

La + Ce 复合处理高碳中锰钢的塑变行为及磨损性能

王 权¹, 齐璘玉宇², 孙 磊¹, 王子轩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: 对高碳中锰钢采用 La + Ce 复合处理, 通过成分分析、组织观察、30% 静态压缩、冲击磨损试验和理论分析, 系统研究了 La、Ce 在高碳中锰钢中的赋存状态和存量的变化规律, La、Ce 对硫化物、氧化物夹杂、微观组织和静态压缩硬化效率、冲击磨损性能的影响。研究表明, 对于高碳中锰钢而言, 加入大量的 La、Ce 并不能增加钢中固溶 La、Ce 含量, 固溶 La、Ce 含量均保持在 0.003 5% 以下。La、Ce 能提升常温 30% 静态压缩硬化效率, 使压缩硬化效率从未加 La、Ce 的 94.4% 增加到添加 La、Ce 的 96.68% ~ 108.2%; La、Ce 提高了试样的抗冲击磨损性, 相对耐磨性在 2 J 冲击载荷时提高了 1.057 0 ~ 1.606 9 倍, 5 J 冲击载荷时提高了 1.080 4 ~ 1.374 1 倍。在本试验条件下, 高碳中锰钢中 La + Ce 最佳加入量为 0.20% ~ 0.25%。

关键词: La + Ce; 高碳中锰钢; 微观组织; 静态压缩行为; 冲击磨损性能

中图分类号: TB146.45

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2026)02 - 0053 - 08

Plastic Deformation Behavior and Wear Property of High Carbon Medium Manganese Steel with La + Ce Complex Processing

Wang Quan¹, Qi Linyuyu², Sun Lei¹, Wang Zixuan¹

(1. Inner Mongolia Zhongtian Hongyuan New Rare Earth Materials Co., Ltd.,
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Baotou Steel Surveying and Mapping Research Institute, Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The high carbon medium manganese steel is with the La + Ce complex processing. The occurrence state and change rules of storage for La and Ce in high carbon medium manganese steel as well as the effects of La and Ce on sulfides, oxide inclusions, microstructure, static compression hardening efficiency and impact wear property are systematically studied through the composition analysis, microstructure observation, 30% static compression, impact wear test and theoretical analysis. The study results showed that the contents of solid solution La and Ce in steel could not be increased by adding into a large amount of La and Ce as well as they all remained below 0.003 5% for high carbon medium manganese steel. The 30% static compression hardening efficiency at room temperature can be improved with La and Ce, from 94.4% without La and Ce to 96.68% ~ 108.2% with La and Ce; impact wear resistance of sample is improved with La and Ce as well as relative wear resistance is increased by 1.057 0 ~ 1.606 9 times when impact load is 2 J and 1.080 4 ~ 1.374 1 times when impact load is 5 J. Under the experimental conditions, the optimal amount of La + Ce added into high carbon medium manganese steel is 0.20% ~ 0.25%.

Key words: La + Ce; high carbon medium manganese steel; microstructure; static compression behavior; impact wear property

在工业领域磨损、腐蚀和断裂是材料失效的 3 种主要形式^[1-3]。磨损通常发生在零件的摩擦表面上,许多零件由于在使用过程中发生磨损而失效报废,造成了大量资源和能源的浪费,给国民经济造成的损失非常大。就目前我国水泥、矿山、电力等行业使用的研磨设备来讲,其耐磨备件绝大部分仍然采用高锰钢来制作,充分利用高锰钢在大能量冲击载荷作用下所产生的表面高强度、心部高韧性的合理匹配^[4-10],提高高锰钢的使用寿命。而对于中、低冲击能量条件下工作的设备,由于冲击能量小,高锰钢表面得不到充分的硬化,表面仍然保持原组织的低硬度,耐磨性差,降低了备件的使用寿命。在这种情况下,研究人员在国标高锰钢(ZGMn13-1)的基础上适当降低碳、锰含量形成含锰 8.0%~9.0%、碳 1.0%~1.2% 的中锰钢,这种中锰钢降低了奥氏体的稳定性,在非强烈冲击工况条件下,磨损表面容易产生加工硬化,发生应变诱发马氏体相变,显示出优良的耐磨性能^[11-15],现已应用于中、低应力冲击磨损条件下的设备中^[16]。另据资料报导^[17]中锰钢 Mn7 应用在非强烈冲击工况下的球磨机衬板、中小型破碎机衬板以及破碎机板锤等,其耐磨性比高锰钢提高 60% 以上。但对于中锰钢而言,降低钢中碳含量也降低了奥氏体中碳的固容量,降低了钢基体的初始强度,耐磨潜力难以发挥。本试验以高碳中锰钢为研究对象,采用增加钢中碳含量的研究思路,来提高其基础和加工硬化后的硬度,同时利用稀土在钢中抑制碳元素扩散、净化钢液^[18-19]、变质夹杂^[20-21]、细化晶粒、改变相变行为提高钢材综合力学性能的作用原理^[22-28],研究 La + Ce 复合处理高碳中锰钢的塑变行为及磨损性能。

1 研究方法

1.1 材料制备

试验原料采用高碳锰铁、废钢、硅铁、铝线和粒度为 10~20 mm(La + Ce)混合稀土合金,利用型号为 DDVIF-25-60-5、真空度为 10 Pa 的 25 kg 真空感应电炉炼钢,钢水熔炼温度为 1 500~1 550 ℃,待钢水熔化后采用铝脱氧,脱氧后加入稀土合金。钢水镇静 15 分钟后开始浇注,浇注温度为 1 400~1 450 ℃,采用金属模浇注,铸锭尺寸为 160 mm ×

75 mm × 250 mm,钢锭冷却到室温后破真空取出。在箱式电阻炉中将钢锭按 6 ℃/min 的速度进行升温,温度升至 1 050 ℃ 保温 2 小时后进行水韧处理,整个试验过程中水温保持在 20~30 ℃。其水韧处理工艺曲线见图 1。

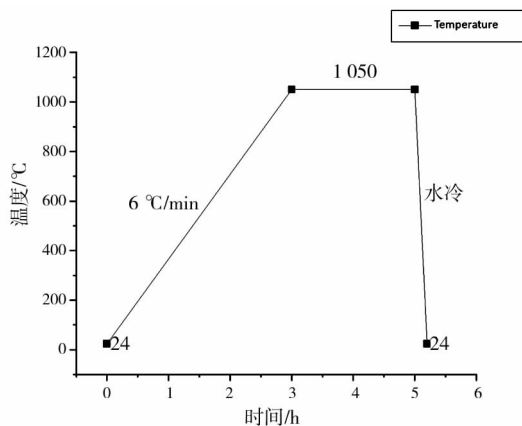


图 1 高碳中锰钢水韧处理工艺

1.2 分析方法

1.2.1 化学成分及稀土存量分析

化学成分分析采用 CS-44 碳硫分析仪分析钢中碳、硫含量;采用 Optima5300DV 等离子光谱仪分析钢中硅、锰含量及钢中稀土总量,采用无水电解液低温电解法测定夹杂物中的稀土含量,二者之差即为钢中固溶稀土含量。电解液为 1% 无水氯化锂 + 5% 三乙醇胺 + 5% 乙二醇 + 乙醇溶液,电解温度为 -15 ℃,电解电流为 0.03~0.04 A。

1.2.2 夹杂物及金相组织分析

采用型号为 4XC-TV 金相显微镜观察试验钢的夹杂物和组织,型号为 Sigma300 的扫描电子显微镜观察经 2 J 和 5 J 载荷冲击磨损后的表面形貌。

1.2.3 压缩硬化测试

在型号为 WHY-2000 微机控制全自动压力试验机上进行 30% 的静态压缩,压缩速率为 0.5 mm/min,压缩后采用型号为 450SVD 数显维氏硬度计测量试样的表面维氏硬度。

1.2.4 冲击磨损性能测试

采用 MLD-10 型磨料磨损试验机测试试样的冲击磨损性能。

2 试验结果分析及讨论

2.1 试验钢化学成分及稀土在钢中的赋存状态与存量

表1为试验钢的实际化学成分,图2为La + Ce复合处理高碳中锰钢中稀土的赋存状态和存量图。由表1和图2看出,对于高碳中锰钢而言,La、Ce主要以夹杂物形态存在于钢中,夹杂物中La + Ce含量占La + Ce残留量的90%以上,固溶La + Ce含量很小。除3[#]、4[#]、5[#]试样的La + Ce固溶含量达到0.003 5%、0.002 1%和0.001 4%外,其余试样均小于0.001 0%,并且随着La + Ce加入量的增加,钢中La + Ce固溶量先增加后降低。而La + Ce总量和夹杂物中La + Ce含量的变化规律具有相似性,即随

着La + Ce加入量的增加,钢中La + Ce总量和夹杂物中La + Ce含量逐渐增大,在La + Ce加入量最大时达到最大值,分别为0.104 4%和0.103 0%,此时钢中的固溶La + Ce含量仅为0.001 4%。本试验钢中La + Ce固溶量最大值出现在加入量为0.2%处,其固溶量达到0.003 5%。由此说明随着La + Ce加入量的增加,La、Ce与钢中的氧、硫发生反应的几率逐渐增加,导致钢中La + Ce残留量、La + Ce夹杂物数量和夹杂物中La + Ce含量不断增加,钢中加入的La、Ce绝大部分形成了夹杂物,降低了钢中La + Ce的固溶量。因此在La + Ce处理高碳中锰钢的生产过程中,加入量必须合理设计,加入量太多或太少,均会使钢中固溶La + Ce量降低,起不到合金化的作用。

表1 试验钢化学成分结果(质量分数)

%

Sample number	Chemical composition of experimental steel					La + Ce	La + Ce	La + Ce content	Solid solution
	C	Si	Mn	P	S	Added	Residual amount	in inclusions	La + Ce content
0 [#]	1.40	0.35	8.86	0.026 3	0.017	0	<0.000 5	<0.000 5	<0.000 5
1 [#]	1.38	0.37	8.86	0.027 2	0.004	0.1	0.015 2	0.015	0.000 2
2 [#]	1.39	0.38	8.56	0.026 0	0.003	0.15	0.048 8	0.048 1	0.000 7
3 [#]	1.39	0.40	8.92	0.028 2	0.003	0.2	0.053 5	0.050	0.003 5
4 [#]	1.35	0.42	8.44	0.027 2	0.004	0.25	0.063 1	0.061	0.002 1
5 [#]	1.37	0.39	8.67	0.027 6	0.004	0.3	0.104 4	0.103	0.001 4

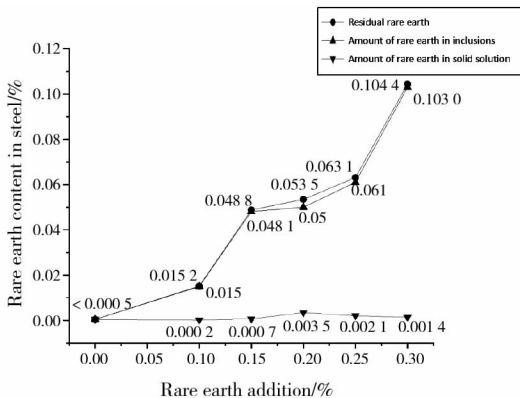


图2 La + Ce在钢中赋存状态及存量

2.2 夹杂物及金相组织

2.2.1 La + Ce对试验钢夹杂物的影响

图3为高碳中锰钢夹杂物显微照片。从照片中看出,随着La + Ce加入量的增加,钢中的氧化物、硫化物夹杂的级别和形态均发生了变化,即La + Ce降低了氧化物、硫化物夹杂的级别和污染度,夹杂物

的形态由未加La + Ce试样的细长条、集中分布态向加稀土后的椭球形、球形转变。由此说明La、Ce加入高碳中锰钢中,一方面对钢中夹杂物有变质作用,随着La + Ce加入量的增加,变质作用效果越明显;另一方面净化了钢液,减少了单位面积钢中夹杂物的数量,降低了钢的污染度。

2.2.2 La + Ce对试验钢组织的影响

从图4的高碳中锰钢水韧态试样组织可以看出,试样经过1 050 ℃加热保温2小时水韧处理后,未加La、Ce的试样组织为奥氏体 + 晶界碳化物,晶粒比较粗大,根据GB 6394—86进行评级,结果为1级。加La、Ce的试样组织为单相奥氏体组织,晶界上未发现未溶碳化物颗粒,晶界较为干净。与0[#]试样相比,1[#]、3[#]、5[#]试样的晶粒较细,其晶粒度级别为1.5~2级。说明La、Ce元素加入高碳中锰钢中,在1 050 ℃加热保温2小时水韧处理过程中稀土能够阻碍碳化物的析出,细化奥氏体晶粒,净化奥氏体晶界。

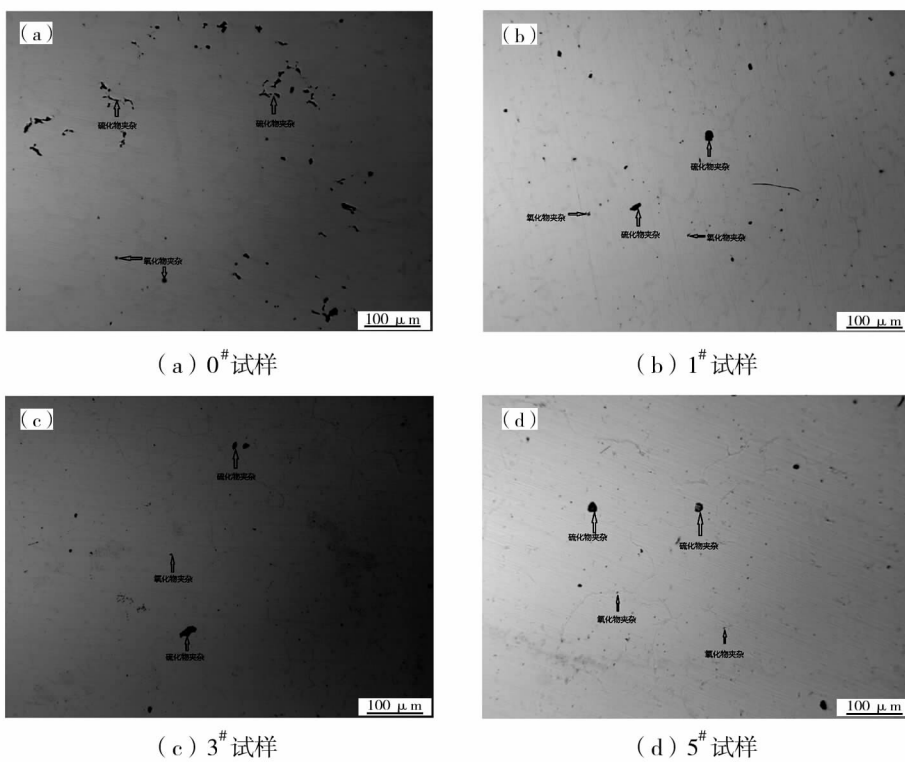


图 3 试验钢中夹杂物形貌

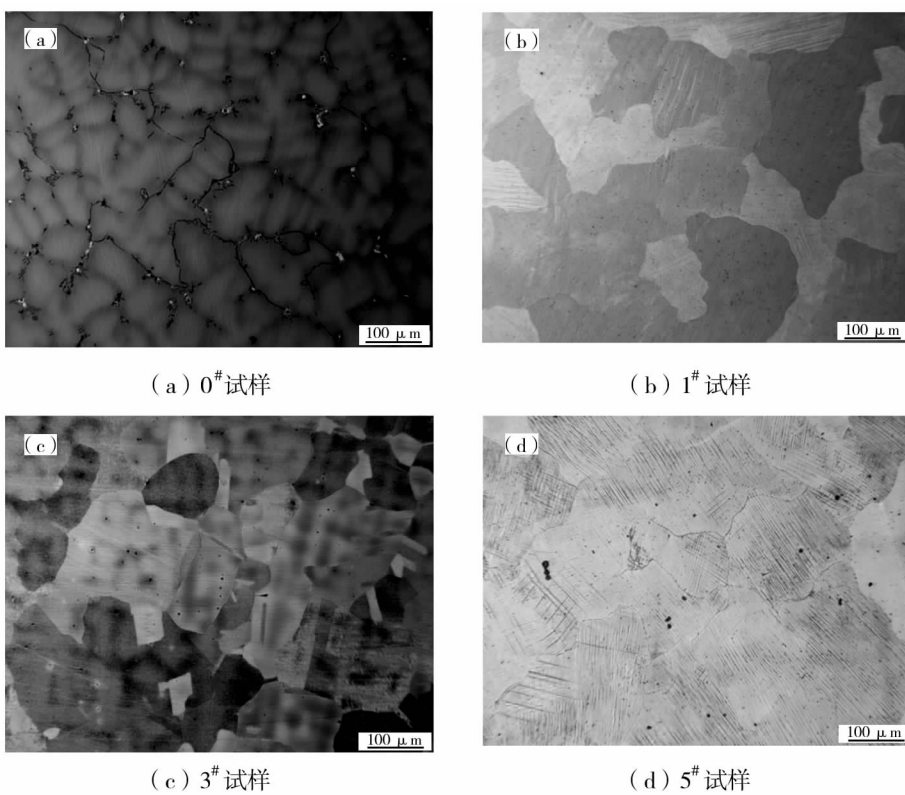


图 4 试验钢显微组织

2.3 La + Ce 对试验钢压缩硬化的影响

中锰钢的特性是在非强烈冲击工况条件下,磨损表面容易产生加工硬化,形成应变诱发马氏体组织,因而显示出优良的耐磨性能。而在静态压缩条件下,中锰钢表面是否会形成高密度位错,是否会发生加工硬化及马氏体相变,对于这些硬化效果的研究还未见报导。

试验试样尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,采用型号为 WHY-2000 微机控制全自动压力试验机进行 30% 的静态压缩,压缩速率为 0.5 mm/min ,压缩后采用型号为 450SVD 数显维氏硬度计测量试样的维氏硬度,共测 5 点,取其平均值对比压缩前、后试样维氏硬度值的变化规律,结果见表 2 及图 5。

表 2 试样静态压缩前、后平均硬度值

Sample number	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
Before static compression (HV10)	232.74	226.76	227.46	232.54	219.48	247.14
After static compression (HV10)	452.34	450.52	472.74	477.12	456.88	473.60
Hardening efficiency/%	94.4	98.7	107.8	105.2	108.2	91.6

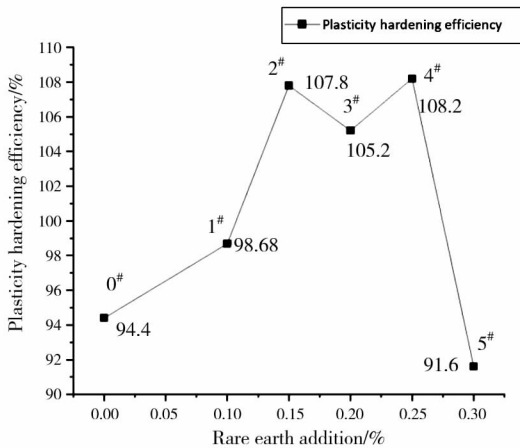


图 5 试验钢静态压缩硬化效率与 La + Ce 加入量的关系

由表 2 和图 5 可以看出,La + Ce 复合处理高碳中锰钢试样以 0.5 mm/min 的压缩速率压缩 30% 后,以 0[#] 试样的塑性压缩硬化效率为基础,除 5[#] 试样外,所有加 La、Ce 试样的塑性压缩硬化效率均增加,变化规律是先增加、波动、后降低。也就是随着 La + Ce 加入量的增加,压缩硬化效率不断地提高,当 La + Ce 加入量为 0.15% ~ 0.25% 时,塑性压缩硬化效率在 105.2% ~ 108.2% 之间波动,是未加 La、Ce 试样的 1.114 ~ 1.146 倍。继续增大 La + Ce 加入量,试样的压缩硬化效率开始降低。在本试验条件下,高碳中锰钢通过添加 La、Ce,使组织由未加 La、Ce 的奥氏体 + 晶界碳化物向单相奥氏体转化。说明在高碳中锰钢中添加 La、Ce 元素,能够降低钢冷却过程中碳元素扩散系数,阻碍了碳化物的析出,

易形成单相奥氏体组织,这种单相奥氏体组织在静态压缩变形时,发生塑变强化,硬化了试样表面,提高了试验钢静态压缩硬化效率。

2.4 La + Ce 对试验钢冲击磨损性的影响

高碳中锰钢冲击磨损试验设备及试验参数为:试验设备为 MLD-10 型磨料磨损试验机,试样尺寸 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$,圆环对磨材料为调质 45[#] 钢。冲锤质量 10 kg,冲锤自由落体高度 20 mm。冲击吸收能量 2 J、5 J。磨料粒度为小于 4 mm 石英砂,磨料流量 360 g/min ,下试样轴转速 200 r/min 。预磨损时间为 15 min,每组冲击磨损试样 3 支,每支磨损 5 次,每次磨损 5 min。每支试样在磨损试验后采用酒精清洗,用精度为 0.1 g 的电子天平称重,试样的平均磨损结果见表 3,磨损量与 La + Ce 加入量的相关关系见图 6。

由表 3 和图 6 可以看出,在高碳中锰钢中添加 La、Ce 稀土元素,经 2 种冲击载荷作用,均能减少高碳中锰钢的冲击磨损失重量,所不同的是对于相同试样随着冲击载荷的增加,失重量也增加。

2 J 冲击载荷试验结果表明,随着 La + Ce 加入量的增加,试样冲击磨损失重量不断降低,与未加稀土的 0[#] 试样相比,冲击磨损失重量分别减少了 5.40% ~ 37.76%。且在 La + Ce 加入量为 0.30% 时(5[#] 试样),冲击磨损失重量降到 2 J 试验的最低点,为 0.069 2 g。若以未加稀土 0[#] 试样的相对耐磨性作为 1,则添加 La、Ce 后试样的相对耐磨性分别是 0[#] 试样的 1.057 0 ~ 1.606 9 倍。

5 J 冲击载荷试验结果表明,随着 La + Ce 加入量的增加,试样冲击磨损失重量不断降低,与未加稀

土的 0[#] 试样相比, 冲击磨损失重量分别减少了 7.44% ~ 27.23%。且在 La + Ce 加入量为 0.3% 时 (5[#] 试样), 冲击磨损失重量降到 5 J 试验的最低点,

为 0.114 4 g。若以 0[#] 试样的相对耐磨性作为 1, 则添加 La、Ce 后试样的相对耐磨性分别是 0[#] 试样的 1.080 4 ~ 1.374 1 倍。

表 3 铸态试样冲击磨损试验结果

Sample number	Impact absorption energy (2 J)				Impact absorption energy (5 J)			
	Initial value/g	Final/g	Wear amount/g	Relative wear resistance	Initial value/g	Final/g	Wear amount/g	Relative wear resistance
0 [#]	30.848 9	30.767 7	0.111 2	1	29.620 2	29.463 0	0.157 2	1
1 [#]	30.666 0	30.561 4	0.105 2	1.057 0	31.136 9	30.989 2	0.144 7	1.086 4
2 [#]	29.893 5	29.812 2	0.081 3	1.367 8	29.892 2	29.746 8	0.145 5	1.080 4
3 [#]	28.702 7	28.632 0	0.070 7	1.572 8	30.880 0	30.741 1	0.138 9	1.131 8
4 [#]	30.796 5	30.722 9	0.073 6	1.510 9	31.176 0	31.035 2	0.140 8	1.116 5
5 [#]	31.205 2	31.136 0	0.069 2	1.606 9	30.940 5	30.826 1	0.114 4	1.374 1

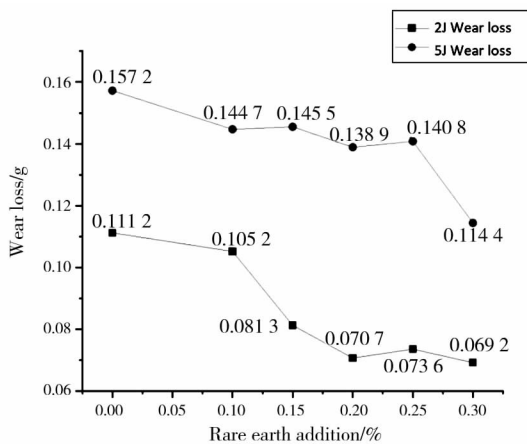


图 6 试验钢失重量与 La + Ce 加入量的关系

La、Ce 混合稀土加到高碳中锰钢中, 除具有脱氧、脱硫、净化钢液和变质夹杂物作用外, 其主要作用是在高碳中锰钢水韧处理过程中能够阻碍碳元素的扩散, 抑制碳化物的析出, 形成单相奥氏体组织, 致使钢中碳、锰元素全部固溶到奥氏体中, 降低了应变诱发马氏体相变的相变能, 即使在小冲击载荷 (2 J) 的条件下, 也能够发生应变诱发马氏体相变现象, 在试样表面产生大量的高密度位错和形变孪晶, 提高试样磨损表面硬度, 减少磨损失重量。

2.5 试验钢冲击磨损后表面形貌

采用型号为 Sigma300 的扫描电子显微镜观察试验钢试样经 2 J 和 5 J 载荷冲击磨损后的表面形貌。

图 7 为 La + Ce 复合处理高碳中锰钢试样在不

同载荷下冲击磨损后的表面形貌。从图 7 中可以看出, La + Ce 复合处理高碳中锰钢试样经 2 J 和 5 J 载荷作用后, 磨损表面形貌均为显微切削犁沟 + 冲击磨损坑 + 反复塑性变形所形成的块状磨削。所不同的是显微切削犁沟形貌、冲击磨损坑形状和大小、块状磨削量不同。2 J 冲击载荷下, 未加混合稀土 La、Ce 的 0[#] 试样与添加稀土的 3[#] 试样相比, 表面挤压变形区增大, 显微切削犁沟增宽且发生了弯曲变形, 冲击磨损坑和块状磨削量增多, 磨损量增加; 5 J 冲击载荷下, 未加混合稀土 La、Ce 的 0[#] 试样与添加稀土的 3[#] 试样相比同样存在表面挤压变形区增大, 显微切削犁沟增宽且发生更大的弯曲变形, 冲击磨损坑和块状磨削量增多、磨损量增加的现象。同时还看出, 对于混合稀土加入量相同的试样来讲, 冲击载荷从 2 J 增加到 5 J, 均会增大试样表面变形区和切削犁沟的宽度, 增加冲击磨损坑和块状磨削量, 使耐磨性降低。由此说明对于本试验钢来讲, 在相同冲击载荷条件下, 加 La、Ce 试样的耐磨性高于未加 La、Ce 试样; 在 La + Ce 加入量相同的条件下, 增加冲击磨损载荷耐磨性降低。究其原因作者认为, 在相同工艺处理下, 未添加 La、Ce 的试验钢得到的组织为奥氏体 + 碳化物, 而添加 La、Ce 的试验钢得到的组织为单相奥氏体组织。La、Ce 作为表面活性元素, 在钢中固溶的 La、Ce 可以富集在奥氏体晶界上, 一方面阻碍碳原子的扩散, 使碳原子全部固溶到奥氏体中, 阻碍晶粒长大, 细化奥氏体晶粒, 从而提高钢的原始强度; 另一方面 La、Ce 固溶在钢中, 钢

在受力时容易形成孪晶组织,加大位错能,降低钢层错能。而层错能与扩展位错密度成反比,即层错能越低,扩展位错密度就越大,位错移动越困难,强化

效果越好。总之 La + Ce 在高碳中锰钢中通过提高加工硬化能力,在受冲击载荷作用时可以有效地抵抗磨料磨损,提高钢的耐磨性。

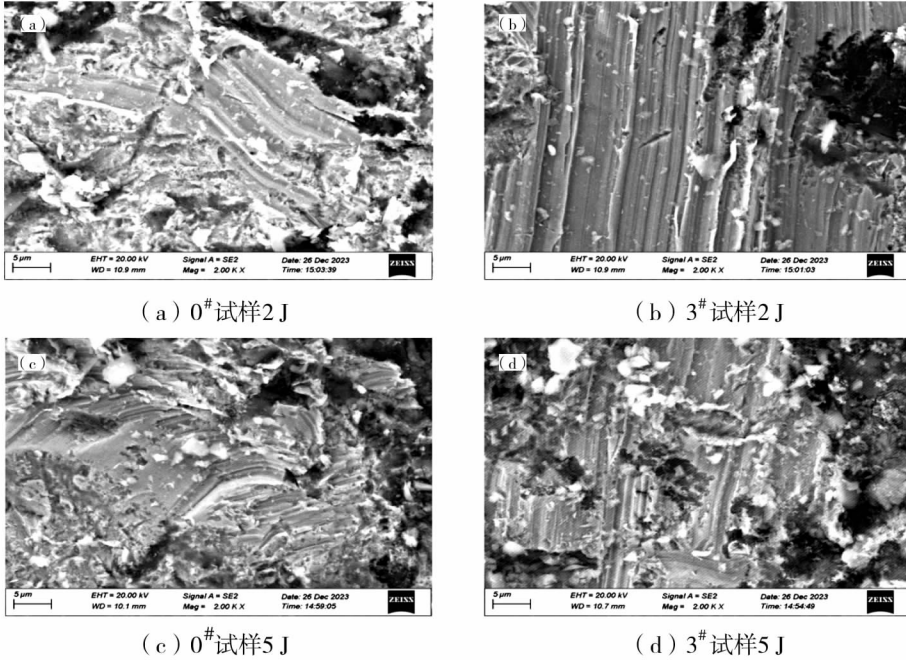


图7 试验钢冲击磨损表面形貌

3 结论

(1) 对于高碳中锰钢而言,加入大量的 La、Ce 并不能增加钢中的固溶 La + Ce 含量,固溶 La + Ce 含量均保持在 0.003 5% 以下。La + Ce 复合处理高碳中锰钢能够改变硫化物、氧化物夹杂的形态,细化晶粒,在水韧冷却过程中能够抑制网状、针状碳化物的析出,形成单相奥氏体组织。

(2) La + Ce 复合处理能够提升水韧态高碳中锰钢常温 30% 静态塑变硬化效率,使塑变硬化效率从未加 La、Ce 的 94.4% 提高到添加 La、Ce 的 98.68% ~ 108.2%。

(3) La + Ce 复合处理能够提高水韧态高碳中锰钢抗冲击磨损性能,添加 La、Ce 的试样相对耐磨性在 2 J 冲击载荷时是未添加 La、Ce 的 1.057 0 ~ 1.606 9 倍;5 J 冲击载荷时是 1.080 4 ~ 1.374 1 倍。添加 La、Ce 试样与未添加稀土试样相比,冲击磨损表面显微切削犁沟较浅,冲击磨损坑和块状磨削小而少。

(4) 在本试验条件下,高碳中锰钢中 La + Ce 最

佳加入量为 0.20% ~ 0.25%。

参 考 文 献

- [1] Ali Y, Garcia - Mendoza C D, Gates J D. Effects of impact and abrasive particle size on the performance of white cast irons relative to low - alloy steels in laboratory ball mills [J]. *Wear*, 2019, 426/427: 83 - 100.
- [2] 王会亮. 金属材料失效浅析 [J]. *山西冶金*, 2016, 39(4): 114 - 115.
- [3] 董振东, 童志, 周洪宇, 等. 抽油杆钢材的发展和抽油杆的服役失效 [J]. *材料导报*, 2021, 35(19): 19161 - 19169.
- [4] Alder P H. Strain hardening of had field manganese steel [J]. *Metall Trans*, 1986, 17A: 1725.
- [5] Roghavan K S. Nature of the work - hardening behavior I had field manganese steel [J]. *Trans AIME*, 1969, 245: 1569.
- [6] 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.

- [7] 陈希杰. 高锰钢[M]. 北京:机械工业出版社, 1988:58.
- [8] 石德珂. 高锰钢的形变与加工硬化[J]. 金属学报, 1989, 25(6):282.
- [9] 朱瑞富. 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.
- [10] 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.
- [11] 李绍雄, 施忠良, 尹衍升, 等. 高锰钢微合金化表层组织的转变及其对耐磨性的影响[J]. 摩擦学学报, 1993, 13(3):201-207.
- [12] 何镇明, 姜启川, 付绍伯, 等. 奥氏体中锰钢的耐磨性与形变诱发马氏体及位错强化的关系[J]. 机械工程学报, 1988, 24(4):98-102.
- [13] He Zhengming, Jiang Qi chuan, Fu Shaobo. Improved work hardening ability and wear resistance of austenitic steel under non-severe impact loading condition [J]. Wear, 1987, 120(3):305-319.
- [14] Jing Pei Xie, Yaomin Zhu, Xiaoying Wang. Thermodynamic analyses of strain-induced martensite transformation in Fe-7Mn-1.2C alloy [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2000, 16(4):449-451.
- [15] 朱绍峰, 程正勇. 中锰铸态耐磨钢的冲击磨损性能[J]. 热加工工艺, 2004(2):25-26.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 李声延, 孙乐飞, 吕瑞国, 等. LaCe稀土在桥梁钢中的应用[J]. 稀土, 2023, 44(2):110-119.
- [19] 史学红, 杨礼林, 夏明, 等. 稀土Ce含量对4Cr5MoSiV1钢中夹杂物的变质作用[J]. 金属热处理, 2022, 47(11):223-229.
- [20] 田方斌, 高雪云, 曹悦, 等. 稀土对Ni-Al系马氏体时效钢中夹杂物的改性作用[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(6):151-158.
- [21] 黄宇, 成国光, 谢有. 稀土Ce对钎具钢中夹杂物的改质机理研究[J]. 金属学报, 2018, 54(9):1253-1261.
- [22] 孟晓亮, 于彦冲, 康健, 等. 稀土对A572. Cr65钢夹杂物及低温冲击性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(11):15-18.
- [23] 蒋月月, 王昭东, 邓想涛. 铈对低合金超高强钢马氏体相变行为的影响[J]. 钢铁, 2020, 55(6):84-90.
- [24] 宿成, 冯光宏, 智建国, 等. 稀土对耐磨板NM400低温冲击韧性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(12):1289-1295.
- [25] 李建国, 贾冬生, 赵银虎, 等. 稀土Ce对32MnMoNiCu铸钢微观组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(1):47-52.
- [26] 宋冉, 赵文倩, 包喜荣, 等. 稀土元素Ce及热处理对过共析轨钢组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(12):162-167.
- [27] 宋操, 王晓东, 包喜荣, 等. Ce对30MnNbRE钢淬火回火微观组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(9):143-149.
- [28] 宋延沛, 林小丽, 陈丹萍, 等. 稀土复合添加剂在近净成形热锻模具钢中的作用研究[J]. 稀土, 2024, 45(5):90-96.