

## 980 MPa 耐蚀钢轨 U68CuCr 的开发和应用

朱敏<sup>1,2</sup> 徐光<sup>1</sup> 张昌强<sup>3</sup> 吉玉<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 武汉钢铁(集团)公司研究院, 武汉 430080;

3 武汉钢铁股份有限公司质检中心, 武汉 430083)

**摘要** 通过制定合理成分和铁水脱硫-120 t 顶底复吹转炉-吹氩-LF-RH-280 mm × 380 mm 坯连铸-轧制工艺, 开发了 980 MPa 热轧耐蚀钢轨 U68CuCr (C: 0.65 ~ 0.75%, Si: 0.40 ~ 0.80%, Mn: 1.00 ~ 1.30%, P ≤ 0.030%, S ≤ 0.025%, Cu ≤ 0.50%, Cr ≤ 0.50%, Nb ≤ 0.05%)。试验结果表明, 耐蚀钢轨 U68CuCr 抗拉强度 ≥ 1 060 MPa, 伸长率 ≥ 12%, 踏面硬度 HB 值为 300 ~ 310, 珠光体片间距为 0.2 μm, 耐磨性能优于同一强度级别的 U75V 钢轨。2% NaCl 溶液腐蚀试验显示, 耐蚀钢轨 U68CuCr 腐蚀速率为 U75V 钢轨的 57%。在京广线使用 3 年, 通过总重量超过 3 亿吨, 耐蚀钢轨 U68CuCr 使用性能良好, 其各项指标均满足铁路运输要求。

**关键词** 980 MPa 耐蚀钢轨 U68CuCr 钢 开发 性能 使用

## Development and Application of 980 MPa Corrosion-Resistant Rail Steel U68CuCr

Zhu Min<sup>1,2</sup>, Xu Guang<sup>1</sup>, Zhang Changqiang<sup>3</sup> and Ji Yu<sup>2</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2 Research and Development Center, WISCO, Wuhan 430080; 3 Testing Center of Quality, WISCO, Wuhan 430083)

**Abstract** The 980 MPa hot rolled corrosion-resistant rail steel U68CuCr (C: 0.65 ~ 0.75%, Si: 0.40 ~ 0.80%, Mn: 1.00 ~ 1.30%, P ≤ 0.030%, S ≤ 0.025%, Cu ≤ 0.50%, Cr ≤ 0.50%, Nb ≤ 0.05%) is developed by defined the chemical composition and the desulphurized metal-120 t top and bottom combined blown converter-argon blowing-LF-RH-280 mm × 380 mm bloom casting-rolling process. Test results show that the tensile strength of corrosion-resistant rail steel U68CuCr is ≥ 1 060 MPa with elongation ≥ 12%, the hardness HB value of rolling face is 300 ~ 310, the interlamellar spacing of pearlite is 0.2 μm, and the wear resistance is better than that of U75V rail steel with same strength rating. The results of 2% NaCl corrosion test show that the corrosion rate of rail steel U68CuCr is 57% of that of rail steel U75V. The corrosion-resistant steel U68CuCr rail has better serve performance in Beijing-Guangzhou railway line for 3 years with gross transporting load 0.3 billion t, and all properties of steel U68CuCr rail meet the requirement of rail.

**Material Index** 980 MPa Corrosion-Resistant Steel Rail, Steel U68CuCr, Development, Properties, Service

钢轨的腐蚀问题一直是铁路发展过程中一个不容忽视的问题, 为增强钢轨的耐腐蚀性能, 国内外相关科技工作者进行了多方面的技术性探索和尝试, 大多采用表面涂覆技术和电极保护方法提高钢轨耐腐蚀性能。随着铁路的高速发展, 钢轨腐蚀带来的安全隐患和经济损失越来越受到重视。武钢通过添加 Cu、Cr、Nb 等合金成分方式, 开发出了低合金高强耐蚀钢轨 U68CuCr, 其产品具有高纯净度、细晶组织、强度高、耐腐蚀性好等特点, 用于客运或客货混运铁路。成品钢轨抗拉强度 ≥ 980 MPa, 断后伸长率 ≥ 10%, 组织为索氏体 + 少量珠光体, 2% NaCl 溶液周浸试验结果表明, 耐蚀钢轨 U68CuCr 使用寿命比 U75V 可延长 70%, 目前已在京广线等地使用, 各项性能均满足铁路运输和行业发展的要求。

### 1 成分设计

本钢种主要定位于客货混运线路, 既要考虑到

客运的安全要求钢轨韧性好, 又要兼顾货运要求钢轨耐磨, 并且要具有良好的焊接性能。在此基础上, 钢轨的耐腐蚀性能要优于目前普遍采用同级别 U75V 钢轨。因此在成分设计上, U68CuCr 钢采用的是适当降低碳含量, 利用 Cu、Cr、Nb 来补充由于降低碳含量带来的强度损失。

Cu 在海洋环境中可以提高钢材基体腐蚀电位, 同时 Cu 的存在, 还可以降低硫化物的腐蚀性能, 并能促进致密锈层的形成, 具有较好的保护作用; Cr 对钢的耐候性有很好的作用, 当钢基体腐蚀后, 原先固溶在 Fe 内的 Cr 在锈层中就要重新分配, 并可能取代 Fe 原子的位置形成多元氧化物, 并且易于在锈层裂纹和孔洞处析出, 以降低表面能, 使合金元素在锈层中富集而非均匀分布; 添加 Nb 的目的在于起到晶粒细化、析出强化的作用。新研发的耐蚀钢轨成分见表 1。

表1 U68CuCr 钢轨的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of U68CuCr rail steel / %							
C	Si	Mn	Cu	Cr	Nb	P	S
0.65 ~ 0.75	0.40 ~ 0.80	1.00 ~ 1.30	≤ 0.50	≤ 0.50	≤ 0.05	≤ 0.030	≤ 0.025

## 2 生产工艺

### 2.1 工艺路线的选择

铁水脱硫→120 t 转炉冶炼→吹氩→LF 精炼→RH 精炼→连铸→铸坯堆垛→加热→轧制→冷床冷却→矫直→检查→入库。

### 2.2 冶炼和连铸工艺

硫是钢中有害元素,铁水采用喷镁粉脱硫工艺,控制出站硫含量 $[S] \leq 0.005\%$ ;在 120 t 顶底复吹转炉冶炼碱度控制在 3.0 ~ 4.0;转炉终点成分 C  $\geq 0.10\%$ ,出钢温度控制在 1 660 °C,钢包容量 120 t,出钢时加入合金进行脱氧和合金化。转炉出钢后在氩站进行吹氩处理,出氩站后在 LF 进行精炼,采用 48% CaO + 25% SiO<sub>2</sub> + 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 5% MgO 精炼渣,适当加入活性石灰、萤石、电石等调整熔渣,炉渣碱度控制目标 2.5 ~ 3.5。LF 精炼完成后,送到 RH 进行真空脱气处理,RH 处理结束后,钢水氢含量  $\leq 1.5 \times 10^{-6}$ 。

连铸过程中,钢包至中间包采用长水口、中间包至结晶器采用浸入式水口保护浇铸,铸坯尺寸(mm)为 280 × 380 × 7 800,中间包钢水过热度控制在 20 ~ 30 °C,铸坯拉速控制在 0.4 ~ 0.7 m/s。

### 2.3 加热及轧制工艺

由于耐蚀钢轨 U68CuCr 中加入了 Cu 元素,Cu 的熔点为 1 083 °C,当加热温度超过 Cu 的熔点后,继续加热导致 Cu 沿晶界扩散,造成成品钢轨表面出现裂纹,因此需要采用高温快烧工艺<sup>[1]</sup>。正常轧制过程中,要求铸坯加热时间 < 240 min。当铸坯在加热炉中加热时间达到 360 min,发现 Cu 在铸坯表面分布,轧制后的钢轨表面表现为网状裂纹,如图 1 所示。通过微观分析可发现钢轨网络晶界上有黄颜色产物铜元素分布,因此设定铸坯加热时间 < 240 min。

钢种添加 Nb 元素,当加热温度  $\geq 1 150$  °C 时,Nb 可以完全固溶到奥氏体中,从而抑制奥氏体晶粒长大。为了保证 Nb 元素在钢中能完全固溶,且保证奥氏体晶粒不能太大,要求加热温度在 1 180 ~ 1 200 °C,保温时间 < 30 min。

轧制耐蚀钢轨采用 280 mm × 380 mm 矩形坯。铸坯出炉后经高压水除鳞,进入 BD1、BD2 轧机进行

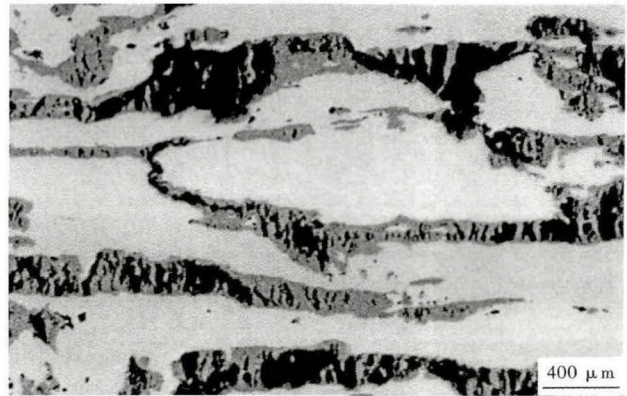


图1 U68CuCr 钢轨表面缺陷形貌

Fig. 1 Morphology of surface defects of U68CuCr steel rail

开坯轧制,开轧温度  $\geq 1 100$  °C,随后进入万能精轧机组轧制,在万能轧制过程中采用未再结晶区控制轧制,变形量要求  $\geq 60\%$ ,终轧温度在 880 °C 以下,轧后进入冷床自然冷却到室温。

## 3 结果及分析

### 3.1 微观组织

采用 Leica DM5000M 金相显微镜对 U68CuCr 钢微观组织检验结果见图 2(a),金相观察表明 U68CuCr 钢的珠光体团较细小,较为均匀,通过 Quanta400 扫描电子显微镜观察可以看出 U68CuCr 钢珠光体片层细且很短,片层间距为 0.2 μm,见图 2(b)。一般认为,片状珠光体的片间距为 0.6 ~ 1.0 μm;索氏体的片间距为 0.25 ~ 0.30 μm;在更低的温度下发生相变形成的片间距为 0.10 ~ 0.15 μm 的珠光体在生产上被称为屈氏体<sup>[2]</sup>。U68CuCr 钢通过合理的成分选择、工艺控制实现了生产热轧空冷索氏体钢轨的目的。

### 3.2 析出相分析

耐蚀钢轨 U68CuCr 中添加了 Nb 元素,起到了第二相沉淀强化作用<sup>[3]</sup>,生成 Nb(C,N) 连续固溶体,从而显著提高钢的强度<sup>[4]</sup>。第二相成点析出的必要条件是固溶体合金的溶解度随着温度的降低而减小,因此加热后得到的过饱和固溶体将随着温度的降低而析出<sup>[5]</sup>。

采用 JEM-2100F 型场发射透射电镜观察第二相析出情况,可以发现单个分散的析出物颗粒分布在晶界处和铁素体中,见图 3。通过能谱分析成分可以看出,析出相类型为 Nb(C,N) 和少量 Ti(C,N)(图 3),尺寸主要为 65 ~ 95 nm,形态主要为不规则形,同时还有类型为 CuS 的析出相,尺寸主要为 15 ~ 90 nm。这些析出物粒子由于尺寸小而能够起

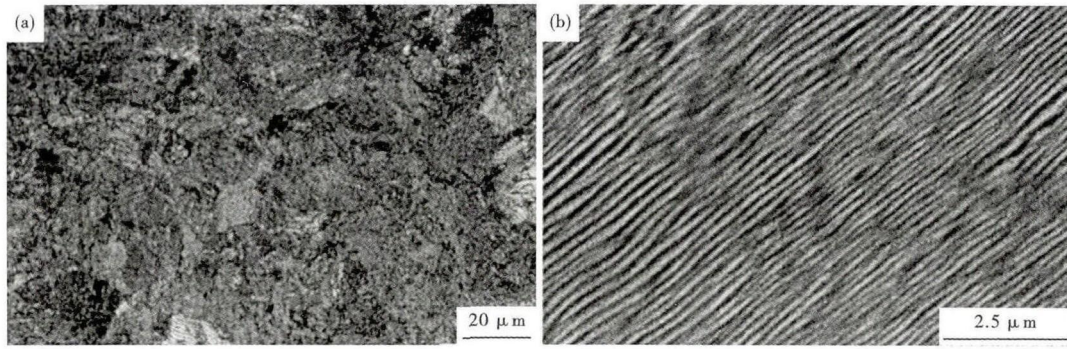


图 2 U68CuCr 钢组织形貌(a)和珠光体片间距(b)

Fig. 2 Morphology of structure (a) and interlamellar spacing of pearlite (b) in U68CuCr rail steel

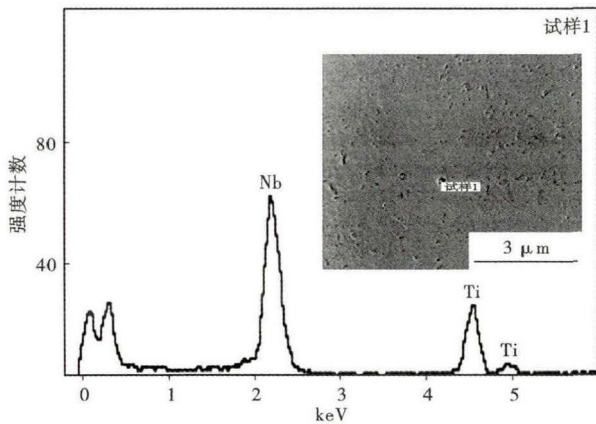


图 3 U68CuCr 钢析出相形貌和能谱

Fig. 3 Morphology of precipitated phase and energy spectrum, U68CuCr rail steel

到显著的析出强化作用。

### 3.3 夹杂物

随着铁路运行速度的提高,重轨的伤损形式由过去的磨损为主转变为接触疲劳伤损。研究表明,重轨的疲劳伤损主要和钢中存在的脆性夹杂物有关。为减少重轨中的脆性夹杂物,提高重轨的抗疲劳性能,采用低铝合金和无铝脱氧剂,控制渣中  $Al_2O_3$  含量。

硅钙钡是一种无铝脱氧剂,它不仅脱氧能力强,使钢液中氧活度降低,而且形成的脱氧产物为低熔点化合物。成品钢轨按照 TB/T2344-2012 取样要求,在钢轨头部取面积为  $200\text{ mm}^2$  的试样分析夹杂物,钢轨中 B 类夹杂物(氧化铝类)含量  $\leq 0.5$  级的比率达到 95% 以上,从而可以降低钢轨接触疲劳伤损。

### 3.4 力学性能

对耐蚀钢轨 U68CuCr 进行拉伸和钢轨踏面硬度进行检测,钢轨抗拉强度  $R_m \geq 1\ 060\text{ MPa}$ ,断后伸长率  $\geq 12\%$ ,踏面 HB 硬度值在 300 ~ 310。根据力

学性能可以看出,耐蚀钢轨 U68CuCr 在力学性能方面与 TB/T2344-2012 中 980 MPa 处于同一级别,具有较高的强度和硬度,适用于客运及客货混运铁路。

### 3.5 耐磨性

随着货运铁路的发展,火车轴重和年通过总量不断增加,就要求钢轨具有良好的耐磨性能。根据研究,钢轨耐磨性与钢轨的硬度成正比关系,因此在选用钢轨时,通过根据用途选择不同硬度的钢轨进行使用。

钢轨磨损试验在 M200 型摩擦磨损试验机上进行,试验过程中,两试样为对滚接触,上试样为车轮试样,下试样为钢轨试样,直径均为 40 mm。上试样转速为 180 r/min,下试样转速为 200 r/min,转动滑差率为 10%;接触应力水平为 1 915 MPa,相当于现场轴重 25 t,对应施加法向载荷为 170 N,每对试样累计磨损 40 h,测定磨损失重量,耐蚀钢轨 U68CuCr 和 U75V 钢与车轮钢对磨损后磨损失重量对比见表 2。

通过采用耐蚀钢轨 U68CuCr 与处于同一硬度级别的 U75V 钢轨钢与车轮钢进行对磨试验发现,耐蚀钢轨 U68CuCr 的磨损失重量从开始阶段明显小于 U75V 钢轨,随着时间的增加,磨损失重量差别逐渐缩小,但 U68CuCr 的磨损失重量一直小于 U75V 钢轨,说明耐蚀钢轨 U68CuCr 耐磨性优于

表 2 U68CuCr 钢轨和 U75V 钢轨磨损失重量对比/mg  
Table 2 Comparison between wear weight loss of U68CuCr rail steel and U75V rail steel /mg

对磨时间/h	U68CuCr	U75V
5	22.4	32.2
10	46.7	53.1
15	68.3	85.0
20	83.0	89.8
25	95.7	104.1
30	112.5	117.2
35	120.5	113.2
40	123.5	125.4

U75V 钢轨。

采用耐蚀钢轨 U68CuCr 和 U75V 钢轨分别加工成尺寸 (mm) 为 40 × 60 × 4 试样,两种材料平行试样两组各 5 片,其中一片做空白片。

具体试验参数:2% 的 NaCl 腐蚀溶液,PH 值为 6.0 ~ 7.5;水槽温度为 (45 ± 2) °C;试验机内相对湿度为 60% ~ 80%;循环周期为 60 min,其中浸润时间 (12 ± 1.5) min;试验时间为 125,150,250 h。试验结束后,对其中 3 片进行除锈处理后称重,计算不同试验时间条件下的腐蚀率;对另一片采用 D/max-2500PC 型 X-射线衍射仪分析试样表面的腐蚀产物。

经过 250 h 加速腐蚀试验后,从腐蚀除锈后试样表面形貌看,U75V 钢轨试样表面存在大量腐蚀坑,而 U68CuCr 钢轨的腐蚀表面较为光滑均匀,未见严重腐蚀坑。通过微观观测发现 U75V 钢的腐蚀表现为少量局部粗大点蚀行为,U68CuCr 钢则表现为大量较为均匀分布的细小点蚀行为,这种特点有效抑制了局部坑蚀破坏性的发展。

U68CuCr 和 U75V 钢轨试样在不同时间的加速腐蚀的失重速率见表 3。从表 3 可以看出,耐蚀钢轨 U68CuCr 失重速率小于 U75V,说明 U68CuCr 钢轨耐蚀性好于 U75V 钢轨。

#### 4 应用研究

耐蚀钢轨 U68CuCr 在京广线韶关段隧道内铺设使用,当地属于高热高湿环境,隧道内常年高温、潮湿。铺设使用 3 年后,运输总重量超过 3 亿吨,通过跟踪测量钢轨使用情况发现,耐蚀钢轨 U68CuCr

表面光洁,基本无伤损,钢轨踏面加工硬化较小,踏面硬度 HB 值在 320 ~ 325,钢轨垂磨量小于 1.2 mm,未发现侧磨,使用后光亮带宽度 30 mm。使用钢轨廓形仪测量使用 3 年后的钢轨,廓形保持良好,各项使用性能均达到铁路行业的发展需求。

与同期铺设的 U75V 钢轨对比,耐蚀钢轨 U68CuCr 表面呈均匀腐蚀,未发现明显的腐蚀坑。U75V 钢轨则表现为表面都发生腐蚀生锈,局部地区可以发现较明显的腐蚀坑,从而给钢轨的安全使用带来隐患。

#### 5 结论

(1)通过对化学成分、生产工艺、组织性能的研究,开发出耐海洋大气腐蚀钢轨 U68CuCr,其强度级别为 980 MPa,适用于客运或客货混运铁路。

(2)U68CuCr 钢轨克服了传统钢轨钢种局部坑蚀现象严重的缺点,表现为均匀腐蚀。加速腐蚀试验结果表明,耐蚀钢轨 U68CuCr 腐蚀速率只有 U75V 钢轨的 57%,具有良好的耐蚀性。

(3)通过研究耐蚀钢轨 U68CuCr 使用性能可以看出,耐蚀钢轨各项使用指标良好,满足铁路行业标准要求。

#### 参考文献

- [1] 李新城,陈 光,朱伟兴,等. 车辆用耐蚀钢热轧钢板防止铜脆的工艺研究[J]. 农业机械学报,2003,34(6):138-140.
- [2] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007:244-255.
- [3] 雍岐龙. 钢铁结构材料中的第二相[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:46-47.
- [4] 余卫华,姜凤琴. 含铌低合金钢析出相[J]. 钢铁研究,1997(3):37-39.
- [5] 王有铭,李曼云,韦 光. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京:冶金工业出版社,2005:6-7.

朱 敏(1981-),男,博士研究生(2015 年武汉科技大学),高级工程师,2004 年东北大学(本科)毕业,型钢新产品及工艺开发。E-mail:Zhuming@sina.com

收稿日期:2015-10-19

表 3 U68CuCr 钢轨和 U75V 钢轨腐蚀失重速率对比/(g · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>)

Table 3 Comparison between corrosion weight loss of U68CuCr rail steel and U75V rail steel/(g · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>)

试验时间/h	U68CuCr	U75V
125	6.4	11.1
150	8.5	11.0
250	11.4	14.9

=====  
 欢迎全国冶金、机械、耐材及相关  
 行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备  
 和技术、产品研发宣传广告  
 =====