

基于显微组织数字化的 EH690 海工钢组织性能研究

金耀辉^{1,2}, 赵 坦^{1,2}, 李文斌^{1,2}, 郭福建³, 李家安^{1,2}, 尚成嘉^{1,3,4}

- (1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁鞍山 114009;
2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁鞍山 114009; 3. 阳江合金材料实验室, 广东阳江 529500;
4. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083)

摘 要: 以 EH690 海工钢为研究对象, 结合扫描电镜、EBSD 和力学性能实验等, 利用显微组织数字化方法, 研究了不同的板厚位置显微组织与性能之间的关系, 结果表明 EH690 海工钢厚度方向由板厚表面到心部, 显微组织由板条状贝氏体向粒状贝氏体过渡, 且晶粒尺寸也逐步增大, 心部相变机制发生变化, 变体选择加强, 心部形成了以单一粗大 Bain 组主导的相变组织, 晶体学 packet 和 Bain 组的尺寸也逐渐增大, 从表面到心部的低温冲击韧性降低, 其变化主要与晶体学结构晶界密度紧密相关, 尤其是 block 界面, 其变化趋势基本与冲击功一致, 即 block 界面密度越大, 冲击韧性也就越高。

关键词: EH690 海工钢; 显微组织数字化; 晶体学; DBTT

Study on the Microstructure and Properties of EH690 Marine Steel Based on Digital Characterization of Microstructure

JIN Yaohui^{1,2}, ZHAO Tan^{1,2}, LI Wenbin^{1,2}, GUO Fujian³, LI jiaan^{1,2}, SHANG Chengjia^{1,3,4}

- (1. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan114009, China;
2. Iron and Steel Research Institute of ANGANG Group, Anshan114009, China;
3. Yangjiang Advanced Alloys Laboratory, Yangjiang Guangdong 529500, China;
4. Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing100083, China)

Abstract: Taking EH690 marine steel as the research object, combined with scanning electron microscope, EBSD and mechanical property experiment, the relationship between microstructure and properties at different plate thickness positions was studied by using the digital method of microstructure. The transformation structure dominated by a single coarse Bain group is formed in the center. The size of the Crystallography packet and Bain group also gradually increases, and the low-temperature impact toughness from the surface to the center decreases. Its change is closely related to the grain boundary density of the Crystallography structure, especially the block interface. Its change trend is basically consistent with the impact energy, that is, the higher the density of the block interface, the higher the impact toughness.

Keywords: EH690 marine steel; Digitization of microstructure; crystallography; DBTT

EH690 级海洋工程用钢多用于海洋平台等大型钢结构关键部分的建设, 要求具有高强韧、优良的焊接性和抗层状撕裂等物理性能^[1], 工业化生产的调质态 EH690 级海洋工程用钢, 尤其是厚度 $\geq 50\text{mm}$ 时, 由于轧制过程中由心部压下量小, 厚度 1/2 位置奥氏体晶粒粗大, 钢板热处理前表面和心部初始组织差异大, 而在后续热处理过程中由于板厚效应, 使得钢板不同厚度位置的冷速不均匀, 导致厚规格钢板在不同厚度位置的相变产物不一致, 进一步加剧了大厚钢板沿板厚方向的强度、韧性、塑性的差异性^[2-3]。

对于 EH690 超高强海工钢, 显微组织主要为马氏体 / 贝氏体组织。其相变产物与原始奥氏体总会保持特定的位向关系, 又被称之为协变相变产物^[4]。协变相变产物具有复杂的结构, 一般包括 packet、block 和

板条 (lath) 3 个层次的亚结构^[5], 其结构决定了钢板的强韧性能。提高强韧性的本质是对协变相变组织的调控。对协变相变产物的调控的研究, 将为优化高强钢在不同相变条件下形成的组织及性能提供方法^[6-7]。因此, 本文基于对 EH690 超高强海工钢的显微组织数字化表征, 研究组织晶体学信息的差异与性能的关系。

1 实验材料及方法

试验钢为采用 250mm 的连铸坯, 经控轧-控冷工艺轧制和淬火-回火热处理后生产的 52mm EH690 超高强海工钢, 其化学成分 (质量分数, %) 为: C0.07, Si0.15, Mn1.21, P0.008, S0.002, (Ni+Mo+Cr+Cu+V) 1.9 以及适量的 Al 和 B、Fe 余量。

组织数字化表征取样位置如图 1 所示, 在 3 个不同的板厚位置取样, 分别是表面、1/4 板厚位置和 1/2 板厚位置, 经砂纸逐级打磨并机械抛光后, 分别采用 4 %硝酸酒精溶液浸蚀组织和高氯酸酒精溶液进行样品表面电解抛光。采用带有电子背散射系统 (EBSD) 的 TESCANMIRA3LMH 型号的场发射扫描电镜观察组织形貌并进行晶体学表征。获取 EBSD 数据后, 利用 Oxford-HKL 中 Channel5 软件对各个条件下 EBSD 数据进行处理。同时, 采用 Matlab 软件校对实验极图、计算奥氏体相变过程中贝氏体变体选择情况以及各类晶界 (sub-block、block 和 packet) 的长度。



图 1 组织数字化表征取样位置

按照 GB/T228.1-2021 的相关规定, 分别沿 EH690 海工钢垂直于轧制方向切取厚度 1/4 位置和 1/2 位置圆拉伸试样, 室温下在 Zwick-600 万能试验机上进行拉伸试验; 根据 GB/T229-2020 的相关规定, 分别沿 EH690 海工钢垂直于轧制方向切取厚度距表面 2mm、1/4 位置和 1/2 位置 10mm×10mm×55mm 的标准 Charpy-V 型缺口冲击试样, 在 JBC-2602 全自动冲击试验机上进行冲击试验。

2 实验结果与分析

2.1 显微组织及晶粒尺寸

图 2 给出了三种贝氏体组织的 BC 图和利用软件重构的原始奥氏体形貌图。可以清晰的发现, 从板厚表面到心部, 显微组织的变化显著。在表面位置, 显微组织主要为板条状贝氏体, 其一个完整的奥氏体晶粒被分割成几个 packet, 并由平行的板条构成。在板厚 1/4 位置, 显微组织形貌与表面的组织形貌较为接近, 但板条宽度增加且奥氏体晶粒尺寸有所降低。板厚心部的显微组织形貌几乎完全变为粒状贝氏体且奥氏体晶粒粗大。从原始奥氏体重构图上可以清楚观察到, 如图 2d-f 所示, 从板厚边部到中心晶粒尺寸逐步增大, 其平均尺寸分别为 9.47 μm 、10.48 μm 和 16.32 μm 。

2.2 协变相变数字化表征

由晶体学可知, 一个完整的单一奥氏体是由 24 个变体构成, 且依据 fcc 母相的 3 个 $\langle 100 \rangle_\gamma$ 轴并结合 fcc-bcc 转变机制可以将 24 个变体分为三个 Bain 组, 每个 Bain 组包含 8 个变体^[8]。同样, 这 24 个变体可以分为四个 packet (CP) 组, 一个 CP 组包括 6 个变体且共用一个的密排面 (惯习面) ^[9-11]。为了可视化 EH690 海工钢显微组织的晶体学结构, 利用 HKL 软件和编程重构处理, 将同一奥氏体晶粒分别用四种 (红黄蓝绿) 和三种 (红黄蓝) 颜色表征其晶体学的 4 个 CP 组和 3 个 Bain 组, 如图 3 所示。由 CP 和 Bain 图可以更清晰直观地观察到厚度位置对贝氏体晶体学形貌的影响。由 CP 图可知, 近表面位置形成的板条贝氏体其晶体学变体沿着惯习面生长并呈现肩并肩分布状态。对比相应的 Bain 图可以发现, 每一个 CP 区包含两个或者三个 Bain 组并呈现交错式排布结构, 而这样的排列有助于大角度晶界的形成。然而, 这种结构排列模式并不适用于厚板心部形成的粒状贝氏体。对比图 3c 和 f 可发现, 心部形成的贝氏体出现了变体择优选择, 一个奥氏体往往由单一粗大的 Bain 组主导, 而一旦主导的 Bain 组形成, 将导致大角晶界密度严重降低。

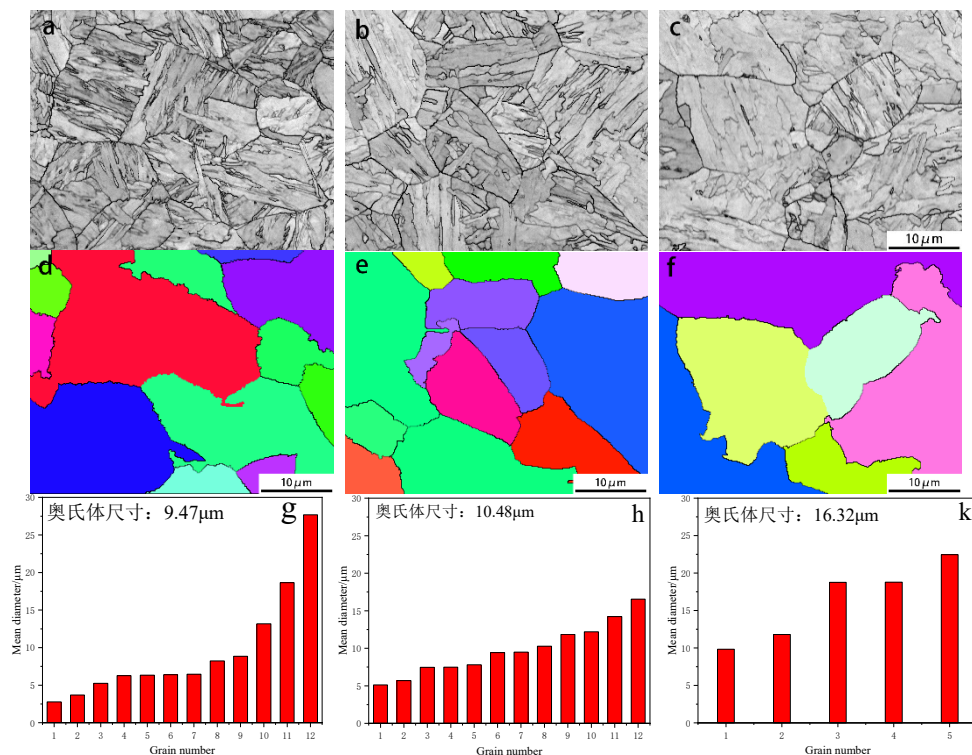


图2 不同厚度位置晶体学形貌(a-c,BC 图)和原始奥氏体重构图(d-f)及其尺寸(a,d,g,边部; b,e,h,厚度 1/4 位置; c,f,i,厚度 1/2 位置)

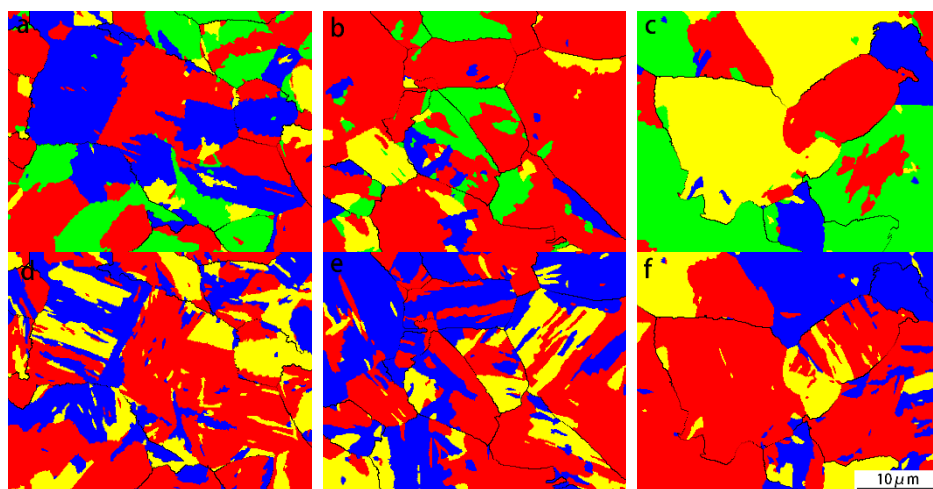


图3 不同厚度位置 Packet 形貌(a-c,BC 图)及 Bain 组形貌(d-f)(a,d,边部; b,e,厚度 1/4 位置; c,f,厚度 1/2 位置)

进一步利用 ImagePro-Plus 图像处理软件计算出晶体学 packet 和 Bain 组的尺寸，如图 4 所示。结果显示，随着钢板由表面向心部过渡，晶体学 packet 和 Bain 组的尺寸逐渐增大，尤其是心部。

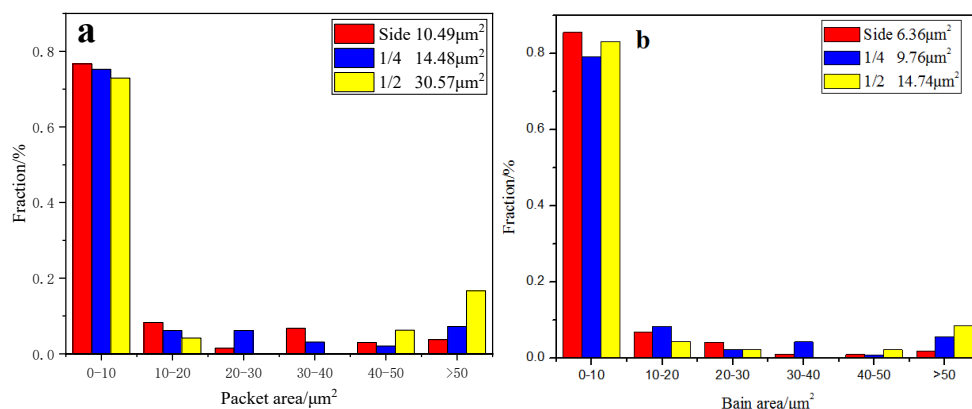


图4 不同厚度位置 Packet 面积统计结果 (a) 及 Bain 区面积统计结果 (b)

图 5 给出了利用实际位向关系计算得到的重构奥氏体晶粒内变体的晶界长度（即，V1 于其他变体构成的变体对）百分比。可以发现，对于板条贝氏体，属于同一 CP 内（CP1）的变体对（V1/V2-V6）含量大于其他变体对，但在粒状贝氏体中，这一趋势明显弱化。

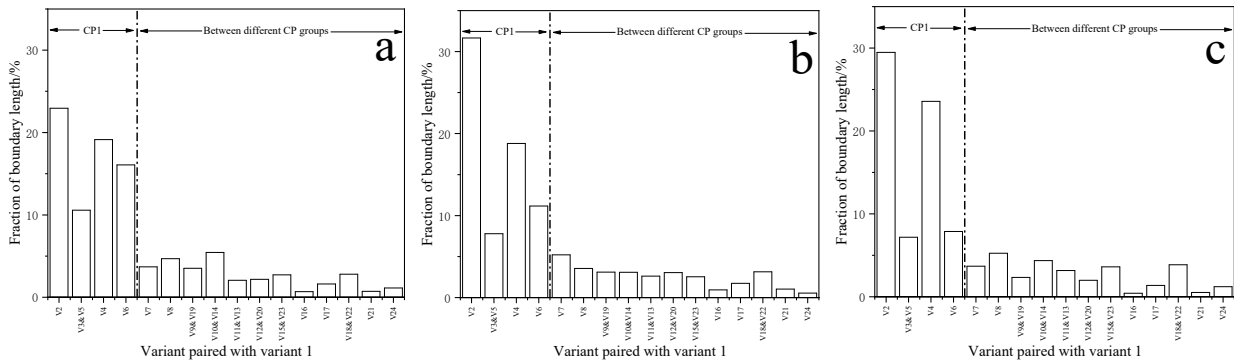


图 5 不同板厚位置变体对分布(a,边部; b,厚度 1/4 位置; c,厚度 1/2 位置)

2.3 组织—性能关系

表 1 给出了 EH690 海工钢力学性能，心部屈服强度可达 644MPa，抗拉达到 705MPa，1/4 厚度位置的屈服和抗拉强度显著提高，分别达到 753MPa 和 792MPa，但延伸率并未降低。图 6 给出了心部和 1/4 厚度位置的韧脆转变温度（DBTT）曲线，可以发现 1/4 厚度位置的 DBTT 现在低于钢板心部。其中 1/4 厚度位置的 DBTT 可以达到-100℃或更低，而钢板心部的 DBTT 仅为-50℃左右。

为了将各个取样位置的显微组织与 DBTT 建立数字化关系，本研究进一步通过计算获得了各类显微组织晶体学结构的实际晶界密度（单位面积内的晶界长度），并将其与 DBTT 绘制同一张图中。总体来看，总的界面长度与冲击韧性（或 DBTT）均随钢板厚度由表面向心部过渡而降低（DBTT 上升）。这与变体对密度分布不同有关，来自 V1/V2、V1/V3(&V5)和 V1/V6 变体对的界面均为 block 界面，V1/V4 是 sub-block 界面，而 V1/V7 至 V1/V24 是 packet 晶界。从板厚表面至中心，随着冷速的减小，block 界面总长度含量显著降低，尤其是属于 V1/V2 的 block 界面。对于板厚心部低冷速下获得的粒状贝氏体，总的 packet 界面长度含量略高于板条贝氏体，而这其中一些构成 packet 界面的变体对含量偏高，尤其是 V1/V8 和 V1&V10（&V14）等取向差小于 15°的界面。

表 1 EH690 海工钢力学性能

取样位置	Rm/MPa	Rp0.2/MPa	A/%	Agt/%
厚度 1/2	705	644	22.5	7.05
厚度 1/4	792	753	23	7.08

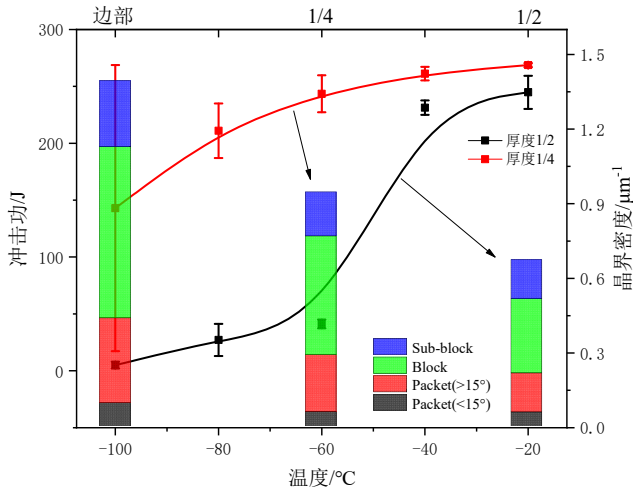


图 6 不同板厚位置的晶界密度分布及冲击韧性（DBTT）

利用欧拉角计算变体界面长度含量的方法有助于对材料晶体学变体选择和界面类型进行分析,但用来分析力学性能还是比较困难的。因此,为了将变体界面与冲击韧性建立一个数字化关系,进一步通过计算获得了单位面积的界面长度,并将晶体学的 sub-block、block 以及 packet 的单位面积长度与韧脆转变一起汇总至图 6。总体来说,总的界面长度与冲击韧性均随板厚深度(冷速减小)增加变差。Packet(大取向差或者小取向差)界面长度受冷速的影响不明显,但 block 和 sub-block 界面随冷速增大而显著增加,尤其是 block 界面,其变化趋势基本与冲击功一致,这是因为 block 界面密度增加,单位面积内 block 界面长度越大,则 block 尺寸越小,V1/V2 变体对含量和大角度晶界密度增加,而大角度晶界有助于阻碍裂纹的扩展,进而增加冲击吸收功。。

3 结论

(1) EH690 海工钢厚度方向由板厚表面到心部,显微组织的变化显著,组织由板条状贝氏体向粒状贝氏体过渡,且晶粒尺寸也逐步增大。

(2) EH690 海工钢协变相变数字化表征研究表明,随显微组织由表面向心部过渡,相变机制发生变化,变体选择加强,心部形成了以单一粗大 Bain 组主导的相变组织,晶体学 packet 和 Bain 组的尺寸逐渐增大,尤其是心部。

(3) 厚度方向由表面向心部过渡,低温冲击韧性降低,韧脆转变温度升高,其变化主要与晶体学结构晶界密度紧密相关,尤其是 block 界面,block 界面密度越大,冲击韧性也就越高。

参考文献:

- [1] 孙乐飞, 闫博. 690MPa 级海洋工程用钢热处理工艺研究[J]. 江西冶金, 2015, 35(06):1-4.
- [2] Wu B B, Huang S, Wang Z Q, et al. Crystallography analysis of toughness in high ultra-heavy steel[J]. Materials Letters, 2019, 250:55
- [3] 袁胜福. 高性能海洋工程用钢组织调控及力学性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [4] GUO Z, LEECS, MORRISJW. On coherent transformations in steel[J]. Acta Materialia, 2004, 52(19): 5511-5518
- [5] MORITO S, TANAKA H, KONISHI R, et al. The morphology and crystallography of lath martensite in Fe-C alloys[J]. Acta Materialia, 2003, 51(6):1789-1799.
- [6] 吴彬彬. 高强度低合金钢晶体学特征及其成分-工艺-性能关系研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020
- [7] 尚成嘉, 李秀程, 王学林. 高性能海洋用钢智慧研发之二——钢铁材料基因与显微组织数字化表征[J]. 鞍钢技术, 2018(02):1-9.
- [8] 吴静, 张文征. 从相变出发理解和计算变体间位向差[J]. 金属学报, 2009, 45(8):897-905
- [9] Wang XL, Wang ZQ, Dong LL, et al. New insights into the mechanism of cooling rate on the impact toughness of coarsegrained heat affected zone from the aspect of variant selection[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 704(sep.17).
- [10] 王学林. 高性能海洋工程用钢焊接物理冶金行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018
- [11] 王志权. 协变相变转变机制中原始母相的回归研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015