

稀土对水韧态高碳中锰钢组织、性能的影响

王 权¹ 齐璘玉宇² 李 强¹ 魏文强¹ 孙 磊¹

1. 内蒙古中天宏远稀土新材料股份公司 内蒙古包头 014010

2. 包钢勘察测绘研究院 内蒙古包头 014010

摘 要: 采用真空感应炉炼钢, 钢模浇铸, 1050℃加热水韧处理及物理化学性能测试和实验数据分析, 研究了稀土在高碳中锰钢中的存在形式和变化规律及其对夹杂物、金相组织、性能的影响。研究发现, 在现有条件下生产的高碳中锰钢中, 稀土的加入量与钢中稀土固溶含量没有相关性, 本次实验中钢中稀土固溶量均小于 0.0035%。微量固溶稀土能够降低钢中碳元素的扩散系数, 阻碍水韧过程中渗碳体组织的析出和奥氏体晶粒的涨大, 细化室温奥氏体晶粒尺寸, 提高抗拉强度、塑性及不同试验温度下的冲击韧性。在本实验条件下, 高碳中锰钢中稀土最佳加入量为 0.2–0.25%, 与未加稀土的 0# 水韧态试样相比, 添加稀土的 3#、4# 试样的 Rm 分别提高了 17.7% 和 0.87%、A₅₀ 分别提高了 7.9% 和 21.6%, -40℃ Ak 分别提高了 438.26%、418.42%。

关键词: 稀土; 水韧态高碳中锰钢; 组织; 硫化物、氧化物夹杂; 性能

前言

磨损是机械零件常见的失效形式之一, 广泛存在于工业生产中, 显著增加企业成本, 降低效益。目前如煤矿挖掘、电力磨煤、水泥破碎、矿山磨粉等行业普遍使用高锰钢制造耐磨部件, 依靠其在强冲击载荷下的形变诱导强化机制以提升使用寿命。然而, 在弱冲击条件下, 高锰钢无法实现塑性变形强化, 其表面仍以软基体面对硬物料冲刷, 导致严重磨损、寿命缩短 [1–7]。为此, 技术人员在高锰钢基础上研发了中锰钢 (含碳 0.8%–1.2%、锰 6.0%–9.5%), 提升其中低冲击环境下的耐磨性能。中锰钢通过降低锰含量, 增强了应变诱导马氏体相变的可能性, 从而在较低冲击条件下也能实现表面强化, 显著延长使用寿命 [8]。据报道, 中锰钢制成的衬板和板锤等部件, 其使用寿命较高锰钢提升超过 60% [9]。然而, 中锰钢基础强度偏低限制了其早期耐磨性 [10]。为优化其性能, 本研究以高碳中锰钢为基础, 进一步探讨稀土元素在改善钢材组织、强化机制等方面的影响。

1 研究方法

1.1 材料制备

实验原材料选用低碳废钢、高碳锰铁、75# 硅铁、铝线和粒度为 20–30mm (La+Ce) 的 1# 稀土合金 (Si–Mg–Re 合金), 原材料按低碳废钢→高碳锰铁→75# 硅铁顺序加入 25Kg 真空感应电炉干锅中, 铝线放到二次加料器中, 1# 稀土合金

放到三次加料器中。钢水熔炼温度为 1510–1520℃, 待钢水熔化后加入铝线脱氧, 脱氧后加入 1# 稀土合金。钢水在干锅中镇静 15 分钟开始浇铸, 浇铸温度为 1420–1430℃, 金属模浇铸, 钢锭的几何尺寸为 160x75x250mm。钢锭浇铸冷却到室温后取出, 在高温箱式电炉中加热进行水韧处理, 钢锭水韧处理工艺为: 加热速率 5℃/min, 加热温度为 1050℃, 保温时间为 2 小时, 冷却方式为水冷却。水韧处理工艺曲线见图 1。

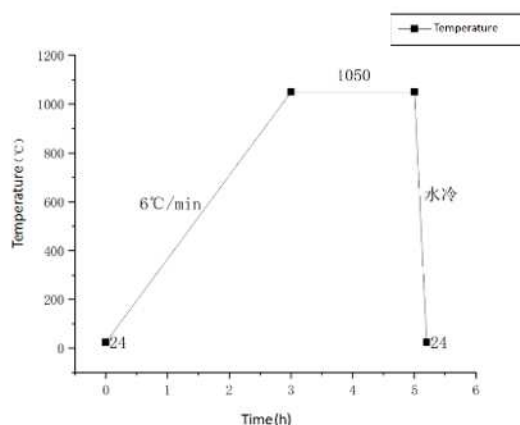


图 1 高碳中锰钢水韧处理工艺

1.2 分析方法

1.2.1 实验钢化学成分及稀土含量的测定

采用型号为 CS-44 碳硫分析仪测定钢中碳、硫含量;

采用型号为 Optima5300DV 等离子光谱仪测定钢中锰、硅及稀土含量,夹杂物中的稀土含量采用低温电解法测定,钢中固溶稀土含量为钢中稀土含量与夹杂物中稀土含量之差。低温电解液的配比为 1%无水氯化锂+ 5%三乙醇胺+ 5%乙二醇+乙醇溶液,电解过程中电解液温度为 -15℃,电解电流为 0.03A ~ 0.04A。

1.2.2 金相组织分析

金相检验试样取自钢锭长度方向的中部 1/4mm 厚度处,采用金相显微镜观察试样的夹杂物形态和组织形貌。

1.2.3 力学性能测定

经水韧处理后的高碳中锰钢钢锭分别按国标 GB229-1984 和 GB228-2002 加工力学性能检测试样,拉伸试样尺寸为 $\phi 10\times 200\text{mm}$;冲击试样尺寸为 $10\times 10\times 55\text{mm}$ 的 U 型缺口试样。采用电子万能材料试验机进行常温拉伸实验,采用配制低温槽的材料冲击试验机进行不同温度的冲击性能试验。

2 实验结果分析及讨论

2.1 高碳中锰钢的化学成分及稀土在钢中的存在状态

表 1 和图 2 显示,高碳中锰钢中的稀土元素主要以夹杂物形式存在,其含量占钢中稀土总量的 90% 以上,固溶于钢基体中的稀土极少。未加稀土的 0# 试样中,固溶稀土量小于 0.0005%,而添加稀土的 1# 至 5# 试样中,固溶稀土量依次为 0.0002%、0.0007%、0.0035%、0.0021%、0.0014%。其中 3# 试样虽添加量仅为 0.2%,却表现出最高的固溶稀土含量,说明稀土固溶量并不随添加量线性增加。图 2 表明,随着稀土添加量的上升,钢中稀土总量和夹杂物中的稀土含量也随之增加,在添加量为 0.3% 时达到最大值,分别为 0.1044% 和 0.103%。由于稀土具有强烈的表面活性,在钢中主要与氧、硫反应生成夹杂物,导致其绝大部分被消耗,降低了固溶含量。因此,若想实现有效合金化,需合理控制稀土添加量,避免因过量或不足导致固溶效率下降。

表 1 实验钢化学成分结果 (Wt%)

Heat number	Chemical composition of experimental steel					RE Added	RE Residual amount	RE content in inclusions	Solid solution RE content
	C	Si	Mn	P	S				
0#	1.40	0.35	8.86	0.0263	0.017	0	<0.0005	<0.0005	<0.0005
1#	1.38	0.37	8.86	0.0272	0.004	0.1	0.0152	0.015	0.0002
2#	1.39	0.38	8.56	0.0260	0.003	0.15	0.0488	0.0481	0.0007
3#	1.39	0.40	8.92	0.0282	0.003	0.2	0.0535	0.050	0.0035
4#	1.35	0.42	8.44	0.0272	0.004	0.25	0.0631	0.061	0.0021
5#	1.37	0.39	8.67	0.0276	0.004	0.3	0.1044	0.103	0.0014

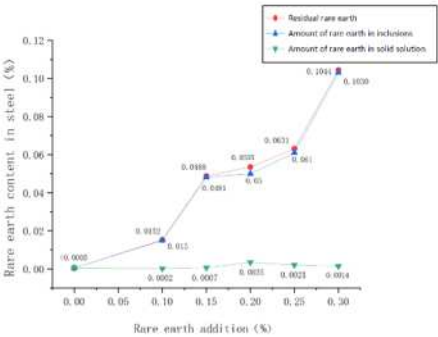


图 2 稀土加入量与存在状态及变化规律

2.2 稀土对高碳中锰钢夹杂物的影响

稀土处理高碳中锰钢夹杂物微观照片见图 3 所示,从图 3 看出,在未加稀土的 0# 试样中,硫化物、氧化物夹杂的形貌为长条状和集中分布的点状;在添加稀土的 1#、3#、5# 试样中,硫化物、氧化物夹杂的形貌变为分散分布的椭球形和球状。说明稀土添加到高碳中锰钢中后,对钢中的夹杂物形态和数量都具有一定的改变作用,即随着稀土的加入

和加入量的增加,实验高碳中锰钢中的硫化物、氧化物夹杂无论是形态还是数量均发生了明显的变化,其一是稀土加入高碳中锰钢中对夹杂物具有变质作用,将未加稀土的长条状硫化物和集中分布的点状氧化物夹杂变质成分散分布的椭球形和球形;其二是稀土加入高碳中锰钢中净化了钢液,减少了单位面积钢中夹杂物的数量,降低了钢的污染度起到了净化钢液的作用。

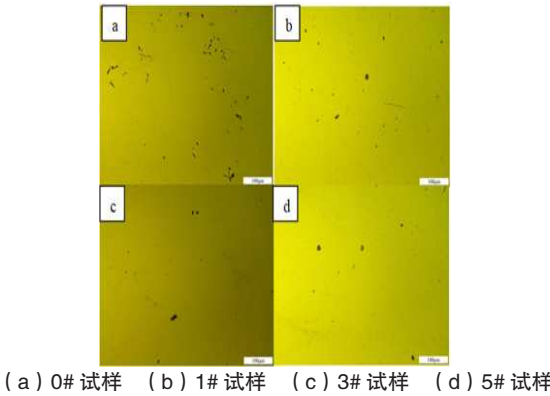
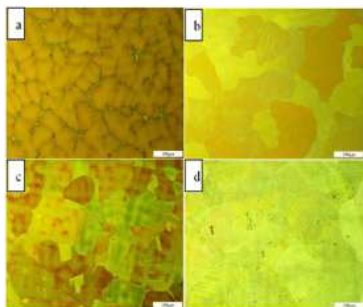


图 3 水韧态高碳中锰钢夹杂物形貌

2.3 稀土对水韧态高碳中锰钢组织的影响

将取自钢锭长度方向中部 1/4mm 处尺寸为 20x20x40mm 的金相试样, 经不同型号的金相砂纸磨制、绒布抛光、4% 硝酸酒精溶液腐蚀, 采用型号为 4XC-TV 金相显微镜进行观察, 组织形貌见图 4。



(a) 0# 试样 (b) 1# 试样 (c) 3# 试样 (d) 5# 试样

图 4 水韧态试样组织

从高碳中锰钢水韧态试样组织的观察结果看出, 试样经过水韧处理后, 未添加稀土的 0# 试样内部组织为奥氏体 + 晶界碳化物见图 4(a), 且晶粒比较粗大。经采用 GB6394-86 进行评级结果为 1 级。添加稀土的 1#、3#、5# 试样内部组织均为单相奥氏体组织, 在奥氏体晶界上未发现未熔碳化物颗粒, 晶界较为干净见图 4(b) - (d)。采用 GB6394-86 对 1#、3#、5# 试样的奥氏体晶粒评级结果为 1.5-2 级。说明稀土添加到高碳中锰钢中, 经水韧处理后能够细化奥氏体晶粒尺寸, 使奥氏体晶粒尺寸细化 0.5-1 级, 同时也净化了奥氏体晶界。究其原因笔者认为稀土添加到高碳中锰钢中, 在水韧处理过程中稀土能够降低钢中碳元素的扩散系数, 抑制碳化物的析出, 从而起到细化奥氏体晶粒, 净化奥氏体晶界的作用。

2.4 稀土对水韧态高碳中锰钢力学性能的影响

2.4.1 强度影响

采用电子万能材料试验机对水韧态试样进行常温静态拉伸实验, 水韧态高碳中锰钢的强度与稀土加入量之间的相关关系见图 5。

由图 5 曲线的变化规律看出, 与未加稀土 0# 试样的抗拉强度和屈服强度相比, 随着稀土加入量的增加, 水韧态高碳中锰钢的抗拉强度总体呈现增加趋势 (除 4# 样外), 而屈服强度则表现为先降低后增加的波动现象。稀土加入高碳中锰钢中主要通过抑制碳化物的析出改变组织状态, 细化奥氏体晶粒, 促进夹杂物的变性及弥散析出等作用来改善高碳

中锰钢的强度。在本实验研究条件下, 稀土加入钢中, 阻碍了钢中碳元素在冷却过程中的析出, 使实验钢水韧后的组织从未加稀土 0# 样的奥氏体 + 碳化物, 改变成单相奥氏体组织, 增加了钢中奥氏体组织的百分含量。这样的组织在单轴拉力的作用下, 产生了较大的形变诱导强化的作用, 增加了高碳中锰钢抗拉强度。同时由于奥氏体组织在拉伸过程中较奥氏体 + 碳化物组织易变形, 造成其具有较低的屈服强度。由此说明稀土加入高碳中锰钢中能够提高钢的抗拉强度, 降低或增加屈服强度。

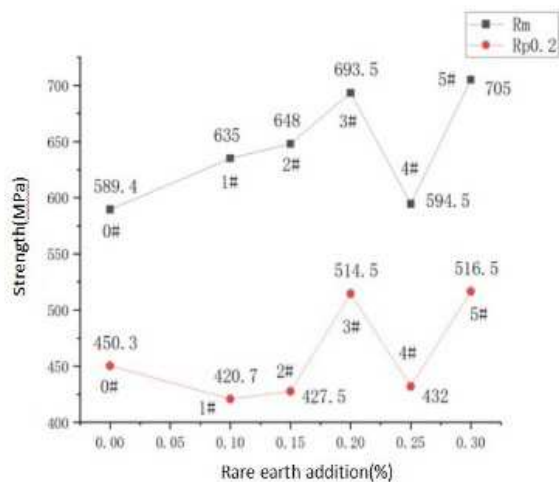


图 5 水韧态高碳中锰钢强度与稀土加入量关系

2.4.2 塑性影响

从图 6 的曲线变化规律看出, 与未加稀土 0# 试样的断后伸长率和断面收缩率相比, 添加稀土试样随着稀土加入量的增加, 断后伸长率和断面收缩率均增加, 在稀土加入量为 0.15% 时达到最大值, 断面收缩率为 27.5%, 伸长率为 40.25%。说明在本实验条件下, 稀土加入高碳中锰钢中一方面阻碍了钢中碳元素在冷却过程中的析出, 使实验钢水韧后的组织从未加稀土 0# 样的奥氏体 + 碳化物, 改变成单相奥氏体组织, 增加了钢中奥氏体组织的百分含量。另一方面由于稀土的加入, 细化了奥氏体晶粒尺寸, 改变了夹杂物性质及分布状态。二者综合作用提升了水韧态高碳中锰钢断后伸长率和断面收缩率。

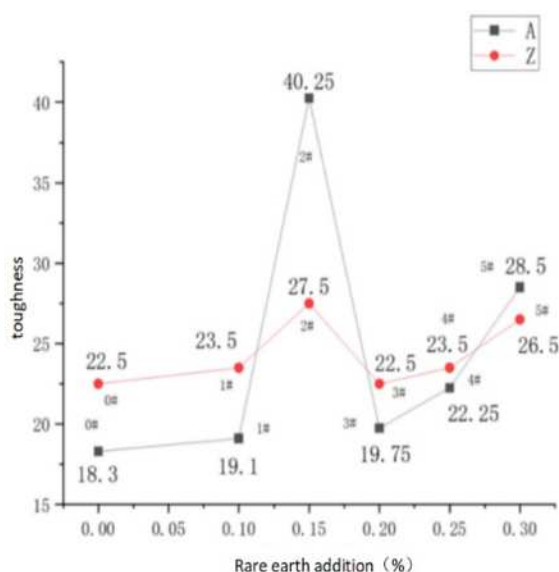


图6 水韧态高碳中锰钢塑性与稀土加入量关系

2.4.3 冲击韧性影响

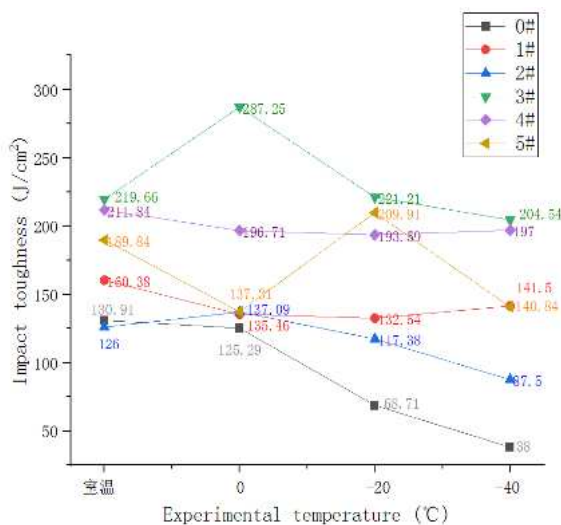


图7 水韧态高碳中锰钢冲击韧性与实验温度的关系

图7显示了水韧态高碳中锰钢在不同实验温度下的冲击韧性变化。与未加稀土的0#试样相比,所有加入稀土的试样在水韧处理后,其冲击韧性均明显提高,尤其在低温条件下提升更为显著。未加稀土的0#试样随着温度降低,韧性大幅下降,而添加稀土的试样则呈现较小波动,降幅明显减缓。例如从室温降至 -40°C ,0#试样下降了 $92.91\text{J}/\text{cm}^2$,而添加稀土的1#、3#试样分别仅下降了 $18.88\text{J}/\text{cm}^2$ 和 $15.12\text{J}/\text{cm}^2$ 。特别是稀土固溶量超过0.001%的3#、4#、5#试样,在各温度点的冲击韧性均显著优于其他组,其中3#试样

在 -40°C 下的韧性提升幅度高达438.26%。这些结果表明,稀土元素通过改善钢的基体组织、细化晶粒和优化夹杂物形貌,在水韧态下可显著提升高碳中锰钢的冲击韧性,尤其是在低温环境下表现尤为突出。

3 结论

(1) 在本实验研究的稀土处理高碳中锰钢中,钢中稀土的固溶量与稀土的加入量之间没有相关关系,随着稀土加入量的增加固溶量并不增加,其固溶稀土含量均保持在0.0035%以下。

(2) 稀土添加到高碳中锰钢中,改变了硫化物、氧化物夹杂的形态,数量。试样经水韧处理后,未加稀土的组织为奥氏体+少量碳化物,晶粒度为1级。添加稀土的组织均为单相奥氏体,晶粒度为1.5~2级。

(3) 添加稀土的高碳中锰钢经水韧处理后,提高了钢的抗拉强度、延伸率、断面收缩率和不同温度下的冲击韧性,尤其是钢的低温冲击韧性提高的幅度更大。

(4) 在本实验条件下,高碳中锰钢中稀土最佳加入量为0.2%~0.25%。与0#试样相比,添加稀土的3#、4#试样常温抗拉强度分别提高了17.7%和0.87%、延伸率分别提高了7.9%和21.6%。 -40°C 冲击韧性分别提高了438.26%、418.42%。

参考文献:

- [1] Alder P H. Strain hardening of had field manganese steel. Metall Trans,1986,17A:1725.
- [2] Roghavan K S. Nature of the work-hardening behavior I had field manganese steel,Trans AIME,1969,245:1569.
- [3] 王兆昌. 奥氏体锰钢的综合加工硬化机理 [J]. 钢铁研究学报,1994,6(1):77.
- [4] 陈希杰. 高锰钢 [M]. 北京:机械工业出版社,1988,58.
- [5] 石德珂等. 高锰钢的形变与加工硬化 [J]. 金属学报,1989,25(6):B282.
- [6] 朱瑞富等. Fe-Mn-C 合金中的 C-Mn 偏聚及其对相变和形变的影响 [J]. 中国科学,E 辑,1997,27(3):193.
- [7] 许云华,熊建龙,陈瑜眉等. 冲击接触加载下高锰钢表层纳米结构及其特异耐磨性 [J]. 自然科学进展,2001,11(3):282-287.
- [8] 刘鼎胜,赵金山,郭建华,加铬中锰钢衬板的生产实践 [J]. 铸造技术,2011,32(4):589-590.

[9] 谢敬佩,李庆春,何镇明. 铸造复合中锰奥氏体钢的
耐磨性 [J]. 洛阳工学院学报,1999(3): 5 -9.

[10] 何镇明,付绍伯,姜启川,等. 化学成分及热处理对
奥氏体锰钢性能的影响 [J]. 吉林工业大学学报,1987(2): 128

-135.

作者简介: 王权 (1962—), 男, 汉, 内蒙古包头市,
硕士, 内蒙古中天宏远新材料股份公司, 教授级高级工程师,
金属材料及工艺研发。