

# 含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢连续冷却转变曲线及其组织研究

陶军晖, 吴田\*, 戴伟, 李杰, 陈木青,  
汪川惠, 陈欣琦, 李睿, 靳海芹, 祁红艳

(湖北第二师范学院物理与机电工程学院功能材料研究所, 武汉 430205)

**摘要:** 采用热膨胀法和金相法, 在 Formastor F 试验机上测定了含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 的  $A_{c1}$  和  $A_{c3}$  以及  $M_s$ , 并测定了该钢在不同冷却速度下连续冷却时的膨胀曲线, 获得了该钢的连续冷却转变曲线(CCT 曲线)及其相应组织, 测定结果为大生产热处理工艺的制定提供了理论基础. 当轧后冷却速率  $< 0.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ , 可获得理想的多边形铁素体+少量珠光体组织. 淬硬性倾向较小, 基本不会出现冷裂纹.

**关键词:** 含 Ti 系; 微合金; 热轧搪瓷钢; 连续冷却转变曲线; 组织

**中图分类号:** Q151.2

**文献标识码:** A

含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 由宝武集团武汉钢铁有限公司开发, 主要用于制造搪瓷贮水罐体的原料钢板(卷), 其广泛应用于搪瓷内胆、供水设备、水箱、水处理罐等产品的制作. 针对国内家电行业大批量生产新一代搪瓷内胆的电热水器, 代替不锈钢内胆热水器, 业界已普遍采用 3.0 mm 以下的含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 替代进口冷轧搪瓷板制造搪瓷内胆. 钢板(卷)经过冲压成形、焊接、涂搪、烧搪工艺, 其使用性能优于不锈钢内胆, 使用寿命长, 安全性能好, 已成为家电行业的新品牌, 产品附加值高, 带动了含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢的开发和生产, 具有显著的经济效益和社会效益.

含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 的生产工艺中需要采取一定的热处理流程. 炉冷退火、空冷正火、水冷淬火等均属于连续冷却中的热处理流程. 过冷奥氏体在连续冷却中也可以发生等温的转变, 其包括有珠光体的转变、贝氏体的转变和马氏体的转变等等. 它们的转变温度范围与等温的转变基本相同. 连续冷却中只会出现等温冷却时有的转变. 然而, 奥氏体连续冷却的转变和等温的转变有

所不一样. 由于连续冷却要经过各个转变的温度范围, 所以会相继产生很多种类的转变. 同时冷却速度不同, 其转变发生也会不一. 另外各类转变不一样相对的量, 所以其性能组织也会不一样. 因此, 连续冷却转变将会表现得相当复杂, 其转变的规律也没有等温转变明显, 组织的区别也很难. 过冷的奥氏体的等温转变规律是能够表示为 C 曲线的. 另一种 C 曲线则能用于描述连续冷却的转变规律, 即“连续冷却的 C 曲线”, 也是“热动力学的曲线”, 英文简写“CCT Curve”<sup>[1-3]</sup>.

含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢的连续冷却的转变一般采用 CCT 曲线来描述. 依据含 Ti 系热轧搪瓷系列钢组织设计再结合所测定的 CCT 曲线, 能够得到含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢工业化大生产热处理工艺. 这对有效控制含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢的组织与性能, 提高钢铁产品的质量, 以及合理的制定热处理工艺等都有非常重要的理论意义<sup>[4-5]</sup>.

## 1 试验材料与方法

试验材料为武钢研究院 50 kg 的真空感应冶

收稿日期: 2018 02 06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51702091, 11404104); 湖北省自然科学基金项目(2018CFB296, 2017CFB581, 2016CFB202, 2017CFB192); 湖北省技术创新专项(重大项目)(2016AAA038); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201620); 湖北省教育厅科学技术研究计划项目(Q20173003, B2017215); 湖北第二师范学院科研项目(XK2016SS10).

\* 通讯联系人. E mail: twu@whu.edu.cn.

炼炉冶炼的铸坯,其主要化学成分范围跟含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 一致,如表 1 所示.将铸坯锻压并经过均匀化退火后,采用机加工的方式加工成  $\phi 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的热模拟 CCT 曲线测定试样,如图 1 所示.在试验室采用热膨胀法对热轧搪瓷钢热轧搪瓷系列的 CCT 曲线进行了测定,热膨胀曲线在 Formastor-F 试验机(如图 2 所示)上完成. Formastor-F 试验机是由日本富士电波株式会社生产的全自动相变测量装置,主要是测定不同金属奥氏体的转变及其组织与温度、时间之间的关系;不同冷却速率下的转变组织和它们转变的开始以及终止温度.具体试验方案为:试样  $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$  速

度加热至  $1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $5 \text{ min}$  保温,奥氏体化充分,然后以  $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$  的速度降温到  $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,保温  $5 \text{ s}$  后以  $5 \text{ s}^{-1}$  的应变速率进行道次变形量  $50\%$  的变形,再以  $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$  的速度降温到  $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,保温  $5 \text{ s}$  后以  $5 \text{ s}^{-1}$  的应变速率进行道次变形量  $40\%$  的变形,最后以  $0.1$ 、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $2.5$ 、 $5.0$ 、 $10.0$ 、 $15.0$ 、 $20.0$ 、 $25.0$ 、 $30.0$ 、 $45.0$ 、 $60.0$ 、 $75.0\text{ }^\circ\text{C/s}$  的速度冷却至  $200\text{ }^\circ\text{C}$ (如图 3).分析膨胀曲线,采用切线法对相变点实施确定<sup>[6]</sup>.

根据不同冷速拐点,同时与组织分析结合,来获得各相变开始之温度以及终止温度,并在坐标图中绘制出 CCT 曲线.

表 1 RT360 化学成分的范围

Tab. 1 The range of chemical components of RT360

材料	化学成分 (wt%)								
	C	Mn	Si	P	S	Al	N	Ti	Fe
RT360	0.06	0.60	0.03	0.015	0.012	0.010	0.006	0.06	Bal.

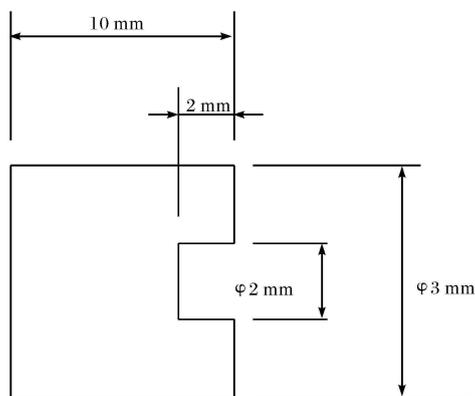


图 1 CCT 曲线测定试样尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CCT specimen

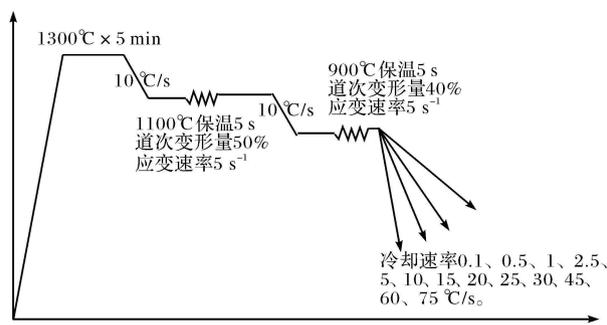


图 3 CCT 工艺试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CCT process test

## 2 试验结果与分析

### 2.1 CCT 曲线分析

相变临界点按照国标进行测试,加热和冷却速度为  $200 \text{ }^\circ\text{C/h}$ ,加热到  $1\ 050\text{ }^\circ\text{C}$ ,保温  $10 \text{ min}$ ,不同冷却速度下的相变温度如表 2 所示.在膨胀曲线分析时根据切线法进行相变点的确定,含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 的 CCT 曲线如图 4 所示.

从含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 的 CCT 曲线中(图 4)可以看出,RT360 钢各相变临界点分别为  $Ac_1 = 770\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Ac_3 = 917\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Ar_1 = 748\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Ar_3 = 898\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Ms = 400\text{ }^\circ\text{C}$ .由表 2 以及图 4 中可以看出,当冷却速度  $< 0.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$  时,热轧搪瓷钢的主控组织为珠光体+铁素体,冷却速度是  $0.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$  时,贝氏体开始形成,热轧搪瓷钢的主控组织为铁素体+珠光体+少量贝氏体,当冷却速度是  $0.5 \sim$



图 2 Formastor-F 试验机

Fig. 2 Formastor-F Tester

10 °C/s时,热轧搪瓷钢的主控组织为珠光体+铁素体+贝氏体,当冷却速度是 15 °C/s 时,珠光体基本消失,热轧搪瓷钢的主控组织为贝氏体+铁素体,当冷却速度>20 °C/s 时,马氏体转变部分发生,水冷时转变的产物主要是少量的游离铁素体+马氏体<sup>[7]</sup>.

综上所述,冷速较慢时(<0.5 °C/s),比较粗大多边形的铁素体+珠光体;冷速>0.5 °C/s 时,贝氏体会产生,以及针状铁素体的出现,转变温度约在 440~580°C,冷速>20 °C/s,马氏体开始转变,转变温度在 400°C左右.所以,为获得理想的多边形铁素体+少量珠光体组织,轧后冷却速度应<0.5 °C/s.

表 2 不同冷却速度下的相变温度  
Tab.2 Phase transition temperature at different cooling rates

冷却速度(°C/s)	A→F 开始	A→P 开始	A→P 结束	A→B 开始	A→M 开始	金相组织
0.1	910	715	—	—	—	F+P
0.5	835	660	590	590	—	F+P+B(少量)
1.0	820	660	590	590	—	F+P+B
2.5	800	660	570	570	—	F+P+B
5.0	770	650	553	553	—	F+P(少量)+B
10.0	750	625	562	562	—	F+P(少量)+B
15.0	720	—	—	590	—	F+B
20.0	710	—	—	555	400	F+B+M
25.0	700	—	—	553	400	F+B+M
30.0	680	—	—	550	400	F+B+M
45.0	672	—	—	545	400	F+B+M
60.0	670	—	—	473	400	F+B+M
75.0	665	—	—	—	400	F+M

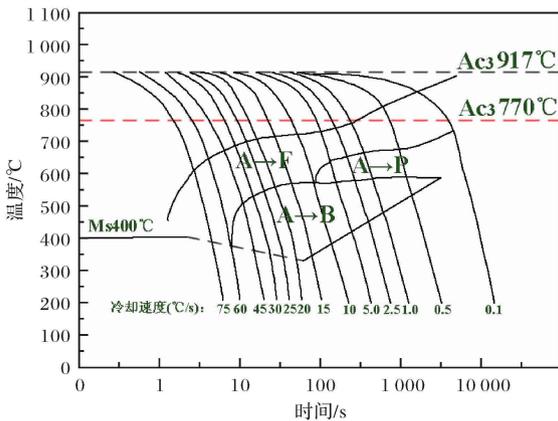


图 4 含 Ti 系热轧搪瓷钢 RT360 的 CCT 曲线  
Fig.4 CCT diagram of the Ti-bearing microalloyed hot-rolled enamel steel RT360

### 2.2 显微组织分析

图 5 是试样钢热加工后不同冷却速度下的显微转变组织.由图 5 可知,冷却速度对过冷奥氏体相变过程及室温组织有较大的影响.含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 铁素体组织在所有的冷却速度下均有析出,但铁素体的形态根据不同冷速将产生不同变化.冷速较慢,主要是多边形铁素体,冷速

加快,铁素体晶粒细化,甚至还有针状铁素体出现.冷速非常快大约 60~75 °C/s 时,铁素体以游离的形态出现.当冷速<15 °C/s,出现很细的索氏体甚至屈氏体,且量不断减少.然而贝氏体转变冷速区域相当宽范,冷速为 0.5 °C/s 时,少量的贝氏体会出现,同时有针状的铁素体加入,冷速变大后针状变得更加细小.并且在冷速非常快的条件下占主要微观组织的马氏体中还是夹杂有少量贝氏体的存在.冷速>20 °C/s 时,马氏体发生了转变,板条状的马氏体开始成为主导.

由于含 Ti 系热轧搪瓷系列钢被用于制作搪瓷内胆时需要经过卷筒、冲压和拉伸等加工工序,因此对塑性有较高要求,设计的含 Ti 系热轧搪瓷系列钢基体组织为多边形铁素体+少量珠光体.搪瓷内胆的耐压性决定了其对含 Ti 系热轧搪瓷系列钢强度有一定要求,其基体组织需要得到细小尺寸的晶粒以及第二相析出物来保证强度的要求.另外,内胆制作剪裁用料不分方向,需要含 Ti 系热轧搪瓷系列钢具备力学性能各向同性,因此含 Ti 系热轧搪瓷系列钢得到等轴晶基体组织为最佳.同时,等轴晶组织有利于提高钢板(卷)表面搪瓷层的密着性能<sup>[8]</sup>.

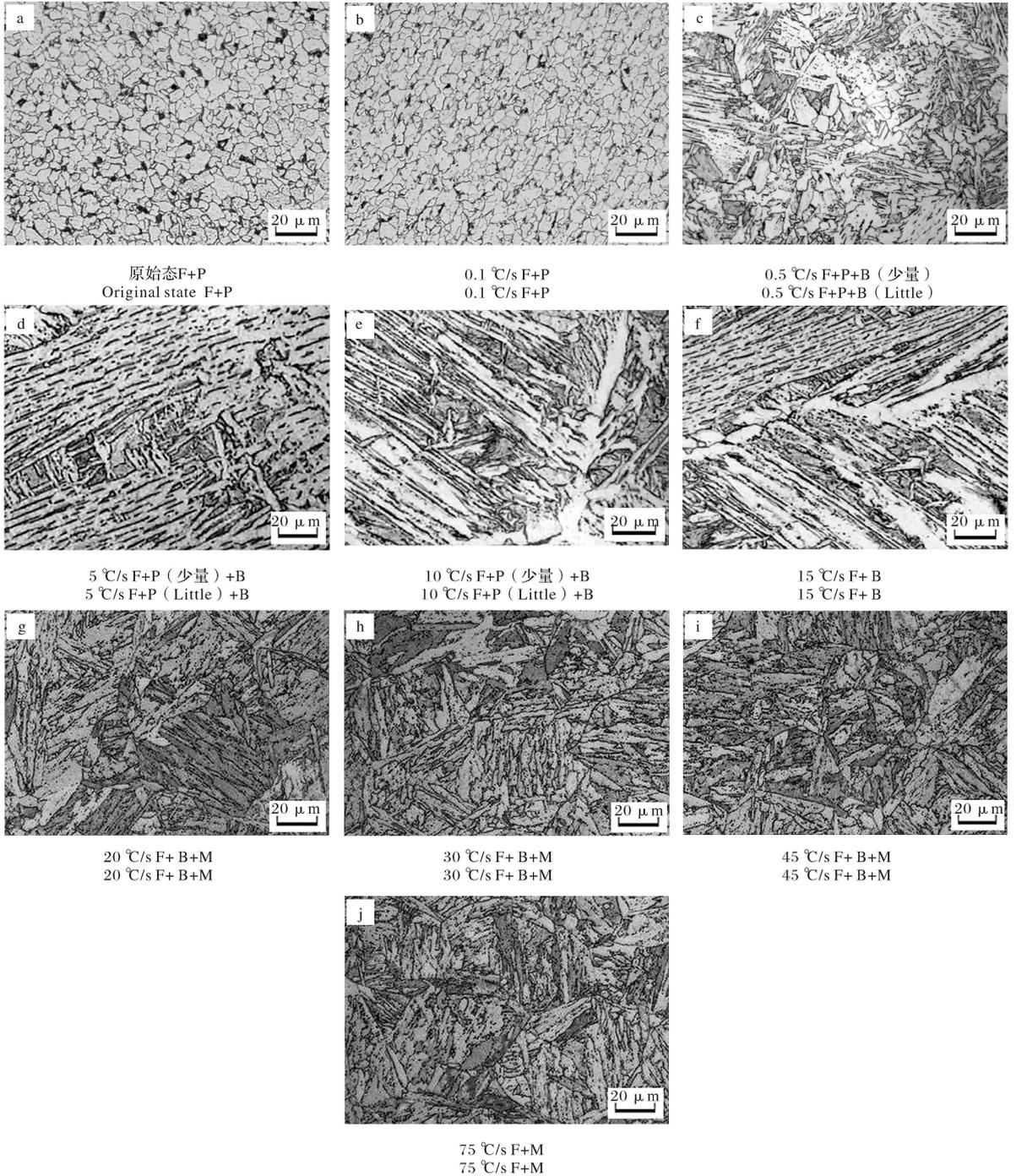


图 5 不同冷却速度条件下的金相组织

Fig. 5 Metallographic structure under different cooling rate conditions

### 2.3 维氏硬度分析

对不同冷却速度下的试样进行了维氏硬度测试,试验结果绘制成冷却速度与试样维氏硬度之间关系的曲线(如图 6).由图 6 可以看出,基材的维氏硬度平均值为 101 HV<sub>5</sub>,当冷却速度为 75 °C/s 时,试样的平均维氏硬度仅为 135 HV<sub>5</sub>,说明含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 的淬硬性倾向较小,出现冷裂纹的可能性小.随着冷却速度变缓慢,硬

度值逐步下降,当冷却速度小于 25 °C/s 时,硬度开始低于基材.当冷却速度为 0.5 °C/s 时,硬度平均值仅为 83 HV<sub>5</sub>,更加无需担心冷裂纹的出现.

### 3 结论

1) 采用热膨胀法和金相法测定并分析了含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 的 CCT 曲线及其相应组织,为大生产热处理工艺的制定提供了理论基础.

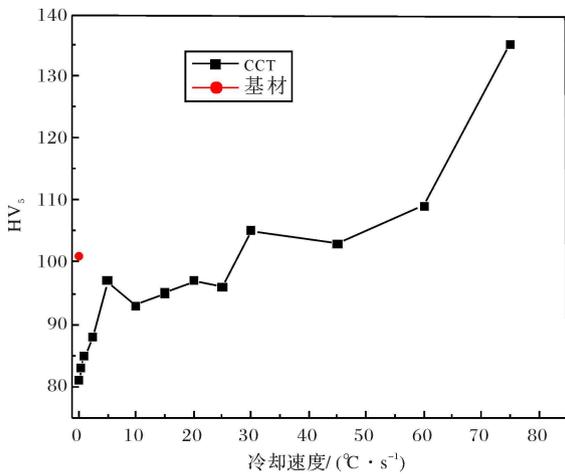


图6 冷却速度与试样维氏硬度之间的关系

Fig. 6 The relationship between the cooling rate and the hardness of the sample Vivtorinox

2) 为获得理想多边形的铁素体+少量的珠光体,含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 轧后的冷却速度应该 $<0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。

3) 当冷速等于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时,硬度平均值仅为 $83\text{ HV}_5$ ,说明含 Ti 系微合金热轧搪瓷钢 RT360 的淬硬性倾向较小,出现冷裂纹的可能性较小。

#### 参考文献:

[1] 蒋庆梅, 张小强, 陈礼清, 等. 1000 MPa 级超高强钢的 SH-CCT 曲线及其热影响区的组织和性能[J]. 钢铁研究学报, 2014, **26**(1):47-51.

2014, **26**(1):47-51.

JIANG Q M, ZHANG X Q, CHEN L Q, et al. SH-CCT Diagram, microstructures and properties of heat-affected zone in a 1000 MPa grade extra high-strength steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, **26**(1): 47-51. (Ch).

[2] LIAN X, CHENG S, ZHOU J, et al. Determination and analysis on CCT curves of 20Cr1Mo1V steel[J]. Hot Working Technology, 2014, **20**(1):122-129.

[3] KIRKALDY J S, SHARMA R C. A new phenomenology for steel it and CCT curves[J]. Scripta Metallurgica, 1982, **16**(10):1193-1198.

[4] 王凤香, 简方, 冯岩. 27SiMn 钢 CCT 曲线的测定[J]. 包钢科技, 2007, **33**(2):26-29.

WANG F X, JIAN F, FENG Y. Determination of CCT Curves of 27SiMn Steel[J]. Science and Technology of Baotou Steel (Group) Corporation, 2007, **33**(2): 26-29. (Ch).

[5] 杨颖, 侯华兴, 王华, 等. 一种高性能超低碳钢 CCT 曲线及组织的研究[J]. 鞍钢技术, 2008(4):27-30.

YANG Y, HOU H X, WANG H, et al. Study on CCT curve and structures of Ultra-Low carbon steel with high property[J]. Angang Technology, 2008(4): 27-30. (Ch).

[6] SONG Y F, TU Y Q, YANG H W, et al. Development of enameling steel sheet used for Heat-Exchanger[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, **633-634**:164-167.

[7] DONG F, DU L, LIU X, et al. Optimization of chemical compositions in low-carbon Al-killed enamel steel produced by ultra-fast continuous annealing[J]. Materials Characterization, 2013, **84**(10):81-87.

[8] GAO S, CHEN M, JOSHI M, et al. Yielding behavior and its effect on uniform elongation in IF steel with various grain sizes [J]. Journal of Materials Science, 2014, **49**(19): 6536-6542.

## A study on the continuous cooling transition curve of Ti-bearing microalloyed hot-rolled enamel steel and corresponding microstructures

TAO Junhui, WU Tian, DAI Wei, LI Jie, CHEN Muqing, WANG Chuanhui, CHEN Xinqi, LI Rui, JIN Haiqin, QI Hongyan

(Institute for Functional Materials, School of Physics and Mechanical and Electronical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** By dilatometric change referencing microscopic test and hardness measurement, the critical point at  $Ac_1$ ,  $Ac_3$  long with  $M_s$  of Ti-bearing microalloyed hot-rolled enamel steel was determined in Formastor-F thermalmechanical simulate. The different expanding curves of Continuous Cooling Transformation CCT diagram was measured. The CCT diagram provided the theoretical basis for the design of rolling and cooling process. When the cooling rate was less than  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , the ideal polygon ferrite and a small amount of pearlite is able to be generated. Thanks to the small hardening tendency, the cold crack would not appear in the matrix.

**Key words:** Ti-bearing; micro-alloy; hot-rolled enamel steel; continuous cooling transition curve; microstructure