

# 稀土 Ce 对热轧 U75V 钢轨低温韧性的影响

张凤明, 梁正伟, 薛虎东, 王嘉伟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 在实验室进行了不同稀土 Ce 含量的热轧态 U75V 钢轨冶炼及轧制, 重点针对轧后钢轨低温冲击性能、低温断裂韧性进行对比分析。试验结果表明, 热轧态 U75V 钢轨加入 0.005 6% 稀土 Ce 后, 钢轨常温冲击韧性可提高 30% 左右,  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温冲击韧性可提高 60% 左右; 钢轨  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $K_{IC}$  平均值提高 14% 左右, 钢轨  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$   $K_{IC}$  平均值提高 15% 左右, 稀土 Ce 的加入进一步提升了热轧态 U75V 钢轨低温韧性。

**关键词:** 热轧 U75V 钢轨; 稀土 Ce; 低温韧性

中图分类号: U213.4<sup>+</sup>

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)04-0051-04

## Effects of Rare Earth Ce on Low Temperature Toughness of Hot Rolled U75V Rail

Zhang Feng-ming, Liang Zheng-wei, Xue Hu-dong, Wang Jia-wei

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The smelting and rolling of hot rolled U75V rails with different contents of rare earth Ce are carried out in laboratory. The low temperature impacting property and fracture toughness of the rolled rail are compared and analyzed. The test results showed that the impact toughness of rail at room temperature could increase by about 30%, low temperature impacting property at  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  could increase by about 60% after add 0.005 6% rare earth Ce into hot rolled U75V rail; the average value of  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $K_{IC}$  of rail increased by about 14% and the average value of  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$   $K_{IC}$  of rail increased by about 15% so that the addition of rare earth Ce could further improve the low temperature toughness of hot rolled U75V rail.

**Key words:** hot rolled U75V rail; rare earth Ce; low temperature toughness

随着我国铁路运营里程的增加, 钢轨逐渐在高原、极寒地区大范围铺设, 该地区线路部分地段常年平均气温在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下, 最低气温达  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 钢轨材料在低温条件下力学性能变差, 容易发生脆性破坏, 这直接威胁着铁路运输的安全, 因此特殊路段对钢轨的低温韧性提出更高的要求。相关研究表明, 稀土具有净化钢质和夹杂物变性的作用, 适量的稀土可以减少夹杂物和改善夹杂物形态与尺寸大

小, 提高钢的强度和韧性<sup>[1]</sup>。在钢轨钢中加入适量的稀土, 通过微合金化或稀土处理, 可以起到细化晶粒的作用, 从而进一步的改善钢材冲击韧性、变形能力、耐腐蚀性、焊接性能、耐磨性、疲劳性能等<sup>[2]</sup>。本文针对热轧 U75V 钢轨加入不同含量稀土 Ce, 进行常规力学性能、低温冲击韧性和低温断裂韧性探讨分析。

## 1 试验材料及方法

试验钢轨以 C、Mn、Si、V、Ce 为主要合金元素,使用废钢、纯铁、铁合金、稀土合金等作为原料进行电炉冶炼,控制电炉冶炼真空度在 40 Pa 以下,小炉冶炼过程中持续进行电磁搅拌、底吹搅拌等操作,达到钢液合金均质化的目的。冶炼中后期通过加入不同质量的铈铁合金,达到控制钢中不同稀土 Ce 含量的目的。

试验钢采用可逆式热轧试验机组进行轧制,轧机线速度不低于 2 m/s,最大压下量不大于 40%,轧制道次大于 5,钢坯轧制压缩比不低于 9:1,初始成

形温度为 1 060 ~ 1 130 °C,终成形温度为 930 ~ 950 °C,轧后空冷至室温。对试验钢进行常规力学性能、不同温度下冲击韧性、不同温度下断裂韧性  $K_{IC}$  和金相组织对比分析。检测试验分析分别采用 Instron60 吨电子拉伸试验机、NI750 冲击试验机、TH600 布氏硬度计、德国蔡司 observer AIM 光学显微镜。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同稀土含量对试验钢常规力学性能的影响

经中试小炉冶炼,轧制所得试验钢化学成分见表 1。

表 1 试验钢冶炼化学成分(质量分数)

编号	C	Si	Mn	V	Ce	P	S
1#	0.760	0.635	0.908	0.071		0.018	0.001
2#	0.758	0.630	0.972	0.071	0.002 3	0.017	0.001
3#	0.758	0.639	1.010	0.073	0.005 6	0.014	0.001

由表 1 可知,1#—3# 试验钢中 C、Si、Mn、V、P、S 元素含量基本相同,冶炼主成分元素质量分数均满足 TB/T 2344.1—2020 标准中对 U75V 钢轨的要求<sup>[3]</sup>。其中 1# 试验钢不含稀土 Ce 元素,2# 试验钢

中含有 0.002 3% 稀土 Ce 元素,3# 试验钢中含有 0.005 6% 稀土 Ce 元素。

对 1#—3# 试验钢进行拉伸试验和硬度试验对比分析,试验结果见表 2。

表 2 试验钢的常规力学性能对比

编号	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后延伸率 $A$ /%	断面收缩率 $Z$ /%	踏面硬度(HBW)
1#	1 020	545	12.75	22.5	303
2#	1 040	571	13.50	23.5	309
3#	1 045	576	14.75	25.5	309

由表 2 可知,1#—3# 试验钢的抗拉强度均大于 980 MPa,断后伸长率均大于 10%,踏面硬度 HBW 在 280 ~ 320 之间,1#—3# 试验钢满足 TB/T 2344.1—2020 标准对热轧 U75V 钢轨的拉伸和硬度性能的要求<sup>[3]</sup>。2# 试验钢加入 0.002 3% 稀土 Ce,3# 试验钢加入 0.005 6% 稀土 Ce,对试验钢的强度、硬度有一定的提高作用,但效果并不明显。

### 2.2 不同稀土含量对试验钢低温冲击韧性的影响

对 1#—3# 试验钢进行 -60 ~ 20 °C 的冲击韧性对比分析,试验结果见图 1。

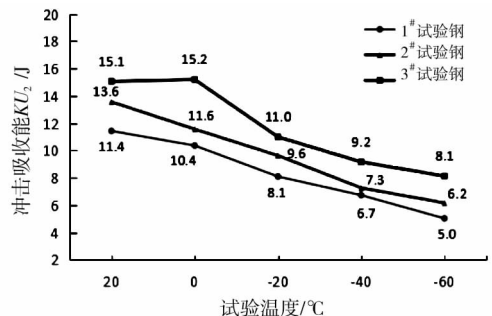


图 1 不同试验温度下试验钢冲击韧性变化

由图 1 可知,随着试验温度的降低,1#—3# 试验

钢平均冲击韧性均呈下降趋势。1<sup>#</sup>试验钢 20 ℃ 平均冲击功 11.4 J, -60 ℃ 平均冲击功 5.0 J; 2<sup>#</sup>试验钢 20 ℃ 平均冲击功 13.6 J, -60 ℃ 平均冲击功 6.2 J; 3<sup>#</sup>试验钢 20 ℃ 平均冲击功 15.1 J, -60 ℃ 平均冲击功 8.1 J。相对于 1<sup>#</sup>试验钢 2<sup>#</sup>试验钢 20 ℃ 冲击功提高 19.3%, -60 ℃ 冲击功提高 24.0%; 3<sup>#</sup>试验钢 20 ℃ 冲击功提高 32.5%, -60 ℃ 冲击功提高

62.0%。一定含量的稀土 Ce 可以提高试验钢冲击韧性,且相对于常温冲击韧性,稀土对试验钢低温冲击韧性改善作用更加显著。

### 2.3 不同稀土含量对试验钢断裂韧性 $K_{IC}$ 的影响

对 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>试验钢进行 -60 ~ 20 ℃ 不同温度下的断裂韧性  $K_{IC}$  对比分析,试验结果见表 3。

表 3 试验钢不同温度下断裂韧性  $K_{IC}$  值

MPa · m<sup>1/2</sup>

试验温度/℃	1 <sup>#</sup> 试验钢			2 <sup>#</sup> 试验钢			3 <sup>#</sup> 试验钢		
20	38.7	35.9	40.8	39.2	43.6	40.8	41.3	42.8	45.5
0	33.9	36.1	38.4	42.6	34.4	39.1	42.2	39.7	41.5
-20	32.8	34.0	31.9	36.2	35.2	35.9	38.4	35.4	39.1
-40	29.6	30.2	28.8	29.0	31.4	30.7	33.3	35.0	31.4
-60	26.3	24.5	28.0	27.6	29.7	28.8	28.6	31.5	30.7

由表 3 可知,1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>试验钢 -20 ℃ 断裂韧性  $K_{IC}$  值在 31.9 ~ 39.1 MPa · m<sup>1/2</sup> 之间,满足 TB/T 2344.1—2020 标准中热轧 U75V 钢轨 -20 ℃ 断裂韧性  $K_{IC}$  单个最小值不大于 26 MPa · m<sup>1/2</sup>,最小平均值不小于 29 MPa · m<sup>1/2</sup> 的要求。

钢 -20 ℃ 断裂韧性  $K_{IC}$  平均值,2<sup>#</sup>试验钢提高 8.8%,3<sup>#</sup>试验钢提高 14.3%。1<sup>#</sup>试验钢 -60 ℃  $K_{IC}$  平均值为 26.3 MPa · m<sup>1/2</sup>,2<sup>#</sup>试验钢 -60 ℃  $K_{IC}$  平均值为 28.7 MPa · m<sup>1/2</sup>,3<sup>#</sup>试验钢 -60 ℃  $K_{IC}$  平均值为 30.3 MPa · m<sup>1/2</sup>,相对于 1<sup>#</sup>试验钢 -60 ℃ 断裂韧性  $K_{IC}$  平均值,2<sup>#</sup>试验钢提高 9.1%,3<sup>#</sup>试验钢提高 15.2%,且只有 3<sup>#</sup>试验钢的 -60 ℃ 断裂韧性  $K_{IC}$  平均值不低于 30 MPa · m<sup>1/2</sup>。由结果可知,一定含量的稀土 Ce 可以提高试验钢的低温断裂韧性,提高低温路段钢轨服役安全性。

### 2.4 不同稀土含量对试验钢金相组织的影响

由图 3 可知,1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>试验钢随着稀土含量的增加,试验钢的金相显微组织未发生变化,均为典型的珠光体加少量的铁素体组织,满足 TB/T 2344.1—2020 标准对热轧 U75V 钢轨的显微组织要求。相对于 1<sup>#</sup>试验钢,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>试验钢加入稀土 Ce 后原始奥氏体晶粒度评级有一定的提高,组织晶粒的细化可提高试验钢低温冲击韧性和断裂韧性。

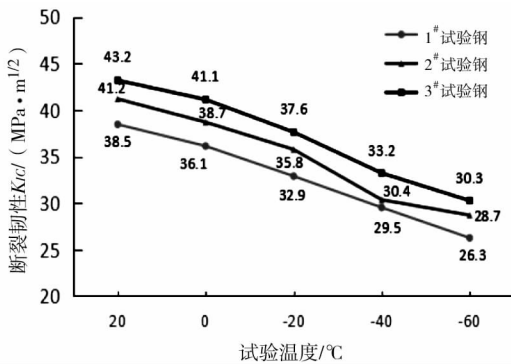
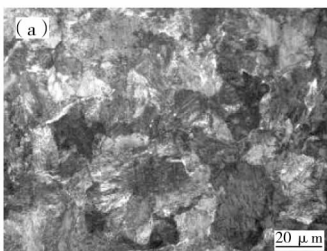
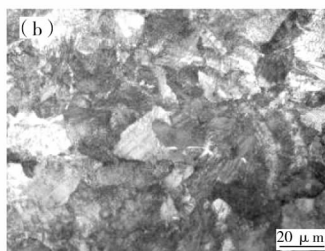


图 2 不同温度下试验钢断裂韧性  $K_{IC}$  平均值变化

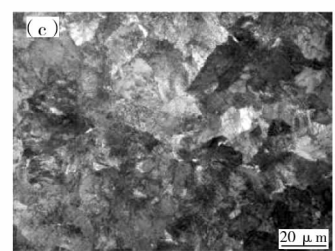
由图 2 可知,随着试验温度的降低,1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>试验钢断裂韧性  $K_{IC}$  平均值呈下降趋势。相对于 1<sup>#</sup>试验



(a) 1<sup>#</sup>试验钢



(b) 2<sup>#</sup>试验钢



(c) 3<sup>#</sup>试验钢

图 3 试验钢显微组织

### 3 结论

(1) 热轧 U75V 钢轨加入 0.002 3% 和 0.005 6% 稀土 Ce 后,对试验钢的强度、硬度、显微组织影响不大,各项性能均满足 TB/T 2344.1—2020 标准对热轧 U75V 钢轨的性能要求。

(2) 热轧 U75V 钢轨加入 0.002 3% 稀土 Ce 后, 20 °C 冲击功提高 19.3%, -60 °C 冲击功提高 24.0%; 加入 0.005 6% 稀土 Ce 后, 20 °C 冲击功提高 32.5%, -60 °C 冲击功提高 62.0%。一定含量的稀土 Ce 可以提高钢轨冲击韧性,且稀土元素对钢轨低温冲击韧性改善作用更加显著。

(3) 热轧 U75V 钢轨加入 0.002 3% 稀土 Ce 后, -20 °C 断裂韧性  $K_{IC}$  平均值提高 8.8%, -60 °C  $K_{IC}$  平均值提高 9.1%; 加入 0.005 6% 稀土 Ce 后, -20 °C 断裂韧性  $K_{IC}$  平均值提高 14.3%, -60 °C

$K_{IC}$  平均值提高 15.2%, 且钢轨加入 0.005 6% 稀土 Ce 后 -60 °C 断裂韧性  $K_{IC}$  平均值不低于 30 MPa·m<sup>1/2</sup>。一定含量的稀土 Ce 可以有效的提高钢轨低温断裂韧性,提高低温路段钢轨服役安全性。

### 参 考 文 献

- [1] 王龙妹,杜挺,卢先利,等. 微量稀土元素在钢中的作用及应用研究[J]. 稀土,2001,22(4): 37-40.
- [2] 林勤,宋波,郭兴敏,等. 钢中稀土微合金化作用与应用前景[J]. 稀土,2001,22(4): 31-36.
- [3] TB/T 2344.1—2020, 钢轨第 1 部分:43 ~ 75 kg/m 钢轨[S].

(上接第 21 页)

对于硅含量大于 0.6% 的铁水,转炉采用双渣法冶炼,并增大渣量,控制终渣碱度在 2.5 左右,不但有利于脱除钢液中的磷,同时可以将吹炼前期进入炉渣的氧化锰一并倒出,可以大幅度降低炉渣中 MnO 含量,避免或减少转炉冶炼后期从炉渣中还原氧化锰,降低钢水出钢时锰含量<sup>[6]</sup>。

### 3 结论

(1) 转炉终点碳含量在 0.025% ~ 0.035%, 提高钢水和炉渣氧化氛围,出钢温度低于 1 620 °C,并适当增加渣量,有利于钢水脱锰反应。

(2) 转炉采用双渣法冶炼,可以大幅度降低终渣中氧化锰含量,有利于低锰钢的冶炼。

(3) 转炉出钢时钢水不脱氧,保持钢水和炉渣高氧化性,在 LF 继续脱锰,钢水锰含量可以再降低 0.01 ~ 0.04 个百分点。

(4) 采用转炉和 LF 精炼联合脱锰工艺,实现了使用锰含量为 0.40% ~ 0.55% 的铁水批量生产锰含量低于 0.05% 的低锰钢,满足高纯工业纯铁对钢

水锰含量的要求。

### 参 考 文 献

- [1] 黄飞. 电炉—精炼炉冶炼时脱锰工艺的研究与实践[J]. 上海电气技术,2018,11(4): 62-64.
- [2] 李闯,郭汉杰. 铁水温度、炉渣碱度和初始硅含量对对碳饱和铁水脱锰的影响[J]. 特殊钢,2009,30(5):4-6.
- [3] 魏薇. 转炉冶炼终点钢水残锰影响因素[J]. 世界钢铁,2014,14(4):15-19.
- [4] 李佃明. 转炉冶炼高锰铁水生产工艺的研究[J]. 冶金工程,2016,3(1):44-49.
- [5] 杨传信,李鹏超,卢昭军,等. 转炉终点钢水残锰质量分数及其影响因素分析[J]. 中国冶金,2012,22(11):44-47.
- [6] 杨俊峰,江腾飞,郝丽霞. 迁钢工业纯铁 SYTB 生产过程脱磷、脱锰实践[J]. 炼钢,2019,31(3):13-16.