 世纪 80 年代,国内对粒状或板条状贝氏体研究十分热门,发表了很多文章,但作者认为其在定义、形态、论述上有很多差异,将问题弄得有些复杂,主要问题是将粒状贝氏体和粒状组织混为一谈。而 B_4 型贝氏体有明确的特征:由板条或颗粒状铁素体和富碳奥氏体两相组成,无其他相,凡是不符合这一特征的就不是 B_4 型贝氏体。

作者也不主张叫它准贝氏体。康沫狂命名的准贝氏体具有板条、粒状形貌,由铁素体和富碳奥氏体相间组成、无碳化物,这与 B_4 型贝氏体特征相同。准贝氏体在等温条件下形成,不稳定,随着等温时间的延长,先期转变的无碳化物的准贝氏体向 B_2 型贝氏体转变,在室温下只能获得部分准贝氏体。还由于将准贝氏体分为上准贝氏体和下准贝氏体,而作者认为无碳化物准下贝氏体存在的可能性不大,因此也不宜将 B_4 型贝氏体叫做准贝氏体。

55SiMnMo 钢经 870~900℃ 奥氏体化 30min 空冷正火后,过冷奥氏体转变的 B_4 型贝氏体组织比较典型,组成相之一的富碳奥氏体可达到 25%~35%。作者曾在 1984 年 12 月受邀在上海一高校做“55SiMnMo 钢上贝氏体形态”学术报告,在会上没有一个人相信这个数据是真的,作者回广州后将硬度 HRC31 的试样寄去,他们用 X 射线测到奥氏体含量达 23.8%。硬度 HRC31 的试样,其金相组织是 B_4 型贝氏体+10%~15%块状复合结构混合组成,块状复合结构以体心立方马氏体为主,和 B_4 型贝氏体中的铁素体相的晶体结构相同,所以测出的数据只是相对值,比 B_4 型贝氏体中实际的奥氏体量少;如果用 HRC25~26 的试样,则组织呈现接近 100% B_4 型贝氏体形态,块状复合结构很少,用 X 射线衍射仪测出的奥氏体,会真实地反映 B_4 型贝氏体的实际奥氏体量,可达 30%甚至更高。

制造小钎杆的专用钢,简称钎钢。钎杆是矿山、交通和国防等工程领域开山凿洞专用的一种工具,此工具用钢为 55SiMnMo 钎钢。55SiMnMo 钎钢是 20 世纪 70 年代中国人创造的一个新钢号,具有自主知识产权,其标准成分的主要元素为:0.55%C+1.34%Si+0.78%Mn+0.45%Mo。它是一种十分优秀的钎钢,主要表现在两方面:一是,用它制造的六角形小钎杆,凿岩寿命长,可与瑞典生产的“世界王牌”

95CrMo 小钎杆媲美, 寿命长的原因就在于它具有强韧性好的配合。空冷正火热处理后, 宏观硬度一般在 HRC33~35, 其金相组织是 70%~80%B₄ 型贝氏体+20%~30%块状复合结构混合型组织。块状复合结构以马氏体为主+有碳化物下贝氏体 (B₃), 其硬度 HRC45~50, 为小钎杆提供强度保障, 使小钎杆弹性好不易弯曲, 提高了疲劳强度; B₄ 型贝氏体硬度虽只有 HRC25~26, 但它有 20%~30%富碳奥氏体, 会抑制疲劳裂纹的形核和扩展, 为小钎杆提供韧性保障。二是, 不含 Cr、Ni 元素, 我国一直是提倡大力发展无 Cr、Ni 的新钢种。今天不受限制鼓励大家广泛使用 304 牌号的不锈钢, 可是在 40 年前, Cr、Ni 极为缺乏, 当时国内矿藏勘探情况不明, 因 Cr、Ni 属航空高温合金原材料, 国外对中国封锁, 严禁向中国出口, 故在国际市场上有钱买不到; 含 Cr、Ni 的民用低合金钢在国际市场可买到, 但又缺美元。现在, 中国是生产不锈钢的大国, 大部分 Cr、Ni 矿产来自国外, 中国也陆续找到一些矿藏, 但相关节约使用 Cr、Ni 的政策没有改变。

经典的 B₃ 型贝氏体具有良好的综合力学性能, 在工业上得到广泛的应用; 而 B₂ 型贝氏体的力学性能不好, 几乎无使用价值。B₄ 型贝氏体 55SiMnMo 钢的综合力学性能优异, 成功用于高寿命小钎杆。55SiMnMo 钢除用于制造小钎杆外, 还可试用来制造其他重要的机械零件, 在机械制造方面, 有很多如轴类零件要求综合力学性能好, 采用中碳低合金钢调质热处理, 硬度达到 HRC28~32, 具有回火索氏体的金相组织, 调质热处理工艺是淬火+高温回火, 若改用 55SiMnMo 钢正火态同等硬度的混合型金相组织, 不仅有更良好的力学性能, 而且减少淬火变形, 减少精加工量, 减掉高温回火, 节省能源和时间。

40 年前中国制造的小钎杆成分是碳 8 钢, 平均凿岩寿命只有 10~20m/根; 从瑞典进口的 95CrMo 小钎杆平均凿岩寿命超过 150m/根, 两者差距甚大。1966~1969 年, 当时冶金工业部组织钎钢攻关队, 任命王新典、翁宇庆为队长, 黎炳雄等都是主要成员。明确的任务是: 创造不含 Cr、Ni 成分的钎钢, 小钎杆的凿岩寿命要超过 150m/根。在研究工作期间, 由于“文化大革命”的影响, 研究工作进展并不顺利, 经努力终于在 1969 年确定了 55SiMnMo 钢最佳成分, 小钎杆的工作寿命已达到了所要求的水平, 但工作队还是因“文革”被解散。到 1974

年冶金工业部又重起钎钢研究，任命徐曙光为协作组长，董鑫业、黎炳雄、李承基、林鼎文、刘正义等都是协作组主要成员，参加协作组的单位比较多，包括了产学研三方面的人，团队达 100 人，建立了抚顺新抚钢厂、贵阳钢厂、冶金部钢铁研究院、河北铜矿、红透山铜矿等基地。

钎钢协作组在 1969 年工作的基础上，对中空六角形钎钢生产方法、55SiMnMo 钢小钎杆制钎工艺进行深入研究，如小钎杆在 1969 年凿岩寿命已偶尔达 200m/根高水平，但性能不稳定，重复性不好，刘正义和林鼎文提出，从金相组织方面来控制、提高、稳定钎杆寿命，同时改进锻造钎尾技术等措施，收到比较好的效果。

中空六角形的小钎杆，几何形状、尺寸是细而长，截面：长度=1：(60~70)。为了减少热处理变形，不能淬火；为了保证强度，不能退火；只能采用空冷正火工艺，既减少了变形，又保证了强韧性。空冷正火后的金相组织，已知道它是一种特殊的贝氏体，在翁宇庆攻关队时期已测绘出 55SiMnMo 钢的 CCT 曲线和 TTT 曲线，但不知道它是哪一种贝氏体，更没有考虑到空冷到室温后的贝氏体在重新加热到 400℃ 过程中的变化。金相组织的转变，用普通金相浸蚀液（Nital）在普通金相显微镜下是难以辨别的，刘正义、李承基等分别借助染色剂、X 射线衍射和电子显微镜等工具进行了研究，弄清了 B₄ 型贝氏体的相组成，定量确定了高寿命小钎杆组织与热处理工艺强韧配合的最优值，促进了小钎杆寿命的提高和稳定，使用寿命超过 150m/根的水平。小钎杆的使用寿命早已达到高水平，国产化的 55SiMnMo 钢小钎杆完全满足国内市场需求，其应用已达 30 年之久，但对其金相组织，在钎钢行业的观点仍然是各自表述。在 2011 年全国钎钢钎具年会上，刘正义、黎炳雄、林鼎文呼吁“统一认识”的必要性，具体指出某个作者，在什么场合下，关于 55SiMnMo 钢正火态金相组织表述有值得商榷之处，并希望达到统一正确的表述。在学术界，至今对其他材料的粒状和板条状型贝氏体的观点也不一致，各自表述的现象也是几十年了。这十分不利于对某类科学问题的深入研究。目前，在学术会议上普遍存在缺少讨论的氛围，一般有两个原因：一是时间安排紧，报告人做完报告后会议一般没有留下足够的讨论时间；二是礼节上的习惯，其他研究

者不好当众指出报告人学术上的问题或提出疑问。在本书的第一章，作者用 55SiMnMo 钢 B₄ 型贝氏体的观点，对一些专业图书和论文中关于板条、粒状贝氏体的表述进行了评论。当然在评论上，作者也有可能存在两点误区：一是作者没有读懂原文的含义就作评论；二是作者还没有认识到贝氏体相变的复杂性，不能用 55SiMnMo 钢特殊无碳化物上贝氏体的观点评论其他钢板条、粒状贝氏体。作者在本书中如有评论不当之处，欢迎读者批评指正，也希望继续讨论。

本书内容包括了作者和合作的同事们的研究成果，作者对他们辛勤的劳动和支持本书的完成，表示真诚的感谢！

在此，作者要特别感谢两位同事：林鼎文教授和罗承萍教授。林鼎文教授，从 1974 年就开始和本书作者合作，参加冶金工业部钎钢协作组，受钎钢协作组的委托，带领华南工学院小分队（师生组成）到抚顺、贵阳，协助新抚钢厂和贵阳钢厂提高 55SiMnMo 小钎杆质量，还代表钎钢协作组组织各小钎杆生产单位，在矿山进行“大比武”（凿岩寿命对比试验）。林教授后调至华侨大学任教，但一直与作者合作撰写论文，探讨 55SiMnMo 钢正火态、回火态、等温态金相组织的变化。罗承萍教授，是金属材料透射电镜分析方面的著名学者，他对 55SiMnMo 钢正火态贝氏体精细结构的研究，为本书增添了色彩。

本书还有以下几位校友的贡献：符坚，他的硕士学位毕业论文，揭示了 55SiMnMo 钢超硬摩擦白层是纳米级马氏体；陈汉存，他的硕士学位毕业论文，对矿水介质影响小钎杆疲劳裂纹扩展速率（ da/dN ）的机理研究比较清楚；黄颖楷，他的本科生毕业论文，首次获得 55SiMnMo 钢超硬摩擦白层。他们的研究工作分别体现在本书相关章节里。在此，作者对他们对本书记编撰的贡献表示衷心的感谢！

刘正义

2017 年 5 月 1 日

目 录

1 关于板条、粒状贝氏体的一些典型论述	1
1.1 经典的贝氏体理论	1
1.1.1 柯俊的贝氏体模型	1
1.1.2 邦武立郎和大森表示方法	5
1.2 不同作者对粒状、板条状贝氏体组织的论述	5
1.2.1 贝氏体、奥氏体条状相间并近似平行的组织	5
1.2.2 铁素体和奥氏体两相组成	6
1.2.3 岛状组织	8
1.2.4 四部有关贝氏体相变专著的观点	11
1.2.5 在板条铁素体夹有奥氏体或碳化物的都是 B_{II} 型贝氏体	23
1.2.6 关于超低碳的贝氏体组织	26
1.2.7 在钎钢钎杆生产企业界对 55SiMnMo 钢 B_4 型贝氏体的认识	27
1.3 关于粒、板条状贝氏体“讨论”的焦点	29
1.3.1 确定金相组织的重要判据	29
1.3.2 粒、板条贝氏体与粒状组织	29
参考文献	30
2 55SiMnMo 等钎钢相变动力学特征	32
2.1 引言	32
2.2 小钎杆用钢牌号、成分、相变临界点	32
2.2.1 小钎杆用钢的牌号与成分	32
2.2.2 钢的相变临界点	34
2.2.3 合金元素在钢中存在的形式	36
2.3 主要合金元素在钎钢中的作用	39
2.3.1 几个主要元素	39
2.3.2 小钎杆用钢中的合金元素及其作用	39
2.4 钢的相变动力学曲线	41
2.4.1 Fe-C 合金的 C 曲线	42

2.4.2 合金钢的等温 C (TTT) 曲线	47
2.4.3 55SiMnMo 钎钢连续冷却相变 C 曲线	50
2.4.4 从 C 曲线来看 55SiMnMo 钢	53
参考文献	54
3 55SiMnMo 钢正火 (连续空冷) 的 B₄ 型贝氏体形态	55
3.1 B ₄ 型贝氏体形貌特征	55
3.1.1 用普通光学显微镜研究 B ₄ 型贝氏体形貌特征	55
3.1.2 用电子显微镜研究 B ₄ 型贝氏体形貌特征	64
3.1.3 B ₄ 型贝氏体各组成相体积分数及其含碳量	69
3.1.4 B ₄ 型贝氏体的形成过程 (机制)	71
3.2 55SiMnMo 钢块状复合结构组织	75
3.2.1 混合组织的形貌特征	76
3.2.2 块状复合结构形貌特征	77
3.2.3 块状复合结构的形成过程 (探讨)	78
3.2.4 块状复合结构的比例控制	79
3.3 连续空冷条件下影响金相组织的主要因素	79
3.3.1 钢的成分	80
3.3.2 过冷奥氏体的冷却速度	80
3.3.3 B ₄ 型贝氏体中富碳奥氏体所占比例	81
3.4 B ₄ 型无碳化物上贝氏体的回火转变	82
3.4.1 冷处理	83
3.4.2 重新加热 (回火处理)	83
3.4.3 回火温度对奥氏体总量的影响	89
3.4.4 回火临界温度 (点)	89
3.4.5 相界面稳定平衡与回火转变	90
3.4.6 B ₄ 型贝氏体铁素体相的含碳量	92
3.4.7 关于“回火贝氏体”的概念	92
3.5 55SiMnMo 钢等温贝氏体	92
3.5.1 关于回火贝氏体	93
3.5.2 等温贝氏体的组织形貌	93
3.5.3 等温贝氏体的特征	95
3.6 随炉冷却的金相组织	97
3.7 超温奥氏体化后的 B ₄ 型贝氏体	98

参考文献	99
4 55SiMnMo 钢贝氏体相变晶体学研究	101
4.1 前言	101
4.2 实验方法	102
4.3 实验结果	102
4.3.1 正火组织的形态和精细结构	102
4.3.2 贝氏体的晶体学位向关系	106
4.3.3 贝氏体铁素体的惯习面	109
4.3.4 无碳化物的上贝氏体的奥氏体-铁素体界面	111
4.4 贝氏体相变的晶体学理论研究	111
4.5 讨论	115
4.6 结论	117
4.7 修改内容的说明	117
参考文献	119
5 55SiMnMo 钢力学性能与钎杆失效分析	121
5.1 力学性能与金相组织	121
5.1.1 力学性能指标 (常规)	121
5.1.2 在连续空冷条件下的硬度与金相组织	125
5.2 55SiMnMo 钢小钎杆主要失效形式——疲劳	129
5.2.1 小钎杆的服役条件	129
5.2.2 小钎杆的失效	129
5.3 影响小钎杆疲劳失效的主要因素	132
5.3.1 夹杂物是外疲劳的主要因素	132
5.3.2 空蚀是内疲劳的主要因素	135
5.4 疲劳裂纹扩展速率 da/dN	137
5.4.1 da/dN 符号的物理意义	138
5.4.2 da/dN 的测定	138
5.4.3 对 $da/dN-\Delta K$ 曲线的影响因素	142
5.5 疲劳裂纹扩展途径	143
5.5.1 对裂纹扩展途径的试验 (观察) 方法	143
5.5.2 金相磨面显示裂纹扩展途径	143
5.6 裂纹的起源	145

5.7 断口金相	147
5.8 水介质对 da/dN 的影响	150
5.8.1 试样的热处理	150
5.8.2 测试装置	151
5.8.3 测试条件	151
5.8.4 疲劳裂纹扩展的 $da/dN-\Delta K$ 曲线	152
5.8.5 试样的背面应变 (BFS) 曲线	153
5.8.6 裂纹内腐蚀产物 (氧化物) 形成过程	155
5.8.7 矿水介质对小钎杆疲劳寿命影响的结论	158
参考文献	158
6 55SiMnMo 钢小钎杆制造、质量和应用	161
6.1 小钎杆的应用	161
6.1.1 开山凿洞的工具	161
6.1.2 钎钢和钎杆的区别	162
6.2 六角中空钢的制造	162
6.2.1 铸管法	163
6.2.2 钻孔法	167
6.3 六角中空小钎杆制造工艺路线的发展	168
6.3.1 高质量的小钎杆制造难点	168
6.3.2 小钎杆制造工艺要点	169
6.4 影响钎杆质量的几个关键问题	171
6.4.1 缺口和缺口效应	171
6.4.2 锻挤所产生的冶金缺口	172
6.4.3 小钎杆的机械缺口	174
6.4.4 钎杆的热处理	176
6.5 小钎杆的表面喷丸强化	179
6.5.1 喷丸改变表面应力状态	179
6.5.2 喷丸消除或减少钎杆表面缺陷	180
6.6 防腐处理 (磷化—挂蜡)	180
参考文献	181
7 超硬摩擦马氏体 (55SiMnMo 钢摩擦磨损行为)	183
7.1 引言	183

7.1.1 白层的特征	183
7.1.2 白层的本质	184
7.2 摩擦磨损试验	185
7.2.1 试验机及其装置	185
7.2.2 试样	186
7.2.3 摩擦试验参数	186
7.3 摩擦白层的特性	186
7.3.1 宏观(目视)特征	186
7.3.2 金相组织特征	187
7.3.3 摩擦白层(纳米级超细晶马氏体)性能上的三大特点	188
7.4 摩擦白层的相结构分析	191
7.4.1 X射线分析	191
7.4.2 透射电镜(TEM)分析摩擦白层的晶体结构	193
7.4.3 白层断口形貌特征(用扫描电镜研究白层)	201
7.4.4 影响白层的主要因素	201
7.5 白层的磨损	207
7.6 关于本章的内容总结	210
参考文献	211
名词术语	212

1 关于板条、粒状贝氏体的一些典型论述

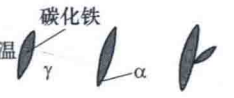
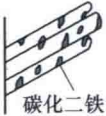
在钢铁材料加热和冷却过程中所发生的基本相变，主要是奥氏体、珠光体、贝氏体和马氏体相变，其中以贝氏体相变及其所形成的金相组织形貌、形态和形成机制最为复杂^[1,2]。除了经典的三种贝氏体外，还有其他形态的贝氏体，其中讨论得最多的是板条、粒状贝氏体。在学术界，关于板条、颗粒状贝氏体的观点不一致。主要是某些因素使板条或粒状贝氏体形貌有差异，但又缺乏识别方法；在定义上，将C曲线贝氏体和马氏体转变区的产物放在一起叫板条、粒状贝氏体，也不妥。55SiMnMo 钢正火（从奥氏体温度连续空冷至室温）态的贝氏体组织，也具板条、粒状贝氏体形貌特征，刘正义建议叫它 B₄ 型贝氏体。它由约 70%铁素体+30%富碳奥氏体层状相间或颗粒相邻排列，无碳化物，作者以此为参考来讨论究竟怎样定义条状、粒状贝氏体，它的特征、相组成、形貌……还有 B₄ 型贝氏体与经典贝氏体的关系。

1.1 经典的贝氏体理论

1.1.1 柯俊的贝氏体模型

在 20 世纪 50 年代初，我国的柯俊总结了前人研究工作，提出了贝氏体形成机构模型，如表 1-1 所示^[3]。过冷奥氏体在不同温度范围内转变的贝氏体分别叫做无碳化物贝氏体、上贝氏体和下贝氏体，下面分别介绍其主要特征。

表 1-1 经典贝氏体转变机构及特征

柯俊在 1955 年提出的贝氏体形成机构		邦武立郎和大森用符号简称命名	
模型	特征	模型	符号
高温 	无碳化物上贝氏体，单相		(B _I)
中温 	有碳化物上贝氏体，双相		(B _{II})
低温 	有碳化物下贝氏体，双相		(B _{III})