

## 高强度船板钢 EH460 的动态连续冷却转变曲线

李胜利<sup>1,2</sup> 孙傲<sup>1</sup> 孙逸婷<sup>1</sup> 周成<sup>2</sup> 严玲<sup>2</sup>

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051;2 鞍山钢铁集团技术中心,鞍山 114001)

**摘要** 通过 Gleeble-3800 热模机将 EH460 钢 80 mm 热轧板(成分:0.07C,0.39Si,1.76Mn,0.34Ni,0.36Cu,0.02~0.05Nb,0.05~0.10V,≤0.02Ti,0.008Al)切取的 Φ5 mm×86 mm 试样以 10 °C/s 加热至 1 200 °C 5 min 奥氏体化,然后以 10 °C/s 冷却至 830 °C,并在 830 °C 以变形速率 1 s<sup>-1</sup>,进行 30% 的热压缩变形试验,并以 1~30 °C/s 冷却到室温。通过膨胀量-温度曲线,结合不同冷却速率下的组织,利用 Origin 软件得出 EH460 钢的动态连续冷却转变曲线。结果表明,当冷却速率小于 3 °C/s 时,EH460 钢的组织为铁素体+少量贝氏体;当冷却速率为 5~10 °C/s 时,组织为贝氏体+少量铁素体;当冷却速率大于 20 °C/s 时,组织以板条贝氏体为主,并含少量粒状贝氏体;当冷却速率从 1 °C/s 增加至 30 °C/s 时,该钢 HV 硬度值由 246 增加到 274。

**关键词** EH460 船板钢 相变 冷却速率 CCT 曲线

## Dynamic Continuous Cooling Transformation Curves of High Strength Hull Structural Steel EH460

Li Shengli<sup>1,2</sup>, Sun Ao<sup>1</sup>, Sun Yiting<sup>1</sup>, Zhou Cheng<sup>2</sup> and Yan Ling<sup>2</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051; 2 Technology Center, Anshan Iron and Steel Group, Anshan 114001)

**Abstract** The hot compression test on Φ5 mm×86 mm test specimen cut from 80 mm hot-rolled plate of steel EH460 (成分:0.07C,0.39Si,1.76Mn,0.34Ni,0.36Cu,0.02~0.05Nb,0.05~0.10V,≤0.02Ti,0.008Als) with 10 °C/s heating to 1 200 °C for 5 min austenizing then with 10 °C/s cooling to 830 °C and with strain rate 1 s<sup>-1</sup>, deformation 30% at 830 °C, then cooling to ambient temperature with 1~30 °C/s has been carried out by using a Gleeble-3800 thermal simulation testing machine. And the dynamic continuous cooling transformation (CCT) curves of tested steel EH460 is obtained by dilation-temperature curves combined with structure at different cooling rate and using Origin software. Results show that with cooling rate less than 3 °C/s the structure of steel EH460 is ferrite + minor bainite, with cooling rate 5~10 °C/s the structure is bainite + minor ferrite and with cooling rate more than 20 °C/s the structure is mainly lath bainite with little granular bainite; with cooling rate increasing from 1 °C/s to 30 °C/s the HV hardness value of the steel increases from 246 to 274.

**Material Index** Hull Structure Steel EH460, Phase Transformation, Cooling Rate, CCT Curves

近年来,随着国内外造船工业的高速发展,我国对船板钢的需求也日益增加。另外船舶向大型化、高速化方向发展的趋势使高强度船体结构用钢的需求不断扩大,对钢铁制造业提出了新的要求,高强船板钢使用比例将逐年提高<sup>[1-3]</sup>。目前我国已有很多钢铁企业开始研制要求更高的大厚度的船板钢,EH460 船板钢因具有高强度和良好的低温冲击韧性,能够很好的满足船舶行业的需要<sup>[4-5]</sup>,因此,EH460 钢越来越多的被应用于船舶制造领域。

鞍钢通过优化船板钢的化学成分、添加适量的 Mo,采用 TMCP 工艺试生产 EH460 高强度船板钢。

为此,在试轧前采用热模拟试验法研究了 EH460 船板钢在连续冷却过程中相变行为,分析了其组织变化规律,并测定了不同冷却速率下相变产物的硬度,为现场制定合理的冷却工艺提供理论依据。

### 1 试样制备与方法

热模拟试验用钢试样取自于钢厂的 300 mm 厚的小型钢锭,其化学成分如表 1 所示。

将钢锭在 Φ550 mm 的试验机上加工成厚度为 80 mm 的钢板。在试验中,将热轧态的钢板加工成 Φ5 mm×86 mm 的圆柱形热模拟试样,再利用

表 1 试验钢 EH460 的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested steel EH460 / %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Nb	V	Ti	Als
0.07	0.39	1.76	≤0.020	≤0.015	0.34	≤0.50	0.36	0.21	0.02~0.05	0.05~0.10	≤0.02	0.008

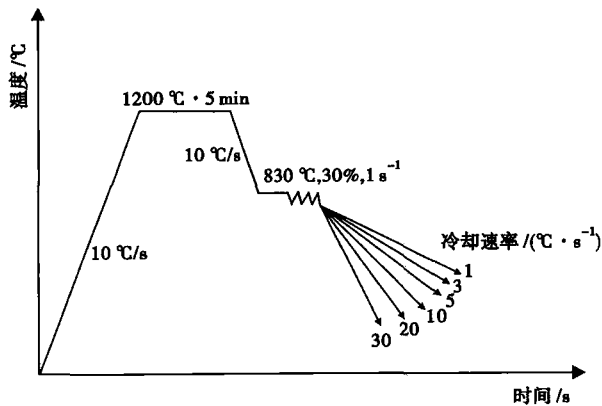


图1 EH460 钢热模拟工艺示意图

Fig. 1 Schematics of thermal simulation process of steel EH460

Gleeble3800 热模拟试验机将试样以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的速度加热到  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保温  $5\text{ min}$  使其完全奥氏体化, 然后以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的速度冷却到  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保温  $5\text{ s}$  以消除试样内部的温度梯度, 再进行压缩变形, 变形速率为  $1\text{ s}^{-1}$ , 变形量为  $30\%$ , 并以  $1, 3, 5, 10, 20, 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的速度冷却到室温, 试验冷却工艺如图 1 所示。将试样经过粗磨、精磨及抛光后, 利用  $4\%$  的硝酸酒精溶液对其腐蚀  $15\text{ s}$  左右, 再利用金相显微镜对其显微组织进行观察及分析。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 EH460 钢在不同冷却速率下的组织及硬度

从图 2 可以看出, 由于转变温度不同, 组织从奥氏体主要转变为铁素体和贝氏体等两种不同形式, 铁素体的转变称为过冷奥氏体的高温转变, 贝氏体的转变称为过冷奥氏体的中温转变<sup>[6-7]</sup>。

从图 2 和表 2 可见, 当冷却速率小于  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 其显微组织中以铁素体 (F)、针状铁素体 (AF) 为主, 其中含有少量贝氏体 (B), 且显微组织较粗大; 当冷却速率为  $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 其组织以贝氏体为主, 且含有少量的铁素体; 当冷却速率大于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 其组织中板条贝氏体 (LB) 含量逐渐增多, 粒状贝氏体 (GB) 含量减少, 且其组织变得更加细小。不同冷却速率下 EH460 钢的显微组织及其相应的硬度如表 2 所示。

由表 2 可知, 随着冷却速率从  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  到  $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 显微 HV 硬度值也从 246 增加到 274, 其硬度值明显增大。这是因为一方面随着冷却速率的增大, 其显微组织发生细化进而产生细晶强化; 另一方面, 随着冷却速率的增加, 软相铁素体的体积分数减小, 硬相贝氏体体积分数增多且其形态也发生变化<sup>[8]</sup>。当冷却速率达到  $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 其组织中除了仅有少量的粒状贝氏体外, 其余大部分都是板条贝氏体, 因而试验钢的显微 HV 硬度值达到最大。

### 2.2 转变类型及临界点的确定

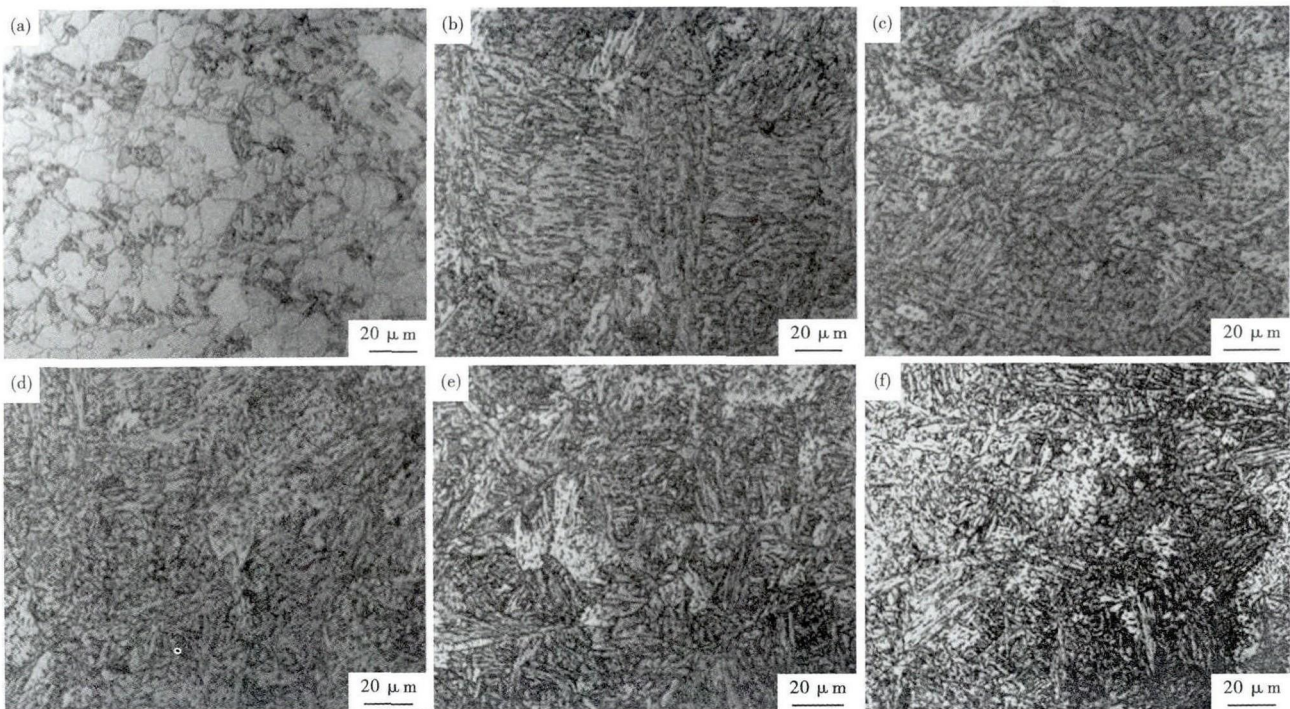
图2 EH460 钢在冷却速率/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$ : (a)1, (b)3, (c)5, (d)10, (e)20 和 (f)30 时组织形貌Fig. 2 Morphology of structure of steel EH460 at cooling rate / $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$ : (a)1, (b)3, (c)5, (d)10, (e)20 and (f)30

表 2 冷却速率对 EH460 钢的组织及硬度的影响

Table 2 Effect of cooling rate on structure and hardness of steel EH460

冷却速率/ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )	显微组织	HV 硬度值
1	F + 少量 B	246
3	AF + 少量 B	254
5	B + 少量 AF	255
10	B + 少量 AF	257
20	LB + 少量 GB	268
30	LB + 少量 GB	274

根据热模拟膨胀曲线上的拐点位置和金相组织检验结果可以判定 EH460 钢在不同冷却速率下的转变类型,然后再用切线法确定各转变的临界点。各组织转变的类型及相应的临界温度如表 3 所示。

### 2.3 EH460 钢动态 CCT 曲线

试验采用单道次压缩法,根据冷却过程中的膨胀量-温度曲线来确定相变的开始温度和终了温度,并结合不同冷却速率下的金相显微组织,利用 Origin 绘图软件绘制出高强度船板钢 EH460 的动态连续冷却转变曲线, EH460 钢的 CCT 曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出,该成分的 EH460 试验钢的相

表 3 冷却速率对 EH460 钢相变温度的影响

Table 3 Effect of cooling rate on phase transformation temperature of steel EH460

冷却速率/ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )	A→F		A→B	
	开始温度/ $^{\circ}\text{C}$	结束温度/ $^{\circ}\text{C}$	开始温度/ $^{\circ}\text{C}$	结束温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	630	521	521	442
3	620	520	520	433
5	621	516	516	417
10	606	497	497	396
20	603	484	484	387
30	600	480	480	375

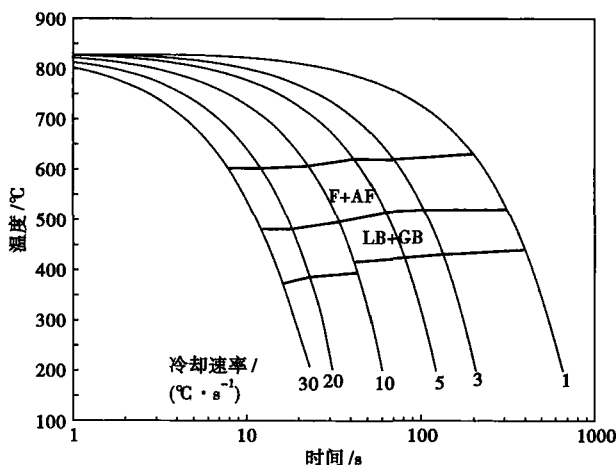


图 3 试验 EH460 钢的连续冷却转变温度曲线

Fig. 3 Continuous cooling transformation curves of tested steel EH460

变区域主要由铁素体和贝氏体两部分组成,在高温区主要形成铁素体,中温区形成贝氏体,随冷却速率从  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$  增加至  $30^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,相变结束温度从  $442^{\circ}\text{C}$  降到  $375^{\circ}\text{C}$ 。结合表 3 可发现,随着冷却速率的加快,组织中 铁素体与贝氏体的形态及其所占比例均发生改变,铁素体的形态由块状逐渐变为针状,贝氏体的形态由粒状逐渐变为板条状。

### 3 结论

(1) EH460 钢在冷却速率小于  $3^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,其组织主要以铁素体为主并混有少量的贝氏体,且随着冷却速率的增加,铁素体的形态主要由块状逐渐变为针状;当冷却速率为  $5 \sim 10^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,其组织以贝氏体为主并混有少量的铁素体,且随着冷却速率的增加,贝氏体所占比例逐渐增加;当冷却速率大于  $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时,其组织中大部分都是板条贝氏体,仅存有少量的粒状贝氏体;试验钢的显微组织随着冷却速率的增加逐渐细化。

(2) EH460 钢的显微硬度随着冷却速率的加快而逐渐增大。 $1 \sim 30^{\circ}\text{C}/\text{s}$  冷却速率的试验钢的硬度值随着组织的细化以及 AF、GB、LB 的形成而呈增加趋势,在本次模拟试验中,其 HV 硬度值随着冷却速率的提高而增大 30 左右。

(3) 该成分的 EH460 试验钢的相变区域主要由铁素体和贝氏体两部分组成。在高温区形成铁素体,在中温区形成贝氏体,相变结束温度随着冷却速率的提高而逐渐降低。

### 参考文献

- [1] 牛琳霞. 我国船舶用钢的需求分析[J]. 武钢技术, 2006, 44(5): 48-50.
- [2] 张豪, 雷运涛, 魏金山. 高强度船体结构钢的现状与发展[J]. 特种钢结构, 2004, 19(2): 39-40.
- [3] 武会宾, 唐获, 赵爱民, 等. 高强韧 FH460 级船板钢组织性能研究[J]. 金属世界, 2010(5): 40-43.
- [4] Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft. Supplementary Rules for Application of Steel with Yield Strength of  $460 \text{ N}/\text{mm}^2$  [S]. Hamburg: Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft, 2009: 1-17.
- [5] Det Norske Veritas. Extra High Strength Steel Material NV47 for Hull Structural Application in Container Ships [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2011: 1-10.
- [6] 刘永铨. 钢的热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 16-25.
- [7] 陈飞, 汪五一. FH32 高强船板动态 CCT 曲线的研究[J]. 南钢科技与管理, 2015(1): 16-25.
- [8] 史学星, 鞠新华, 王蕾, 等. DH36 高强度船板钢的动态 CCT 曲线[J]. 机械工程材料, 2013, 37(1): 18-20.

李胜利(1967-), 男, 博士(2006 年东北大学), 教授, 1988 年鞍山钢铁学院(本科)毕业, 冶炼和轧钢工艺研究。

E-mail: Lishengli66@sohu.com

收稿日期: 2016-10-29