

中国金属学会 1979-1980年优秀论文选集



(第四分册)

中国金属学会 编

冶金工业出版社

中国金属学会

1979—1980年优秀论文选集

(第四分册)

中国金属学会 编

冶金工业出版社

中国金属学会
1979—1980年优秀论文选集

(第四分册)

中国金属学会 编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 23 字数 551 千字

1984年1月第一版 1984年1月第一次印刷

印数00,001~3,500册

统一书号: 15062·3949 定价2.40元

编者说明

中国金属学会于一九七八年十二月召开第三届全国代表大会以来,建立了三十个专业学术委员会,在中国科协和冶金部的领导下,团结了冶金界的广大科技工作者,紧密结合冶金工业生产建设和冶金科学技术发展的需要,积极开展了国内、国际学术活动,总结交流了冶金科研成果和生产技术经验;在双百方针的指导下,活跃了学术空气,提高了科学技术水平,对促进冶金科学技术的发展,做出了一定的贡献。

在一九七九年到一九八〇年几十次的学术活动中,广大的冶金科技工作者提出了几千篇学术论文,在学会各专业学术委员会召开的一系列学术会议上进行了交流和讨论。这些论文中有些在冶金科学理论上有新的创见;有些在技术、工艺上发现一些新的规律,有些总结了长期生产实践经验并将其提高到理论水平;还有些通过生产实践对我国资源开发和技术发展方针提出新的建议。两年来,由各学术委员会评选推荐,又经过学会办公室组织复审从中选出了较为优秀的论文七十四篇,编辑成《1979—1980年中国金属学会优秀论文集》。

这套《论文集》分为四个分册:第一分册包括冶金地质、采矿、选矿专业;第二分册包括轻有色金属、重有色金属、稀有金属、有色金属材料与加工、半导体材料、粉末冶金、炭素材料;第三分册包括炼焦化学、炼铁、炼钢、特殊钢、轧钢、铁合金、耐火材料;第四分册包括金属学及金属物理、冶金过程物理化学、热工与热能、冶金建筑、冶金设备、自动化、安全、环境保护、无损检测、理化检验。

本书为《选集》的第四分册,包括各方面的论文28篇。

此外,经审定的优秀论文中还有八篇因故未列入本《选集》,这8篇论文是:

1. 海相火山建造及其铁(铜)矿床的地质特征、评价标志和找矿方向
冶金部地质研究所 冶金部北京冶金地质研究所
2. 包头矿选矿综合利用新进展——浮选-选择性絮凝脱泥流程的研究与实践
冶金部矿冶研究总院 罗家珂
3. 根据我国铝资源特点走自己发展氧化铝生产技术的道路
冶金部沈阳铝镁设计院 陈岱等
4. 砂状氧化铝的分解及焙烧
郑州铝厂
5. 无筛板沸腾氯化新技术的研究
冶金部广州有色金属研究院 温旺光等
6. 提高钨铝丝质量的工艺研究
冶金部宝鸡有色金属研究所 李应泉
7. 超纯单晶锆的制备
冶金部有色金属研究总院
8. 对我国氧化铝生产节能问题的探讨
冶金部北京有色冶金设计研究总院 刘天齐

目 录

金 属 学

硼向奥氏体晶界的非平衡偏聚及其机制.....北京钢铁学院 贺信来 褚幼义 (1)
低碳铬镍钼钒钢中白点形成规律的研究

.....中国科学院金属研究所 刘民治 陈 廉 尹万全 刘盛炎 (21)
..... 苏会和 万耀光 柏森
.....鞍山钢铁公司 陈泉浴 刘守箴 刘仁才 范喜亮
王富山 魏景川 于开芝 张天俊

锆对Fe-Ni-Co-Cu系合金晶粒长大及性能的影响

.....清华大学金属材料教研组 马莒生 (56)

Cr含量对30CrNi5MoV钢“软化”效应的探讨

.....鲁肇俊 吴宝榕 吴佩芝 李桂芬 王琪 (69)
..... 卢鸿修 李雪缘 金钦乾 汪德根

冶金过程物理化学

液态CaO-SiO₂二元系渣中CaO和SiO₂的活度

.....中国科学院上海冶金研究所 周继程 邹元熾 赵彭年 李鸿明
.....中国科学院金属研究所 张子青 (83)

铁、镁、钛氧化物的氯化动力学研究

.....冶金工业部有色金属研究总院 虞宝煜 傅全林 张山环 刘淑珍 (92)

磷酸三丁酯及烷基氧化膦萃取铂族金属氯络酸的机理

.....冶金工业部贵金属研究所 陈景 杨正芬 崔宁 (97)

热 工 与 热 能

钢铁工业的节能方向和途径东北工学院 陆钟武 (109)

.....鞍山热能研究所 周大刚

烧结工序能耗分析及节能的途径鞍山黑色冶金矿山设计研究院 肖相材 (118)

关于降低铝电解电耗的一些理论观点东北工学院 沈时英 (147)

冶 金 建 筑

粘弹塑性波动法分析土层地震反应的某些特点和规律

.....冶金工业部建筑研究总院工程抗震研究室 王志良 周根寿 韩清宇 (157)

密实水玻璃耐酸混凝土冶金工业部建筑研究总院 张信鹏 (171)

冶 金 设 备

武钢1700热连轧机主传动系统测试研究

..... 中南矿冶学院箔材研究组 古可 钟掘 武钢热轧薄带厂 刘炳南 (175)
有阀型液压凿岩机有关问题的探讨

..... 北京钢铁学院矿机教研室液压凿岩机科研组 李大治 (194)

冶金自动化

采用液压缸压力反馈的热轧带钢轧机厚度自动控制 (AGC) 系统

..... 冶金工业部自动化研究所 马竹梧 胡自修 (203)

XCR-1型X射线测厚仪的研制 冶金自动化研究所 余式正 (215)

冶金安全

非铀金属矿山采空区中氢的析出和控制方法

..... 昆明工学院 赵梓成 湖南省第六研究所 张哲 冶金工业部安全技术研究

所 赵鹏 第二机械工业部第四设计院 李治 昆明冶金工业学校 周洵远 (222)

沸腾颗粒层除尘器研制报告

..... 冶金工业部安全技术研究所 湖北省鄂城钢铁厂 王能勤等 (231)

冶金环境保护

密闭型平面旋流文氏管的研究 冶金工业部建筑研究总院 李世龙 (244)

无损检验

YY-17型有色金属管材全自动涡流探伤方法及装备的研究

..... 上海有色金属研究所第五研究室涡流探伤课题组 袁振华 宋德泰 (252)

电磁超声探伤技术的研究

..... 冶金工业部钢铁研究总院 张广纯 赵景岐 (272)

A型超声图形描记仪的研制

..... 宝鸡有色金属加工厂 简大元 胡绍庭 陈百锁 (277)

理化检验

钢的恒应变控制低周疲劳的试验研究

..... 冶金工业部钢铁研究总院 曹用涛 姚常春 罗书尚 梁贵元 张庆华 (281)

用激光干涉法对低温热膨胀的测量

..... 冶金工业部有色金属研究总院 郭一玲 王惠英 高桂贤 黄丹桂 姚隆卿 (289)

辉光放电灯在光谱分析上的应用 中国科学院金属研究所光谱组 (299)

全差示光度法及其应用

..... 湖南冶金研究所 杜治坤 杨素卿 陈庆阳 宋现来 (307)

GD-1型脉冲扫描自动记录光栅单色仪的研制及应用

..... 冶金工业部有色金属研究总院 朴松燮 (343)

应用叠加电位—二次标准加入法测定镍基高温合金中痕量银

..... 冶金工业部钢铁研究总院 王海舟 陈铁光 李林湘 赵淑荣 (356)

金 属 学

硼向奥氏体晶界的非平衡偏聚及其机制

北京钢铁学院 贺信莱 褚幼义

一、引 言

1. 钢中加入微量硼能显著地提高钢的性能。例如, 往碳素结构钢中加入十万分之几的硼, 能使钢的淬透性成倍提高, 其作用效率比常用的最强合金元素铬还要大百倍, 这对于充分利用合金资源是极为重要的。硼加入不锈钢耐热钢和高温合金中, 能改善热加工性和抗蠕变性能, 以Udimet500镍基高温合金为例, 加入0.005%B, 可使晶界出现裂纹的时间由23小时推迟到214小时以上。在利用硼改善某些不锈钢的耐蚀性和中强度钢抗焊接热裂倾向等方面也取得了一定的效果。至于渗硼及含硼的多元共渗, 则是目前化学热处理中的一个正在发展的领域。此外, 硼还是原子能结构材料中的重要组分等等。硼的应用具有广阔的发展前景。

硼钢的发展已有较长历史, 早在二十世纪三十年代, 硼钢就开始工业生产。在美国, 由于战争的需要, 1952年硼钢生产曾达到70多万吨^[1], 但后来又大幅度下降。七十年代开始, 资本主义各国的硼钢生产又有新的发展。以美国为例, 1970年以来生产的碳素硼钢, 如表1所示, 逐年增长, 近年保持在7~8万吨左右, 已超过了铬—钒钢和镍钢的产量^[2]。1978年各类含硼钢的总量估计约为150万吨/年^[4]。

表 1 美国碳素硼钢的产量^[2]

年 份	1970	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
产量, 万吨	1.52	2.1	2.07	2.48	5.1	7.6	7.5	7.4

我国从1957年生产第一炉工业硼钢以来, 硼钢的生产和研究工作有很大的发展。含硼的调质钢和渗碳钢, 如50B、40MnB、25MnTiBRE、20MnVB、20Mn2TiB等钢种已广泛使用, 成为生产汽车和拖拉机等零件的重要钢种。我国合金结构钢标准YB6—71中列有17个含硼钢种, 是世界各国中最多的。近年来开展了关于冷变形硼钢的研究和应用。

然而硼钢的生产和使用并不是一帆风顺的。几十年来国外硼钢生产出现过几次大的起伏, 在我国也同样存在许多问题。主要是, 硼钢性能不如镍—铬钢稳定, 特别是硼提高淬透性的效用不稳定。它不但随冶炼工艺, 钢中B、C及其它元素的含量而异; 而且即使同一炉钢、硼的效用也会因热历史的差异而发生明显的变化, 甚至在某些条件下会使钢材变脆。此外, 硼钢的热处理变形规律不易掌握, 也给生产和使用带来不少困难。

硼钢生产中的上述问题, 长期以来得不到解决, 其根本原因在于对这样微量的硼在钢中发生作用的基本规律没有弄清。其主要障碍是由于硼的原子序数很低, 在钢中的含量又极微, 对它的分析研究缺乏有效的手段。自从六十年代末70年代初发展了硼的径迹显微照相技术以来, 人们才直接地观测到硼在钢中的显微分布状态。

数十年来,国内外对钢中的硼进行了大量的研究工作,特别是近十年来,有较大的进展。研究工作主要包括以下几方面:

- (1) 在各种条件下硼钢性能(特别是淬透性)的变化规律;
- (2) 硼在钢中的固溶度以及含硼相的结构和成分等基本参数的测定;
- (3) 不同类型硼钢中,硼的显微分布状态与钢的组织转变和性能的关系;
- (4) 硼在钢中存在状态,硼向奥氏体晶界的偏聚以及硼相析出规律等方面的基本研究。

我国大冶钢厂、冶金部钢铁研究总院等对40MnB钢的研究及硼在钢中固溶度的测定方法^[3,17];五二研究所等单位对钢中硼的分析方法;沈阳金属研究所对钢中各类硼相的组成及其存在范围等的研究^[5],都获得了一定的成果。清华大学、钢铁研究总院、本溪钢厂等曾对国内外有关硼钢的生产和研究情况的资料进行了系统总结和整理^[6,7]。1978年在贵阳召开的全国第二届结构钢经验交流会上,着重对硼钢进行了讨论^[8]。近年来,我们在国内首先应用并改进了硼的径迹显微照相技术^[9],对硼在50B、25MnTiB、40MnB钢以及低合金铸钢中的行为进行了研究,并对硼向奥氏体晶界的偏聚提出了新的试验结果和看法^[9~17]。

2. 微量硼在钢中的独特作用,与硼和晶体缺陷的相互作用,特别是与硼在晶界的行为密切相关。大量试验表明,硼提高淬透性的作用,主要是由于它抑制了铁素体在晶界形核的结果;硼对耐热钢性能的影响,可能与强化晶界的作用有关;至于含硼相在晶界析出的状态则会给钢的韧性带来显著的影响。因此,弄清微量硼在晶界的偏聚行为,是掌握硼在钢中作用规律的一个关键。

关于硼在奥氏体晶界的偏聚问题,有过许多研究。对其产生的机制,到目前为止可以区分为平衡偏聚和非平衡状态偏聚两类。平衡偏聚是传统的观点,多年来人们认为硼是一个强烈的表面活性元素,高温时偏聚在奥氏体晶界上(内吸附现象),使晶界能降低,从而抑制了铁素体的成核^[18~20]。对于这种典型的晶界平衡偏聚现象,其晶界偏聚量应服从这样的关系式^[21]:

$$Cd \approx ACe^{Q/RT}$$

式中 Q 是硼原子与晶界的结合能; Cd 和 C 分别是硼在晶界和晶内的浓度; A 是与振动熵有关的常数。

可见,这种热力学晶界平衡偏聚的特征是:(1)当溶质浓度不变时,在一定温度下有一定的平衡晶界偏聚量;(2)温度升高,晶界偏聚量按指数规律下降,当温度高到一定数值以上时,这种偏聚趋于消失。

1972年,Jandeska等用径迹显微照相技术,试图测定晶界偏聚量与温度的关系,以求出硼的晶界结合能^[22]。

这种观点遇到了许多困难。早在1955年Adair^[23]用真空热蚀法测定晶界能,发现加硼与不加硼钢的晶界能差别很小,最大仅3.5%。这样小的能量差会对淬透性产生巨大的影响吗?为了解决这个问题,1977年Morral用假定新相核心呈球冠状,来说明即使晶界能降低很小,也会对新相形核率产生较大的影响^[24]。

Ueno、Keown、Gladman等近年的工作^[25~27]指出,含硼钢高温加热快速淬火时,在奥氏体晶界上看不到硼的偏聚,而在较慢冷却时,则可以看到。因此他们采用了Grange

等^[20]早年提出的,在冷却过程中形成硼偏聚的看法。Sharma等^[28]则用共格硼相锁住晶界的模型来说明对新相形核的影响。

近几年来,Williams等^[29]、Keown等^[30]和我们^[9]的工作,采用径迹显微照相技术研究硼在晶界的偏聚行为,发现了许多新的试验现象。表明硼在奥氏体晶界的偏聚不符合平衡偏聚的基本规律。提出了淬火过程中过饱和空位带着硼向奥氏体晶界迁移,从而发生晶界非平衡偏聚的设想。但未能给予充分的论证和具体的原子机构的说明。本文的目的,是试图用比较系统的试验,充分地论证并定量地揭示出淬火过程中硼向奥氏体晶界发生的非平衡偏聚及其规律;并通过对试验结果的数学处理,进一步探讨非平衡偏聚的可能原子机制。

二、试验材料与方法

试验选用了常用的50B和25MnTiB钢。

50B钢由5吨电弧炉冶炼,用铝终脱氧,加钛铁后加硼铁,钢锭经开坯热轧成 $\phi 28$ 圆棒,棒材取样分析成分为: C0.54%, Mn0.75%, Si0.31%, Ti0.035%, Al0.017%, B₀0.0027%。

25MnTiB钢由200公斤真空感应炉熔炼,试样锻成 $\phi 10$ 圆棒,成分为: C0.24%, Mn1.33%, Si0.35%, Ti0.093%, B₀0.0027%。

试棒先经高温正火处理,25MnTiB钢在980°C加热2小时,50B钢在950°C加热1小时。

采用改进的径迹显微照相技术,直接显示硼在钢中的分布,灵敏度达到1ppm左右,其显微分辨率约为2微米,用醋酸纤维作为探测薄膜,单位面积中子辐照积分通量采用 1×10^{13} 和 4×10^{14} 中子数/厘米²二种。在低通量下便于对晶界偏聚量进行统计分析;在高通量下较易区分硼的偏聚与析出状态,并便于显示和测定贫硼区的宽度。该方法的细节及其改进请见文献[10, 14]。

采用Leitz TAS型图象分析仪进行定量统计。

三、试验程序和结果

在840~1150°C范围内进行了顶端淬火试验。结果表明,加硼使这二种钢的半马氏体距离增加1倍左右。50钢相应于HRC43的距离由4.5~5.5毫米增加到8.8~10.5毫米;25MnTi钢相应于HRC36的距离由6.5~8.5毫米增加到11.0~15.5毫米。淬透性的提高,显然与硼在晶界的分布状态密切相关。观察在半马氏体距离增加的范围内,硼的分布(如图1所示)有如下特点:

(1) 在奥氏体晶界上显示有明显的硼富集带,其宽度在3微米左右,这种偏聚局部已开始向聚集和析出发展;

(2) 在晶界硼富集带二侧出现有硼的贫化区,其宽度在10微米左右。

为了弄清这种偏聚的由来和发展,设计和进行了下述试验。

1. 小试样真空加热淬火

将 $\phi 10 \times 2$ 毫米的薄片试样,真空密封在石英管中,在不同温度下加热保温后取出,

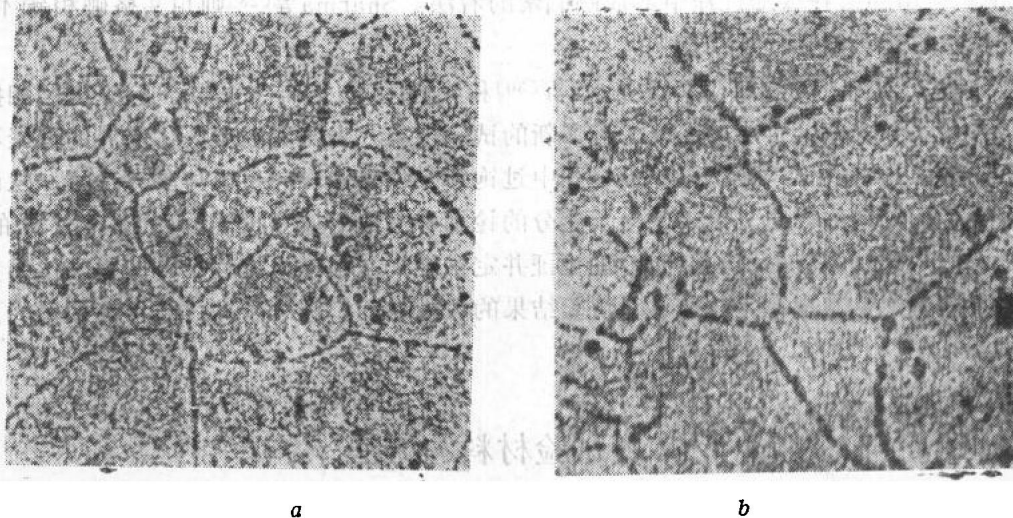


图 1 50B钢950°C顶端淬火试样上的硼分布 ×280
a—离顶端6毫米；b—离顶端7.5毫米

击碎石英管在水或冰碱水中淬火。这样处理可以防止加热时的脱硼和氧化，并获得高的冷却速度。试验结果如图 2 所示，快速冷却可以抑制硼在奥氏体晶界的偏聚。表明图1中显示的这种偏聚在高温保温时并不存在，而是在冷却过程中产生的。

2. 冷却速度的影响

采用顶端淬火试样和金相试样在不同介质中冷却的方法，研究冷却速度对硼在奥氏体

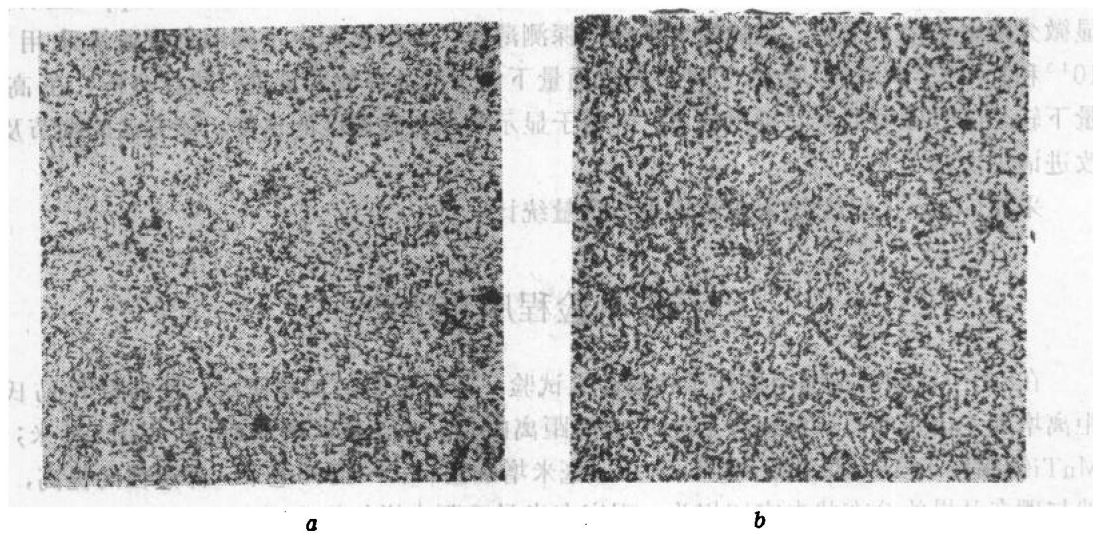


图 2 50B钢降温950°C小试样真空加热淬火 ×280
a—冰碱淬；b—水淬

表 2 顶淬试样上离顶端不同距离处的冷却速度

离顶端距离，毫米	0.5	1	2	3	4.5	6	7.5	9	12
冷速，℃/秒	>450	>450	230	105	55	42	30	25	16.5



晶界偏聚的影响。如表 2 所示,在端淬试样上,随离顶端距离的增加,冷却速度不断减小,图 3 上示出了 50B 钢 1150°C 顶淬试样中硼分布的变化。

由图可以看出,硼在奥氏体晶界的偏聚程度随冷却速度降低而加剧。在离顶端 0.5~1 毫米处,径迹显微照相仅能发现晶界有比较微弱的偏聚,在 0.5 毫米处还不能勾画出完整的晶粒来。在 2~3 毫米处,硼在晶界上的偏聚已明显发展成沿晶界的连续蚀坑带。距离增加到 4.5~6 毫米处,硼在晶界的偏聚进一步增加,偏聚带加宽,并开始由连续的蚀坑带向不连续的聚集状态发展。距离更远时,局部聚集发展为沿晶析出,在 12 毫米处已可明显地发现细微的沿晶硼析出相。

与此同时,晶界二侧贫硼区的宽度也发生明显变化。冷却速度增加,贫硼区缩小,直至分辨不清。这种偏聚带与贫硼区的变化规律在其它温度淬火时也相类似,只是变化的速度有所不同。

3. 淬火加热温度的影响

采用两种热处理制度,如图 4 所示,一种是将试棒分别加热到不同温度,保温 30 分钟后水淬,称为升温处理;另一种是将全部试样均先加热到 1150°C 保温 30 分钟后,分别炉冷到不同温度保温 20 分钟水淬,称为降温处理,这类试样有相同的较大奥氏体晶粒。各试样的淬火温度和冷却速度列于表 3。硼的分布特征如图 5 和 6 所示。

由图可以看出(1)所试验的 50B 钢在 950°C 以上,25MnTiB 钢在 920°C 以上,碳化物基本全溶,与文献报导一致^[5,20];温度继续升高,径迹照相上基体蚀坑密度不再增加,固溶硼量不再变化。

(2)不论是升温还是降温处理,随淬火温度升高、晶界偏聚程度加剧,并逐步向不连续的聚集和析出状态发展。与晶界平衡偏聚的预言相反,这种变化在碳化物完全溶解的温度以上仍明显地存在。

(3)晶界富集带和贫硼区宽度,随淬火温度升高而增加。

4. 定量统计分析

为了定量地描述硼向奥氏体晶界的偏聚过程,对所获得的径迹显微照相进行了定量统计分析。它的基本原理是:单位面积上的蚀坑数目(蚀坑密度) $\rho = E \cdot \Phi \cdot B$ 。式中 Φ 是中子辐照积分通量; B 是试样对应地区的含硼量; E 是与试验条件有关的常数。曾将试样沿表面深度蚀坑密度的变化与逐层化学分析结果进行对照,证实过这个关系。采用同一试样对不同地区蚀坑密度的相对变化进行统计,可以排除试验条件,即 E 值变化的影响,对于本研究来说获得含硼量的绝对值并不重要。此外,在蚀刻程度上力求获得相似的蚀坑尺寸,蚀坑所占的面积百分数控制在 20~40% 范围内,并利用下式进行蚀坑重叠校正^[31]。

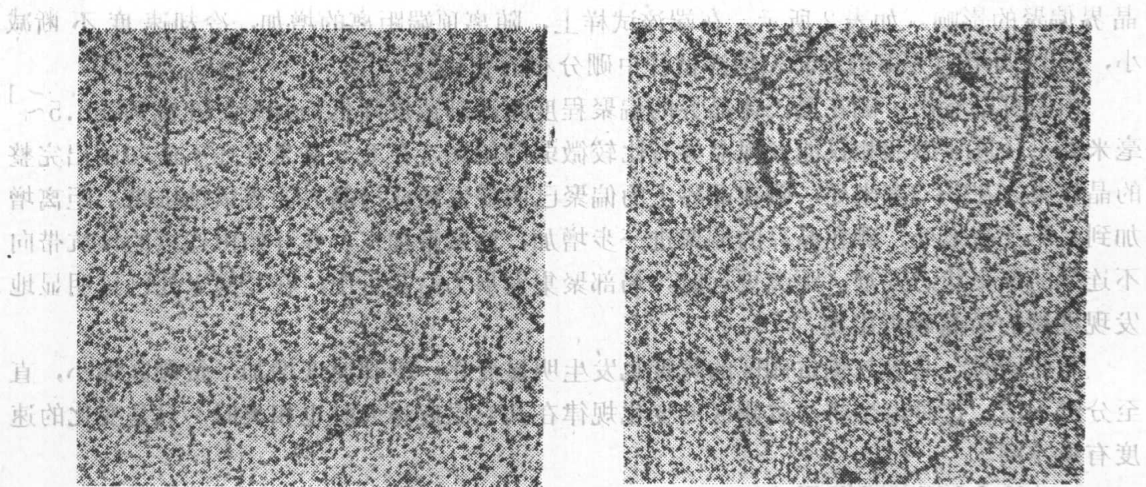
$$\rho = -[\ln(1 - \rho' \alpha)] / \alpha$$

式中 ρ' 是表观径迹密度; ρ 是真实径迹密度; α 是不重叠时单个蚀坑所占的面积。

定量统计 I: 首先研究晶界偏聚与贫硼区的关系。把晶界附近的蚀坑密度(富硼带加上两侧贫硼区的平均蚀坑密度)与晶内蚀坑密度进行对比。因为晶界富硼带中硼含量高,所以试验采用较低的中子辐照通量。取

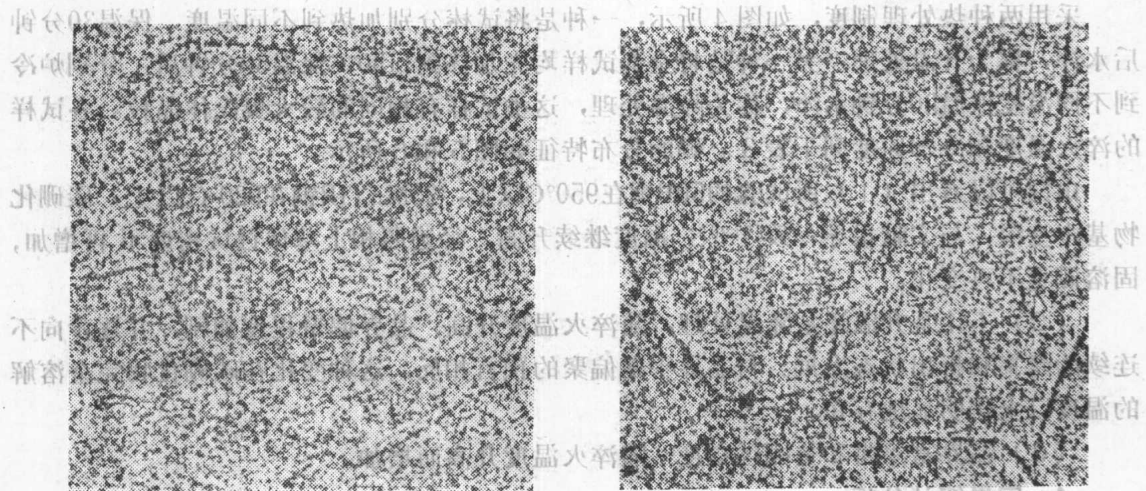
$$K = \frac{\text{晶界区(包括贫硼区在内)的蚀坑密度}}{\text{晶内蚀坑密度}}$$

25MnTiB 钢的结果如表 4 所示^[9]。在不同的淬火温度下 K 值都接近 1, 表明晶界上富集



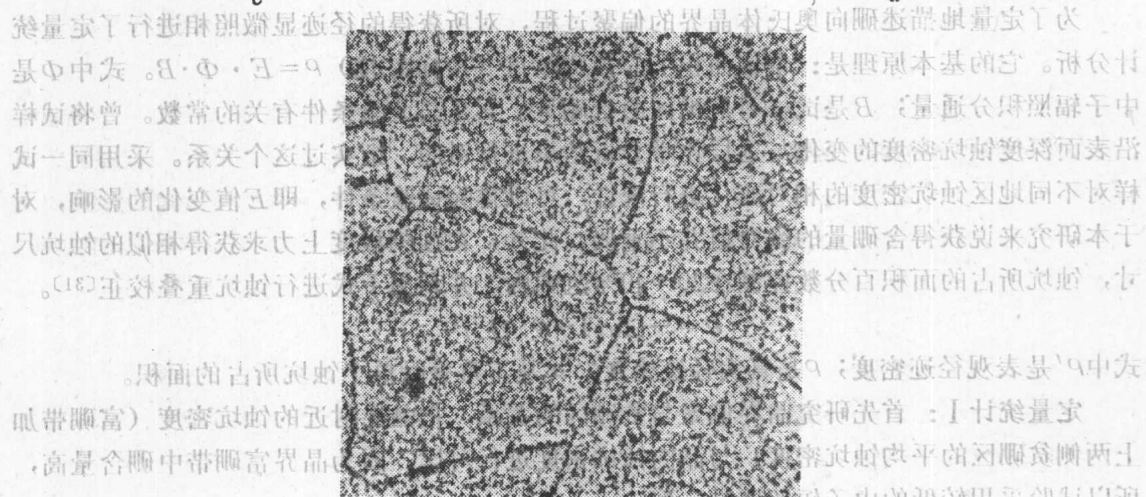
a

b



c

d



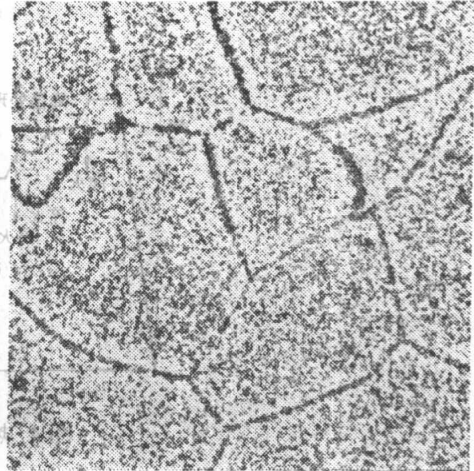
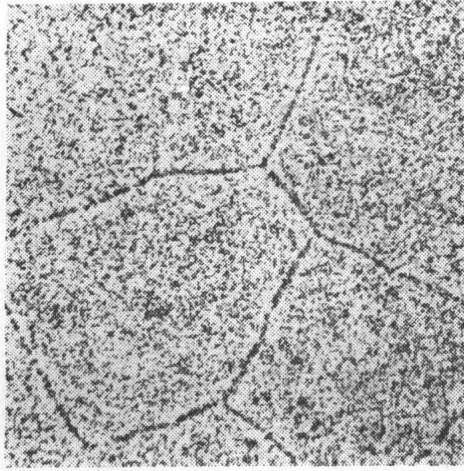
奥氏体晶粒 (内层为奥氏体晶粒)

奥氏体晶粒

图 3 50B 钢 1150°C 顶端淬火后离

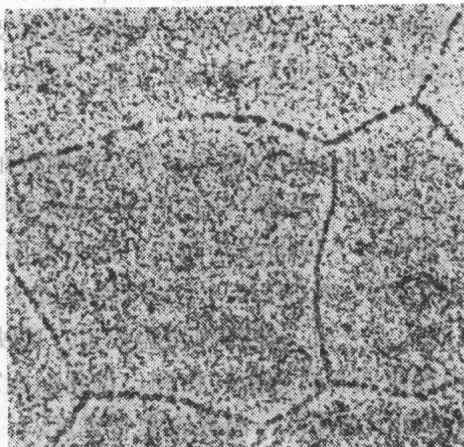
a—0.5 毫米; b—1 毫米; c—2 毫米; d—3 毫米; e—9 毫米;

奥氏体晶粒 (内层为奥氏体晶粒) 奥氏体晶粒



晶体的奥氏体中生长时，高温度晶火率。来而求富习脚登脚两界品由中生长时，晶脚前
 应习基升变的通宽习脚登脚两界品由中生长时，晶脚前
 要必以平此技术五中端文

●付登量宝。面陪公如脚前
 平，界品到一前斗米毫02量
 五自自。米毫2在登火率
 一同，得前前前个单火，
 出。前高前量前含少前下火
 面陪公如壁典前示前 (0) 5
 。V\、V 更前前量习升登味



Sto. I 用：I 付登量宝
 照显显显显显显显显显显
 带空米毫20×02界品干行
 而古更更更更更更更更更更
 更更更更更更更更更更更更
 晶火V\、V\、V量含前前
 品宝前前前前前前前前前前
 其，其，其，其，其，其，其，其

界品各是。图。0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 4.0 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 5.0 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 6.0 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 7.0 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7 7.8 7.9 8.0 8.1 8.2 8.3 8.4 8.5 8.6 8.7 8.8 8.9 9.0 9.1 9.2 9.3 9.4 9.5 9.6 9.7 9.8 9.9 10.0 10.1 10.2 10.3 10.4 10.5 10.6 10.7 10.8 10.9 11.0 11.1 11.2 11.3 11.4 11.5 11.6 11.7 11.8 11.9 12.0 12.1 12.2 12.3 12.4 12.5 12.6 12.7 12.8 12.9 13.0 13.1 13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7 13.8 13.9 14.0 14.1 14.2 14.3 14.4 14.5 14.6 14.7 14.8 14.9 15.0 15.1 15.2 15.3 15.4 15.5 15.6 15.7 15.8 15.9 16.0 16.1 16.2 16.3 16.4 16.5 16.6 16.7 16.8 16.9 17.0 17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 18.0 18.1 18.2 18.3 18.4 18.5 18.6 18.7 18.8 18.9 19.0 19.1 19.2 19.3 19.4 19.5 19.6 19.7 19.8 19.9 20.0 20.1 20.2 20.3 20.4 20.5 20.6 20.7 20.8 20.9 21.0 21.1 21.2 21.3 21.4 21.5 21.6 21.7 21.8 21.9 22.0 22.1 22.2 22.3 22.4 22.5 22.6 22.7 22.8 22.9 23.0 23.1 23.2 23.3 23.4 23.5 23.6 23.7 23.8 23.9 24.0 24.1 24.2 24.3 24.4 24.5 24.6 24.7 24.8 24.9 25.0 25.1 25.2 25.3 25.4 25.5 25.6 25.7 25.8 25.9 26.0 26.1 26.2 26.3 26.4 26.5 26.6 26.7 26.8 26.9 27.0 27.1 27.2 27.3 27.4 27.5 27.6 27.7 27.8 27.9 28.0 28.1 28.2 28.3 28.4 28.5 28.6 28.7 28.8 28.9 29.0 29.1 29.2 29.3 29.4 29.5 29.6 29.7 29.8 29.9 30.0 30.1 30.2 30.3 30.4 30.5 30.6 30.7 30.8 30.9 31.0 31.1 31.2 31.3 31.4 31.5 31.6 31.7 31.8 31.9 32.0 32.1 32.2 32.3 32.4 32.5 32.6 32.7 32.8 32.9 33.0 33.1 33.2 33.3 33.4 33.5 33.6 33.7 33.8 33.9 34.0 34.1 34.2 34.3 34.4 34.5 34.6 34.7 34.8 34.9 35.0 35.1 35.2 35.3 35.4 35.5 35.6 35.7 35.8 35.9 36.0 36.1 36.2 36.3 36.4 36.5 36.6 36.7 36.8 36.9 37.0 37.1 37.2 37.3 37.4 37.5 37.6 37.7 37.8 37.9 38.0 38.1 38.2 38.3 38.4 38.5 38.6 38.7 38.8 38.9 39.0 39.1 39.2 39.3 39.4 39.5 39.6 39.7 39.8 39.9 40.0 40.1 40.2 40.3 40.4 40.5 40.6 40.7 40.8 40.9 41.0 41.1 41.2 41.3 41.4 41.5 41.6 41.7 41.8 41.9 42.0 42.1 42.2 42.3 42.4 42.5 42.6 42.7 42.8 42.9 43.0 43.1 43.2 43.3 43.4 43.5 43.6 43.7 43.8 43.9 44.0 44.1 44.2 44.3 44.4 44.5 44.6 44.7 44.8 44.9 45.0 45.1 45.2 45.3 45.4 45.5 45.6 45.7 45.8 45.9 46.0 46.1 46.2 46.3 46.4 46.5 46.6 46.7 46.8 46.9 47.0 47.1 47.2 47.3 47.4 47.5 47.6 47.7 47.8 47.9 48.0 48.1 48.2 48.3 48.4 48.5 48.6 48.7 48.8 48.9 49.0 49.1 49.2 49.3 49.4 49.5 49.6 49.7 49.8 49.9 50.0 50.1 50.2 50.3 50.4 50.5 50.6 50.7 50.8 50.9 51.0 51.1 51.2 51.3 51.4 51.5 51.6 51.7 51.8 51.9 52.0 52.1 52.2 52.3 52.4 52.5 52.6 52.7 52.8 52.9 53.0 53.1 53.2 53.3 53.4 53.5 53.6 53.7 53.8 53.9 54.0 54.1 54.2 54.3 54.4 54.5 54.6 54.7 54.8 54.9 55.0 55.1 55.2 55.3 55.4 55.5 55.6 55.7 55.8 55.9 56.0 56.1 56.2 56.3 56.4 56.5 56.6 56.7 56.8 56.9 57.0 57.1 57.2 57.3 57.4 57.5 57.6 57.7 57.8 57.9 58.0 58.1 58.2 58.3 58.4 58.5 58.6 58.7 58.8 58.9 59.0 59.1 59.2 59.3 59.4 59.5 59.6 59.7 59.8 59.9 60.0 60.1 60.2 60.3 60.4 60.5 60.6 60.7 60.8 60.9 61.0 61.1 61.2 61.3 61.4 61.5 61.6 61.7 61.8 61.9 62.0 62.1 62.2 62.3 62.4 62.5 62.6 62.7 62.8 62.9 63.0 63.1 63.2 63.3 63.4 63.5 63.6 63.7 63.8 63.9 64.0 64.1 64.2 64.3 64.4 64.5 64.6 64.7 64.8 64.9 65.0 65.1 65.2 65.3 65.4 65.5 65.6 65.7 65.8 65.9 66.0 66.1 66.2 66.3 66.4 66.5 66.6 66.7 66.8 66.9 67.0 67.1 67.2 67.3 67.4 67.5 67.6 67.7 67.8 67.9 68.0 68.1 68.2 68.3 68.4 68.5 68.6 68.7 68.8 68.9 69.0 69.1 69.2 69.3 69.4 69.5 69.6 69.7 69.8 69.9 70.0 70.1 70.2 70.3 70.4 70.5 70.6 70.7 70.8 70.9 71.0 71.1 71.2 71.3 71.4 71.5 71.6 71.7 71.8 71.9 72.0 72.1 72.2 72.3 72.4 72.5 72.6 72.7 72.8 72.9 73.0 73.1 73.2 73.3 73.4 73.5 73.6 73.7 73.8 73.9 74.0 74.1 74.2 74.3 74.4 74.5 74.6 74.7 74.8 74.9 75.0 75.1 75.2 75.3 75.4 75.5 75.6 75.7 75.8 75.9 76.0 76.1 76.2 76.3 76.4 76.5 76.6 76.7 76.8 76.9 77.0 77.1 77.2 77.3 77.4 77.5 77.6 77.7 77.8 77.9 78.0 78.1 78.2 78.3 78.4 78.5 78.6 78.7 78.8 78.9 79.0 79.1 79.2 79.3 79.4 79.5 79.6 79.7 79.8 79.9 80.0 80.1 80.2 80.3 80.4 80.5 80.6 80.7 80.8 80.9 81.0 81.1 81.2 81.3 81.4 81.5 81.6 81.7 81.8 81.9 82.0 82.1 82.2 82.3 82.4 82.5 82.6 82.7 82.8 82.9 83.0 83.1 83.2 83.3 83.4 83.5 83.6 83.7 83.8 83.9 84.0 84.1 84.2 84.3 84.4 84.5 84.6 84.7 84.8 84.9 85.0 85.1 85.2 85.3 85.4 85.5 85.6 85.7 85.8 85.9 86.0 86.1 86.2 86.3 86.4 86.5 86.6 86.7 86.8 86.9 87.0 87.1 87.2 87.3 87.4 87.5 87.6 87.7 87.8 87.9 88.0 88.1 88.2 88.3 88.4 88.5 88.6 88.7 88.8 88.9 89.0 89.1 89.2 89.3 89.4 89.5 89.6 89.7 89.8 89.9 90.0 90.1 90.2 90.3 90.4 90.5 90.6 90.7 90.8 90.9 91.0 91.1 91.2 91.3 91.4 91.5 91.6 91.7 91.8 91.9 92.0 92.1 92.2 92.3 92.4 92.5 92.6 92.7 92.8 92.9 93.0 93.1 93.2 93.3 93.4 93.5 93.6 93.7 93.8 93.9 94.0 94.1 94.2 94.3 94.4 94.5 94.6 94.7 94.8 94.9 95.0 95.1 95.2 95.3 95.4 95.5 95.6 95.7 95.8 95.9 96.0 96.1 96.2 96.3 96.4 96.5 96.6 96.7 96.8 96.9 97.0 97.1 97.2 97.3 97.4 97.5 97.6 97.7 97.8 97.9 98.0 98.1 98.2 98.3 98.4 98.5 98.6 98.7 98.8 98.9 99.0 99.1 99.2 99.3 99.4 99.5 99.6 99.7 99.8 99.9 100.0 100.1 100.2 100.3 100.4 100.5 100.6 100.7 100.8 100.9 101.0 101.1 101.2 101.3 101.4 101.5 101.6 101.7 101.8 101.9 102.0 102.1 102.2 102.3 102.4 102.5 102.6 102.7 102.8 102.9 103.0 103.1 103.2 103.3 103.4 103.5 103.6 103.7 103.8 103.9 104.0 104.1 104.2 104.3 104.4 104.5 104.6 104.7 104.8 104.9 105.0 105.1 105.2 105.3 105.4 105.5 105.6 105.7 105.8 105.9 106.0 106.1 106.2 106.3 106.4 106.5 106.6 106.7 106.8 106.9 107.0 107.1 107.2 107.3 107.4 107.5 107.6 107.7 107.8 107.9 108.0 108.1 108.2 108.3 108.4 108.5 108.6 108.7 108.8 108.9 109.0 109.1 109.2 109.3 109.4 109.5 109.6 109.7 109.8 109.9 110.0 110.1 110.2 110.3 110.4 110.5 110.6 110.7 110.8 110.9 111.0 111.1 111.2 111.3 111.4 111.5 111.6 111.7 111.8 111.9 112.0 112.1 112.2 112.3 112.4 112.5 112.6 112.7 112.8 112.9 113.0 113.1 113.2 113.3 113.4 113.5 113.6 113.7 113.8 113.9 114.0 114.1 114.2 114.3 114.4 114.5 114.6 114.7 114.8 114.9 115.0 115.1 115.2 115.3 115.4 115.5 115.6 115.7 115.8 115.9 116.0 116.1 116.2 116.3 116.4 116.5 116.6 116.7 116.8 116.9 117.0 117.1 117.2 117.3 117.4 117.5 117.6 117.7 117.8 117.9 118.0 118.1 118.2 118.3 118.4 118.5 118.6 118.7 118.8 118.9 119.0 119.1 119.2 119.3 119.4 119.5 119.6 119.7 119.8 119.9 120.0 120.1 120.2 120.3 120.4 120.5 120.6 120.7 120.8 120.9 121.0 121.1 121.2 121.3 121.4 121.5 121.6 121.7 121.8 121.9 122.0 122.1 122.2 122.3 122.4 122.5 122.6 122.7 122.8 122.9 123.0 123.1 123.2 123.3 123.4 123.5 123.6 123.7 123.8 123.9 124.0 124.1 124.2 124.3 124.4 124.5 124.6 124.7 124.8 124.9 125.0 125.1 125.2 125.3 125.4 125.5 125.6 125.7 125.8 125.9 126.0 126.1 126.2 126.3 126.4 126.5 126.6 126.7 126.8 126.9 127.0 127.1 127.2 127.3 127.4 127.5 127.6 127.7 127.8 127.9 128.0 128.1 128.2 128.3 128.4 128.5 128.6 128.7 128.8 128.9 129.0 129.1 129.2 129.3 129.4 129.5 129.6 129.7 129.8 129.9 130.0 130.1 130.2 130.3 130.4 130.5 130.6 130.7 130.8 130.9 131.0 131.1 131.2 131.3 131.4 131.5 131.6 131.7 131.8 131.9 132.0 132.1 132.2 132.3 132.4 132.5 132.6 132.7 132.8 132.9 133.0 133.1 133.2 133.3 133.4 133.5 133.6 133.7 133.8 133.9 134.0 134.1 134.2 134.3 134.4 134.5 134.6 134.7 134.8 134.9 135.0 135.1 135.2 135.3 135.4 135.5 135.6 135.7 135.8 135.9 136.0 136.1 136.2 136.3 136.4 136.5 136.6 136.7 136.8 136.9 137.0 137.1 137.2 137.3 137.4 137.5 137.6 137.7 137.8 137.9 138.0 138.1 138.2 138.3 138.4 138.5 138.6 138.7 138.8 138.9 139.0 139.1 139.2 139.3 139.4 139.5 139.6 139.7 139.8 139.9 140.0 140.1 140.2 140.3 140.4 140.5 140.6 140.7 140.8 140.9 141.0 141.1 141.2 141.3 141.4 141.5 141.6 141.7 141.8 141.9 142.0 142.1 142.2 142.3 142.4 142.5 142.6 142.7 142.8 142.9 143.0 143.1 143.2 143.3 143.4 143.5 143.6 143.7 143.8 143.9 144.0 144.1 144.2 144.3 144.4 144.5 144.6 144.7 144.8 144.9 145.0 145.1 145.2 145.3 145.4 145.5 145.6 145.7 145.8 145.9 146.0 146.1 146.2 146.3 146.4 146.5 146.6 146.7 146.8 146.9 147.0 147.1 147.2 147.3 147.4 147.5 147.6 147.7 147.8 147.9 148.0 148.1 148.2 148.3 148.4 148.5 148.6 148.7 148.8 148.9 149.0 149.1 149.2 149.3 149.4 149.5 149.6 149.7 149.8 149.9 150.0 150.1 150.2 150.3 150.4 150.5 150.6 150.7 150.8 150.9 151.0 151.1 151.2 151.3 151.4 151.5 151.6 151.7 151.8 151.9 152.0 152.1 152.2 152.3 152.4 152.5 152.6 152.7 152.8 152.9 153.0 153.1 153.2 153.3 153.4 153.5 153.6 153.7 153.8 153.9 154.0 154.1 154.2 154.3 154.4 154.5 154.6 154.7 154.8 154.9 155.0 155.1 155.2 155.3 155.4 155.5 155.6 155.7 155.8 155.9 156.0 156.1 156.2 156.3 156.4 156.5 156.6 156.7 156.8 156.9 157.0 157.1 157.2 157.3 157.4 157.5 157.6 157.7 157.8 157.9 158.0 158.1 158.2 158.3 158.4 158.5 158.6 158.7 158.8 158.9 159.0 159.1 159.2 159.3 159.4 159.5 159.6 159.7 159.8 159.9 160.0 160.1 160.2 160.3 160.4 160.5 160.6 160.7 160.8 160.9 161.0 161.1 161.2 161.3 161.4 161.5 161.6 161.7 161.8 161.9 162.0 162.1 162.2 162.3 162.4 162.5 162.6 162.7 162.8 162.9 163.0 163.1 163.2 163.3 163.4 163.5 163.6 163.7 163.8 163.9 164.0 164.1 164.2 164.3 164.4 164.5 164.6 164.7 164.8 164.9 165.0 165.1 165.2 165.3 165.4 165.5 165.6 165.7 165.8 165.9 166.0 166.1 166.2 166.3 166.4 166.5 166.6 166.7 166.8 166.9 167.0 167.1 167.2 167.3 167.4 167.5 167.6 167.7 167.8 167.9 168.0 168.1 168.2 168.3 168.4 168.5 168.6 168.7 168.8 168.9 169.0 169.1 169.2 169.3 169.4 169.5 169.6 169.7 169.8 169.9 170.0 170.1 170.2 170.3 170.4 170.5 170.6 170.7 170.8 170.9 171.0 171.1 171.2 171.3 171.4 171.5 171.6 171.7 171.8 171.9 172.0 172.1 172.2 172.3 172.4 172.5 172.6 172.7 172.8 172.9 173.0 173.1 173.2 173.3 173.4 173.5 173.6 173.7 173.8 173.9 174.0 174.1 174.2 174.3 174.4 174.5 174.6 174.7 174.8 174.9 175.0 175.1 175.2 175.3 175.4 175.5 175.6 175.7 175.8 175.9 176.0 176.1 176.2 176.3 176.4 176.5 176.6 176.7 176.8 176.9 177.0 177.1 177.2 177.3 177.4 177.5 177.6 177.7 177.8 177.9 178.0 178.1 178.2 178.3 178.4 178.5 178.6 178.7 178.8 178.9 179.0 179.1 179.2 179.3 179.4 179.5 179.6 179.7 179.8 179.9 180.0 180.1 180.2 180.3 180.4 180.5 180.6 180.7 180.8 180.9 181.0 181.1 181.2 181.3 181.4 181.5 181.6 181.7 181.8 181.9 182.0 182.1 182.2 182.3 182.4 182.5 182.6 182.7 182.8 182.9 183.0 183.1 183.2 183.3 183.4 183.5 183.6 183.7 183.8 183.9 184.0 184.1 184.2 184.3 184.4 184.5 184.6 184.7 184.8 184.9 185.0 185.1 185.2 185.3 185.4 185.5 185.6 185.7 185.8 185.9 186.0 186.1 186.2 186.3 186.4 186.5 186.6 186.7 186.8 186.9 187.0 187.1 187.2 187.3 187.4 187.5 187.6 187.7 187.8 187.9 188.0 188.1 188.2 188.3 188.4 188.5 188.6 188.7 188.8 188.9 189.0 189.1 189.2 189.3 189.4 189.5 189.6 189.7 189.8 189.9 190.0 190.1 190.2 190.3 190.4 190.5 190.6 190.7 190.8 190.9 191.0 191.1 191.2 191.3 191.4 191.5 191.6 191.7 191.8 191.9 192.0 192.1 192.2 192.3 192.4 192.5 192.6 192.7 192.8 192.9 193.0 193.1 193.2 193.3 193.4 193.5 193.6 193.7 193.8 193.9 194.0 194.1 194.2 194.3 194.4 194.5 194.6 194.7 194.8 194.9 195.0 195.1 195.2 195.3 195.4 195.5 195.6 195.7 195.8 195.9 196.0 196.1 196.2 196.3 196.4 196.5 196.6 196.7 196.8 196.9 197.0 197.1 197.2 197.3 197.4 197.5 197.6 197.7 197.8 197.9 198.0 198.1 198.2 198.3 198.4 198.5 198.6 198.7 198.8 198.9 199.0 199.1 199.2 199.3 199.4 199.5 199.6 199.7 199.8 199.9 200.0 200.1 200.2 200.3 200.4 200.5 200.6 200.7 200.8 200.9 201.0 201.1 201.2 201.3 201.4 201.5 201.6 201.7 201.8 201.9 202.0 202.1 202.2 202.3 202.4 202.5 202.6 202.7 202.8 202.9 203.0 203.1 203.2 203.3 203.4 203.5 203.6 203.7 203.8 203.9 204.0 204.1 204.2 204.3 204.4 204.5 204.6 204.7 204.8 204.9 205.0 205.1 205.2 205.3 205.4 205.5 205.6 205.7 205.8 205.9 206.0 206.1 206.2 206.3 206.4 206.5 206.6 206.7 206.8 206.9 207.0 207.1 207.2 207.3 207.4 207.5 207.6 207.7 207.8 207.9 208.0 208.1 208.2 208.3 208.4 208.5 208.6 208.7 208.8 208.9 209.0 209.1 209.2 209.3 209.4 209.5 209.6 209.7 209.8 209.9 210.0 210.1 210.2 210.3 210.4 210.5 210.6 210.7 210.8 210.9 211.0 211.1 211.2 211.3 211.4 211.5 211.6 211.7 211.8 211.9 212.0 212.1 212.2 212.3 212.4 212.5 212.6 212.7 212.8 212.9 213.0 213.1 213.2 213.3

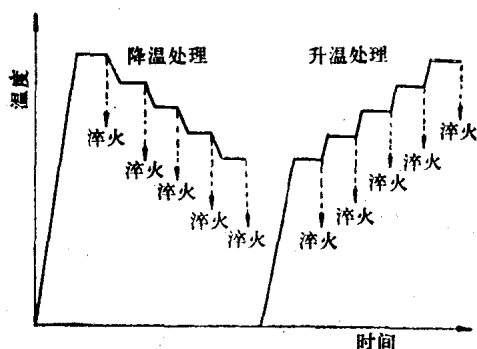


图 4 热处理制度示意图

的硼是冷却过程中由晶界两侧贫硼区富集而来。淬火温度越高，冷却过程中硼向奥氏体晶界富集越多，贫硼区也越宽越明显。可见，贫硼区内硼的分布及贫硼区宽度的变化是反应和描述非平衡晶界偏聚动力学的重要参量。到目前为止，在有关文献中还未对此予以必要的注意。

定量统计 I：用 LeitzTAS 图象分析仪测定试样晶界附近的硼成分剖面。定量统计^①在放大1000倍的径迹显微照片上进行。如图7(a)所示，每次测量50毫米长的一段晶界，平行于晶界取50×2毫米窄带进行统计，以晶界为起点，沿 x 方向每次移动2毫米。用自动记录器测定窄带中蚀坑所占面积的百分数(y_x)， $y_x = \rho a = a E \Phi B$ ， a 为单个蚀坑的面积，同一试样上基本相同，所以蚀坑面积百分数（经面积覆盖校正）反映了该处含硼量的高低。用相对硼含量 y_x/y_0 (y_0 为晶内蚀坑面积百分数)作图，得到如图7(b)所示的典型成分剖面曲线，其上可以分别测定出贫硼区宽度 x_i ，晶界富集带宽度 $2\delta_i$ 和贫化区最低深度 y_i/y_0 。

对每个试样，统计分析了24~32段晶界。测量结果列于图8、9和10。图a是各晶界段的平均结果。图b上给出的是由各晶界段测定的贫硼区宽度和晶界富集带宽度的频率分布图，虚线指出的是平均值。由图可见，频率分布较集中，分散不大。

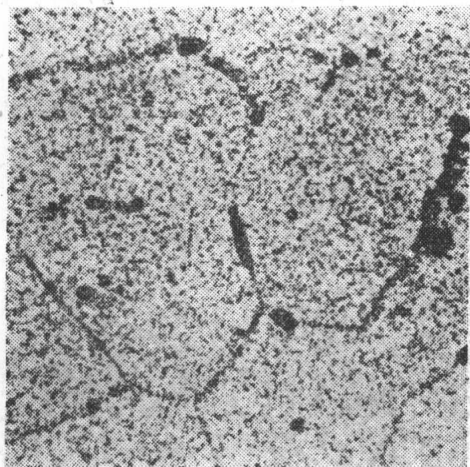
测得的贫硼区宽度和晶界富集带宽度随淬火温度的变化数据列于表5并示于图11和12中。从淬透性试样上测定的贫硼区宽度随冷却速度变化的结果示于图13中。

实验结果表明，在相同淬火冷却速度下，贫硼区及晶界富集带宽度均随淬火温度升高而增加；在相同淬火温度下，贫硼区宽度 x_i 与冷却速度 A_i 的平方根成反比， $x_i \propto 1/\sqrt{A_i}$ 。

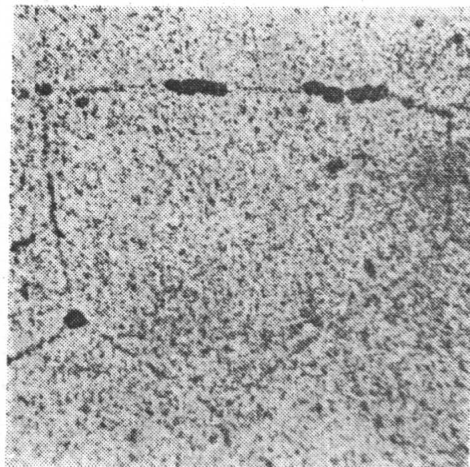
表 3 试样的变温热处理制度

钢 种	加热方式	冷速, °C/秒	淬 火 温 度, °C				
50B	降温	50	1150	1100	960	900	840
25MnTiB	降温	70	1150	1080	1000	920	840
50B	升温	160	1150	1100	950	900	840

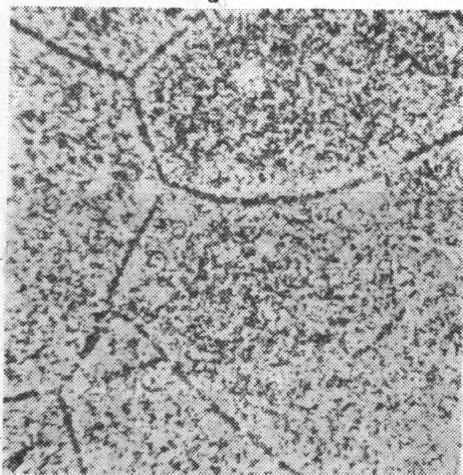
① 定量统计工作得到冶金部、钢铁研究总院炼钢室的大力支持，在此深表谢意。



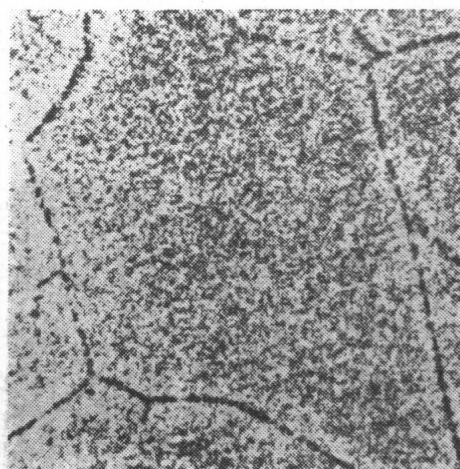
a



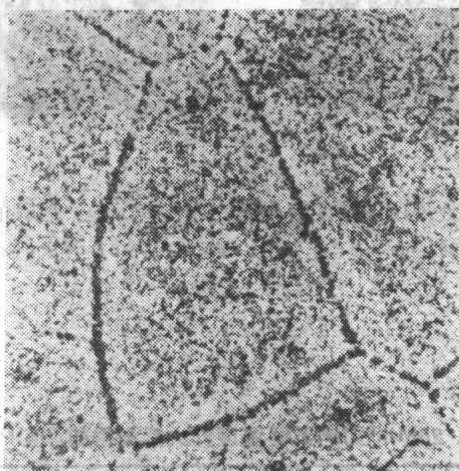
b



c



d

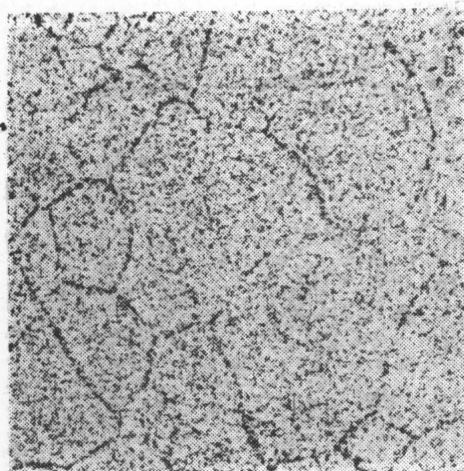


e

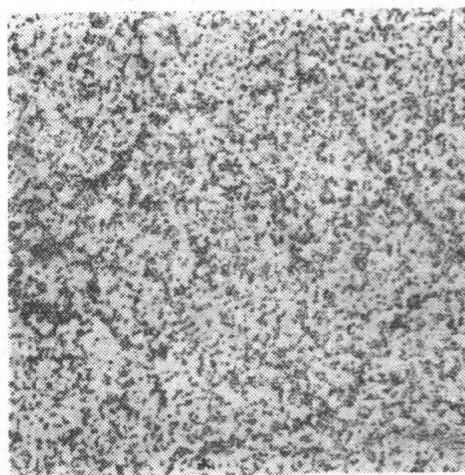
图 5 50B钢降温处理不同温度淬火(冷速 50°C/秒)后硼的分布状

态 ×280

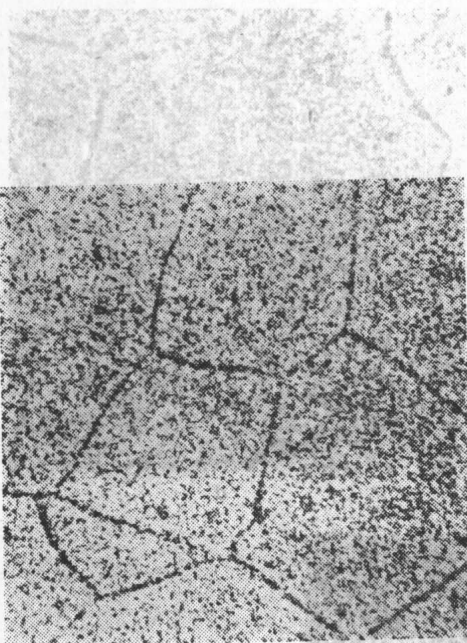
a—840°C 淬火; b—900°C 淬火; c—960°C 淬火; d—1100°C 淬火; e—1150°C 淬火



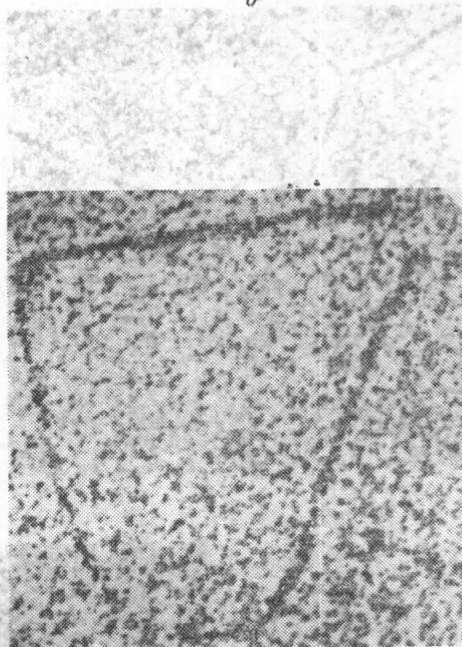
a



b



c



d

图6 50B钢升温处理不同温度淬火(冷速160°C/秒)后硼的分布状态
a—950°C淬火, $\times 280$; b—950°C淬火, $\times 660$; c—1150°C淬火, $\times 280$; d—1150°C淬火 $\times 660$

表4 25MnTiB钢不同温度淬火后测得的K值^[9]

淬火温度, °C	840	920	1000	1080	1150
K 值	0.95	0.98	0.97	0.98	0.89

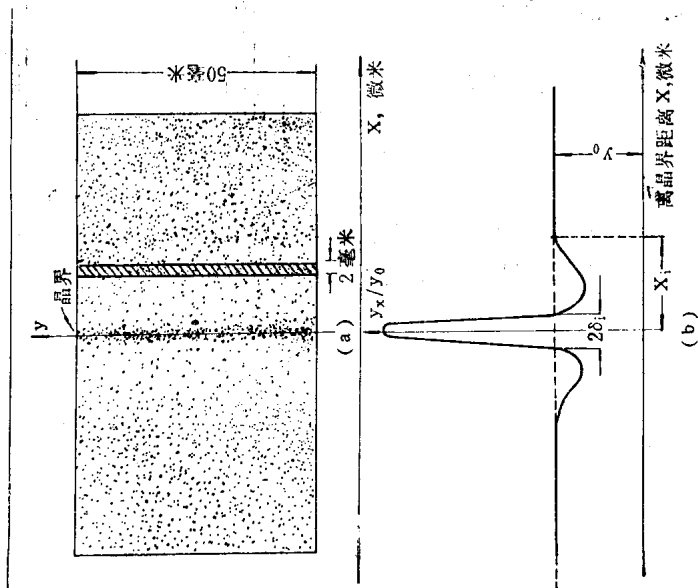


图 7 晶界附近成分测定示意图

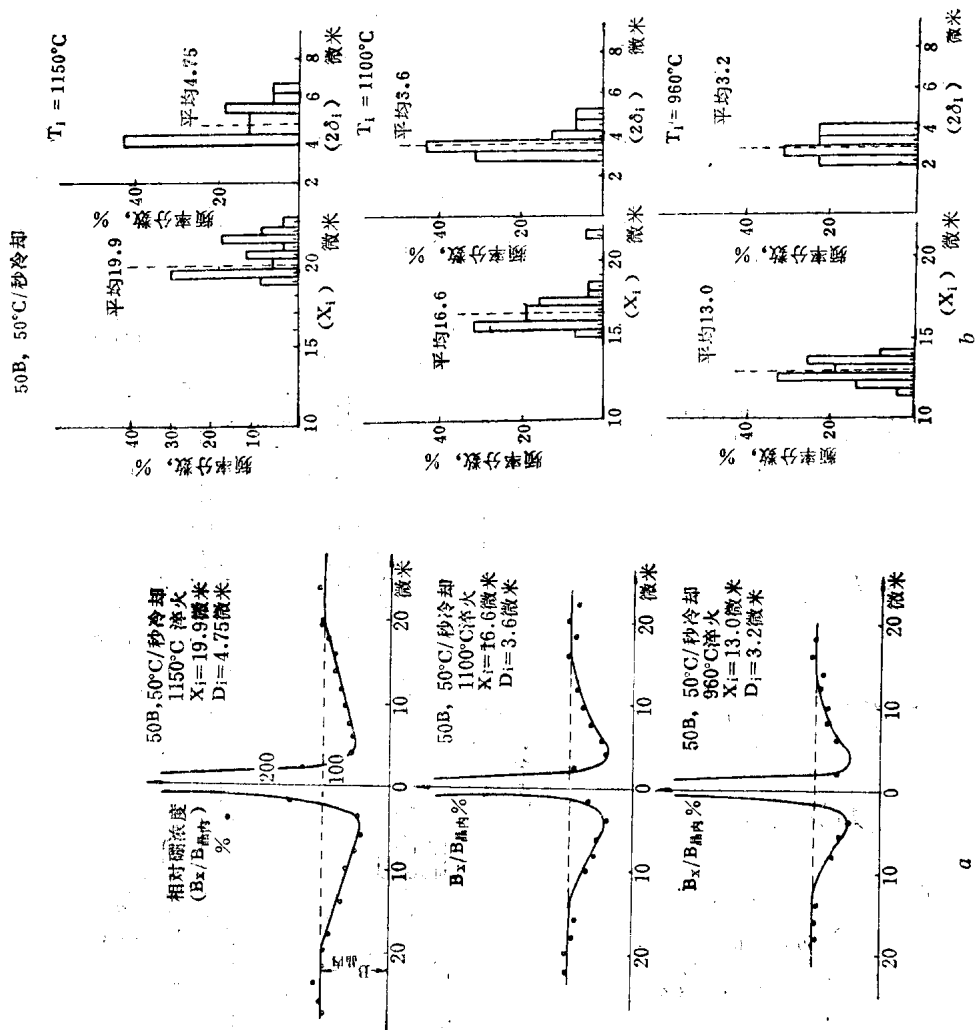


图 8 50B 钢降温处理不同温度淬火后晶界附近的成分剖面以及贫碳区宽度 (X_1) 和晶界富集带宽度 $(2\delta_1)$ 的频率分布曲线, 冷却速度 50°C/秒