# 400 MPa级稀土耐大气腐蚀抗震钢筋研发*

赵晓敏[1,2], 吕 刚[1], 银志军[3], 白月琴[1], 邢志刚[1], 杨鲁明[1]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古自治区稀土钢产品研发企业重点实验室, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼钢厂, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要**: 文章通过实验室研究了耐大气腐蚀钢筋的力学性能、耐腐蚀性能、稀土对耐腐蚀性能的影响、锈层组分以及试验钢CCT曲线测定等, 成功采用6#铸机小方坯工艺试制生产了具有包钢特色的稀土耐大气腐蚀钢筋, 铸坯质量、产品力学性能、弯曲等检验结果满足耐腐蚀钢筋标准要求。

**关键词**: 稀土; 耐大气腐蚀; 钢筋
**中图分类号**: TG142.13 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2019)06-0066-05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.06.017

# Research and Development of 400 MPa Grade of Rare Earth Weather-resistant Aseismic Ribbed Bar

*Zhao Xiao-min*[1,2], *Lv Gang*[1], *Yin Zhi-jun*[3], *Bai Yue-qin*[1], *Xing Zhi-gang*[1], *Yang Lu-ming*[1]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *Steel-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

**Abstract**: In the paper, it is studied the mechanical properties and corrosion resistance of weather-resistant ribbed bar, influences of rare earth on corrosion resistance, composition of rust layer and determination of CCT curve for test steel in the laboratory. The trial production of rare earth weather-resistant ribbed bar with the characteristics of Baotou Steel by 6# casting machine and billet process has been successful. Its test results such as the slab quality, mechanical properties and bending of products could meet the requirements of corrosion-resistant ribbed bar standard.

**Key words**: rare earth; weather-resistant; ribbed bar

**收稿日期**: 2019-09-16

**作者简介**: 赵晓敏(1986-), 女, 内蒙古赤峰市人, 硕士, 高级工程师, 现从事线棒材新产品研发工作。

中国知网 https://www.cnki.net

近年来，钢筋逐步向耐腐蚀、耐低温、耐火等功能性钢筋转变，主要是由于钢筋应用在以氯盐为主要介质的腐蚀环境，或工业大气的污染环境下，造成公路、铁路桥梁、隧道等工程结构腐蚀程度都相当严重，为了解决钢筋腐蚀问题，国内外也陆续出现了不锈钢筋、镀锌钢筋、环氧树脂钢筋[1]以及阴极保护法、阻锈剂等防腐技术，但这些都存在成本高、施工困难及防腐效果不理想等缺点。因此要从根本上延缓钢筋腐蚀进程，考虑钢筋锈蚀的“内因”，从钢筋自身入手，通过系列技术手段改变钢筋基体的组成、结构，研制普通低碳钢筋替代材料，是有效解决钢筋锈蚀问题的根本方法。本文介绍了包钢新开发的具有耐大气腐蚀、抗震性能的稀土耐大气腐蚀钢筋的化学成分设计、生产工艺和产品性能。该钢种是采用 6#铸机 150 mm × 150 mm 断面试验生产，试制后研究了稀土耐大气腐蚀钢筋的铸坯质量、产品力学、弯曲、耐腐蚀性能、锈层组分分析以及 CCT 曲线等。

## 1　稀土耐大气耐腐蚀钢筋成分设计

Cu－P 系耐候钢广泛应用于铁路、桥梁、建筑等领域，属于一种典型的耐大气腐蚀钢[2-4]。由于 Cu 和 P 元素在钢中耐腐蚀作用突出，同时还起着固溶强化的作用，考虑钢筋成本和 Cu、P 元素在钢中突出的耐腐蚀作用，成分设计中加入 Cu、P 元素，来加速钢的均匀溶解与 Fe 离子的氧化速度，还有助于钢表面形成均匀的锈层。V 是强碳化物形成元素，在钢中以 VC 和 $V_4C_3$ 形式存在，起沉淀强化作用的同时也提高钢的耐腐蚀性能，综合成本、力学性能和耐腐蚀性能考虑，在稀土耐大气腐蚀钢筋中添加了提高耐腐蚀性能的化学元素 Cr、Ni、RE。HRB400aERE 稀土耐腐蚀钢筋化学成分设计范围及目标成分见表 1。

**表 1　稀土耐大气腐蚀钢筋化学成分设计范围及目标成分**(质量分数)　　%

| 成分 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu | V | RE(加入量) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 设计成份 | ≤0.21 | 0.20～0.55 | 1.05～1.55 | ≥0.060 | ≤0.030 | ≤0.30 | ≤0.30 | ≤0.30 | 0.030～0.050 | 0.020 |
| 目标成分 | 0.20 | 0.44 | 1.15 | 0.097 | 0.024 | 0.27 | 0.25 | 0.26 | 0.035 | 0.018 |

根据耐大气腐蚀指数（$I$）公式[5]（式中成分均为质量分数），理论计算得到 HRB400aERE 稀土耐腐蚀钢筋耐大气腐蚀性指数 I 为 7.4，满足耐大气腐蚀指数 $I \geqslant 6.0$ 的要求。

$$I = 26.01[\%Cu] + 3.88[\%Ni] + 1.20[\%Cr] + 1.49[\%Si] + 17.28[\%P] - 7.29[\%Cu][\%Ni] - 9.10[\%Ni][\%P] - 33.39[\%Cu]^2$$

## 2　生产工艺

为保证 HRB400aERE 稀土耐大气腐蚀钢筋表面质量和综合力学性能，确定工艺路线为：高炉铁水—铁水预处理—转炉顶底复吹冶炼—LF 精炼—6#小方坯连铸 150 mm × 150 mm—长材厂轧制。

转炉冶炼采用 150 t 复吹转炉冶炼，终渣碱度按 3.0 控制。终点控制目标 $w[C] \geqslant 0.06\%$，出钢温度要不低于 1 620 ℃，终脱氧采用有 Al 脱氧，出钢依次加入铝铁、硅铁、锰铁、中碳铬铁、磷铁进行脱氧合金化。连铸做好保护浇注工作，该钢种对裂纹比较敏感[6-7]，要选择专用保护渣，采用合适的一冷和二冷冷却强度，防止出现表面裂纹和内部裂纹缺陷。轧制时，加热温度不宜过高，铸坯加热温度控制在 1 100～1 150 ℃，保证钢的在炉时间，钢坯出炉温度 1 050～1 150 ℃，开轧温度 950～1 050 ℃，终轧温度 900～950 ℃。轧制过程中，轧后控冷水箱关闭，避免钢筋表面出现淬火裂纹。

## 3　结果分析与讨论

### 3.1　稀土耐大气腐蚀钢筋用钢铸坯热酸低倍

图 1 为稀土耐腐蚀钢筋用钢铸坯横截面和铸坯外表面的热酸低倍照片，可以看到铸坯中心裂纹缺陷 1 级，中心疏松为 1 级，其余缺陷都为 0 级，铸坯外表面未发现有表面裂纹等缺陷。通过对连铸过热度、拉速以及二冷工艺的控制调整，铸坯内部质量较好。

中国知网　https://www.cnki.net

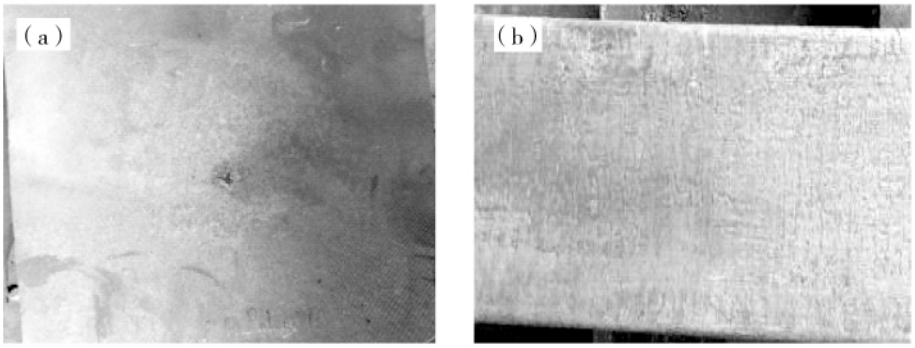



图1 铸坯横截面和铸坯外表面的热酸低倍照片

### 3.2 稀土耐大气腐蚀钢筋力学性能

在长材厂棒材作业区进行试验轧制，试验轧制了Φ20 mm、Φ25 mm、Φ32 mm、Φ36 mm 4个规格，对试轧的钢筋进行力学性能检验，检验结果如表2所示。4个规格钢筋屈服强度大于400 MPa，抗拉强度大于540 MPa，同时满足抗震性能要求。对钢筋进行正向弯曲和反向弯曲试验，钢筋内侧、外侧均未发现肉眼可见的裂纹(见图2)。

表2 稀土耐大气腐蚀钢筋力学性能检验结果

| 编号 | 规格/mm | $R_{eL}$/MPa | $R_m$/MPa | $A$/% | $A_{gt}$/% | $R_m^o/R_{eL}^o$ | $R_{eL}^o/R_{eL}$ | 弯曲 | 正弯 $\alpha=90°$<br>反弯 $\alpha=20°$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1-1 | Φ20 | 484 | 657 | 27.0 | 17.0 | 1.36 | 1.21 | 合格 | 合格 |
| 1-2 | Φ20 | 484 | 652 | 24.5 | 16.5 | 1.35 | 1.21 | 合格 | 合格 |
| 2-1 | Φ25 | 480 | 654 | 27.0 | 15.0 | 1.36 | 1.20 | 合格 | 合格 |
| 2-2 | Φ25 | 480 | 662 | 26.5 | 15.5 | 1.38 | 1.20 | 合格 | 合格 |
| 3-1 | Φ32 | 472 | 701 | 21.0 | 14.5 | 1.49 | 1.18 | 合格 | 合格 |
| 3-2 | Φ32 | 462 | 663 | 22.0 | 14.0 | 1.44 | 1.16 | 合格 | 合格 |
| 4-1 | Φ36 | 473 | 644 | 24.0 | 15.5 | 1.36 | 1.18 | 合格 | 合格 |
| 4-2 | Φ36 | 473 | 644 | 23.5 | 15.0 | 1.36 | 1.18 | 合格 | 合格 |

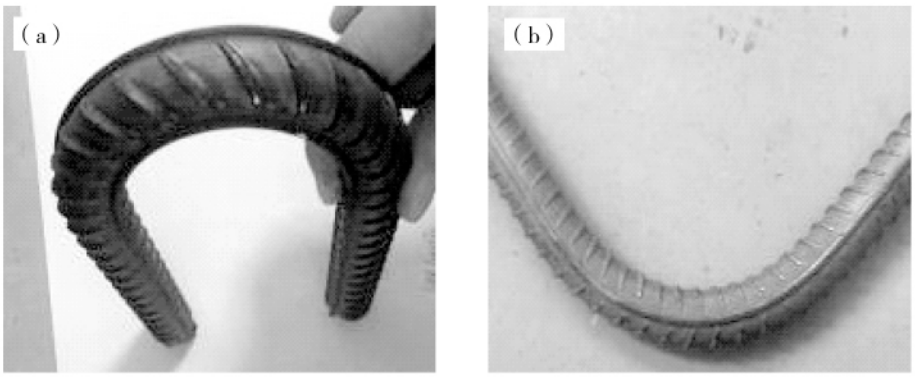



图2 钢筋正向弯曲和反向弯曲试验照片

### 3.3 中性盐雾腐蚀试验

试样尺寸为8 mm×70 mm×150 mm的块状试样，其中只有一个端面为工作面，面积为105 $cm^2$，其余各面用胶带进行密封，试验采用50 g/L NaCl中性水溶液，环境温度28 ℃，试验温度47 ℃。试验时间分别为6 h、24 h、48 h、96 h、168 h、240 h、480 h、720 h，比对试样为HRB400E。经过腐蚀试验后采用增重法评价试样腐蚀性能。对不同腐蚀时间与增重量数据进行分析，如图3所示，得到经过720 h腐蚀后，HRB400aERE稀土耐腐蚀钢筋和HRB400E普

中国知网 https://www.cnki.net

通抗震钢筋的腐蚀速率分别为 0.608 g/( $m^2$ · h) 、0.925 g/( $m^2$ · h) ,相对腐蚀速率是 HRB400E 钢筋的 66%。同时进行了加入稀土合金和不加入稀土合金比对试验,分析发现加入稀土后耐腐蚀钢筋的耐腐蚀性能可以提高 6.7% ~11.5% ,如图 4 所示。

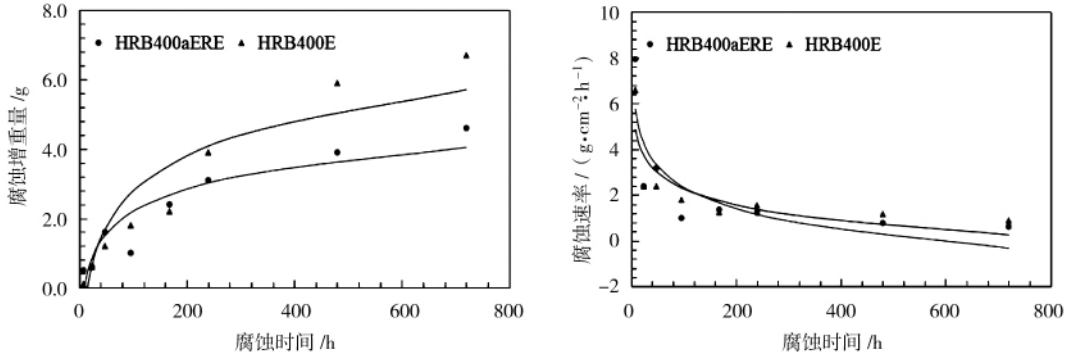



图 3　稀土耐大气腐蚀钢筋腐蚀后的腐蚀增重量和腐蚀速率曲线

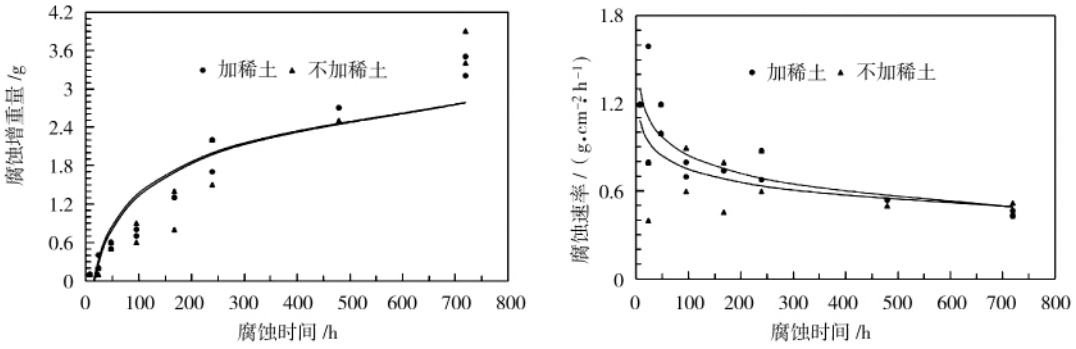



图 4　加入稀土和不加入的耐腐蚀钢筋腐蚀增重量和腐蚀速率曲线

### 3.4　稀土耐大气腐蚀钢筋锈层组分分析

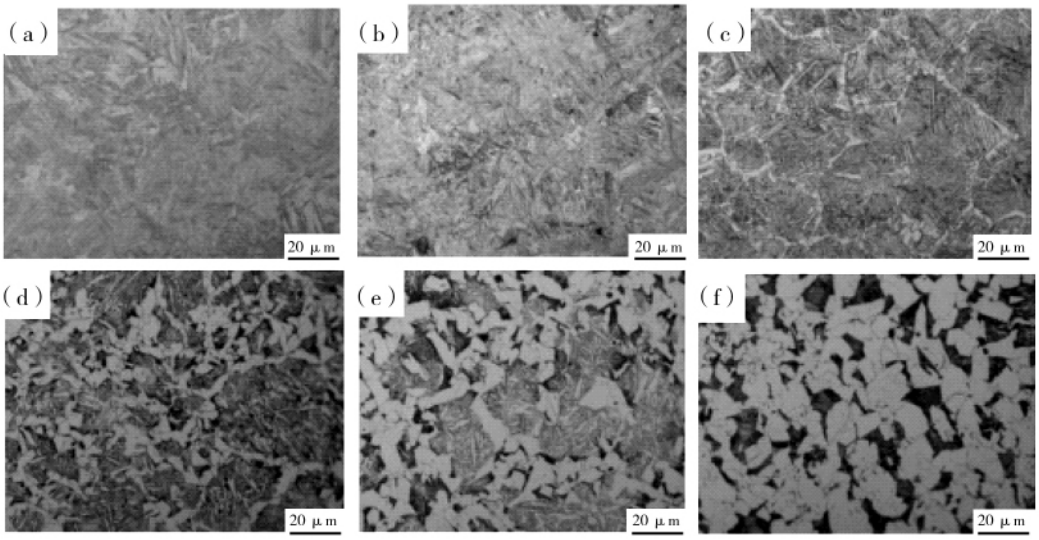
为了深入研究耐候钢腐蚀机理,对不同腐蚀时间得到的锈层进行分析,采用的检测方法为 X - 射线衍射定量分析。发现随着时间的延长,锈层组成成分也发生变化,初期锈层组分主要为 FeO、$Fe_2O_3$、$Fe_3O_4$,经过一段时间腐蚀后,锈层主要成分向 α - FeOOH、β - FeOOH、γ - FeOH 成分转变,而不同的是,普通 HRB400E 抗震钢筋经过腐蚀后,锈层组分中未发现 α - FeOOH 存在。

### 3.5　CCT 曲线测定及不同冷速下的组织

采用 Formastor - F Ⅱ全自动相变仪测定稀土耐大气腐蚀试验钢奥氏体转变产物、转变温度与时间的关系以及奥氏体化后不同冷却速度的转变开始和终了温度。将试样加热到 950 ℃后分别以 1 ℃/s、2 ℃/s、3 ℃/s、5 ℃/s、10 ℃/s、20 ℃/s、40 ℃/s、55 ℃/s冷速连续冷却至室温。根据温度 - 膨胀量曲线测定不同冷速下试验钢的相变点,绘制 CCT 曲线。随着冷却速度的增加,铁素体开始转变温度变化不大。而珠光体随着冷却速度的增加,珠光体转变量越来越少,逐渐向贝氏体和马氏体转变。从 CCT 曲线中可以看到马氏体转变的开始温度在 442 ℃左右,终了温度在 225 ℃左右。

将不同冷速下试样打磨抛光后,采用 4% 的硝酸酒精进行腐蚀,利用光学显微镜观察显微组织,如图 5 所示。当冷却速度小于 2 ℃/s 时,组织为多边形铁素体加珠光体组织,随着冷却速度的增加,铁素体晶粒的尺寸逐渐变小,出现针状铁素体,而且随着冷却速度的增加,铁素体体积分数明显降低,针状铁素体量逐渐增大。当冷速大于 2 ℃/s 时,珠光体组织逐渐向贝氏体组织转变,随着冷速的增加,当冷却速度超过 40 ℃/s 时,出现明显的马氏体组织。

中国知网　https://www.cnki.net




(a) 55 ℃/s; (b) 40 ℃/s; (c) 10 ℃/s; (d) 3 ℃/s; (e) 2 ℃/s; (f) 1 ℃/s

图5 试验钢不同冷速下的显微组织

## 4 结论

(1) 包钢成功开发生产了具有抗震、耐大气腐蚀性能优异的稀土耐大气腐蚀钢筋。

(2) 稀土的加入,可明显提高钢的耐腐蚀性能,耐腐蚀性能可以提高6.7%~11.5%。

(3) 不同冷速下的组织,随着冷却速度的增加,铁素体体积分数明显降低,针状铁素体量逐渐增大。当冷速大于2 ℃/s时,珠光体组织逐渐向贝氏体组织转变,随着冷速的增加,当冷却速度达到40 ℃/s时,出现明显的马氏体组织。

(4) 研究了锈层组成成分,初期锈层组分主要为FeO、$Fe_2O_3$、$Fe_3O_4$,经过一段时间腐蚀后,锈层主要成分向$\alpha$-FeOOH、$\beta$-FeOOH、$\gamma$-FeOOH成分转变。

## 参 考 文 献

[1] 张松,李周波,蔡森,等. 环氧钢筋涂层的研制[J]. 涂料工业,2005,35(12):5-8.

[2] 吴晓东,孙霞飞. 一种耐候钢耐蚀性能的分析[J]. 热加工工艺,2014,43(8):69-72.

[3] Hao L,Zhang S X,Dong J H,et al. Atmospheric corrosion resistance of MnCuP weathering steel in stimulated environment[J]. Corrosion Science,2011,(12):4187-4192.

[4] 岳学杰,郭洪亮. 建筑用新型耐候钢09MnCuPTiRE大气初期腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺,2015,44(8):82-84.

[5] GB/T 4171—2008,耐候结构钢[S].

[6] 李率民,胥克宝,万友堂,等. 耐候钢板表面裂纹研究[J]. 宽厚板,2009,15(3):15-17.

[7] 戚国平,陆斌,徐军,等. 10PCuRE耐候钢连铸坯表面裂纹成因分析[J]. 稀土,14(5):33-37.

中国知网 https://www.cnki.net