

# 钇稀土复合多元合金变质包芯线在高锰钢中的应用研究

刘燕平, 杨 清, 朱福生, 张志勇

(龙南龙钇重稀土科技股份有限公司, 江西赣州 341401)

**摘要:** 利用钇基重稀土和轻稀土两种不同种类的稀土生产的变质包芯线对高锰钢进行变质细化处理, 研究了不同种类稀土及不同加入量对高锰钢冲击值及耐磨性能的影响。结果表明: 加稀土较未加稀土试样冲击韧性和初始硬度稍有提高, 但变化不明显, 但经钇基稀土复合多元合金变质线处理后试样的伸长率比未经稀土处理的试样提高较明显; 钇基稀土复合多元合金变质线处理能显著提高高锰钢的加工硬化能力, 所以高锰钢的耐磨性能被提高了, 且轻稀土变质线处理后的试样比未变质的试样耐磨性提高10%~20%, 钇基稀土复合多元合金变质线处理后的试样比普通稀土变质线处理的试样耐磨性提高20%~30%。

**关键词:** 钇基重稀土; 包芯线; 变质处理; 多元合金; 高锰钢; 加工硬化

高锰钢是一种优良的耐磨钢, 广泛应用于制造承受冲击磨损的零件, 如斗齿、牙板、衬板、履带板、铁路轨道等。高锰钢的铸态组织为奥氏体、碳化物及少量珠光体, 经水韧处理后得到单相奥氏体或奥氏体加少量碳化物的组织。高锰钢有个重要的特点: 外来冲击力越大, 其表层耐磨性越高, 在外力作用下会不断产生新的表面硬化层。但是由于高锰钢初始强度及硬度均较低, 初次使用时容易变形且会有较大的磨损。现有文献资料显示, 稀土对高锰钢有净化钢液、抑制碳化长大、细化晶粒、减少晶间夹杂物的数量等作用<sup>[1-2]</sup>。特别是重稀土在这方面的作用更加明显<sup>[3-5]</sup>。

目前对于稀土变质的研究也非常多, 但是对如何把稀土加入高锰钢的研究非常少, 本研究通过特殊工艺及方法将稀土合金制作成包芯线产品, 通过喂线机将稀土变质包芯线加入高锰钢钢液中, 研究了轻、重两种稀土变质包芯线对高锰钢组织、力学性能及耐磨性能的影响。

## 1 试验方法及过程

### 1.1 试验过程

#### 1.1.1 变质包芯线的生产

第一步: 采用钇基重稀土硅铁合金为主要原料, 配以其他各种合金元素在中频电炉中熔配合金化均匀, 出炉铸锭, 冷却后破碎检测分析, 再过筛分选, 密封包装待用。

第二步: 包芯线机包线(图1), 本次试验采用 $\Phi 13$  mm外径包芯线, 包线全程自动监测芯料下料, 包线过程中分时段检测芯线比等数据, 检测合格后准备变质处理试验。

#### 1.1.2 高锰钢的熔炼

熔炼用0.75吨中频电炉, 炉料选择P、S含量极低的废钢, 入炉前除锈处理, 首先加入废钢, 废钢熔化后造渣, 加入适量萤石或生石灰, 扒渣后加入锰铁合金化,

作者简介:

刘燕平(1978-), 男, 工程师, 主要从事稀土在钢铁耐磨材料中的应用研究及产品推广工作。电话: 18079759392, E-mail: 15979826582@163.com

中图分类号: TG142.72

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)03-0361-08

收稿日期:

2020-07-21 收到初稿,  
2020-10-27 收到修订稿。

熔清后取样分析,成分合格后加入硅铝钡钙合金脱氧,脱氧完成后扒渣,出钢液至钢包内,钢液出完后液面覆盖保温剂,将钢包转运至喂线处理站进行喂线变质处理,如图2。变质剂加入的方案及成分测试结果见表1。

## 1.2 试验方法 – 喂线变质处理

采用LYWX-IV型喂线机,喂线速度15 m/min,加入量20 m/t;处理温度1 560 ℃,喂线结束后扒渣,覆盖保温剂静置2 min,浇注基尔试样,化学成分用德国斯派克光谱仪分析(表1),水韧处理温度为1 080 ℃,保温时间为100 min,采用奥林巴斯显微镜观察分析金相组织。

磨损试验采用MLD-10型冲击(动载)磨料磨损试验机,试验机的冲头上试样为高铬铁,试验的冲击功为5 J,冲击次数为9 000次。磨料颗粒为6~10目的石英砂磨料,磨损环境为干磨。环状下试样为高锰钢,外径为50 mm,内径为30 mm,如图3所示。

冲击试验机为ZBC-2302数字式金属摆锤冲击试验机,冲击试样为10 mm×10 mm×55 mm,带U形缺口,如图4。拉伸测试在美特斯液压万能试验机上进行,试样 $\Phi$ 10 mm×60 mm(图5),拉伸速度为1 mm/min。



图1 稀土丝包线机

Fig. 1 Rare earth silk wrapping machine

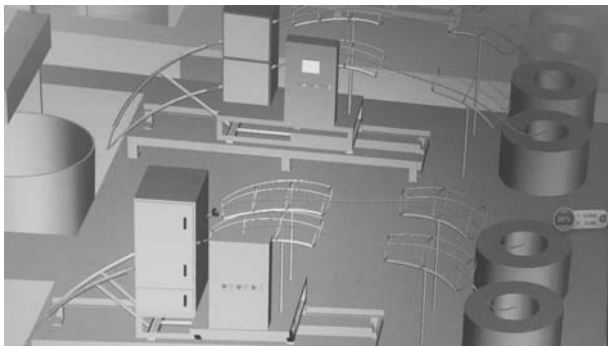


图2 喂线处理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wire feeding treatment

表1 试验样品编号及锰钢化学成分

Table 1 Test sample number and chemical composition of manganese steel

| 变质剂种类              | 变质剂加入量<br>/% | 试样编号 | $w_B/\%$ |      |       |       |       |      |       |
|--------------------|--------------|------|----------|------|-------|-------|-------|------|-------|
|                    |              |      | C        | Si   | Mn    | S     | P     | Cr   | RE    |
| 钇稀土复合多元<br>合金变质包芯线 | 0.2          | Y02  | 1.18     | 0.60 | 11.9  | 0.006 | 0.044 | 1.86 | 0.019 |
|                    | 0.4          | Y04  | 1.25     | 0.65 | 11.83 | 0.008 | 0.042 | 1.84 | 0.025 |
|                    | 0.6          | Y06  | 1.28     | 0.62 | 11.77 | 0.009 | 0.035 | 1.91 | 0.047 |
| 轻稀土变<br>质包芯线       | 0.2          | C02  | 1.22     | 0.63 | 11.79 | 0.011 | 0.039 | 1.88 | 0.016 |
|                    | 0.4          | C04  | 1.19     | 0.58 | 11.58 | 0.015 | 0.045 | 1.87 | 0.023 |
|                    | 0.6          | C06  | 1.23     | 0.66 | 11.93 | 0.012 | 0.038 | 1.96 | 0.035 |
| 不添加                | 0            | K00  | 1.19     | 0.61 | 11.88 | 0.024 | 0.044 | 1.89 |       |
|                    |              | K01  | 1.22     | 0.68 | 11.84 | 0.022 | 0.041 | 1.88 |       |
|                    |              | K02  | 1.25     | 0.61 | 11.86 | 0.026 | 0.042 | 1.85 |       |

## 2 试验结果

### 2.1 试样金相组织

#### 2.1.1 铸态组织分析

试验合金无腐蚀及腐蚀铸态金相图,见图6、图7。普通奥氏体中锰钢主要用铝终脱氧,其夹杂物主要类型是 $Al_2O_3$ 、 $MnO$ 、 $MnS$ 等及它们组成的复合夹杂物,形状多为不规则多角形,或是尖角块状,数量较多,尺寸较大,最大尺寸可达到 $42\ \mu m^{[6-7]}$ ,并且常常分布在晶界,降低钢的力学性能,特别是降低韧性。通过变质处理,减少了夹杂物的数量,改变了夹杂物的形态及分布,从而减少了它们对基体的危害,提高



图3 用于磨损试验的试样

Fig. 3 Samples for wear test

钢的力学性能，特别是冲击值。从以上铸态金相可明显看出，加稀土变质处理后，夹渣物数量明显减少，尺寸明显变小，均以粒状、球状为主，从而减少了夹杂物对基体的割裂作用。

通过以上金相图对比可看出，未经稀土变质的金相组织中，晶界富集有大量的网状共晶碳化物，夹杂物粗大且数量多；加普通轻稀土后晶界也有大量网状共晶碳化物，夹杂物数量虽多但是尺寸变小，呈颗粒状

或团球状，说明加稀土后对锰钢中大块硫化、氧化夹杂有球化、细化的作用。加重稀土钇后，晶界网状碳化物明显减少，仅有极少量出现在晶间，大部分碳化物出现在晶粒内部，在晶内以粒状均匀分散分布，在钇稀土和多元合金的共同作用使碳化物、夹杂物变得细小圆整、弥散分布，增加了锰钢的耐磨质点，为提高锰钢耐磨性打下了坚实基础。

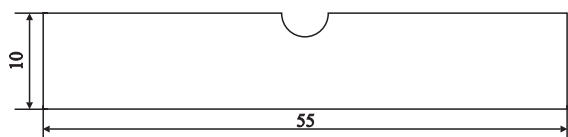


图4 冲击试样尺寸

Fig. 4 Size of impact specimen

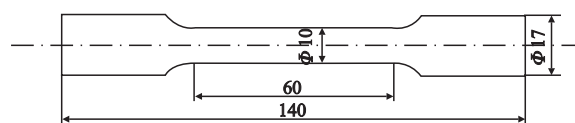


图5 拉伸试样尺寸

Fig. 5 Size of tensile specimen

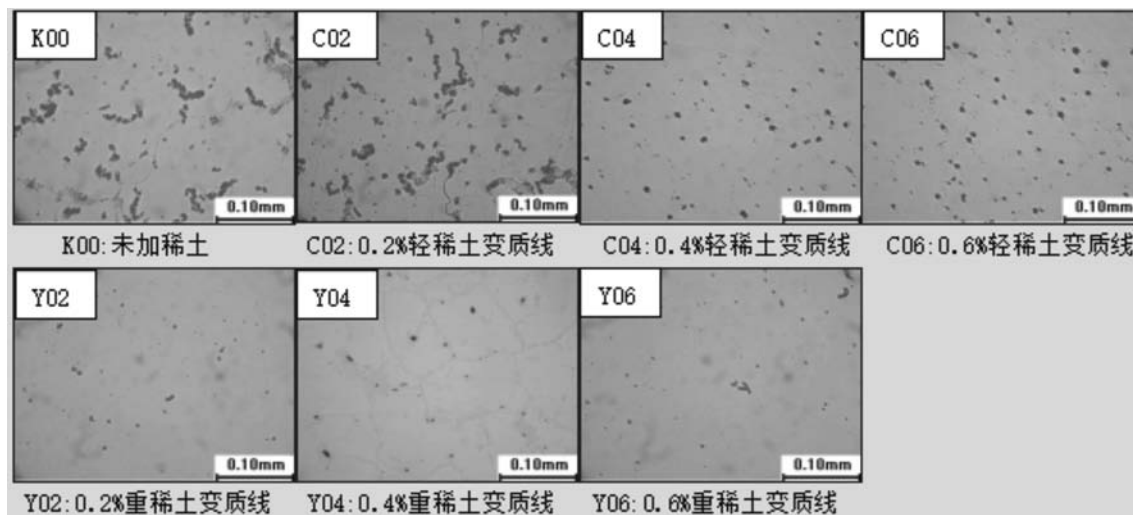


图6 铸态未腐蚀金相组织

Fig. 6 As-cast microstructure ( unetched )

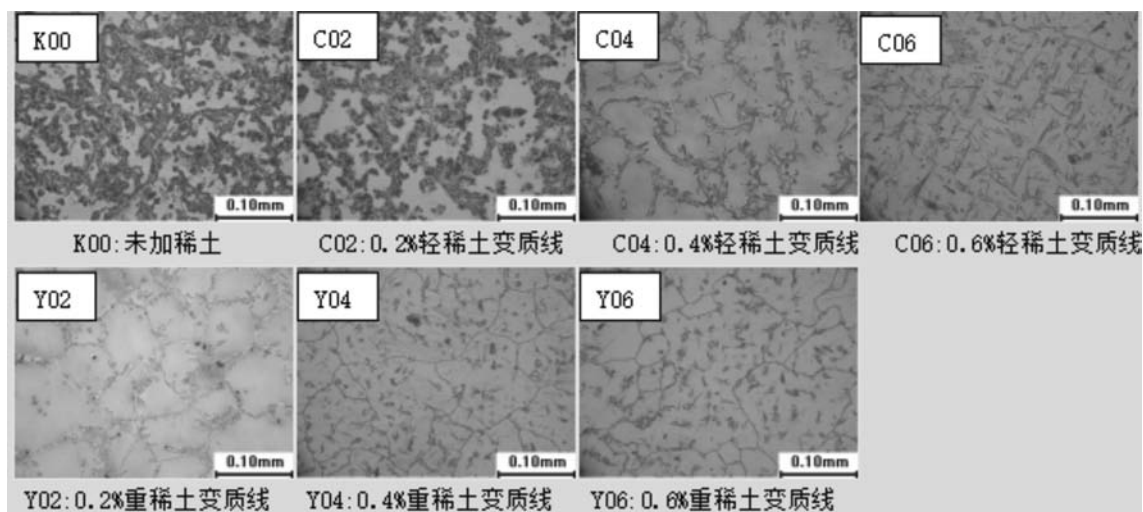


图7 铸态腐蚀后金相组织

Fig. 7 As-cast microstructure ( etched )

### 2.1.2 水韧处理金相组织

水韧处理金相见图8，因未加稀土金相图片相差不大，本文只取了一个试样的金相图。水韧处理后明显可以看出，加钇稀土包芯线可明显细化高锰钢奥氏体晶粒。稀土加入高锰钢钢液中主要形成两类非金属夹杂物：稀土氧化物和稀土硫氧化物；这两类氧化物熔点均很高，其中粒子较大的稀土氧化物和硫氧化物以渣的形式被排除，直径较小的夹杂物质点仍然悬浮在熔体中，作为奥氏体钢非均匀质形核的核心<sup>[8]</sup>。据非均匀形核理论，形核剂能促进液态金属形核，这两类氧化物完全可以作为结晶时的异质晶核，由于晶核的增多，自然能细化高锰钢的奥氏体晶粒。经钇稀土变质处理后，稀土在固/液两相界面上富集，阻碍固相从液相获得相应的原子，从而达到阻碍晶粒长大、抑制柱状晶发展、细化等轴晶的作用，加入量在0.2%、0.4%、0.6%都能起到明显细化晶粒的效果（图8）。

### 2.2 力学性能

稀土元素有缩小铸件组织中柱状晶区、加大等轴晶区、细化晶粒的作用，稀土元素的这个作用普遍认为是稀土夹杂非均匀形核作用造成的。新日铁研究所的大桥彻郎通过过冷度试验证明稀土氧化物比氧化铝、二氧化硅等更有可能成为非自发结晶核心<sup>[9-12]</sup>。用稀土对高锰钢进行变质处理，可细化晶粒，改善碳化物和非金属夹杂的形态及分布，有利于提高韧性和抗热裂倾向。

表2为9个高锰钢试样的抗拉强度、伸长率和冲击值。未加入稀土变质时的高锰钢铸态显微组织中有大量的共晶碳化物在晶界上呈连续的网状分布，这些脆性相的存在割断了奥氏体间的联系，使晶粒间的结合强度大大降低，稀土加入主要是对夹杂物起变质作用，使其成为球形高熔点夹杂物，提高了材料塑性。复合其他多元合金素的综合作用，消除柱状晶，强化

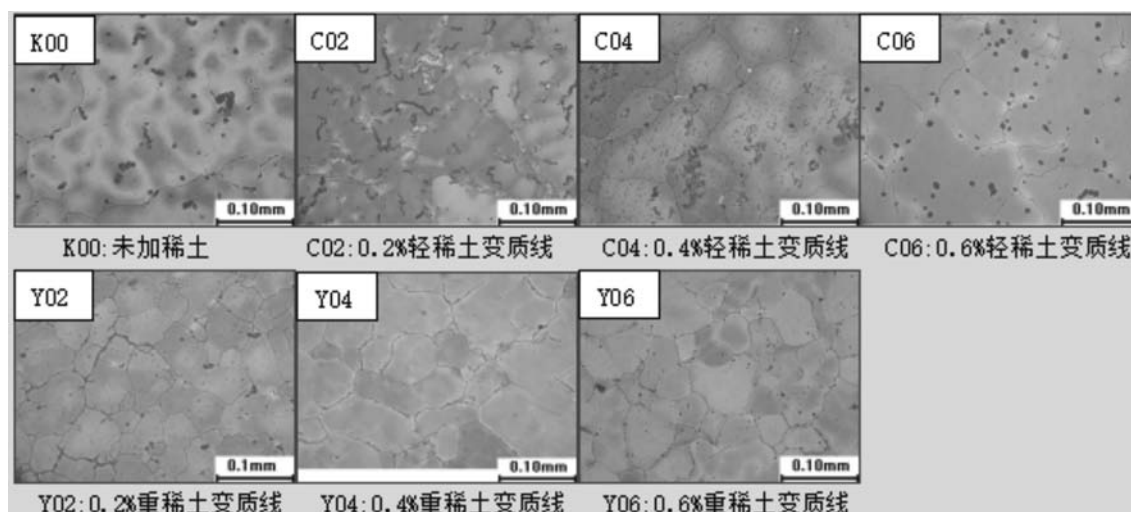


图8 水韧处理后金相组织

Fig. 8 Water toughened microstructure

表2 试样力学性能  
Table 2 Mechanical properties of specimens

| 变质剂                | 加入量/% | 试样编号 | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 冲击值/(J·cm <sup>-2</sup> ) |
|--------------------|-------|------|----------|-------|---------------------------|
| 钇稀土复合多元<br>合金变质包芯线 | 0.2   | Y02  | 645      | 33    | 129                       |
|                    | 0.4   | Y04  | 685      | 35    | 132                       |
|                    | 0.6   | Y06  | 698      | 37    | 133                       |
| 轻稀土变<br>质包芯线       | 0.2   | C02  | 655      | 29    | 120                       |
|                    | 0.4   | C04  | 644      | 25    | 119                       |
|                    | 0.6   | C06  | 655      | 28    | 117                       |
| 无变质剂               | 0     | K00  | 638      | 25    | 115                       |
|                    |       | K01  | 641      | 26    | 118                       |
|                    |       | K02  | 632      | 24    | 114                       |



基体,提高淬透性,从而加强水韧处理对其综合性能的作用,裂纹形成功和扩展功提高<sup>[4]</sup>,从而表现断口为韧窝,强度提高,特别是伸长率大幅度提高。

### 2.3 断口形貌分析

未加稀土高锰钢纵向冲击断口呈现少量浅韧窝与解理面的混合花样,横向冲击断口表现为解理断口的河流花样特征。加入稀土后,高锰钢纵向冲击断口区域呈现少量的韧窝,在韧窝底部伴有少量的球状夹杂物,表现为准解理+韧窝的断口形貌,特别是加重稀土后韧窝较深且数量也较多,并且在靠近解理和韧窝的边界处,断裂的撕裂棱突起非常明显,呈花瓣状,见

图9-11。

### 2.4 部分夹渣物能谱分析

在冲击试样上各取三个点对夹渣物进行能谱分析,钇与高锰钢中的氧硫形成稀土硫化物、硫氧化物,熔点高,呈细小的粒状,尺寸在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 左右,能谱分析结果如图12。钕与高锰钢中的氧硫形成稀土硫化物、硫氧化物,熔点也高,呈连续、半连续网状、团块状,尺寸在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 左右,如图13。未加稀土的高锰钢中,硫化物、硫氧化物大部分呈连续网状、块状,尺寸在 $25\sim 40\ \mu\text{m}$ 左右,如图14。

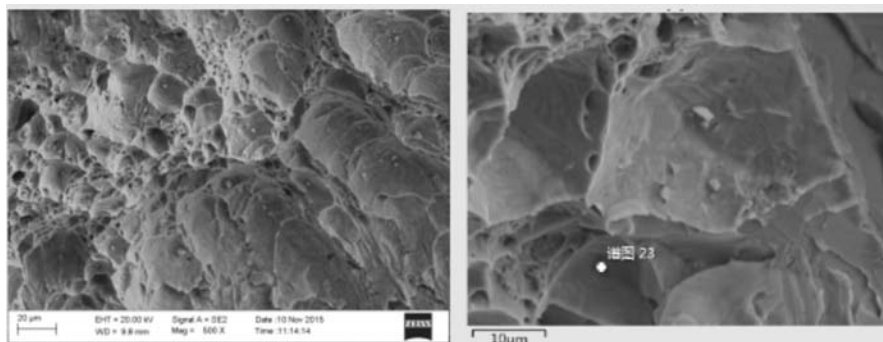


图9 钇稀土变质处理试样断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of impact specimen treated by yttrium rare earth modification line

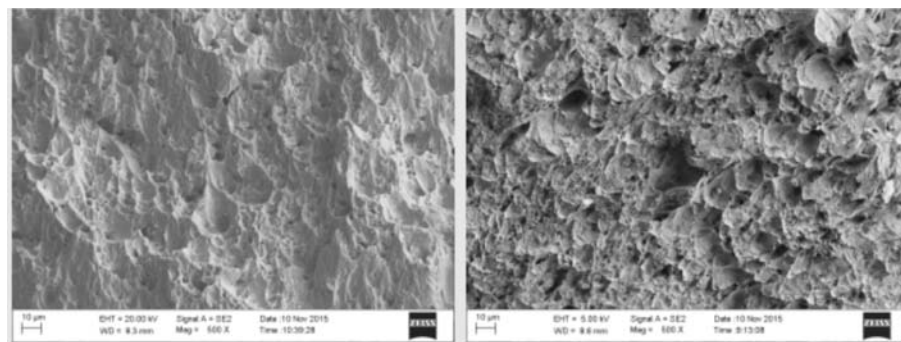


图10 轻稀土变质处理试样断口形貌

Fig. 10 Fracture morphology of impact specimen treated by light rare earth modification line

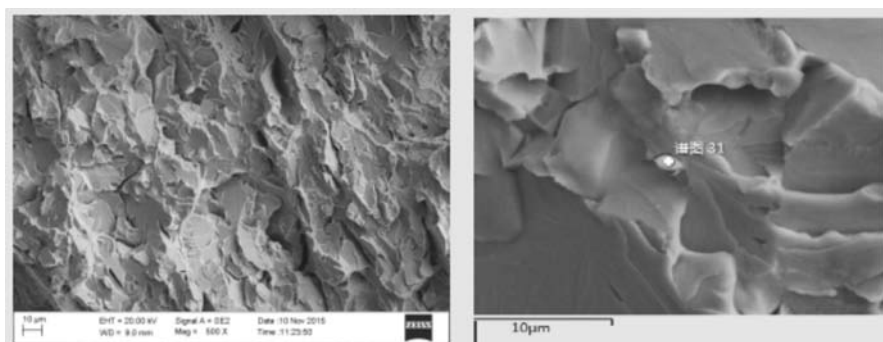


图11 未经稀土变质处理试样断口形貌

Fig. 11 Fracture morphology of impact specimen without modification treatment by rare earth alloy

## 2.5 磨损失重试验

磨损失重试验数据见表3。本试验所制备的材料为同一密度的合金材料,因此选取磨损失重来评定材料的耐磨性。在评定材料磨损及耐磨性时,因为在所有的情况下,磨损是时间的函数,因此,用耐磨性来表示其时间特性。本试验采用的磨损率是以9 000次为一个周期的磨损量,磨损量越小表示耐磨性能好。

## 2.6 磨损前后硬度变化

由于钇具有独特的核外电子排布,分子量较镧钕

等轻稀土大,在钢铁合金中具有较大的固溶度,除形成夹杂成为异质核心,此外钇还在固液界面前沿一侧富集<sup>[13]</sup>,在受外力作用下容易形成孪晶组织,加大位错能,在相同的冲击功下有更多的奥氏体组织生成马氏体,较软的表面奥氏体在高速撞击下会相变成为较硬的马氏体相<sup>[14]</sup>,从而提高了表面的耐磨性。同时心部仍有较软的奥氏体相,又保留了高锰钢的韧性。

高锰钢的耐磨性能只有在强冲击、大压力下才能体现出来,这是因为高锰钢水韧处理后基本上是单一的奥氏体组织,奥氏体为面心立方点阵结构,滑移系

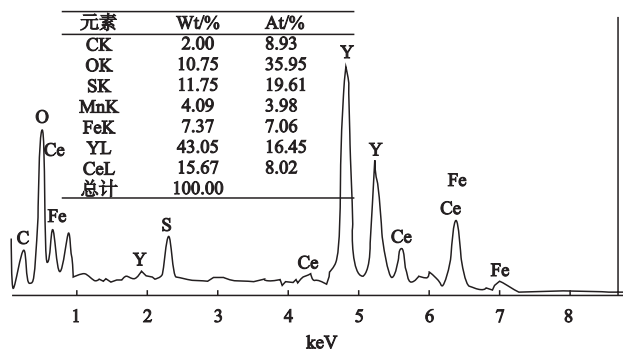
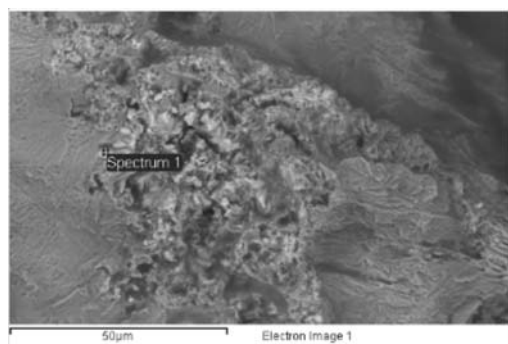


图12 钇稀土变质线处理后试样断口夹杂物分析

Fig. 12 Analysis of fracture slag inclusion of yttrium rare earth modified specimen

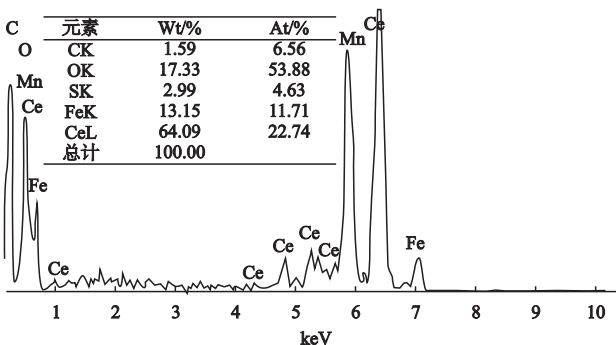


图13 轻稀土变质线处理后试样断口夹杂物分析

Fig. 13 Analysis of fracture slag inclusion of light rare earth modified specimen

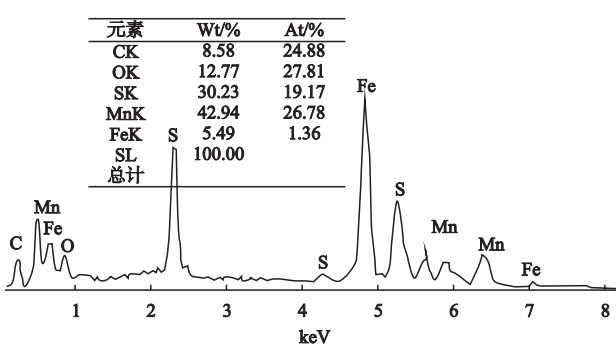
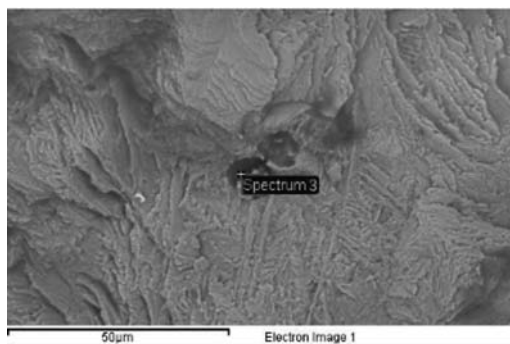


图14 未经稀土变质线试样断口夹杂物分析

Fig. 14 Analysis of fracture slag inclusion of samples without rare earth modification

多, 韧性好, 而硬度和屈服强度较低。经过钇稀土变质线变质处理后, 在相同的冲击功下, 发生加工硬化的区域明显增大, 显微硬度大幅提高, 提高了高锰钢的加工硬化能力。加入钇稀土变质处理后高锰钢的耐磨性能提高, 见表4。除了和经钇稀土变质处理后抗拉强度和屈服强度有关外, 还与钇稀土加入后提高了高锰钢的加工硬化能力有关<sup>[15]</sup>。

从试验过程及数据分析, 结合现有关于高锰钢研究资料, 加稀土后高锰钢耐磨性能的提高主要有以下几方面的原因: ①加稀土后高锰钢钢液得到了深度净化, 晶间夹渣物减少<sup>[6]</sup>, 奥氏体晶界得到了净化<sup>[3]</sup>; ②加稀土后高锰钢奥氏体晶粒得到了细化, 奥氏体晶粒度从1级细化到4-5级, 晶粒细化使晶界数目增多, 阻碍了大量位错的运动, 使位错彼此缠结形成位错胞, 进而转化为亚晶粒, 从而使亚晶粒也得到明显的细化<sup>[16]</sup>; ③加稀土后提高了高锰钢的加工硬化能力, 特别是加重稀土钇后强烈诱发了马氏体相变, 形成弥散分布的马氏体<sup>[14]</sup>, 表面硬度提高明显; ④稀土在锰钢中起到合金化的作用, 提高了基体的位错密度, 位错密度的增大总是伴随着晶粒的细化, 晶粒越细, 位错运动的阻力越大, 就越有利于锰钢基体的强化<sup>[17]</sup>; ⑤加重稀土钇后, 锰钢中第二相<sup>[18]</sup> (奥氏体内部颗粒状碳化物) 体积扩大, 这个也属于外来形核质点的增加, 在同样的浇注温度下, 奥氏体晶粒度 (等轴晶) 得到进一步细化<sup>[19]</sup>, 同时这些颗粒状碳化物相当于耐磨质点, 增加基体硬度和耐磨性能。

### 3 结论

(1) 高锰钢在钇稀土复合多元合金变质线处理后, 夹渣物数量明显减少、形状尺寸得到改善, 碳化物得到球化和细化, 奥氏体晶粒度得到细化; 水韧处理后晶间夹渣物数量也明显减少, 而晶粒内部的碳化物增加了锰钢的耐磨质点, 显著提高高锰钢的耐磨性。

(2) 采用喂线法加入稀土及多元合金, 减少了活泼合金元素的烧损, 稀土吸收率稳定, 保证了变质效果的稳定; 采用喂线加入也减少了人为因素的影响。

表3 试样耐磨性数据  
Table 3 Wear resistance data of specimens

| 试样编号 | 磨损前/g   | 磨损后/g   | 耐磨性/% |
|------|---------|---------|-------|
| Y02  | 193.437 | 193.333 | 0.054 |
| Y04  | 194.205 | 194.112 | 0.048 |
| Y06  | 194.25  | 194.169 | 0.043 |
| C02  | 182.793 | 182.671 | 0.067 |
| C04  | 181.293 | 181.181 | 0.062 |
| C06  | 182.083 | 181.963 | 0.066 |
| K00  | 179.321 | 179.177 | 0.080 |
| K01  | 180.236 | 180.104 | 0.073 |
| K02  | 193.981 | 193.845 | 0.070 |

表4 试样磨损前后硬度  
Table 4 Sample hardness before and after wear

| 试样编号 | 磨损前HBS | 磨损后HBS |
|------|--------|--------|
| Y02  | 107    | 457    |
| Y04  | 100    | 442    |
| Y06  | 107    | 425    |
| C02  | 128    | 404    |
| C04  | 114    | 418    |
| C06  | 119    | 410    |
| K00  | 123    | 370    |
| K01  | 119    | 361    |
| K02  | 124    | 371    |

(3) 加稀土较未加稀土试样的冲击韧性、初始硬度及强度稍有提高, 但变化不明显; 添加轻稀土变质线试样的伸长率比未添加稀土的试样稍有提高, 添加钇基稀土复合多元合金变质线试样的伸长率比未添加稀土的试样提高较明显; 磨损后加稀土试样的表面硬度提高均较明显; 特别是加钇基稀土复合多元合金变质线试样表面硬度大幅度提高, 说明钇稀土复合多元合金变质线处理能显著提高高锰钢的加工硬化能力, 提高高锰钢的耐磨性能; 轻稀土变质线处理后的试样与未经稀土处理试样相比, 其耐磨性提高10%~20%, 钇基稀土复合多元合金变质线处理后的试样与普通稀土变质线处理的试样相比, 其耐磨性提高20%~30%。

## 参考文献:

- [1] 茅洪祥, 李桂芳. 稀土在高锰钢中的应用 [J]. 武汉钢铁学院报, 1994, 17 (1): 25-32.
- [2] 郑开宏, 赵四勇. 稀土元素在高锰钢中的作用 [J]. 热加工工艺, 2002 (1): 49-50.
- [3] 杨乘东, 周荣锋, 李祖来, 等. Y基稀土变质剂的加入量对ZGMn13组织和力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008 (S1): 283-286.
- [4] 谢敬佩, 刘香茹, 王爱琴, 等. 复合变质中锰钢韧性提高研究 [J]. 热加工工艺, 2002 (6): 27-29.
- [5] 梁建平, 乔林锁, 周旨峰. 稀土复合变质对超高锰钢组织的影响 [J]. 包钢科技, 2004 (1): 15-17.
- [6] 李世彦. 减少高锰钢夹杂物的试验研究 [J]. 铸造, 1999 (2): 29-32.
- [7] 傅排先, 康秀红, 夏立军, 等. 微合金化对厚断面高锰钢铸件中夹杂物形成的影响 [J]. 铸造, 2010 (12): 1337-1340.
- [8] 徐恒钧. 在不同凝固条件下稀土综合变质剂的变质作用研究 [J]. 热加工工艺, 2000 (3): 19-21.
- [9] 高瑞珍, 陈晓光, 刘树模. 稀土元素铈对钢的凝固和枝晶偏析的影响 [J]. 北京钢铁学院学报, 1983 (1): 53-63.
- [10] 郭宏海, 宋波, 毛璟红, 等. 稀土元素对耐候钢元素偏析的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2010 (1): 44-49.
- [11] 大橋徹郎, 広本健, 藤井博務, 等. 鉄の不均質核生成におよぼす酸化物の影响 [J]. 鉄と鋼, 1976 (6): 614.
- [12] 包钢冶金研究所. 稀土与钕 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1974.
- [13] 胡汉起, 钟雪友, 力航. 铈对高锰钢奥氏体胞晶稳定性及锰的枝晶偏析的影响 [J]. 北京钢铁学院学报, 1983 (1): 64-84.
- [14] 刘志学, 程巨强. 不同形变对高锰钢组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2008 (12): 1287-1289.
- [15] 李小蕴, 祖方道, 刘兰俊, 等. 模拟实际工况条件下高锰钢加工硬化能力的研究 [J]. 铸造, 2005 (5): 462-465.
- [16] 吴化, 徐珊珊. 多元变质处理对高锰钢微观结构与性能的影响 [J]. 铸造, 2008 (1): 66-68.
- [17] 魏秉庆, 梁吉, 高志栋, 等. 贝氏体球铁中位错密度测定及其影响因素 [J]. 金属学报, 1996, 32 (6): 573-577.
- [18] 郭建新, 刘俊友, 刘杰. 硼含量对Mn13Cr2高锰钢铸态组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2011 (4): 386-389.
- [19] 傅排先, 李殿中, 李依依. 厚断面高锰钢铸件凝固组织模拟与控制 [J]. 铸造, 2009 (10): 1030-1037.

## Application of Yttrium-Rare Earth Complex Multi-Element Alloy Modified Cored Wire to High Manganese Steel

LIU Yan-ping, YANG Qing, ZHU Fu-sheng, ZHANG Zhi-yong

(Longnan Longyi Heavy Rare Earth Science and Technology Co., Ltd., Ganzhou 341401, Jiangxi, China)

**Abstract:**

High manganese steel was modified and refined by using two kinds of modified cored wires produced by yttrium based heavy rare earth and light rare earth in order to study the effects of different kinds of rare earth and different addition amounts on the impact toughness and wear resistance of high manganese steel. The results show that the impact toughness and initial hardness of the samples with and without rare earth modified cored wires treatment have no obvious change, but the elongation of samples treated by yttrium based heavy rare earth modification line is significantly higher than that without treated by rare earth modification line. After refinement treatment by yttrium based rare earth composite multi-element alloy modification line, the work hardening ability and wear resistance of high manganese steel were significantly improved; after treatment by light rare earth modification line, the wear resistance of the samples increases by 10%-20% compared with the high manganese steel without modification treatment, and the wear resistance of the samples treated by yttrium based rare earth composite modification line is 20%-30% higher than that of the samples treated by ordinary rare earth modification line.

**Key words:**

yttrium-based heavy rare earth; cored wire; modification; multi-alloy; high manganese steel; work hardening