

先进钢铁材料技术丛书

钢的微观组织图像精选

钢铁研究总院结构材料研究所
先进钢铁材料技术国家工程研究中心 编
中国金属学会特殊钢分会

The Collection of
Microstructural Morphology
of Steels



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

农业科学技术丛书

钢的显微组织图像精选

陈惠卿 文星 张培 孙海 陈惠卿 文星
张培 孙海 陈惠卿 文星 张培 孙海 陈惠卿 文星
中国冶金工业出版社

The Collection of
Microstructural Morphology
of Steels

CHEN HUIQING WEN XING
ZHANG PEI SUN HAI

先进钢铁材料技术丛书

钢的微观组织图像精选

钢铁研究总院结构材料研究所
先进钢铁材料技术国家工程研究中心 编
中国金属学会特殊钢分会

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 提 要

本书精选了近年来国内钢的微观组织图像一百余幅,并按非合金钢、低合金钢、合金钢和其他进行了分类。这些图像的研究对象和研究方法体现了近年来国内新型钢铁材料研发和生产的新进展。在研究对象上,涉及了高性能低成本碳结钢(如细晶粒钢、超细晶粒钢),高强度低合金钢(如 TRIP 钢、高级别管线钢、耐候钢等),长寿命高强度合金结构钢(如微合金非调质钢、耐延迟断裂螺栓钢、抗疲劳弹簧钢、长寿命齿轮钢等),节约资源型不锈钢(如高氮不锈钢、铁素体时效不锈钢、高强度不锈钢、双相不锈钢等),高效率耐热钢(如超超临界火电机组用铁素体耐热钢等),超高洁净度高碳铬轴承钢,高性能工具钢等新型先进钢铁材料;在研究方法上,应用了包括数字金相显微镜技术、彩色金相技术、高分辨透射电镜分析技术(TEM)、高分辨场发射扫描电镜分析技术(SEM)、电子背散射衍射分析技术(EBSD)等先进微观组织分析技术。本书适合从事钢铁材料研发和生产的科技人员、高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢的微观组织图像精选 / 钢铁研究总院结构材料研究所等编. —北京:冶金工业出版社, 2009.1
(先进钢铁材料技术丛书)

ISBN 978-7-5024-4770-0

I. 钢… II. 钢… III. 钢—金相组织—图集
IV. TG142.1-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 176724 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

策划编辑 张 卫 责任编辑 王雪涛 美术编辑 李 心

版式设计 张 青 责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4770-0

北京盛通印刷股份有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2009 年 1 月第 1 版, 2009 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11 印张; 7 彩页; 232 千字; 162 页; 1-2000 册

60.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

《先进钢铁材料技术丛书》

编辑委员会

主 编 翁宇庆

编 审 杨树森

编 委 （按姓氏笔画为序）

干 勇	才鸿年	马绍弥	王立新	王全礼
王国栋	王洪发	王新华	兰德年	田志凌
刘 俭	刘 浏	刘万山	刘 苏	刘春明
朱 静	江来珠	许珞萍	李 成	李文秀
李世俊	苏 杰	杨树森	陈思联	陈蕴博
林慧国	柯 俊	赵 沛	赵克文	郭爱民
高惠菊	翁宇庆	董 瀚		

序 言

钢铁材料具有资源丰富、生产规模大、品种规格多、性能稳定且多样化等特点，并易于加工、价格低廉。钢铁材料既方便使用，又便于回收，是人类从铁器时代就开始使用的材料，目前也是工业生产和人民生活最广泛使用的材料。在可以预见的未来，还没有哪一种材料能够全面取代钢铁材料的作用。钢铁材料是人类社会进步的重要物质基础。

我国经济和社会持续不断地发展，钢产量持续快速增长，自 1996 年以来，粗钢产量连续十年保持世界首位。但是，金属矿产资源、能源、交通运输和环境等方面却难以支撑不断增长且数量庞大的钢材生产和使用的需求。在技术进步和各种材料的竞争条件下，人们提出了钢铁材料合理生产和创新发展的问题。那么，中国需要什么样的钢铁材料呢？

进入 21 世纪，一方面，国民经济各个部门都需要高性能、高精度和低成本先进钢铁材料，如高层建筑、海洋设施、大跨度重载桥梁、高速铁路、轻型节能汽车、石油开采和长距离油气输送管线、大型储存容器、工程机械、精密仪器、大型民用船舶、军用舰艇、航空航天和国防装备等都需要专业用途的先进钢铁材料；另一方面，社会的发展对钢铁的生产、加工、使用和回收等环节又提出了节约能源、节省金属矿产资源、保持环境等要求。因此，从科学发展观来看，我们现在和未来的经济建设和社会发展迫切需要的先进钢铁材料，应该是采用先进技术生产的高技术含量的钢铁材料，是具有高性能、高精度、低成本、绿色化为特征的钢铁材料，如高强度、高韧性、长寿命的高性能化；高形状尺寸精度和高表面质量的高精度化；低合金含量和优化工艺流程的低成本化；易于回收和再利用的绿色化。

近年来，在国家发改委、国防科工委和国家科技部的大力支持下，国内的科研院所、高校和企业的研发人员承担了国家工程研究中心、重点工程配套材料、国家支撑计划、国家“973”规划、国家“863”计划

等国家重要科技项目工作，开展了先进钢铁材料的研发，在基础理论、工艺技术、产品应用等方面都取得了很好的成绩。为了促进钢铁材料发展，满足市场需要，先进钢铁材料技术国家工程研究中心、中国金属学会特殊钢分会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《先进钢铁材料技术丛书》。先进钢铁材料技术国家工程研究中心专家委员会专家和中国金属学会特殊钢分会的专业人员组成本套丛书的编辑委员会。本套丛书的编写与出版具有时代意义。丛书编委会将组织国内钢铁冶金和材料领域的知名学者分别撰写，努力反映先进钢铁材料的科研、生产和应用的最新进展。期望本套丛书能够在推动先进钢铁材料的研究、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先进钢铁材料生产和使用的技术基础，也可为相关大专院校师生提供教学参考。我们组织编写《先进钢铁材料技术丛书》尚属首次。本套丛书将分册撰写，陆续出版。书中存在的疏漏和不足之处，欢迎读者批评指正。

《先进钢铁材料技术丛书》编委会

前 言

由于性能的多样化,钢广泛地应用于各个领域,是经济发展和国防建设的基础材料。钢之所以具有性能多样化的特征,源自于其组织结构的多样化。丰富多彩的组织变化构成了钢种的庞大体系。

钢是不断发展的新材料,其组织结构有些是已知的,还有很多有待确定。随着科学技术的发展,特别是检测技术和设备的发展,人们对钢的微观组织结构的理解不断深入。对微观组织的理解和运用是研发先进钢铁材料的基础。

多年来,国内钢铁研发、生产和应用单位重视钢的微观组织研究,获得了很多成果,支撑了钢的研发工作。本书精选了近年来国内钢的微观组织图像一百余幅,这些图像的作者均是钢铁生产、教学、科研单位的一线科研工作人员。本书对精选的一百余幅图像按非合金钢、低合金钢、合金钢和其他进行了分类。这些精选图像的研究对象和研究方法体现了近年来国内先进钢铁材料研发和分析测试技术的新进展:在研究对象上,涉及了高性能低成本碳结钢(如细晶粒钢、超细晶粒钢等)、高强度低合金钢(如 TRIP 钢、管线钢、耐候钢等)、长寿命高强度合金结构钢(如微合金非调质钢、耐延迟断裂螺栓钢、抗疲劳破坏弹簧钢、长寿命齿轮钢等)、节约资源型不锈钢耐蚀钢(如高氮不锈钢、铁素体不锈钢、高强度不锈钢、双相不锈钢等)、高效率耐热钢(如超超临界火电机组用铁素体耐热钢等)、超高洁净度高碳铬轴承钢、高性能工具钢等新型先进钢铁材料;在研究方法上,应用了包括数字金相显微镜技术、彩色金相技术、高分辨透射电镜分析技术(TEM)、高分辨场发射扫描电镜分析技术(SEM)、电子背散射衍射分析技术(EBSD)等在内的先进微观组织分析测试技术。本书基本反映了近期先进钢铁材料研发的进展,具有代表性和参考价值,能够对从事钢铁材料研发、教学、生产和应用的人员有所帮助。

自 2004 年起,钢铁研究总院结构材料研究所、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连续举办了四届全国范围的“钢的微观组织图像竞赛活动”,吸引了全国数十家钢铁企业、学校、科研院所的广大钢

铁科技人员参与。送选作品反映了近年来我国钢铁工业的产品技术进步，本书大部分图像选自上述竞赛活动中评选出的优秀作品。我们对参加竞赛活动的作者表示敬意，对入选作品的作者表示感谢，我们组织国内有关专家对每幅图像进行了认真评审，保证了图像的质量和技术水平。中国工程院院长徐匡迪院士、钢铁研究总院院长干勇院士、中国金属学会理事长翁宇庆教授等对先进钢铁材料技术研发倾注了大量心血，给予了细致指导和大力支持，培育了良好的钢铁材料微观组织研究活动氛围，借此表示衷心的感谢和敬意。感谢刘正才、刘正东、张永权、陈其安、苏杰、杨志勇、杨树森、赵先存、康喜范、程世长、董瀚、雍岐龙（以姓氏笔画为序）等专家对编辑出版工作的专业技术指导。本书的出版意在激发从事微观组织结构分析科研人员的兴趣，推动我国钢铁材料技术研发活动。陈鹰、刘苏、刘正才、刘正东、董瀚具体负责本书的编写工作，鉴于编者认识水平所限，书中不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 11 月

C-Mn 钢中晶内夹杂物上铁素体形核的 EBSD 表征

作 者：吴立新

工作单位：武汉钢铁（集团）公司研究院

研究对象：C-Mn 钢

拍摄设备：Quanta 400SEM、Oxford EBSD

拍摄时间：2006 年 12 月



拍摄经历及技术背景：

在研究钢中铁素体转变以细小夹杂物形核机制过程中，将普通 C-Mn 钢小块试样在精密盐浴炉中加热到 1250℃奥氏体化 10 s,随炉冷至 690℃保温 40 s，随后水淬至室温。在试样的金相磨面上，可观察到一些在 690℃刚刚转变成的小块状铁素体，其周围是未转变的奥氏体水淬后形成的板条马氏体，而铁素体中心均有细颗粒状夹杂物。能谱分析表明，其大多为 MnS、Al₂O₃、VN 或其复合夹杂。

本图片是用 EBSD 对其中典型区域做的铁素体晶粒取向分布图，绿、蓝、红三色分别代表体心立方铁素体的（101）、（111）、（100）方向，黑色像素点是未能解析的盲点（非铁素体点）。由图可见：初生铁素体主要呈（101）取向，其中有一些放射状的亚晶界或小角度晶界（颜色差别甚微）。其周围因马氏体晶格畸变较大，所以未能解析的盲点较多。能谱分析表明。铁素体中心为 MnS 夹杂颗粒，MnS 夹杂附近贫锰，成分起伏差别较大，有利于形核。这是铁素体以颗粒状 MnS 夹杂形核的典型证明。

冷轧双相钢组织

作 者：田玉伟 王 强

工作单位：本溪钢铁公司

研究对象：冷轧双相钢

拍摄设备：蔡司显微镜

拍摄时间：2007 年 3 月 23 日



拍摄经历及技术背景：

显微组织：铁素体与马氏体；

该组织为热轧板经冷轧和连续退火获得，为具有良好强韧性的冷轧双相钢组织。

TRIP 钢彩色金相

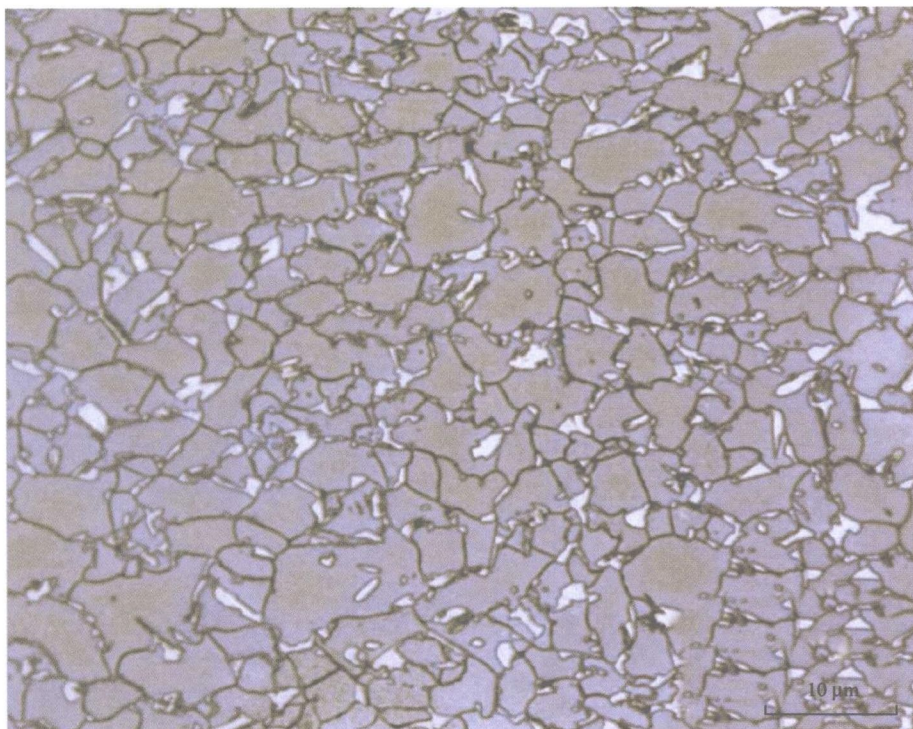
作者：张 敏 刘继雄 李平和

工作单位：武汉钢铁（集团）公司研究院

研究对象：TRIP 钢

拍摄设备：Leica DM6000M

拍摄时间：2006 年 9 月



拍摄经历及技术背景：

TRIP 钢经磨制抛光成金相试样后，用 Lepera 试剂（即 1%偏重亚硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)蒸馏水溶液+4%苦味酸酒精溶液），以 1:1（体积比）搅拌均匀混合作为腐蚀剂，然后将试样浸入腐蚀液中侵蚀试样，使腐蚀面泛出蓝橙般的光泽。在光学显微镜（Leica DM6000M）下观察试样组织，可清晰地观察到铁素体（蓝色）、M-A 岛（白色）和 M-A 岛中及附近的贝氏体（棕色）。

X80 钢板彩色金相

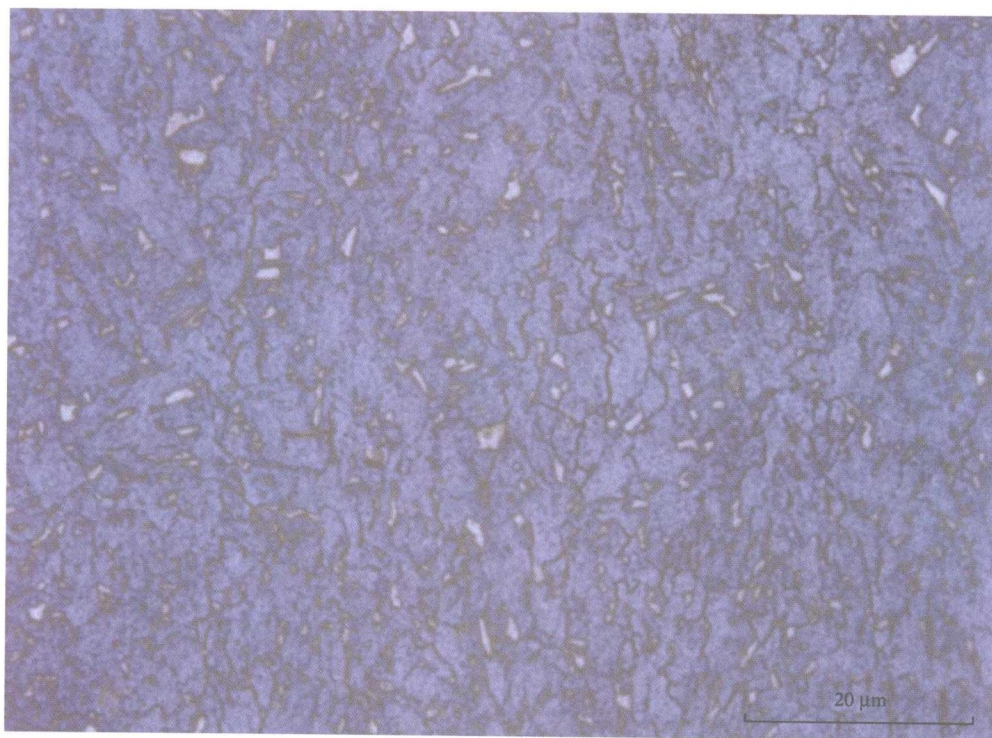
作者：张 敏 李平和 刘继雄 孙宜强

工作单位：武汉钢铁（集团）公司研究院

研究对象：X80 钢

拍摄设备：Leica DM6000M

拍摄时间：2007 年 5 月



拍摄经历及技术背景：

试样取自 X80 钢卷中部，经磨制抛光后，用 Lepera 试剂（即 1% 偏重亚硫酸钠（ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ）蒸馏水溶液+4% 苦味酸酒精溶液），以 1:1 体积比均匀搅拌混合作浸蚀剂。将试样浸入腐蚀液中侵蚀试样。在光学显微镜（Leica DM6000M）下观察试样中的组织，蓝色为针状铁素体、白色为马氏体-奥氏体岛（M-A 岛）、棕色为贝氏体。

X80 管线钢中针状铁素体的 EBSD 研究

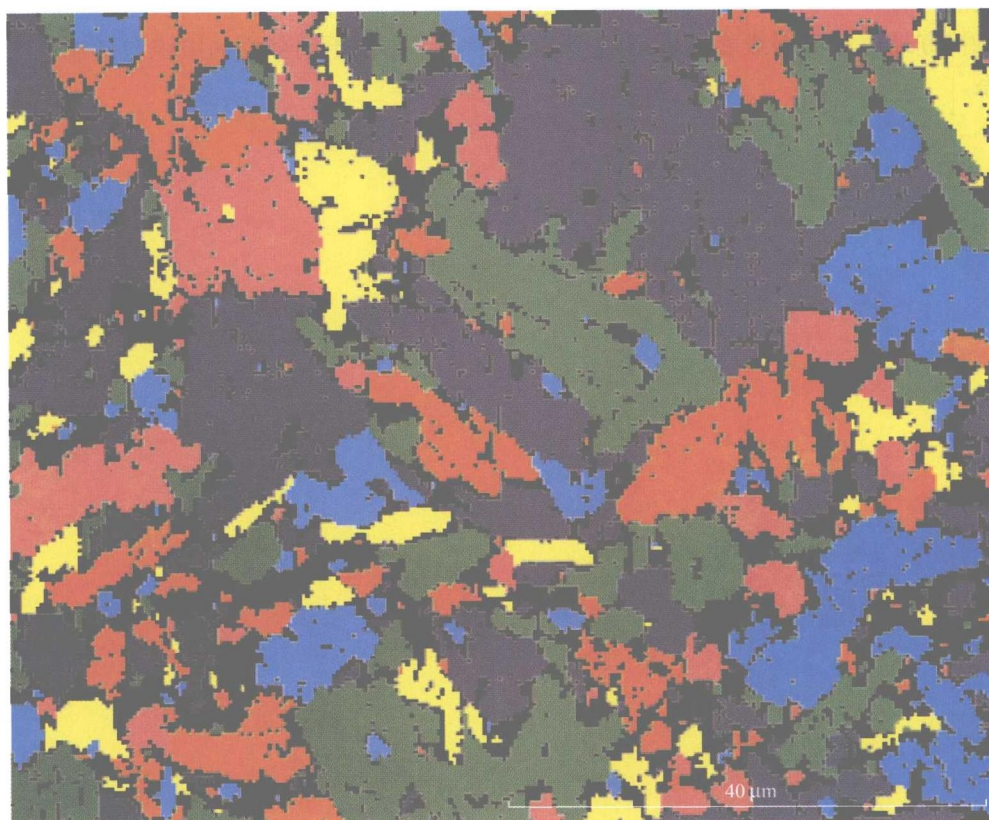
作 者：吴立新

工作单位：武汉钢铁（集团）公司研究院

研究对象：X80 管线钢

拍摄设备：Quanta 400 SEM

拍摄时间：2008 年 6 月



拍摄经历及技术背景：

对管线钢的研究表明，钢中重要的组织单元是有效晶粒，有效晶粒尺寸在不同组织中具有不同的概念和含义。在一般的铁素体-珠光体型管线钢中，多边形铁素体的晶粒直径就代表铁素体-珠光体型低碳钢的有效晶粒尺寸。因多边形铁素体晶界一般为大角度晶界，传统的硝酸酒精浸蚀法可很好地显示多边形铁素体的形状。在高钢级 X80 管线钢中，组织特征为针状铁素体。它呈不规则非多边形形状，

晶粒间界模糊，没有“完整”连续的晶界，晶粒度参差不一。晶粒间和晶内分布着极细小的岛状物（M-A 岛和渗碳体），晶粒中隐约可见亚晶条纹。TEM 下具有细微亚结构和高密度位错及部分细板条铁素体，传统腐蚀方法无力精确测量它。近十年发展起来的 EBSD（电子背散射衍射）装置，配合扫描电镜使用，对针状铁素体的有效晶粒尺寸的测量是行之有效的。本图像是在 1000 倍下以相邻晶粒取向差不小于 10° 为阈值用 EBSD 所作的针状铁素体有效晶粒分布图，它将原先模糊的晶界以取向差不小于 10° 为阈值作了界定，图中黑色块状区域为未解析相，是组织中的岛状物（M-A 岛或渗碳体）。统计测量结果表明：有效晶粒直径为 $3.57\ \mu\text{m}$ 。利用 EBSD 对针状铁素体有效晶粒尺寸的统计测量结果，可很好地解释高钢级管线钢热轧卷外圈、中圈、内圈不同部位的组织与性能的关系。

无碳化物贝氏体钢

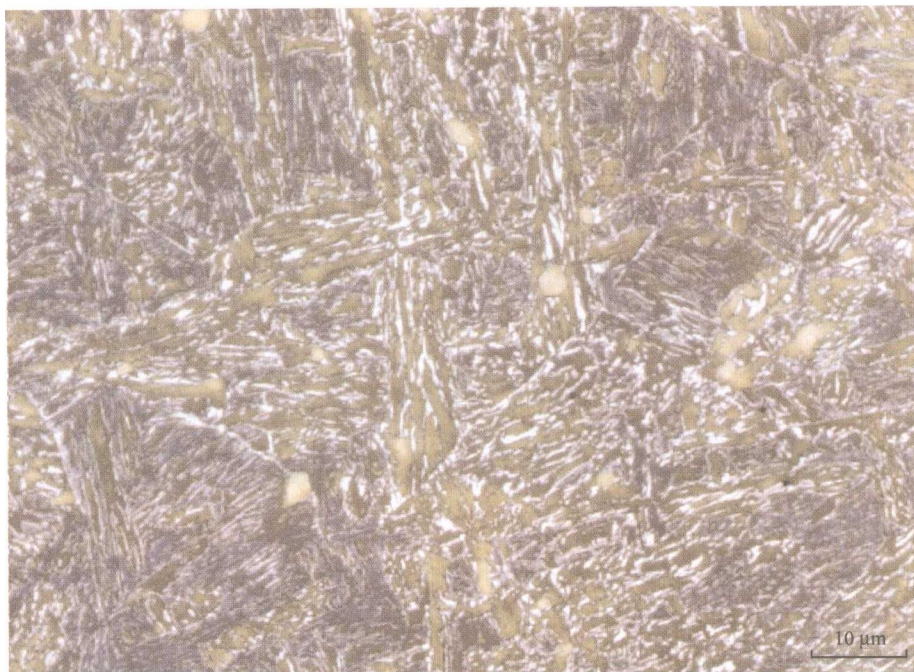
作 者：杨丽珠 徐道元 陈 斌 陈联满

工作单位：马鞍山钢铁股份有限公司技术中心

研究对象：20SiMn2MoV

拍摄设备：Axiovert-200MAT

拍摄时间：2005 年 2 月



拍摄经历及技术背景：

20SiMn2MoV 无碳化物贝氏体钢试样经 920℃ 加热水淬，室温组织为无碳化物贝氏体+少量粒状贝氏体+少量奥氏体。图中棕黄或棕红色为铁素体，蓝色为贝氏体，白色为奥氏体。

17CrNiMo 中板条马氏体的 Block 形态

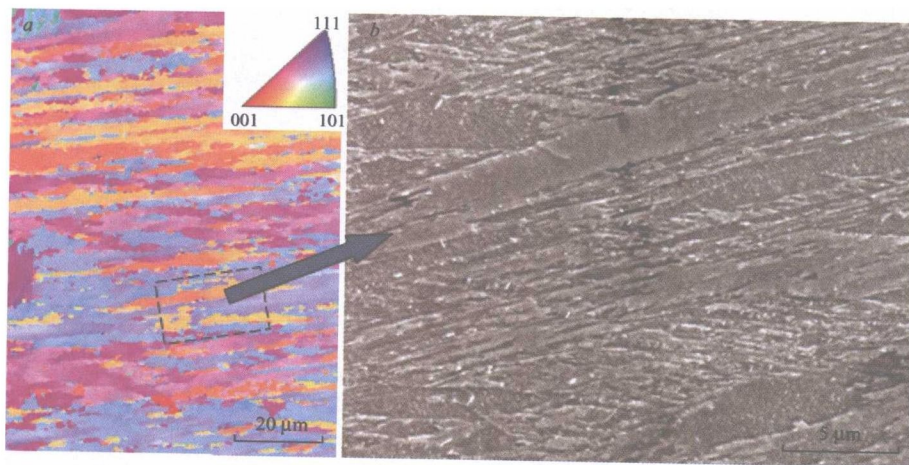
作者：王春芳

工作单位：钢铁研究总院结构材料研究所

研究对象：17CrNiMo 钢中淬火马氏体

拍摄设备：JEOL6500F 热场发射 SEM 和 EDAX/TSL 的 PEGASUS1200 集成的 EBSD/EDS 系统

拍摄时间：2005 年 11 月



拍摄经历及技术背景：

板条状马氏体是低、中碳钢，马氏体时效钢等铁系合金中形成的一种重要的马氏体组织。马氏体的强韧性较大程度依赖于 Packet 和 Block 尺寸。板条马氏体微结构的结晶学特征一直没有被完全阐释清楚。当前的观点是奥氏体晶粒被分成若干个 Packets（具有同一惯习面的板条束组），每一 Packet 被进一步分成 Blocks。20 世纪 90 年代以后，随着电子背散射衍射技术（EBSD）的发展，可以对晶界类型、取向位向差和结构及其分布进行观察、统计测定和定量分析从而使显微组织、微区成分与结晶学数据分析联系起来。本照片选用 17CrNiMo 淬火马氏体为研究对象，分析区域在一个 Packet。图 a 为一个 Packet 的晶体取向，图 b 为图 a 中黑色虚线框区域的 SEM 像。图 a、b 对照可以清晰看到取向完全不同（黄色和蓝色）的板条马氏体的形态，以及取向大致相同（蓝色）的板条马氏体板条形态。SEM 像在 HITACHI S-4300 获得，加速电压 15 kV。EBSD 测试在 JEOL6500F 热场发射 SEM 和 EDAX/TSL 的 PEGASUS1200 集成的 EBSD/EDS 系统中进行。SEM 加速电压 30 kV，入射束流 100 nA，工作距离 10 mm。EBSD 系统采用 DigiView1612CCD 相机收集 EBSD 花样，相机分辨率为 1300×1030。取向图步长 0.2 μm。