

# 稀土处理铸态高碳中锰钢的塑变行为及磨损性能

王 权<sup>1</sup>, 齐璘玉宇<sup>2</sup>, 孙 磊<sup>1</sup>, 李 强<sup>1</sup>, 魏文强<sup>1</sup>

1. 内蒙古中天宏远稀土新材料股份公司, 内蒙古 包头 014060;
2. 包钢勘察测绘研究院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**通过金相观察、30%静态压缩、冲击磨损试验和理论分析,系统研究了稀土在高碳中锰钢中的赋存状态和存量的变化规律,以及稀土对硫化物夹杂、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,加入大量的稀土并不能增加钢中固溶稀土含量,固溶稀土含量均保持在0.003 5%以下。稀土能提高高碳中锰钢常温30%静态压缩硬化效率,使压缩硬化效率从未加稀土的63.25%增加到添加稀土的78.57%~88.37%。稀土提高了高碳中锰钢的抗冲击磨损性,相对耐磨性在2 J冲击载荷时提高了1.010 0~1.893 0倍,在5 J冲击载荷时提高了1.391 3~1.822 8倍。在本试验条件下,高碳中锰钢中稀土最佳加入量为0.20%~0.25%。

**关键词:**稀土;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(2025)05-0070-07

## Plastic Deformation Behavior and Wear Properties of As-cast High Carbon Medium Manganese Steel Treated with Rare Earth

Wang Quan<sup>1</sup>, Qi Linyuyu<sup>2</sup>, Sun Lei<sup>1</sup>, Li Qiang<sup>1</sup>, Wei Wenqiang<sup>1</sup>

1. Inner Mongolia Zhongtian Hongyuan New Rare Earth Materials Co., Ltd., Baotou 014060, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Baotou Steel Survey and Mapping Research Institute, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The occurrence state and change rules of stock for rare earth in high carbon medium manganese steel as well as effects of rare earth on sulfide inclusions, oxide inclusions, microstructure, hardening efficiency of static compression and impact wear property are systematically studied through metallographic observation, 30% static compression, impact wear test and theoretical analysis. The study results showed that the content of solid solution rare earth for high carbon medium manganese steel could not be increased by adding a large amount of rare earth and it remained below 0.003 5%. The hardening efficiency of 30% static compression at room temperature for high carbon medium manganese steel is improved by adding rare earth, which is increased from 63.25% without rare earth to 78.57%~88.37% with rare earth. The impact wear resistance of high carbon medium manganese steel is improved. The relative wear resistance is increased by 1.010 0~

收稿日期:2025-06-27

作者简介:王 权(1962-),男,内蒙古包头市人,硕士,正高级工程师,现从事金属材料及工艺研发工作。

1.893 0 times with impact load of 2 J and it is increased by 1.391 3 ~ 1.822 8 times with impact load of 5 J. The optimal amount of rare earth added into high carbon medium manganese steel is 0.20% ~ 0.25% under the experimental conditions.

**Key words:** rare earth; high carbon medium manganese steel; microstructure; static compression behavior; impact wear property

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消耗,给国民经济造成的损失非常大。目前,我国水泥、矿山、电力等行业使用的研磨设备(球磨机、半自磨机、自磨机等)中的耐磨材料绝大部分仍然采用高锰钢制作。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<sup>[1-4]</sup>和心部高韧性的合理匹配,可提高高锰钢的使用寿命。对于中、低冲击载荷条件下工作的设备,高锰钢表面由于得不到充分的硬化,表面硬度低,耐磨性差,降低了备件的使用寿命。在这种情况下,科技工作者在国标高锰钢(ZGMn13-1)的基础上适当降低碳、锰的含量,形成锰含量 8.0% ~ 9.0%、碳含量 1.0% ~ 1.2%、铬含量 2.0% ~ 2.5%、硅含量 < 0.8% 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<sup>[5-7]</sup>,现已应用于中、低应力冲击磨损条件下的设备<sup>[8]</sup>。另据资料报导<sup>[9]</sup>,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,由于降低了钢中碳含量,同时也降低了奥氏体中固溶的碳含量,致使基础强度较低,耐磨潜力难以发挥。本试验以高碳中锰钢为研究对象,通过增加钢中碳含量提高其基础硬度和加工硬化后的硬度,并充分利用稀土在钢中对碳元素的抑制和净化钢液、变质夹杂、细化晶粒及合金化作用<sup>[10]</sup>,研究稀土对铸态高碳中锰钢的塑变行为及磨损性能的影响。

## 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 的镧铈混合稀土合金,利用 DDVIF-25-60-5 型 25 kg 真空感应电炉炼钢,钢水熔炼温度为 1 500 ~ 1 550 °C,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 min 后开始浇注,浇注温度为 1 400 ~ 1 450 °C,采用金属模浇注,铸锭

尺寸为 160 mm × 75 mm × 250 mm。

### 1.2 分析方法

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,二者之差即为钢中的固溶稀土含量。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 °C,电解电流为 0.03 ~ 0.04 A。

采用 4XC-TV 金相显微镜观察试验钢的夹杂物和显微组织。

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

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。由表 1 可以看出,对于高碳中锰钢而言,稀土主要以稀土夹杂物形式存在于钢中,夹杂物中稀土含量占稀土残留量的 90% 以上。高碳中锰钢中的固溶稀土含量很小,除 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 试样的固溶稀土含量达到 0.003 5%、0.002 1% 和 0.001 4% 外,其余试样固溶稀土含量均小于 0.001 0%,并且随着稀土加入量的增加,钢中的稀土固溶量先增加后降低。而稀土总量和夹杂物中稀土含量的变化规律具有相似性,即随着稀土加入量的增加,钢中的稀土总量和夹杂物中稀土含量逐渐增大,在稀土加入量达到本试验最大值 0.30% 时,二者分别为 0.104 4% 和 0.103 0%,此时钢中的固溶稀土含量仅为 0.001 4%。本试验钢中稀土固溶量最大值对应稀土加入量为 0.2%,其固溶量达到 0.003 5%。由此说明随着稀土加入量的增加,稀土与钢中的氧、硫发生反应的几率逐渐增加,导致钢中稀土残留量、稀土夹杂物数量和夹杂物中

稀土含量不断增加,钢中加入的稀土绝大部分形成了稀土夹杂物,降低了钢中稀土的固溶量。在稀土处理高碳中锰钢的生产过程中,稀土的加入量必须

合理设计,加入太多或太少,均会使钢中固溶稀土量降低,起不到合金化的作用。

表 1 试验钢化学成分及稀土含量(质量分数)

试样编号	化学成分					稀土加入量	稀土残留量	夹杂物中稀土含量	固溶稀土含量
	C	Si	Mn	P	S				
0 <sup>#</sup>	1.40	0.35	8.86	0.026 3	0.017	0	<0.000 5	<0.000 5	<0.000 5
1 <sup>#</sup>	1.38	0.37	8.86	0.027 2	0.004	0.10	0.015 2	0.015	0.000 2
2 <sup>#</sup>	1.39	0.38	8.56	0.026 0	0.003	0.15	0.048 8	0.048 1	0.000 7
3 <sup>#</sup>	1.39	0.40	8.92	0.028 2	0.003	0.20	0.053 5	0.050	0.003 5
4 <sup>#</sup>	1.35	0.42	8.44	0.027 2	0.004	0.25	0.063 1	0.061	0.002 1
5 <sup>#</sup>	1.37	0.39	8.67	0.027 6	0.004	0.30	0.104 4	0.103	0.001 4

## 2.2 夹杂物及金相组织

### 2.2.1 稀土对夹杂物的影响

图 1 为高碳中锰钢夹杂物显微照片。从图 1 可以看出,随着稀土加入量的增加,高碳中锰钢中的氧化物、硫化物夹杂的级别和形态均发生了变化,即稀土降低了氧化物、硫化物夹杂的级别和污染度,夹杂

物的形态由未加稀土 0<sup>#</sup>试样的细长条、集中分布向加稀土后的椭球形、球形转变。由此说明稀土加入高碳中锰钢中,一方面对钢中夹杂物有变质作用,并且随着稀土加入量的增加,变质效果越明显。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。

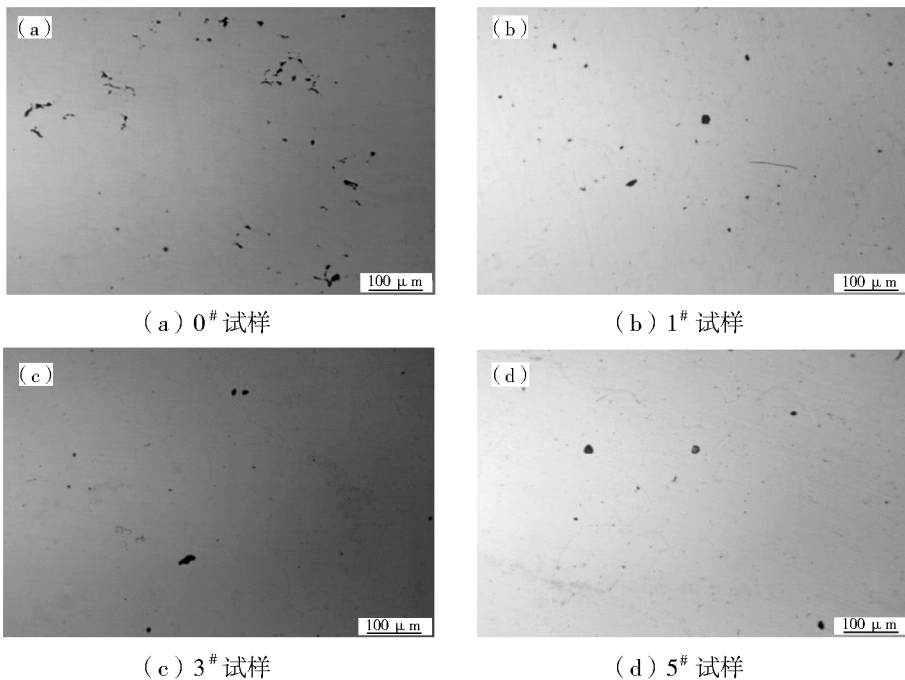


图 1 高碳中锰钢铸态夹杂物形貌(100 ×)

### 2.2.2 稀土对铸态组织的影响

图 2 为高碳中锰钢铸态金相组织。0<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>试样

的组织均为奥氏体 + 网状渗碳体 + 针状渗碳体,相比之下 1<sup>#</sup>试样的网状渗碳体和针状渗碳体数量较

0<sup>#</sup>试样少。3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>试样的组织为奥氏体 + 断网状渗碳体 + 颗粒状渗碳体,且5<sup>#</sup>试样的碳化物较3<sup>#</sup>试样粗大。由此说明稀土加入高碳中锰钢中,由于稀土元素和钢中碳元素的相互作用,降低碳元素在钢中的扩散系数,使单位时间内形成的碳化物量减少,从

而改变铸态碳化物的形态。就本试验条件而言,随着稀土加入量的增加,钢中碳化物的形态从细小的网状 + 针状向细小的断网状 + 颗粒状转化。当稀土加入量达到0.30%时(5<sup>#</sup>试样),钢中碳化物出现粗大现象,其原因有待今后进一步研究。

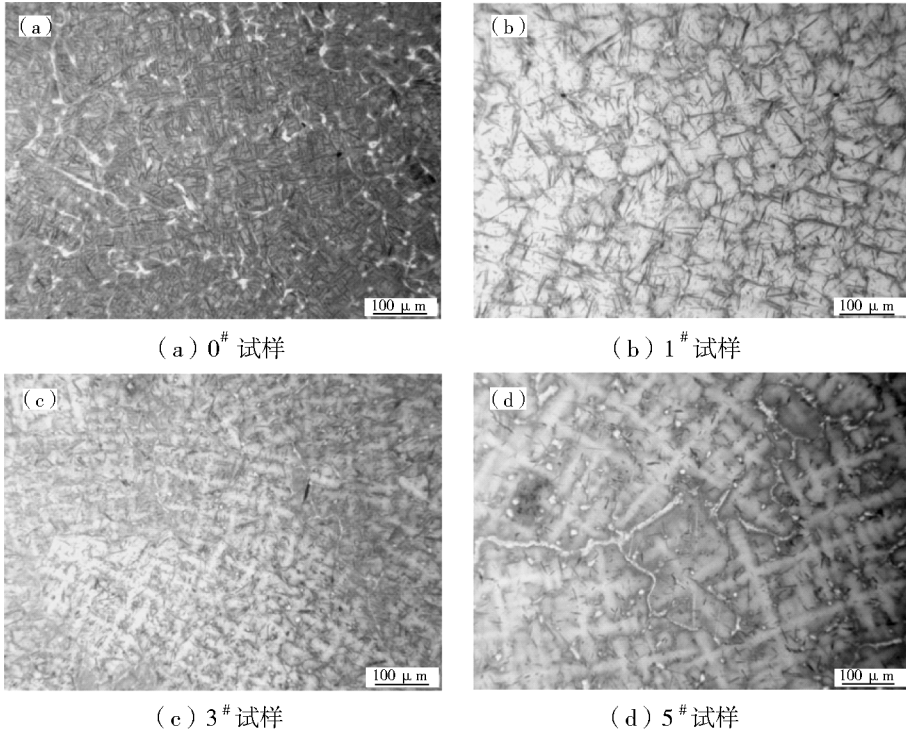


图2 高碳中锰钢铸态组织(100×)

### 2.3 稀土对铸态塑变硬化的影响

中锰钢的特性是在非强烈冲击工况下,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。而在静载压缩条件下,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,针对这些硬化效果的研究还未见报道,尤其是对高碳中锰钢铸态试样的研究还

没有开展。

试验试样尺寸为 $\Phi 10\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ,采用WHY-2000微机控制全自动压力试验机进行30%的常温静态压缩,压缩速率为0.5 mm/min,压缩后采用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3。

表2 铸态试样静态压缩前、后硬度值

项目	平均维氏硬度(HV10)					
	0 <sup>#</sup>	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
压缩前	309.22	302.76	287.56	258.82	270.92	275.00
压缩后	504.80	448.12	513.52	487.54	497.10	495.48
塑性硬化效率/%	63.25	48.01	78.57	88.37	83.37	80.18

由表 2 和图 3 可以看出,高碳中锰钢铸态试样以 0.5 mm/min 的压缩速率压缩 30% 后,以 0<sup>#</sup>试样的塑性压缩硬化效率值为基础,除 1<sup>#</sup>试样外,所有加稀土试样的塑性压缩硬化效率均增加,它们的变化规律是先增加后降低,也就是随着稀土加入量的增加,压缩硬化效率不断增加,当稀土加入量为 0.20% 时,塑性压缩硬化效率达到本试验最大值 88.37%,继续增大稀土加入量,试样的压缩硬化效率开始降低,这一变化规律与钢中固溶稀土含量的变化规律相同。在本试验条件下,高碳中锰钢通过添加稀土,使铸态组织由未加稀土的奥氏体 + 网状渗碳体 + 针状渗碳体向奥氏体 + 断网状渗碳体 + 颗粒状渗碳体转化,且随着稀土加入量的增加,钢中奥氏体基体和碳化物的相对占比也发生了变化,说明在高碳中锰钢中添加稀土元素,充分利用稀土降低碳元素扩散系数的作用,增加了试验钢中奥氏体基体的含量,相应使各种碳化物的比例减少。在静态压缩变形时,奥氏体基体组织产生塑变强化并硬化,而碳化物组织不会塑变强化,这就是铸态试验钢静态压缩硬化效率的变化规律。

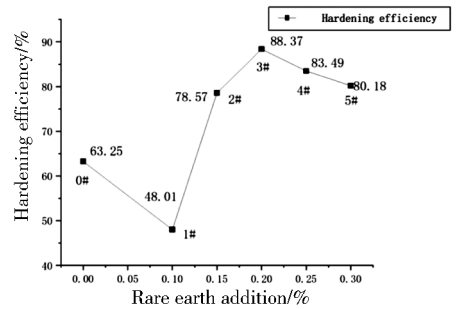


图 3 铸态试样静态压缩硬化效率与稀土加入量的关系

#### 2.4 稀土对铸态试样冲击磨损性能的影响

对铸态高碳中锰钢进行冲击磨损试验,试验设备采用 MLD-10 型磨料磨损试验机,试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 55 mm,圆环对磨材料为调质 45<sup>#</sup>钢。冲锤质量为 10 kg,冲锤自由落体高度为 20 mm。冲击吸收能量分别为 2 J、5 J。磨料为粒度小于 4 mm 石英砂,磨料流量为 360 g/min,下试样轴转速为 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,采用精度为 0.100 0 g 的电子天平称重。试样的平均磨损结果见表 3,磨损量与稀土加入量的相关关系见图 4。

表 3 铸态试样冲击磨损试验结果

试样编号	冲击吸收能量 2 J				冲击吸收能量 5 J			
	初始重量/g	终了重量/g	磨损失重量/g	相对耐磨性	初始重量/g	终了重量/g	磨损失重量/g	相对耐磨性
0 <sup>#</sup>	30.299 4	30.160 8	0.138 6	1	30.603 7	30.574 9	0.028 8	1
1 <sup>#</sup>	31.028 6	30.891 4	0.137 2	1.010 0	31.111 3	31.090 2	0.021 1	1.432 8
2 <sup>#</sup>	31.026 9	30.890 5	0.136 4	1.016 1	31.020 0	31.002 5	0.017 5	1.645 7
3 <sup>#</sup>	30.976 6	30.847 3	0.129 3	1.072 0	30.525 6	30.509 8	0.015 8	1.822 8
4 <sup>#</sup>	31.094 3	31.021 1	0.073 2	1.893 0	31.460 6	31.439 9	0.020 7	1.391 3
5 <sup>#</sup>	30.180 6	30.099 4	0.081 2	1.707 0	30.687 8	30.669 9	0.017 9	1.608 9

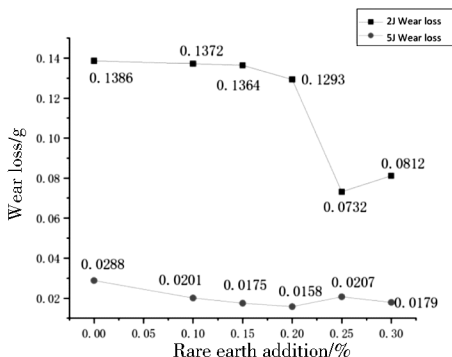


图 4 铸态试样磨损量与稀土加入量的关系

由表 3 和图 4 看出,在高碳中锰钢中添加稀土,能够减少铸态高碳中锰钢的冲击磨损失重量,增加耐磨性。当冲击能量为 2 J 时,随着稀土加入量的增加,磨损失重量不断减少,在稀土加入量达到 0.25% (4<sup>#</sup>试样) 时磨损失重量降到最低 0.073 2 g,相对耐磨性是 0<sup>#</sup>试样的 1.893 0 倍。当冲击能量为 5 J 时,随着稀土加入量的增加,磨损失重量出现了快速减少的现象,在稀土加入量达到 0.20% (3<sup>#</sup>试样) 时磨损失重量降到最低 0.015 8 g,相对耐磨性是 0<sup>#</sup>试样的 1.822 8 倍。总体来看,随着冲击载荷

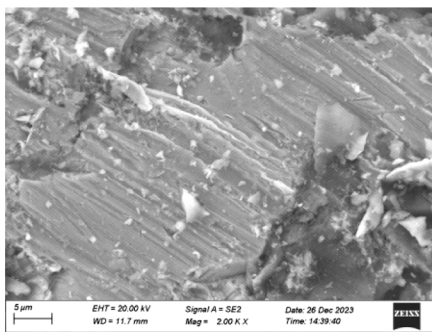
的增加,磨损失重量降低。究其原因,笔者认为由于铸态高碳中锰钢的基体组织是碳化物+奥氏体,非全部奥氏体组织。此时奥氏体中固溶的碳、锰元素较少,在2 J冲击载荷作用时,由于冲击力小,塑硬化效率较低,不能产生大量的高密度位错和形变孪晶,造成磨损失重量大。当冲击载荷增加到5 J时,提高了塑硬化效率,产生了大量的高密度位错和形变孪晶带,提高了表面硬度,减少了磨损失重量。若以0<sup>#</sup>试样的相对耐磨性作为1,经计算添加稀土的铸态高碳中锰钢在2 J的冲击载荷作用下,相对耐磨性的变化范围是1.010 0~1.893 0,在5 J的冲击载荷作用下,相对耐磨性的变化范围是1.391 3~1.822 8。

## 2.5 铸态试样冲击磨损后的表面形貌

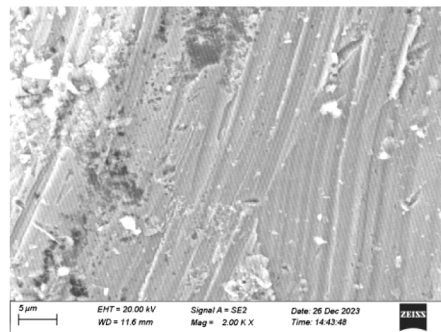
采用扫描电子显微镜观察高碳中锰钢铸态试样经2 J和5 J的冲击吸收能量冲击磨损后的表面形貌,见图5。从图5可以看出,高碳中锰钢铸态试样在2 J和5 J冲击载荷作用下,磨损表面形貌均为显微切削犁沟+冲击坑+反复塑性变形形成的块状磨削。两者相比,显微切削犁沟形貌、冲击坑形状大小和块状磨削有所不同。当冲击载荷为2 J时,未加稀土的0<sup>#</sup>试样与添加稀土的3<sup>#</sup>试样相比,表面显微切削犁沟较深、冲击磨损坑和块状磨削大而多。当

冲击载荷为5 J时,未加稀土的0<sup>#</sup>试样与添加稀土的3<sup>#</sup>试样相比,仍然表现为表面显微切削犁沟较深、冲击磨损坑和块状磨削大而多的特点。

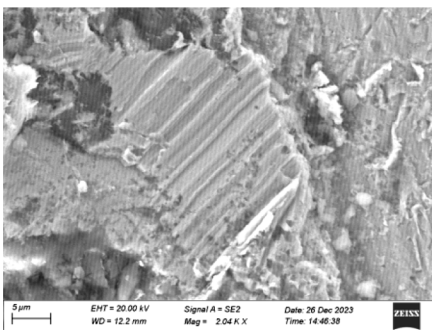
对于相同试样,冲击载荷从2 J增大到5 J,未加稀土的0<sup>#</sup>试样冲击磨损坑相当,但显微切削犁沟变浅,块状磨削变少,塑性变形区域增大;添加稀土的3<sup>#</sup>试样表现为表面显微切削犁沟更浅,冲击磨损坑和块状磨削量少,但磨损表面局部却出现了微观裂纹,说明铸态高碳中锰钢试样在小冲击载荷作用下,由于0<sup>#</sup>试样存在大量的网状和针状碳化物组织,这些碳化物恶化了钢的冲击韧性,冲击过程中在冲击剪切力的作用下,组织中这些硬而脆的碳化物易被压碎而脱落,形成冲击磨损坑。同时由于碳化物的析出降低了奥氏体中碳和锰元素的固溶量,降低了钢的基础强度,在与石英砂接触摩擦过程中产生了较深的显微切削犁沟和较多的块状磨削。综合因素降低了钢的抗冲击磨损性,增加了钢的磨削量。添加稀土后的3<sup>#</sup>试样,由于稀土元素富集在奥氏体晶界处,阻碍奥氏体晶粒长大使晶粒细化,阻碍了碳化物沿晶界析出,使碳化物变少且分散,在小冲击载荷作用时塑硬化效果不足,切削犁沟较深,在大冲击载荷作用时,塑硬化效果充分,表面强度提高,切削犁沟浅,耐磨损性能提高,磨耗降低。



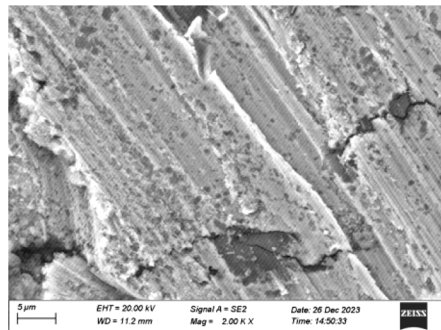
(a) 0<sup>#</sup>试样(2 J)



(b) 3<sup>#</sup>试样(2 J)



(c) 0<sup>#</sup>试样(5 J)



(d) 3<sup>#</sup>试样(5 J)

图5 高碳中锰钢铸态试样冲击磨损形貌

### 3 结论

(1) 对于高碳中锰钢而言,加入大量的稀土并不能增加钢中的固溶稀土含量,固溶稀土含量均保持在 0.003 5% 以下。稀土在铸态高碳中锰钢中能够改变硫化物、氧化物夹杂的形态。在冷却过程中能够抑制网状、针状碳化物的析出,形成奥氏体 + 极少量碳化物组织。

(2) 稀土能够提高高碳中锰钢常温 30% 静态塑性硬化效率,使塑性硬化效率从未加稀土的 63.25% 增加到添加稀土的 78.57% ~ 88.37%。

(3) 稀土添加到高碳中锰钢中,能够提高高碳中锰钢的抗冲击磨损性能,添加稀土试样的相对耐磨性在 2 J 冲击载荷时是未添加稀土试样的 1.010 0 ~ 1.893 0 倍;在 5 J 冲击载荷时,相对耐磨性是未添加稀土试样的 1.391 3 ~ 1.822 8 倍。添加稀土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,高碳中锰钢中稀土最佳加入量为 0.20% ~ 0.25%,稀土提高了高碳中锰钢 30% 静态压缩塑性硬化效率,减少了冲击磨损量。

### 参 考 文 献

- [1] Alder P H. Strain hardening of had field manganese steel[J]. Metall Trans, 1986, 17A: 1725.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Jing Peixie, Zhu Yaomin, Wang Xiaoying. 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 王龙妹, 杜挺, 卢先利, 等. 微量稀土元素在钢中的作用机理及应用研究[J]. 稀土, 2001, 4(1): 37 - 40.
- [10] 李春龙. 稀土在钢中的应用及需注意的一些问题[J]. 稀土, 2001, 4(8): 1 - 6.