

# 一种双相组织的高强度低屈强比钢的 EBSD 研究

刘俊亮,薛 菲,季思凯

(宝钢研究院,上海 201900)

本文应用电子背散射衍射分析技术(EBSD)研究了具有铁素体和马氏体双相组织热轧态钢种的相的分布,体积分数,不同相内晶界取向差,并结合材料的力学性能,分析了这种热轧态双相组织材料的机理。

## 1 实验方法

试验用钢由真空感应炉冶炼,共浇铸 6 支 100 kg 钢锭,锻造成厚度为 210mm 的钢坯。钢坯在电阻加热炉内加热,钢坯分别加热至 1 170<sup>o</sup>,在最大轧制压力为 1 000t 的试验轧机上进行轧制。钢坯经 11 个道次轧制,成品厚度为 20mm~36mm。成品钢板经不同时间的驰豫之后进入 AcC 装置进行加速冷却,出水后在不同的停冷温度空冷至室温。试验用钢的成分见表 1 和表 2。

表 1 试验用钢成分

C	Si	Mn	Ni	Nb	Ti	V	Al
0.07	0.48	1.81	0.25	0.048	0.017	0.068	0.045

表 2 试验用钢性能

$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	屈强比	断后伸长率, %	最大延伸率, %
564	778	0.725	14.6	6.4

研究样品首先经切割,研磨和抛光制备成金相试样。然后用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)观察材料的铁素体和马氏体组织形态;用电子背散射衍射技术(Electron Backscatter Diffraction, EBSD)分析材料内铁素体和马氏体晶体取向等信息;所用的设备为日本电子 JSM-6460LV 型低真空扫描电子显微镜,配备英国牛津公司能量色散谱(Energy Dispersive Spectrometer, INCA Energy + EDS)、波长色散谱(Wavelength Dispersive Spectrometer, INCA Energy + WDS)和电子背散射衍射(INCA Crystal EBSD)附件。

## 2 结果与讨论

图 1 是试验钢的光学显微镜和扫描电子显微镜照片。图 1a 光学显微照片仅能分辨出铁素体晶粒,而不能分辨出晶界附近和晶粒内部一些黑点组织细节。图 1b 的扫描电镜照片不仅清晰地分辨出铁素体晶粒,更重要的是能分辨清楚晶粒边界、界面附

近、晶粒内部的组织细节。1b 中的黑色晶粒是铁素体,白色晶粒是马氏体组织。采用电子背散射衍射技术(EBSD)分析了试验钢的各种相的组分。图 2a 是 EBSD 分析样品的区域尺寸,图 2b 是按照不同相组分不同颜色的相组分图。利用 EBSD 计算可以得到,3# 试验钢中铁素体所占比率为 69.7%,马氏体所占比率是 29.1%,残余的奥氏体占据 0.4%,渗碳体占 0.8%。图 3a 显示的是 3# 试验钢中铁素体晶界的取向差。不同颜色代表了不同晶界的取向差,其中,绿色表示的是晶界取向差从 2 到 12.00<sup>o</sup>,蓝色表示取向差从 12.00 到 22.00<sup>o</sup>,红色代表取向差从 22.00<sup>o</sup>到 32.00<sup>o</sup>,粉色表示取向差从 32.00<sup>o</sup>到 42.00<sup>o</sup>,黄色表示从 42.00 到 52.00<sup>o</sup>,白色显示从 52.00 到 62.00<sup>o</sup>。图 3b 是不同颜色代表的晶界取向差的和。可以明显地看出,绿色所占的比例最大,小角度晶界取向差从 0 到 15<sup>o</sup>,计算所分析的区域中小角度晶界可以得出所占比例为 47.22%。大量的小角度晶界存在可以大大提高材料的塑性性能。

同样地,图 4 显示的是试验钢中马氏体晶界的取向差。不同颜色代表了不同晶界的取向差。其中,图 4a 显示的是试验钢中马氏体晶界的取向差。不同颜色代表了不同晶界的取向差,其中,绿色表示的是晶界取向差从 2 到 17.00<sup>o</sup>,蓝色表示取向差从 17.00 到 32.00<sup>o</sup>,红色代表取向差从 32.00 到 47.00<sup>o</sup>,粉色显示的取向差从 47.00 到 61.90<sup>o</sup>,黄色表示取向差从 61.90<sup>o</sup>到 76.90<sup>o</sup>,白色显示的是从 76.90 到 91.90<sup>o</sup>。图 4b 是不同颜色代表的晶界取向差的和。可以明显地看出,绿色所占的比例最大,小角度晶界取向差从 0 到 15<sup>o</sup>,计算所分析的区域中小角度晶界可以得出所占比例为 52.91%。大量的马氏体小角度晶界存在可以大大提高材料的形变能力。

图 5 是利用 EBSD 技术得到的试验钢的晶粒尺寸。图中不同的颜色代表不同晶粒,分析数据表明试验钢的平均晶粒尺寸是 1.80 $\mu$ m。在热轧状态下得到这样细小晶粒,根据传统的霍尔-佩奇(Hall-Petch)公式:  $\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$ ,式中,  $\sigma_i$  和  $k_y$  是两个和材料有关的常数,  $d$  是晶粒直径。晶粒越细,材料强度越高。同时,细化的晶粒在提高材料强度的同

的同时,也使其塑性与韧性得以提高。晶粒越细,单位体积内晶粒越多,形变时同样的形变量便可分散到更多的晶粒中,产生均匀的形变而不会造成局部应力过度集中,引起裂纹的过早产生与发展。特别是上面的铁素体和马氏体的界面取向差的数据表明了在这些材料内,小角度晶界所占比例很高,这样就使得材料形变时产生位错容易通过这些小角小角度晶界,从而提高了材料的塑性与韧性。

### 3 结论

具有优异力学性能的材料归因于合理的化学成分和工艺,及其添加的合理微合金元素 Nb、Ti 或 Nb、Ti、V。在这些综合因素条件下,得到了具有超细晶粒的铁素体和马氏体双相组织,大量的弥散析出粒子的存在,一方面拖曳了奥氏体晶界,起到了细化晶粒的作用;另一方面,阻碍了位错的运动,起到了强化组织的作用。同时,大量的铁素体和马氏体双相小角度晶界的存在,也大大提高了材料的韧性。

参考文献略。

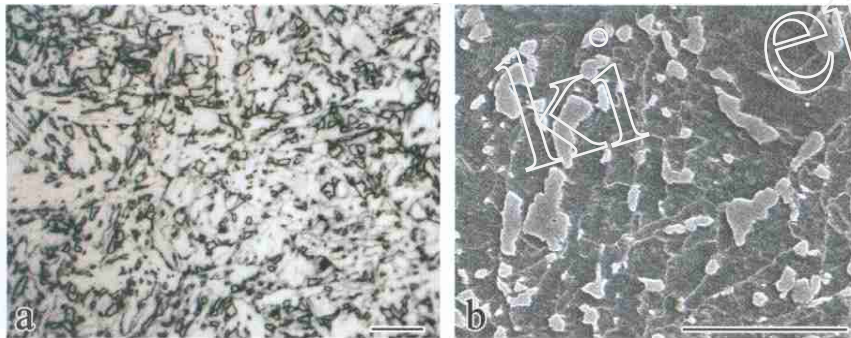


图1 试验钢板的光学和电子显微镜照片。a,b:Bar=10μm

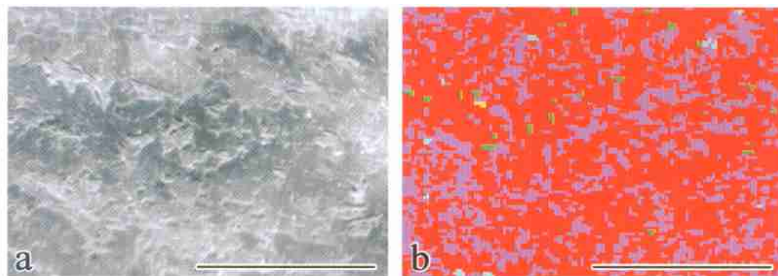


图2 试验钢板的 EBSD 实验结果。a,b:Bar=30μm

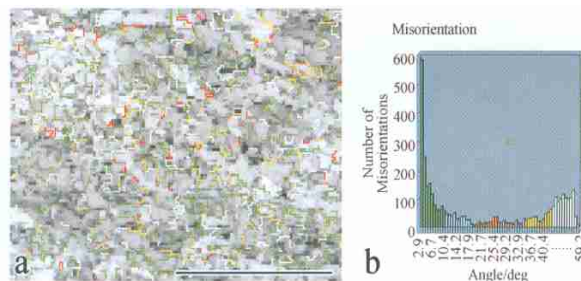


图3 试验钢板中铁素体晶界取向差。Bar=30μm

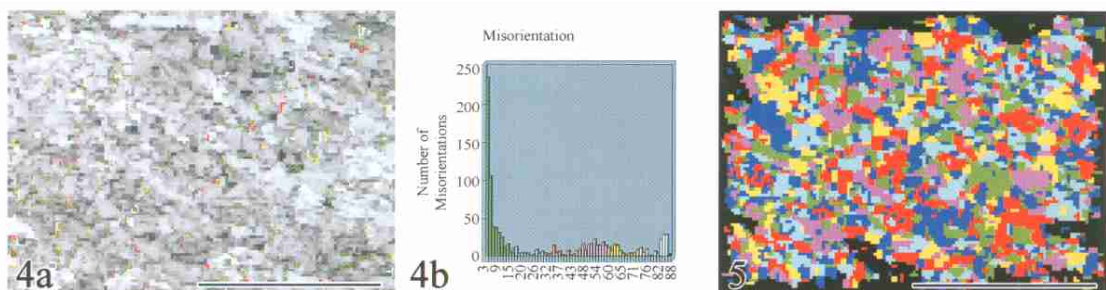


图4 试验钢中马氏体晶界取向差。Bar=30μm

图5 试验钢板中晶粒尺寸。Bar=30μm