

# 稀土对重轨钢冲击韧度的影响作用机制

刘承军<sup>1</sup>, 姜茂发<sup>1</sup>, 李春龙<sup>1,2</sup>, 王云盛<sup>1,2</sup>, 陈建军<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学冶金与材料学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 包头钢铁集团公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 通过实验测定、金相观察和理论分析, 研究了稀土对重轨钢冲击韧度的影响作用机制. 随着稀土加入量的增加(0~0.06%,  $\omega$ ), 重轨钢中的固溶稀土含量均先逐渐增大, 达到一定值后开始减小. 当稀土加入量为 0.01%时, 重轨钢的奥氏体晶粒尺寸明显细化, 冲击韧度显著改善. 稀土在改善重轨钢冲击韧度的同时, 可以减小横向冲击功和纵向冲击功之间的差距, 消除钢的各向异性, 增强钢的各向同性. 在本实验条件下, 最佳稀土加入量为 0.01%.

**关键词:** 稀土; 重轨钢; 冲击韧度; 微观组织; 硫化物夹杂

**中图分类号:** TB146.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2006)01-0135-03

## 1 前言

冲击韧度是铁路用钢轨的主要力学性能之一<sup>[1]</sup>. 研究发现, 稀土在钢中的作用主要包括净化钢液、变质夹杂物和微合金化、改善重轨钢的冲击韧度<sup>[2-5]</sup>. 为进一步提高重轨钢的综合使用性能, 应深入探讨稀土对重轨钢冲击韧度的影响作用机制. 本研究通过实验测定、金相观察和理论分析, 研究了稀土对重轨钢冲击韧度的影响作用机制, 对包钢重轨钢的工业生产具有理论指导意义.

## 2 研究方法

### 2.1 材料制备

以包钢工业生产的 U74 钢作为熔炼母料, 适当添加硅铁、锰铁、铌铁、电极石墨、工业纯铁和稀土等, 利用 50 kg 真空感应炉模拟冶炼重轨钢. 然后用 750 kg

空气锤锻造钢锭, 保温温度 1200 °C, 保温时间>30 min, 升温时间>3 h, 锻后空冷. 最后用小型轧机轧制锻件, 开轧温度 1150 °C, 终轧温度>950 °C, 轧后空冷.

### 2.2 稀土存量分析

采用等离子光谱分析测定钢中的稀土总量, 采用无水电解液低温电解法测定钢中的夹杂物稀土含量, 二者之差即为钢中的固溶稀土含量.

### 2.3 金相分析

采用金相显微镜和扫描电镜观察钢的夹杂物状况和组织状况, 利用截线法测定钢的奥氏体晶粒度<sup>[6]</sup>.

### 2.4 冲击实验

冲击实验装置为 JB-5 摆锤式冲击试验机.

### 2.5 研究方案

本实验用重轨钢的化学成分如表 1 所示.

表 1 重轨钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of heavy rail steel (% ,  $\omega$ )

RE	C	Si	Mn	P	S	Nb	$\Sigma O$
0~0.06	0.70~0.72	0.75~0.76	1.29~1.32	0.019~0.020	0.006~0.007	0.050~0.057	0.0003~0.0015

## 3 分析与讨论

### 3.1 稀土在重轨钢中的赋存状态和存量

在本实验条件下, 当稀土加入量较小时(小于 0.01%), 稀土主要以稀土夹杂物形态存在于重轨钢中, 固溶稀土含量小于 0.0004%. 当稀土加入量较大时(大于 0.02%), 稀土主要以稀土夹杂物和固溶稀土两种形态存在于重轨钢中, 夹杂物稀土含量与固溶稀土含量的变化共同决定了重轨钢中稀土总量的变化.

由表 2 可知, 在本实验条件下, 随着稀土加入量的

增加, 重轨钢中的夹杂物稀土含量、固溶稀土含量和稀土总量均先逐渐增大, 达到一定值后开始减小; 当稀土加入量为 0.04%时, 重轨钢中的固溶稀土含量达到最大值, 为 0.0151%.

表 2 稀土在重轨钢中的赋存状态及存量

Table 2 State and content of RE in heavy rail steel (% ,  $\omega$ )

RE addition	0	0.005	0.01	0.02	0.04	0.06
Total RE in steel	0	0.0017	0.0021	0.0128	0.0271	0.0222
RE in inclusions	0	0.0013	0.0018	0.0078	0.0120	0.0103
RE solution	0	0.0004	0.0003	0.0050	0.0151	0.0119

收稿日期: 2005-01-17, 修回日期: 2005-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 50204005, 50374029)

作者简介: 刘承军(1974-), 男, 河南省新乡市人, 博士, 副教授, 钢铁冶金专业, Tel: 024-83681478, E-mail: lchj\_neu@163.com.

钢中固溶稀土含量存在极值点主要有两个原因,一是稀土在钢中有一定的固溶度,二是由于稀土夹杂物的聚集长大和上浮去除了破坏了稀土在钢液中的平衡状态.

### 3.2 稀土对重轨钢硫化物夹杂的影响

随着稀土加入量的增加,重轨钢中的硫化物夹杂物

形态逐渐由细长条状、纺锤形向球形转变,如图1所示.在本实验条件下,当稀土加入量大于0.04%时,硫化物夹杂以球形、椭球形和纺锤形等3种形态存在于重轨钢中,而细长条状硫化物夹杂则基本消失.这表明稀土处理已经基本完成了夹杂物变质的冶金功能.

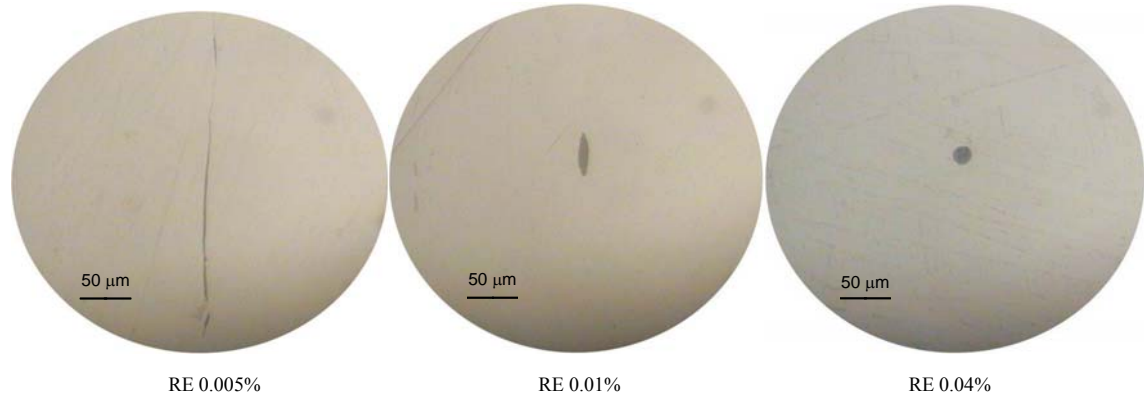


图1 重轨钢中的硫化物夹杂

Fig.1 Sulfide inclusions in heavy rail steel

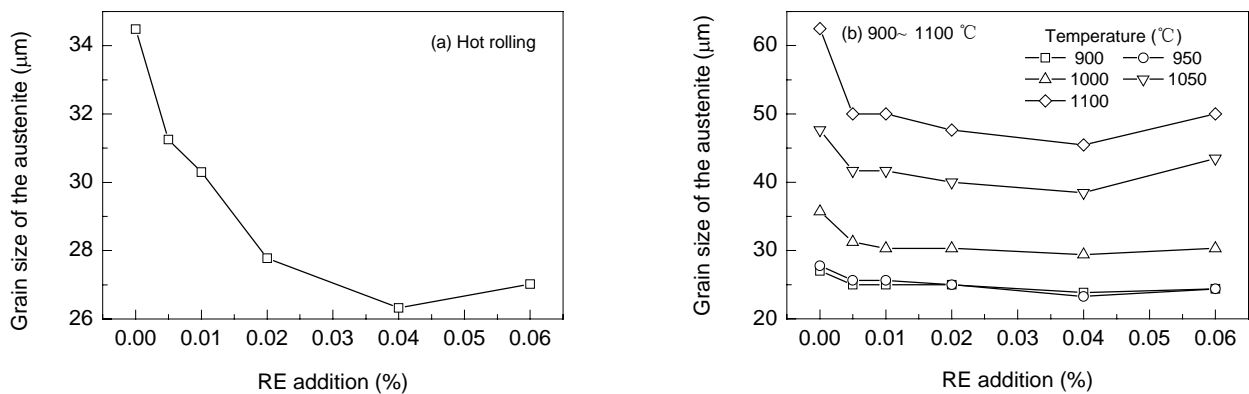


图2 重轨钢奥氏体晶粒尺寸与稀土加入量的关系

Fig.2 Relations between grain size of the austenite in heavy rail steel and RE addition

### 3.3 稀土对重轨钢微观组织的影响

将重轨钢试样置于高温炉中,在不同温度条件下加热保温30 min,经水冷后测定其奥氏体晶粒尺寸,结果如图2所示.由图2(a)可知,稀土在重轨钢中具有细化热轧态奥氏体晶粒的作用,细化晶粒的关键是钢中的固溶稀土含量.在稀土加入量小于0.01%的条件下,随着稀土加入量(固溶稀土含量)的增加,重轨钢的热轧态奥氏体晶粒尺寸迅速减小,由34.40 μm减小到30.30 μm,稀土对热轧态奥氏体晶粒的细化作用非常显著,此时钢中固溶稀土含量小于0.0004%.之后继续增加稀土加入量,热轧态奥氏体晶粒尺寸仍逐渐减小,但稀土对热轧态奥氏体晶粒的细化作用已不明显.

由图2(b)可知,不同稀土含量的重轨钢的奥氏体晶粒均随着加热温度的升高而逐渐长大.稀土在重轨钢中具有细化奥氏体晶粒的作用.在稀土加入量小于0.01%

的条件下,随着稀土加入量(固溶稀土含量)的增加,重轨钢的奥氏体晶粒尺寸迅速减小,稀土对奥氏体晶粒的细化作用非常显著,此时钢中固溶稀土含量很小,小于0.0004%.之后继续增加稀土加入量,奥氏体晶粒尺寸仍逐渐减小,但稀土对奥氏体晶粒的细化作用已大大减弱.

在本实验条件下,较低的稀土加入量(0.01%)和较低的固溶稀土含量(0.0004%)即可实现对重轨钢奥氏体晶粒的细化作用.

### 3.4 稀土对重轨钢冲击韧度的影响

取未加稀土的重轨钢试样,以常温(20 °C)纵向冲击功作为基准,在不同温度条件下重轨钢的相对横向冲击功和相对纵向冲击功随稀土加入量的变化如图3所示.图中 $A_K$ 为相对冲击功,为一定温度条件下的冲击功与常温纵向冲击功的比值, $W$ 代表横向, $L$ 代表纵向.

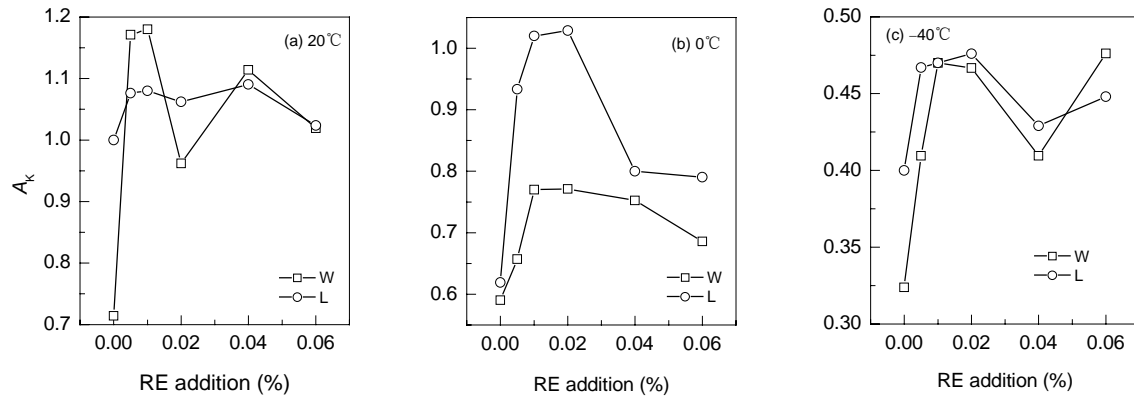


图 3 重轨钢的相对冲击功( $A_K$ )随稀土加入量的变化  
Fig.3 Variation of  $A_K$  of heavy rail steel with RE addition

稀土处理可以提高重轨钢的横向冲击功和纵向冲击功, 即改善钢的冲击韧度. 与未加稀土的重轨钢试样相比, 经过稀土处理的重轨钢试样的横向冲击功和纵向冲击功均有不同程度的提高. 稀土加入量小于 0.01%, 冲击功提高的幅度最大; 继续增大稀土加入量, 冲击韧度的改善效果并不明显. 另外, 随着温度的降低, 重轨钢的横向冲击功和纵向冲击功均逐渐降低.

在本实验条件下, 当稀土加入量为 0.01% 时, 重轨钢的奥氏体晶粒明显细化, 冲击韧度显著改善; 在 20, 0, -40 °C 温度条件下, 重轨钢的横向冲击功和纵向冲击功分别相应增加 65.3%, 30.5%, 45.1% 和 8.0%, 64.8%, 17.5%. 之后继续增大稀土加入量, 重轨钢冲击韧度的改善幅度不大.

对比重轨钢的横向冲击功和纵向冲击功可以发现, 稀土处理在改善冲击韧度的同时, 可以减小横向冲击功和纵向冲击功之间的差距, 使冲击韧度在横向和纵向上保持稳定, 即消除钢的各向异性, 增强钢的各向同性.

## 4 结论

(1) 随着稀土加入量的增加(0~0.06%,  $\omega$ ), 重轨钢中的固溶稀土含量均先逐渐增大, 达到一定值后开始减

小; 当稀土加入量为 0.04% 时, 重轨钢中的固溶稀土含量达到最大值, 为 0.0151%.

(2) 当稀土加入量为 0.01% 时, 重轨钢的奥氏体晶粒尺寸明显细化, 热轧态奥氏体晶粒尺寸由 34.40  $\mu\text{m}$  减小到 30.30  $\mu\text{m}$ ; 此时冲击韧度得到显著改善, 在 -40 °C 温度条件下重轨钢的横向冲击功和纵向冲击功分别增加 45.1% 和 17.5%.

(3) 稀土在改善重轨钢冲击韧度的同时, 可以减小横向冲击功和纵向冲击功之间的差距, 消除钢的各向异性, 增强钢的各向同性.

(4) 本实验条件下重轨钢最佳稀土加入量为 0.01%.

### 参考文献:

- [1] 李春龙, 智建国, 姜茂发, 等. 稀土对 BNbRE 钢轨综合性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2003, 21(4): 468-473.
- [2] Zhu X Y, Lin Q, Zeng J, et al. Role of Rare Earth in Low Sulphur Nb, Ti Bearing Steel [J]. J. Rare Earths, 2003, 21(1): 81-84.
- [3] Luyckx L, Bell J R, Mclean A, et al. Sulfide Shape Control in High Strength Alloy Steels [J]. Metall. Trans., 1970, 1(11): 3341-3350.
- [4] 李春龙. 稀土在钢中的应用及需注意的一些问题 [J]. 稀土, 2002, 22(4): 1-6.
- [5] Kang S K, Gow K V. Mechanical Properties of Rare Earth Metal Treated Rail Steel [J]. Metall. Trans., 1979, 10A(10): 1800-1806.
- [6] Lin Q, Wang H B, Lu X L, et al. Effects of RE and Vanadium on Micro Alloyed Steel [J]. J. Rare Earths, 2002, 20(1): 36-40.

## Mechanism and Effect of Rare Earth on the Impacting Toughness of Heavy Rail Steel

LIU Cheng-jun<sup>1</sup>, JIANG Mao-fa<sup>1</sup>, LI Chun-long<sup>1,2</sup>, WANG Yun-sheng<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-jun<sup>1,2</sup>

(1. Sch. Mater. & Metall., Northeastern Univ., Shenyang, Liaoning 110004, China;

2. Baotou Iron & Steel Group Corp., Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

**Abstract:** The mechanism and effect of rare earth (RE) on the impacting toughness of heavy rail steel have been studied by means of experimental measurement, microscopic structure observation and theoretical analysis. Under the experimental conditions, the content of RE solute in heavy rail steel first increases and then decreases with the RE addition increasing. When the content of RE addition is 0.01%, the grain size of austenite can be obviously fined, and the impacting toughness of heavy rail steel can be obviously improved. RE in the steel can decrease the difference between the transverse impact energy and the longitudinal impact energy, eliminate the anisotropism and increase the isotropy of heavy rail steel. The optimum mass fraction of RE addition is 0.01% for heavy rail steel.

**Key words:** rare earth; heavy rail steel; impacting toughness; microscopic structure; sulfide inclusion