

## 货油舱用耐蚀钢连续冷却的转变规律

于 驰<sup>1</sup>, 高秀华<sup>2</sup>, 王 平<sup>1</sup>, 牛西茜<sup>2</sup>

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 在 MMS-300 热模拟试验机上测得货油舱用耐蚀钢在不同冷速下的连续冷却膨胀曲线, 结合金相-硬度法, 研究了该耐蚀钢变形和未变形过冷奥氏体冷却过程中的组织演变, 建立了连续冷却转变 (CCT) 曲线。结果表明, 动态 CCT 曲线较静态 CCT 曲线明显向左上方移动, 提高了奥氏体转变的开始温度; 随着冷却速度的增大, 显微组织由多边形铁素体、珠光体和少量贝氏体逐渐过渡到针状铁素体、粒状贝氏体, 最后为板条贝氏体和马氏体。

**关 键 词:** 货油舱用钢; 热模拟; 连续冷却转变曲线; 金相-硬度法; 显微组织

中图分类号: TP 172

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)04-0479-05

## Continuous Cooling Transformation of Corrosion Resistant Steel for Cargo Oil Tank

YU Chi<sup>1</sup>, GAO Xiu-hua<sup>2</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, NIU Xi-xi<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YU Chi, E-mail: yuchi0319@163.com)

**Abstract:** The continuous cooling transformation (CCT) curve of cargo oil tank (COT) steel was obtained by using dilatometric method combined with metallographic analysis-hardness measurement, and the austenites before and after the compress deformation were analyzed, which were tested on MMS-300 thermal mechanical simulation under different cooling rates. The results showed that the dynamic CCT curve compared to static CCT curve obviously moves to the left and up direction, and the starting temperature of austenite increases. With increasing the cooling rate, the microstructures gradually change from polygonal ferrite, pearlite and a little bainite to a small amount of acicular ferrite and granular bainite, finally transform into bainite and martensite.

**Key words:** cargo oil tank (COT) steel; thermal simulation; continuous cooling transformation (CCT) curve; metallographic analysis-hardness measurement; microstructure

货油舱用钢要求具有高抗腐蚀性、高强度、良好的低温韧性和焊接性能。一般情况是在普通钢中加入一些合金元素, 利用控轧控冷技术得到良好的组织性能, 提高钢的强韧性和耐蚀性。关于传统合金钢的连续冷却转变行为研究论文很多<sup>[1-4]</sup>, 但对货油舱用钢的研究甚少<sup>[5-6]</sup>。而且, 近年来油船遭受腐蚀导致的事故频频发生, 因此迫切需要开发新型的耐腐蚀货油舱用钢。

本文针对一种新型的货油舱用钢进行奥氏体

连续冷却变形转变行为的研究。利用热模拟机结合金相-硬度法得到耐蚀钢的静态和动态 CCT 曲线。研究不同条件下耐蚀钢的转变产物和维氏硬度, 系统分析了不同冷速对相变各阶段的影响规律, 为热轧生产工艺的制定奠定理论基础。

## 1 实验方法

实验原料在 150 kg 高频感应加热炉中冶炼、

收稿日期: 2014-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174058)。

作者简介: 于 驰(1979-), 男, 辽宁铁岭人, 东北大学博士研究生; 高秀华(1966-), 女, 河北唐山人, 东北大学教授, 博士生导师; 王 平(1964-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 东北大学教授, 博士生导师。

浇铸,锻成 120 mm × 100 mm 矩形钢坯,在实验室  $\phi 450$  轧机上将钢坯轧成 16 mm 厚的板材,加工成规格为  $\phi 8$  mm × 15 mm 的热模拟试样. 试验钢化学成分(质量分数,%)为 C 0.085, Si 0.24, Mn 1.36, P 0.006, S 0.002, Al 0.04, Cr 0.23, Cu 0.16, W 0.21, Mo 0.21, Sn 0.1, Ni 0.11, Nb 0.012, Fe 余量.

利用东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室自主开发的 MMS-300 热模拟实验机进行相关实验. 实验的步骤如下:首先测试不同冷速下的相变行为,将试样以 20 °C/s 的速度加热至 1 200 °C,保温 3 min,然后以 10 °C/s 的速度冷却至 900 °C,进行变形和未变形,保温 20 s 后分别以 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40 和 50 °C/s 的冷却速度冷却至室温. 利用热模拟试验机记录冷却过程中的热膨胀曲线,采用切线法确定相变温度,如图 1 所示. 将热模拟后得到的试样沿轴向中间切开用于硬度和金相实验研究,利用 SVDTM 维氏硬度计测量耐蚀钢硬度,利用 Leica 金相显微镜观察显微组织形貌. 结合以上数据绘制 CCT 曲线.

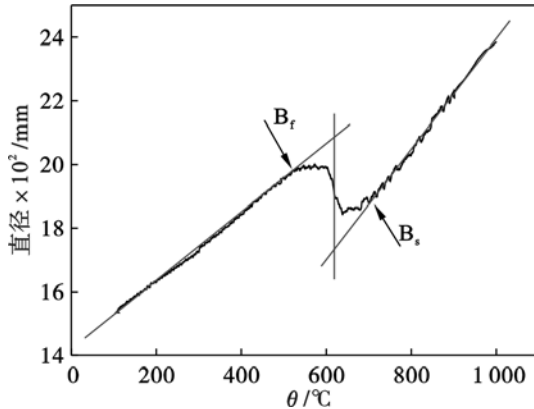


图 1 耐蚀钢相变温度曲线

Fig. 1 Transformation temperature curve of corrosion resistant steel

## 2 实验结果与分析

### 2.1 静态 CCT 曲线和动态 CCT 曲线

实验钢在 900 °C 奥氏体未发生变形和变形 0.4 的 CCT 曲线如图 2 所示,图中标示出在不同冷却速度下过冷奥氏体所经历相变区.

从图 2 可以看出,静、动态 CCT 曲线相变区域主要分成 2 个部分:高温转变区主要为先共析铁素体(PF)和珠光体(P);中温转变区主要是贝氏体(B);低温转变区主要是马氏体(M).

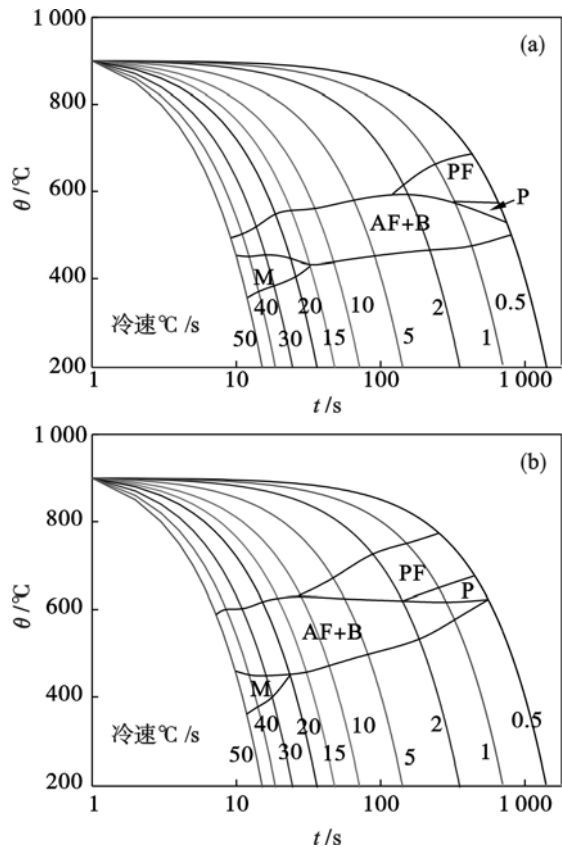


图 2 耐蚀钢未变形和变形奥氏体连续冷却转变曲线  
Fig. 2 CCT curves of austenite for corrosion resistant steel before and after deformation  
(a)—静态 CCT; (b)—动态 CCT.

由图 2a 可知,未变形奥氏体具有较好的稳定性,推迟了多边形铁素体相变,珠光体转变发生在 0.5 ~ 1 °C/s 的冷速范围内. 图 2b 与 2a 相比,珠光体开始转变温度较高,而且冷速在 0.5 ~ 2 °C/s 范围内均可以发生珠光体相变,说明变形在一定程度上促进了珠光体转变. 当变形量为 0.4,贝氏体转变的冷却速度增大,与图 2a 相比贝氏体相变区整体向左上移动. 表明变形可以促进先共析铁素体相变,导致出现先共析铁素体 + 珠光体混合组织的临界冷却速度增大. 变形提高了铁素体的开始转变温度,缩短了  $\gamma \rightarrow \alpha$  转变的孕育期. 这是因为变形使奥氏体晶粒拉长,晶内产生大量的变形带和位错,使晶内缺陷密度大幅度增加,畸变能存储量增大,易于相变形核,形核率增加,细化晶粒;另一方面有利于铁原子与碳原子的扩散<sup>[7-8]</sup>.

### 2.2 冷却速度对相变组织的影响

在不同冷却速度下耐蚀钢的显微组织如图 3 和图 4 所示. 可以看出耐蚀钢晶粒的大小随着冷却速度的增加而减小,晶粒细化作用更加明显.

在未变形条件下,当冷速为 0.5 °C/s 时,耐蚀钢组织主要为多边形铁素体 + 珠光体;冷速的

进一步增加会使在原奥氏体晶界形核的多边形铁素体转变为针状铁素体,转变过程中碳会扩散到相邻的奥氏体组织中.当扩散的碳含量(质量分数)达到共析转变时形成退化珠光体,随后冷却转变成贝氏体组织.因此当冷速增加到 $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时得到的组织主要是针状铁素体+粒状贝氏体,针状铁素体板条中分布着短杆状或粒状直线平行排列的岛状组织.当冷速为 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,得到的组织主要为粒状贝氏体+板条贝氏体,针状铁素体明显减少.冷速升高到 $15\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,组织进一步细化,粒状贝氏体体积分数增加.当冷速为 $30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,贝氏体形态由粒状转变成板条状,出现马氏体组织,最后得到的组织为贝氏体+马氏体.

奥氏体经过0.4的变形后,当冷速为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,得到的室温组织为多边形铁素体+珠光体,其中铁素体晶粒相对于未变形组织明显变细,珠光体更弥散均匀.当冷速为 $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,得到的组织主要是多边形铁素体+粒状贝氏体.随着冷速的增加,当冷速为 $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时组织为针状铁素体+粒状贝氏体.当冷速增加到 $15\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,得到的组织同样是针状铁素体+粒状贝氏体且晶粒分布更加均匀细小,而且粒状贝氏体的体积分数增加.当冷速达到 $30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,得到的室温组织为贝氏体+马氏体,针状铁素体减少,组织得到了细化,马氏体的体积分数增加.

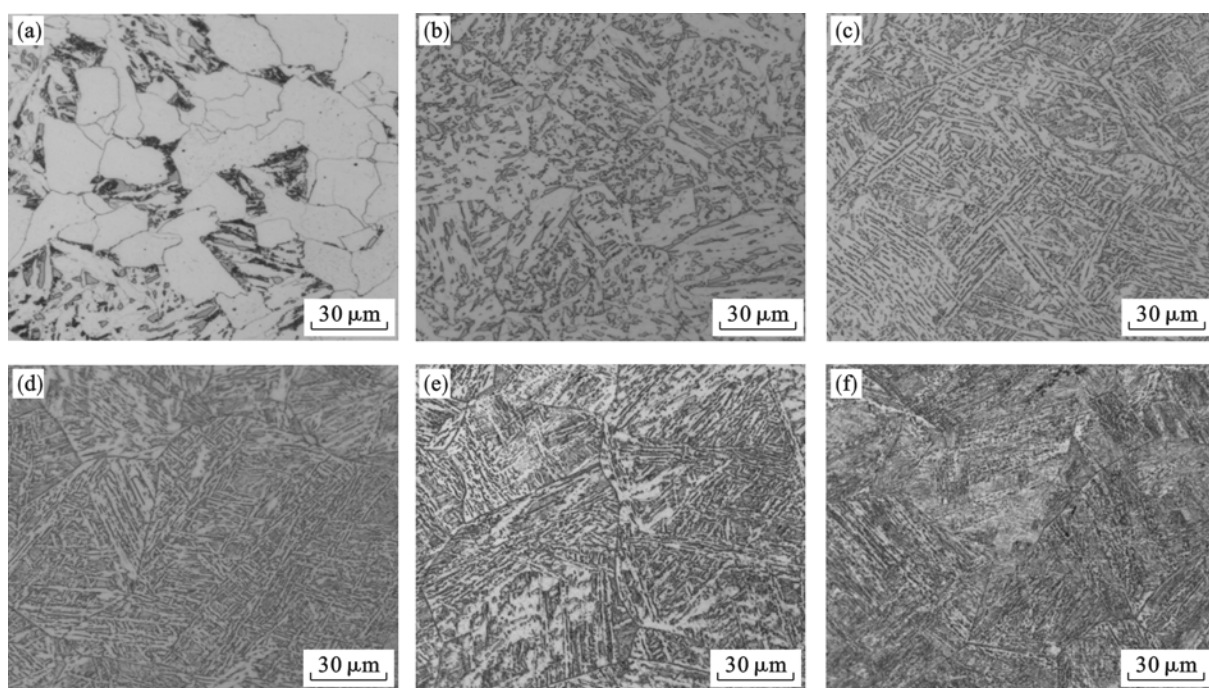


图3 耐蚀钢未变形时不同冷速下的显微组织

Fig. 3 Microstructure of corrosion resistant steel with different cooling rates before deformation

(a)— $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (b)— $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (c)— $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (d)— $15\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (e)— $20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (f)— $30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ .

对比动态 CCT 曲线和静态 CCT 曲线,可以看出在发生0.4变形后铁素体相变开始温度增加,扩大了先共析铁素体相变区,马氏体相变区相对减小.结合金相照片,发生变形后形成的铁素体晶粒相对拉长且比较细小,这是由于变形促使奥氏体晶粒发生了变形和晶界的相对转动,致使晶界畸变,晶界能增大,同时晶粒内原子排序发生混乱,促使先共析铁素体形成.当奥氏体变形量达到0.4时使奥氏体晶粒变形拉长,增加晶界面积,由于有大量位错存在而处于高能量状态,位错处优先形核,铁素体形核位置与数量增多,使晶界上的新相形核速率提高<sup>[9]</sup>.总之,变形促进了铁素体转变,提高了转变开始温度,细化了晶粒,使相变

开始所需时间缩短及 CCT 曲线向左上移动,扩大了铁素体和珠光体相变区.从金相照片中还可看出,变形在一定程度上抑制了贝氏体的相变,变形奥氏体诱发位错缠结,贝氏体相变时被位错缠结阻止,晶粒不易长大,但当变形增加时,变形诱发的晶体缺陷提供更多形核位置,这种抑制作用逐渐被取消.此时从变形奥氏体转变的贝氏体体积分数与从无变形奥氏体转变的贝氏体体积分数基本相当,但显微组织得到细化,强化了金属基体.

### 2.3 不同冷速条件下耐蚀钢的维氏硬度

通过对耐蚀钢相变规律的研究可以看出,不同的冷却速度能够得到不同的显微组织.不同冷速对显微组织硬度值的影响规律如图5所示.变

形 0.4 与未变形相比较,在相同的冷速下,变形后的组织硬度比未变形的偏高,但在冷速约  $3 \sim 12 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  的范围内未变形的硬度值偏高,主要原因是在冷速大约在  $3 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  时未变形奥氏体已经结束了先共析铁素体析出,而变形 0.4 奥氏体的先共析铁素体相变在持续进行,直至在冷速约

$12 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  时才结束,而在这个范围内未变形的奥氏体已经有少量贝氏体析出致使硬度值偏高;在其他冷速条件下,由于变形后奥氏体晶粒内部形成畸变带,晶界变形导致相变后晶粒细化,一定程度上强化了金属基体,致使硬度值偏高。

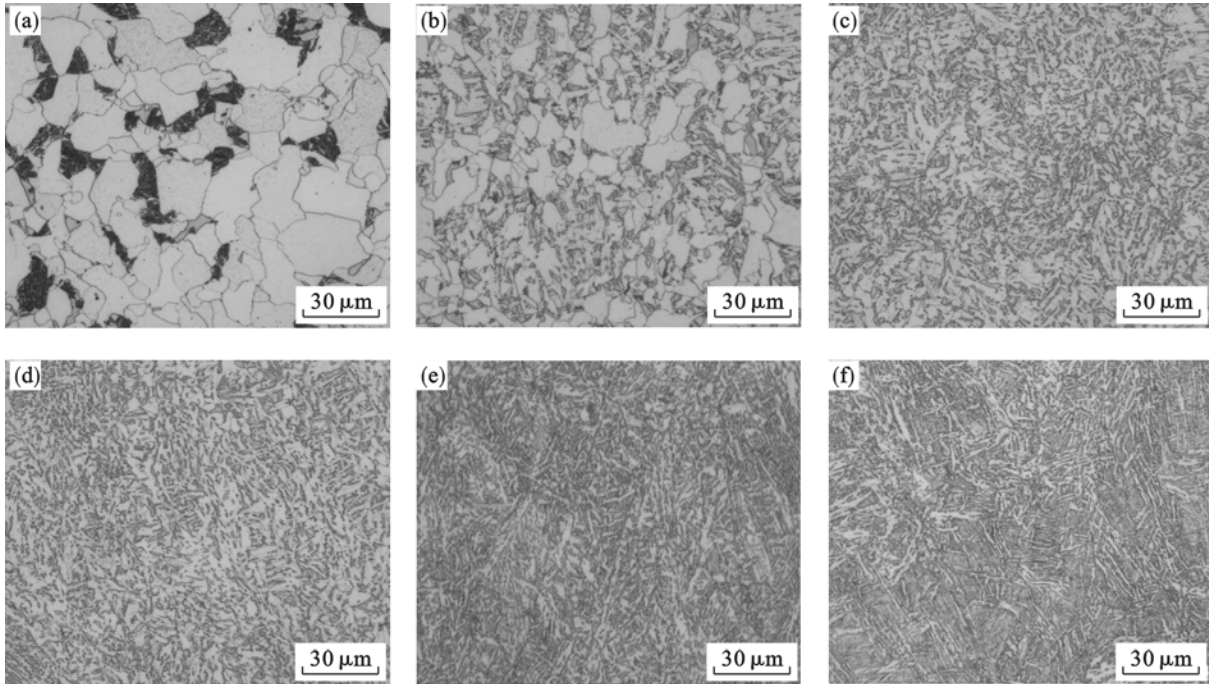


图 4 耐蚀钢变形时不同冷速下的显微组织

Fig. 4 Microstructure of corrosion resistant steel with different cooling rates after deformation

(a)— $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (b)— $2 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (c)— $10 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (d)— $15 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (e)— $20 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ; (f)— $30 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ .

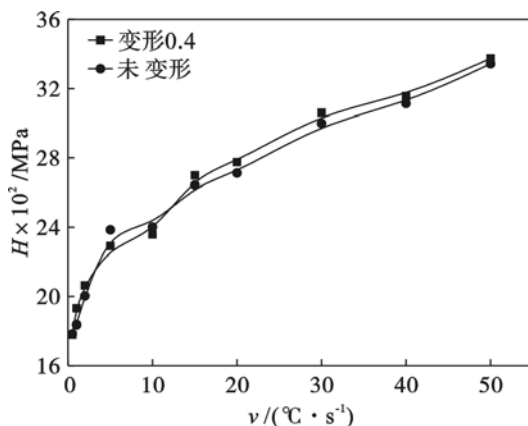


图 5 不同冷速下耐蚀钢的硬度

Fig. 5 Microhardness of corrosion resistant steel under different cooling rates

### 3 结 论

1) 与静态 CCT 曲线相比,动态 CCT 曲线整体向左上方向移动。

2) 随着冷速的增大,耐蚀钢的硬度增加。在相同的冷速下,形变奥氏体转变后的组织硬度值

较大,但在冷速约  $3 \sim 12 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  的范围内未变形的硬度值偏高。

3) 冷速控制在  $10 \sim 15 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  范围内,耐蚀钢可以获得较好的力学性能和耐蚀性能。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Z M, Cai Q W, Yu Q, et al. Continuous cooling transformation behavior and kinetic models of transformations for an ultra-low carbon bainitic steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, 19(12): 73–78.
- [2] 徐东,朱苗勇,唐正友,等. SCM435 钢奥氏体连续冷却转变行为[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2013, 34(3): 356–359.  
( Xu Dong, Zhu Miao-yong, Tang Zheng-you, et al. Continuous cooling transformation behavior of subcooling austenite of SCM435 steels [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2013, 34(3): 356–359. )
- [3] Zhao J W, Jiang Z Y, Kin J S, et al. Effects of tungsten on continuous cooling transformation characteristics of microalloyed steels [J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 252–258.

(下转第 488 页)