

Eh47 止裂钢奥氏体连续冷却转变行为

刘朝霞 刘俊 徐光琴 宁康康 许晓红

(江阴兴澄特种钢铁有限公司研究院, 江阴 214400)

摘要 采用 Gleeble-3800 热模拟实验机测定了 Nb-Ti-V 微合金化 0.04 ~ 0.08C-0.6 ~ 1.2Ni-0.1 ~ 0.5Cr-0.1 ~ 0.5Cu 大型集装箱船用 EH47 止裂钢在 0.05 ~ 50 °C/s 冷速下连续冷却转变的膨胀曲线, 结合光学显微镜的微观组织观察, 得出了该钢奥氏体连续冷却转变过程中的 CCT 曲线; 研究了 EH47 止裂钢连续冷却转变产物的组织形态和显微硬度。结果表明, EH47 止裂钢在 0.05 ~ 50 °C/s 冷却速率下的组织主要由铁素体 + 珠光体、针状铁素体 + 贝氏体组成, 即使冷却速度达到了 50 °C/s, 组织中仍然未见马氏体出现。

关键词 EH47 止裂钢 热模拟机 CCT 曲线

Continuous Cooling Transformation Behavior of Austenite in EH47 Crack-Resistant Steel

Liu Zhaoxia, Liu Jun, Xu Guangqing, Ning Kangkang and Xu Xiaohong
(Research Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co Ltd, Jiangying 214400)

Abstract By measuring the dilatometric curves of Nb-Ti-V micro-alloying 0.04 ~ 0.08C-0.6 ~ 1.2Ni-0.1 ~ 0.5Cr-0.1 ~ 0.5Cu crack-resistant steel EH47 for large container ship with cooling rate of 0.05 ~ 50 °C/s on a Gleeble-3800 thermo-mechanical simulator, and combining with metallographic analysis, a CCT diagram of austenite continuous cooling transformation is obtained. And the microstructure and hardness of the continuous cooling transformation occurring in EH47 crack-resistant steel are investigated. The results show that the microstructure of EH47 crack-resistant steel at 0.05 ~ 50 °C/s cooling rate consists of ferrite + pearlite and acicular ferrite + bainite. Even the cooling rate as high as 50 °C/s, no martensite occurs in the microstructure.

Material Index EH47 Crack-Resistant Steel, Thermal Mechanical Simulation, CCT Curves

大型集装箱船在实际船舶建造中采用了一种屈服强度大于 460 MPa、强度大于常规船体结构钢板、可容纳 10000TEU 及以上的新型船体 EH47 止裂钢板^[1-3]。EH47 止裂钢板除了具有高强度和优异的韧性外, 还具备易焊接及良好的低温抗裂和止裂性能^[4-6]。

1 实验材料及方法

Eh47 止裂钢冶炼流程为铁水预处理脱硫-150 t 转炉冶炼-LF-RH-板坯连铸-加热-轧制-冷却; 其中在脱硫处理后, 转炉采用扒渣操作, 应用夹杂物控制技术, 采用 LF 精炼和 RH 真空脱气处理, 采用低过热度全程氩气保护浇注, 来降低钢坯的化学成分偏析; 采用厚度为 370 mm 的连铸坯, 以保证压缩比。板

坯连铸采取动态轻压下技术, 确保板坯内部质量满足工艺要求。将铸坯轧制成一块厚度为 85 mm 的钢板, 经检测, 该钢板横向拉伸性能为: 屈服强度 520 MPa, 抗拉强度 606 MPa, 延伸率为 23%; -40 °C 纵向冲击功 ≥ 300 J; 满足船级社规定 EH47 止裂钢横向拉伸性能指标: 屈服强度 ≥ 460 MPa, 抗拉强度介于 570 ~ 720 MPa, 延伸率 ≥ 17%; 以及 -40 °C 纵向冲击功 ≥ 64 J 的要求。

在上述钢板上取一块样坯, 放至实验室加热炉, 按 1.4 min/mm 热透率加热至 930 °C 30 min, 空冷。经锯床及线切割加工成 Φ6 mm × 100 mm 的热模拟试样。EH47 止裂钢化学成分如表 1 所示。

采用 Gleeble-3800 热模拟试验机测定 EH47 止

表 1 EH47 止裂钢化学成分
Table 1 Chemical composition of EH47 crack-resistant steel

化学成分 /%											Ceq	Pcm
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	Ti	V		
0.04 ~ 0.08	0.10 ~ 0.40	1.30 ~ 1.60	≤0.015	≤0.003	0.6 ~ 1.2	0.1 ~ 0.5	0.1 ~ 0.5	0.02 ~ 0.06	0.005 ~ 0.030	0.01 ~ 0.06	0.45 ~ 0.48	0.16 ~ 0.20

注: Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15, Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B

裂钢过冷奥氏体连续冷却转变过程中的膨胀曲线,由膨胀曲线确定相变温度。在真空状态下,以 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度加热至 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 5 min ,使奥氏体成分均匀化,然后以 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却速度冷却至室温,得到升温膨胀曲线,利用切线法测定在升温过程中的铁素体-奥氏体相变开始温度 (Ac_1) 和结束温度 (Ac_3) 点。将试验以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度加热至 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 10 min ,然后分别以 $0.1\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却至室温,测量冷却过程中的膨胀曲线,结合切线法和顶点法确定各冷却速度下的相变点。

采用 ZEISS 光学显微镜观测分析不同冷速下试样微观组织。结合硬度法进一步验证不同冷却速率的相转变,采用抛光态等距离打点的方法,用 HV-1000 型显微硬度计的压头(载荷 100 g ,载荷时间 10 s) 在每个圆柱样上均匀打出 3 个点,取平均值。

2 实验结果及分析

2.1 CCT 曲线测定和分析

根据 Gleeble-3800 热模拟试验机上采集的温度-膨胀曲线,采用偏量法确定不同冷却速度下各个相变点:铁素体开始转变点、铁素体结束转变点和珠光体开始转变点、珠光体结束转变点、贝氏体开始转变点。再根据相变点计算出不同冷却速度下达到相变点所需要的时间,这样就可以在温度-时间(对数)坐标上绘出 EH47 止裂钢的连续冷却转变(CCT)曲线。

由图 1 可见,由 EH47 止裂钢经 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 升温膨胀曲线得其升温铁素体奥氏体相变开始温度 Ac_1 点为 $704\text{ }^{\circ}\text{C}$,铁素体奥氏体相变结束温度 Ac_3 点为 $903\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当冷却速度小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,过冷奥氏体主要转变为铁素体和珠光体;当冷却速度大于

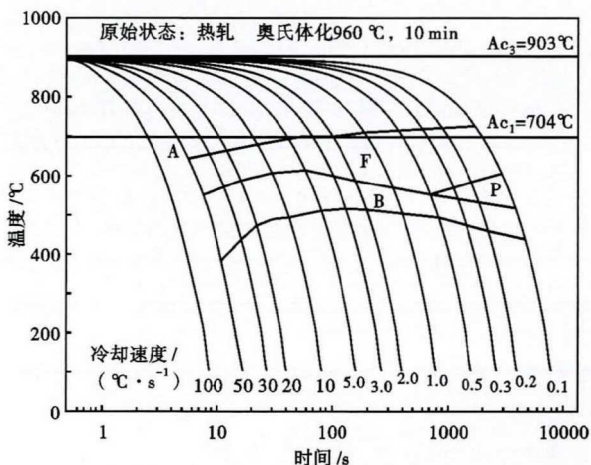


图 1 EH47 止裂钢过冷奥氏体 CCT 曲线

Fig. 1 Continuous cooling transformation curves of supercooled austenite of EH47 crack-resistant steel

$0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,珠光体组织转变中止;发生奥氏体-铁素体 + 贝氏体转变,但当冷却速度高达 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,仍为奥氏体-铁素体 + 贝氏体转变,未见马氏体转变。

2.2 不同冷却速度下的显微组织

图 2 显示 EH47 止裂钢在不同冷却速度下过冷奥氏体连续冷却转变后的组织主要为铁素体、珠光体、针状铁素体、贝氏体。当冷却速度为 $0.1\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,过冷奥氏体室温下的转变产物为先共析铁素体与珠光体。其中冷却速度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,晶粒尺寸介于 $6\sim 15\text{ }\mu\text{m}$,晶粒不均匀,当冷却速度提高至 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,组织主要由等轴状铁素体晶粒与珠光体组成,铁素体晶粒细小均匀,晶粒尺寸介于 $6\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 。当冷却速度为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,过冷奥氏体室温下的相变产物中出现了贝氏体,珠光体消失。组织进一步细小。其中当冷却速度介于 $0.5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,相变产物为块状铁素体、珠光体和岛状贝氏体的混合组织,当冷却速度不断增加时,珠光体逐渐消失,岛状贝氏体转变量逐渐增多;当冷却速度在 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,出现了针状铁素体与贝氏体混合组织。当冷却速度进一步增加介于 $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,出现了下贝氏体与针状铁素体组织,当冷却速度达到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,过冷奥氏体经连续冷却转变主要组织为下贝氏体组织与极少量的针状铁素体,尚无马氏体组织出现。从组织形貌上看,EH47 止裂钢容易在较低冷却速度下出现珠光体组织,只有在冷却速度超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 下才能避免珠光体出现,要想获得均匀的针状铁素体,此时的冷却速度应为 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

2.3 不同冷却速度下的硬度

由图 3 可见,随着冷却速度从 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 过程中,HV10 硬度值也从 190.5 增加到 251.5 ,硬度值明显增大;且当冷却速度在 $0.1\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,硬度处于较低水平,增加缓慢,结合组织分析可知此时硬度的增加缓慢主要是铁素体体积分数减少不明显;当冷却速度在 $0.5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,硬度呈现快速增加的趋势,此时硬度变化主要是因为随着冷却速度的增加,硬相贝氏体体积分数逐渐增多。当冷却速度达到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,其组织中除了少量的针状铁素体外,其余大部分都是细小的下贝氏体,因而硬度值达到最大。从硬度值来看,尽管冷却速度高达 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,材料中仍然未见马氏体出现。这与显微组织分析结果相一致。

3 结论

(1) EH47 止裂钢随冷却速度增加,铁素体、珠光体含量逐渐减少,针状铁素体先增多、后减少,下

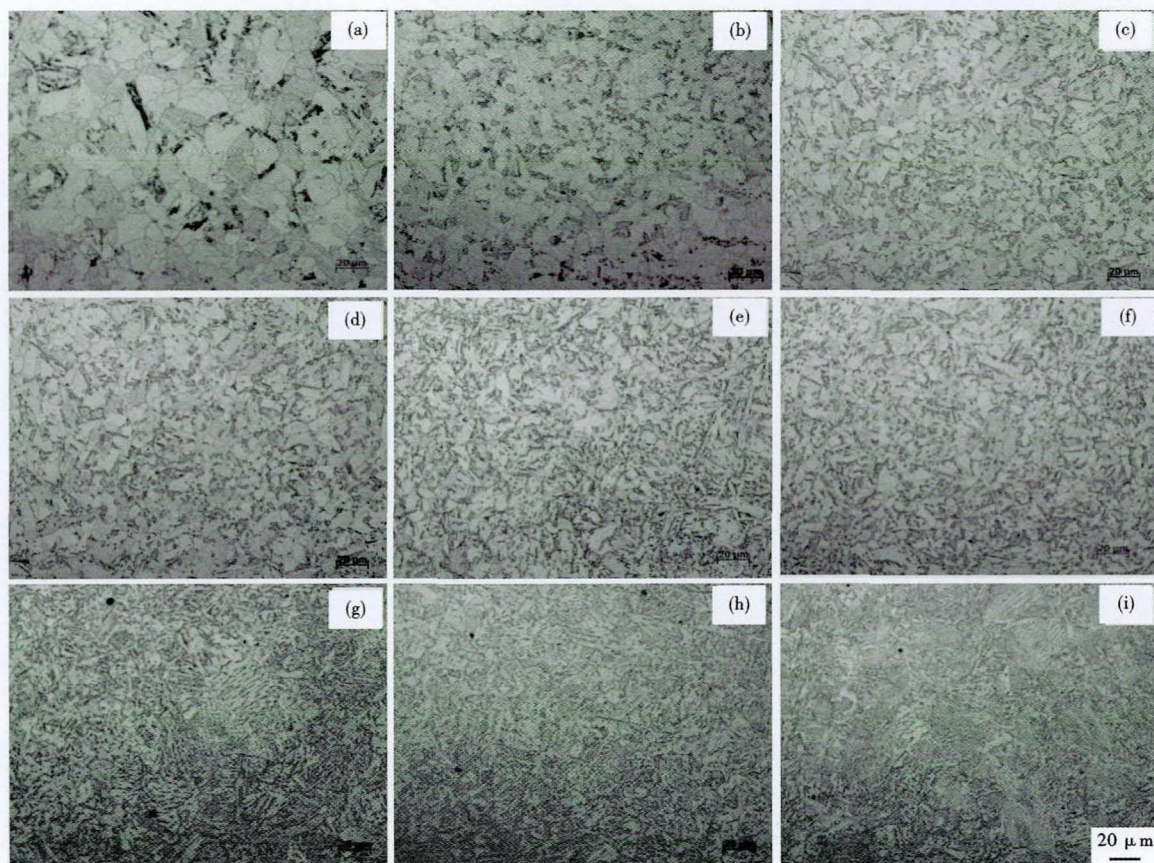


图2 EH47 试验钢冷却速度(a)0.1 ℃/s;(b)0.5 ℃/s;(c)1 ℃/s;(d)2 ℃/s;(e)3 ℃/s;(f)5 ℃/s;(g)10 ℃/s;(h)20 ℃/s;(i)50 ℃/s 时显微组织形貌

Fig.2 Morphology of microstructure of EH47 crack-resistant steel with cooling rates (a)0.1 ℃/s;(b)0.5 ℃/s;(c)1 ℃/s;(d)2 ℃/s;(e)3 ℃/s;(f)5 ℃/s;(g)10 ℃/s;(h)20 ℃/s;(i)50 ℃/s

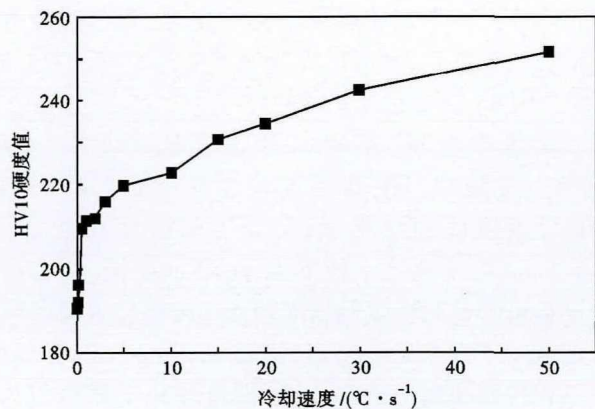


图3 冷却速度对 EH47 止裂钢硬度的影响

Fig.3 Effect of cooling rate on hardness of EH47 crack-resistant steel

贝氏体含量逐渐增加,显微组织变得细小均匀。

(2) 即使冷却速度达到 50 ℃/s, 所研究的 EH47 止裂钢尚未见马氏体转变。

(3) 对于 EH47 止裂钢而言, 为获得均匀细小的针状铁素体的组织和合适的硬度, 以利于提高其后续性能, 连续冷却速度应控制在 3 ~ 5 ℃/s 为宜。

参考文献

- [1] LEE C S, KIM S and SUH I S, et al. High Strength Steel Plates for Large Container Ships[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011, 18(S1): 796-802.
- [2] Wang C L, Wu J M and Wang D Y. Numerical Investigation of Three-dimensional Hull Girder Ultimate Strength Envelope for an Ultra Large Container Ship[J]. Ocean Engineering, 2018, 149(1): 23-37.
- [3] Liu D S, Cheng B G and Luo M. F460 Heavy Steel Plates for Off-shore Structure and Shipbuilding Produced by Thermomechanical Control Process[J]. ISIJ International, 2011, 51(4): 603-611.
- [4] 周成, 严岭, 张鹏, 等. 集装箱船用 EH47 高止裂钢的组织性能[J]. 材料热处理研究学报, 2017, 38(8): 83-87.
- [5] 宫旭辉, 薛钢, 李冲, 等. 集装箱船用高强度厚钢板指标值的初步实验验证[J]. 材料开发及应用, 2017, 32(6): 4-7.
- [6] 张丽萍, 罗晓东, 蒋月月, 等. 调质工艺对 EH47 船板钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(6): 226-228.

刘朝霞(1979-), 女, 博士(2007年中国科学院金属研究所), 高级工程师, 2001年吉林大学(本科)毕业, 板材产品研发。E-mail: liuzhaoxia@citicsteel.com

收稿日期: 2020-04-05