

· XXXX ·



稀土 Ce 对 NM550 钢组织性能的影响

张勇伟¹, 柳智皓², 张青学¹, 钱亚军¹, 陈敏侠¹, 邓想涛²

(1 湘潭钢铁集团有限公司板材事业部, 湘潭 411101; 2 东北大学数字钢铁全国重点实验室, 沈阳 110819)

摘要: 系统研究了添加稀土 $w[\text{Ce}]$ 为 0.001 2% 的 NM550RE 钢的组织、力学性能、耐磨性能及其磨损机制, 并与传统 NM550 钢进行对比。结果表明: 常规 NM550 钢平均原始奥氏体晶粒尺寸为 $9.48\ \mu\text{m}$, 硬度为 553HBW, Ce 的加入可以细化晶粒尺寸, 平均奥氏体晶粒尺寸为 $7.55\ \mu\text{m}$, 硬度为 579HBW, $-40\ ^\circ\text{C}$ 冲击功由 29.43 J 提升至 34.63 J。G65 磨粒磨损试验结果表明, NM550RE 钢的耐磨性是常规 NM550 钢的 1.11 倍, 稀土改性后的夹杂物与基体相容性更好, 同时具有较小的晶粒尺寸、较高的硬度和韧性, 磨损过程中, 阻碍磨料压入基体, 阻止犁沟的继续发展, 使犁沟的宽度和深度减小, 从而表现出较高的耐磨性能。

关键词: 稀土元素 Ce; 磨粒磨损; 耐磨性; 磨损机制

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260047 **中图分类号:** TG142.72

Effect of Rare Earth Ce on the Microstructure and Properties of NM550 Wear-Resistant Steel

Zhang Yongwei¹, Liu Zhihao², Zhang Qingxue¹, Qian Yajun¹, Chen Minxia¹, Deng Xiangtao²

(1 Plate Business Division, Xiangtan Iron and Steel Group Co., Ltd., Xiangtan 411101, China;

2 State Key Laboratory of Digital Steel, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The microstructure, mechanical properties, wear resistance, and wear mechanism of NM550RE steel alloyed with 0.001 2% rare-earth $w[\text{Ce}]$ were systematically studied, and compared them with those of conventional NM550 steel. The results show that the conventional NM550 steel has an average original austenite grain size of $9.48\ \mu\text{m}$ and a hardness of 553HBW. The addition of Ce refines the grain size, reducing the average austenite grain size to $7.55\ \mu\text{m}$ and increasing the hardness to 579HBW. Meanwhile, the impact energy at $-40\ ^\circ\text{C}$ increases from 29.43 J to 34.63 J. The G65 abrasive wear test results show that the wear resistance of NM550RE steel is 1.11 times that of conventional NM550 steel. After rare-earth modification, the inclusions exhibit better compatibility with the matrix, while the steel possesses a fine grain size, higher hardness, and toughness. During wear, this helps hinder abrasive particles from penetrating into the matrix and prevents further development of ploughing grooves, thereby reducing their width and depth and resulting in superior wear resistance.

Key Words: Rare Earth Element Ce; Abrasive Wear; Wear Resistance; Wear Mechanism

随着国民经济的快速发展和能源需求不断增大, 高端装备制造业向大型化、重载化和轻量化方向持续发展。低合金高强度耐磨钢具有优良的强韧性和耐磨性, 广泛应用于工程机械、矿山设备等关键领域^[1-3], 材料表面的磨损是其失效的主要形式之一, 直接决定了部件的服役寿命与可靠性, 因此, 通过微合金化手段提升其耐磨性, 是材料改性研究的重要方向^[4-6]。传统耐磨钢的硬度是其耐磨性的决定因素, 硬度越高, 耐磨性越好^[7], 然而, 常规手段在提升耐磨性的同时会引起韧性的下降^[8], 因此, 亟须一种在保持或提升韧性的同时提高材料耐磨性

能的方法, 稀土元素 Ce 的引入, 有望在保持材料的韧性的同时改善耐磨性^[9-10]。王晓磊等^[11]通过在 内生 TiC 粒子增强型低合金马氏体超级耐磨钢中添加 Ce, 在保持韧性的同时提升材料的耐磨性能。通过对新型稀土 NM550 的组织、力学性能、耐磨性及磨损机制进行分析, 并与常规 NM550 钢进行对比, 旨在揭示 Ce 的作用机制, 以期开发高性能耐磨钢提供理论依据和实验数据支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本研究设计了 2 种不同 Ce 含量的 NM550 钢, 其

基金项目: 重点新材料研发及应用国家科技重大专项 (2025ZD0611700)

作者简介: 张勇伟 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师; **E-mail:** 085343@mail.hnxx.com.cn; **收稿日期:** 2026-03-28

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

化学成分见表1,实验钢生产工艺流程为:铁水预处理→BOF顶底复吹转炉冶炼(公称容量为120 t)→LF精炼→RH精炼(添加稀土元素Ce)→连铸(260 mm×2 250 mm)→板坯加热(均热温度1 150~1 230 ℃)→轧制→热处理。轧制采用两阶段控制轧制,将锻坯加热至1 200 ℃,保温330 min后,热轧至25 mm厚,钢板粗轧开轧温度为1 190 ℃,待温坯厚度为3倍板厚,精轧开轧温度为850 ℃,精轧终轧温度为770 ℃。热处理采用淬火温度860 ℃,加热速度1.6~2.1 min/mm,在炉70 min,随后在160 ℃低温回火,在炉110 min。

1.2 实验方法

金相试样由电火花线切割切取后,依次使用800#至2000#砂纸打磨并机械抛光,金相刻蚀采用4%的硝酸酒精溶液。使用50 mL去离子水和苦味酸试剂配制过饱和苦味酸溶液,并在其中加入少量缓蚀剂海鸥牌洗发膏和2~3滴盐酸,在80 ℃恒温水浴中保温,将试样腐蚀20 s左右,随后使用金相显微镜观察并拍摄原始奥氏体晶粒形貌,使用IPP图像分析软件中的割线法对晶粒平均尺寸进行统计。采用扫描电子显微镜(SEM)及EDS对实验钢中夹杂物形貌和成分进行分析。冲击试样在-40 ℃保温15 min后,用ZBC2452-B型冲击试验机进行测试。通过AG-XPLUS100 kN万能试验机测试室温下的拉伸力学性能,拉伸速度设置为1 mm/min。磨损实验按照ASTM—G65标准采用MLGS—225干湿橡胶轮

磨粒磨损实验机进行磨损性能测试。样品尺寸为70 mm(轧向)×25 mm(横向)×7 mm(厚度)。加载载荷为130 N,转速为200 r/min,橡胶轮转动2 000 r,橡胶轮硬度为70邵氏硬度,石英砂尺寸为50~70 μm,石英砂流量为170 g/min。为了获得更为准确和可靠的实验结果,进行三次平行实验,并取三次实验的平均值作为最终结果。

2 实验结果与分析

2.1 组织及力学性能分析

图1所示为两种钢的金相显微组织形貌。实验结果表明,经860 ℃淬火加低温回火后,两种钢的组织均为板条马氏体,马氏体板条束清晰可见,添加稀土Ce元素后,组织整体更加细密均匀,这是因为高熔点的含Ce夹杂物增加了液相中的形核粒子,提高了成核速率,促进钢液的非均质形核与等轴晶细化^[12]。

对两种钢的原始奥氏体形貌及晶粒尺寸进行分析,如图2所示,IPP软件分析统计结果表明常规NM550钢的原始奥氏体晶粒平均尺寸为9.48 μm,且晶粒尺寸分布不均匀,而添加稀土元素Ce的NM550(RE)钢的原始奥氏体晶粒得到细化,大小更加均匀,晶粒平均尺寸为7.55 μm。

两种钢中的夹杂物SEM形貌及EDS能谱如图3所示,可以看出实验钢中原有的Al₂O₃、MnS、(Ti, Nb)(C, N)夹杂物尺寸较大,主要集中在8~10 μm,并且形状不规则。特别是MnS夹杂物与基体结合

表1 两种实验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of the two experimental steels

%

实验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr+Nb+V	Ti	Ce	Fe
NM550	0.33	0.16	0.81	0.004 0	0.001 1	<1.0	0.010	0	Bal.
NM550(RE)	0.33	0.14	0.86	0.004 7	0.000 9	<1.0	0.012	0.001 2	Bal.

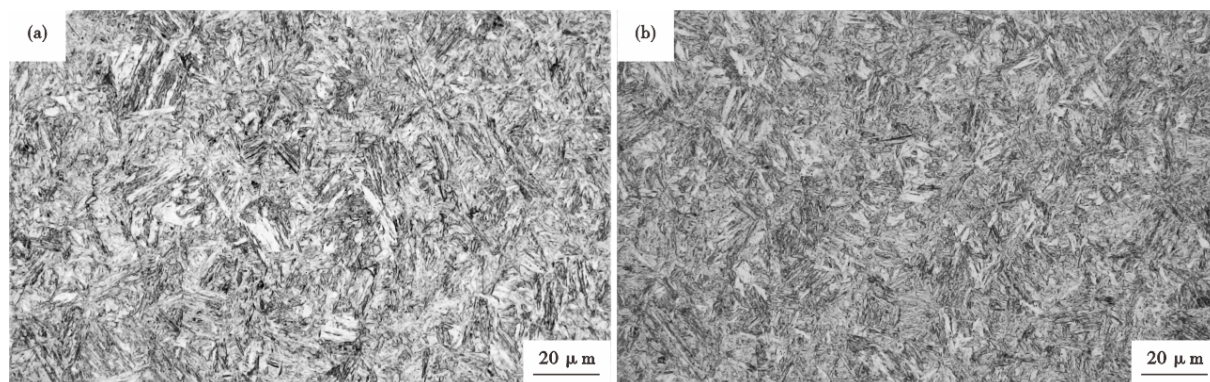


图1 两种实验钢的金相显微组织图:(a)NM550,(b)NM550 (RE)

Fig. 1 Metallographic micrographs of the two experimental steels :(a)NM550,(b)NM550 (RE)

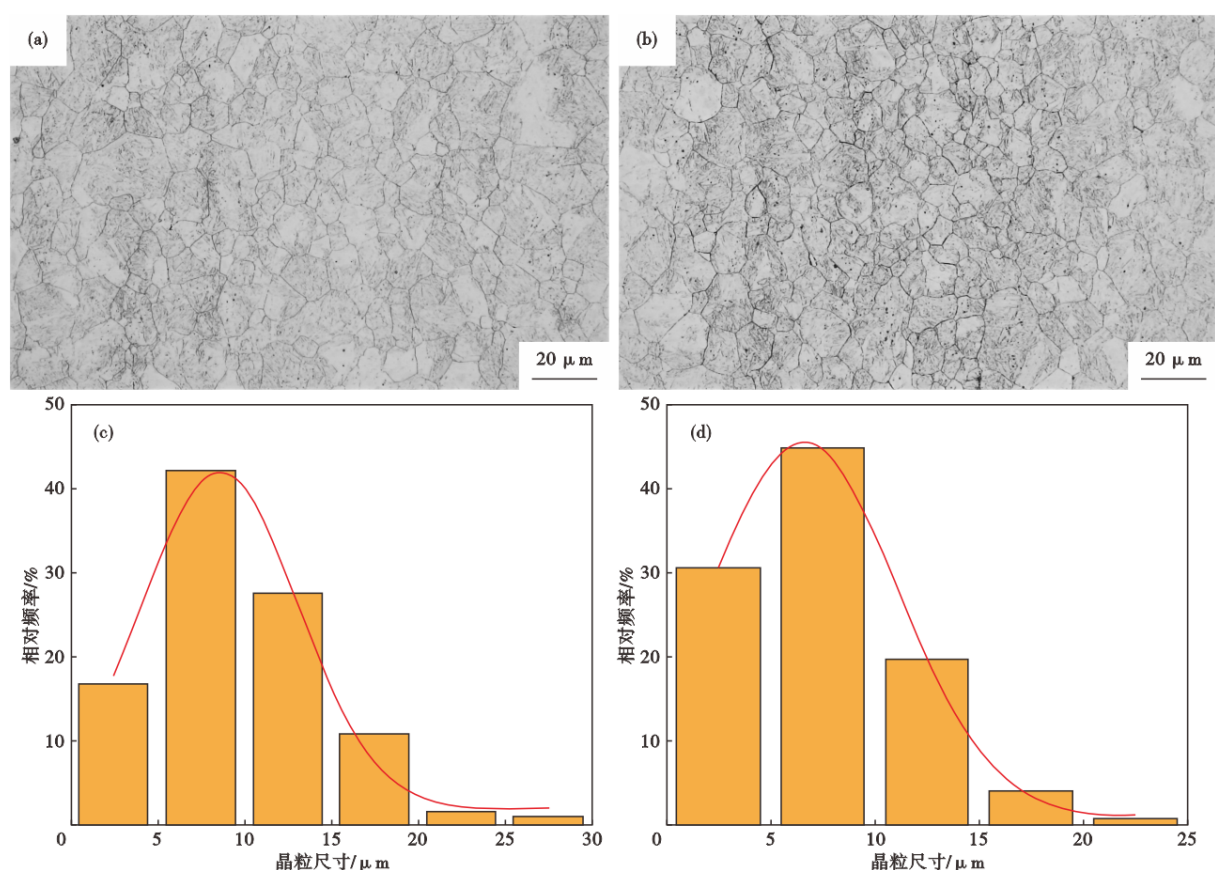


图2 两种实验钢的原始奥氏体形貌及晶粒尺寸分布图:(a)NM550钢原始奥氏体形貌,(b)NM550(RE)钢原始奥氏体形貌,(c)NM550钢晶粒尺寸分布,(d)NM550(RE)钢晶粒尺寸分布

Fig. 2 Morphology and grain size distribution of original austenite grains of the two experimental steels : (a)morphology of original austenite grains of NM550 steel, (b)morphology of original austenite grains of NM550(RE) steel, (c)grain size distribution of original austenite grains of NM550 steel, (d)grain size distribution of original austenite grains of NM550(RE) steel

性较差,二者界面之间存在明显的间隙,这些大尺寸多边形的夹杂物容易在棱角处形成应力集中,恶化实验钢的性能。而经过稀土元素 Ce 处理后的 NM550(RE)钢中的含 Ce 夹杂物平均尺寸在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$,呈球状或类球状弥散分布在钢中,有助于改善钢的综合力学性能。

两种钢的力学性能如图 4 所示和见表 2。常规 NM550 钢抗拉强度为 1 856 MPa,表面硬度为 553 HBW。NM550(RE)钢的抗拉强度和表面硬度均高于常规 NM550 钢,分别为 1 890 MPa 和 579 HBW,这得益于稀土元素 Ce 处理后产生的细晶强化作用^[13]。NM550(RE)钢的平均-40 °C 冲击由常

规 NM550 钢的 29.43 J 提升至 34.63 J,综合力学性能比常规 NM550 钢更好。

实验钢-40 °C 下的冲击断口形貌如图 5 所示,由图 5(a)可知,常规 NM550 钢断口呈现出准解理断裂,可以看到明显的撕裂棱,存在少量尺寸大小不一的韧窝。而添加稀土元素后,NM550(RE)钢断口表面韧窝分布密集,且尺寸均匀,是典型的微孔聚集型断裂形貌,如图 5(b)所示。产生这一现象的原因为添加稀土元素 Ce 后,晶粒尺寸得到细化,细化后的晶粒在冲击载荷的作用下发生塑性变形时可以分散到更多的晶粒内部进行,塑性变形更加均匀,可有效缓解晶界处的应力集中^[14];此外,晶粒细

表2 两种实验钢的力学性能
Table 2 Mechanical properties of the two experimental steels

实验钢	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	伸长率/%	-40 °C 冲击功/J	硬度(HBW)
NM550	1 435	1 856	12.3	29.43	553
NM550(RE)	1 470	1 890	11.9	34.63	579

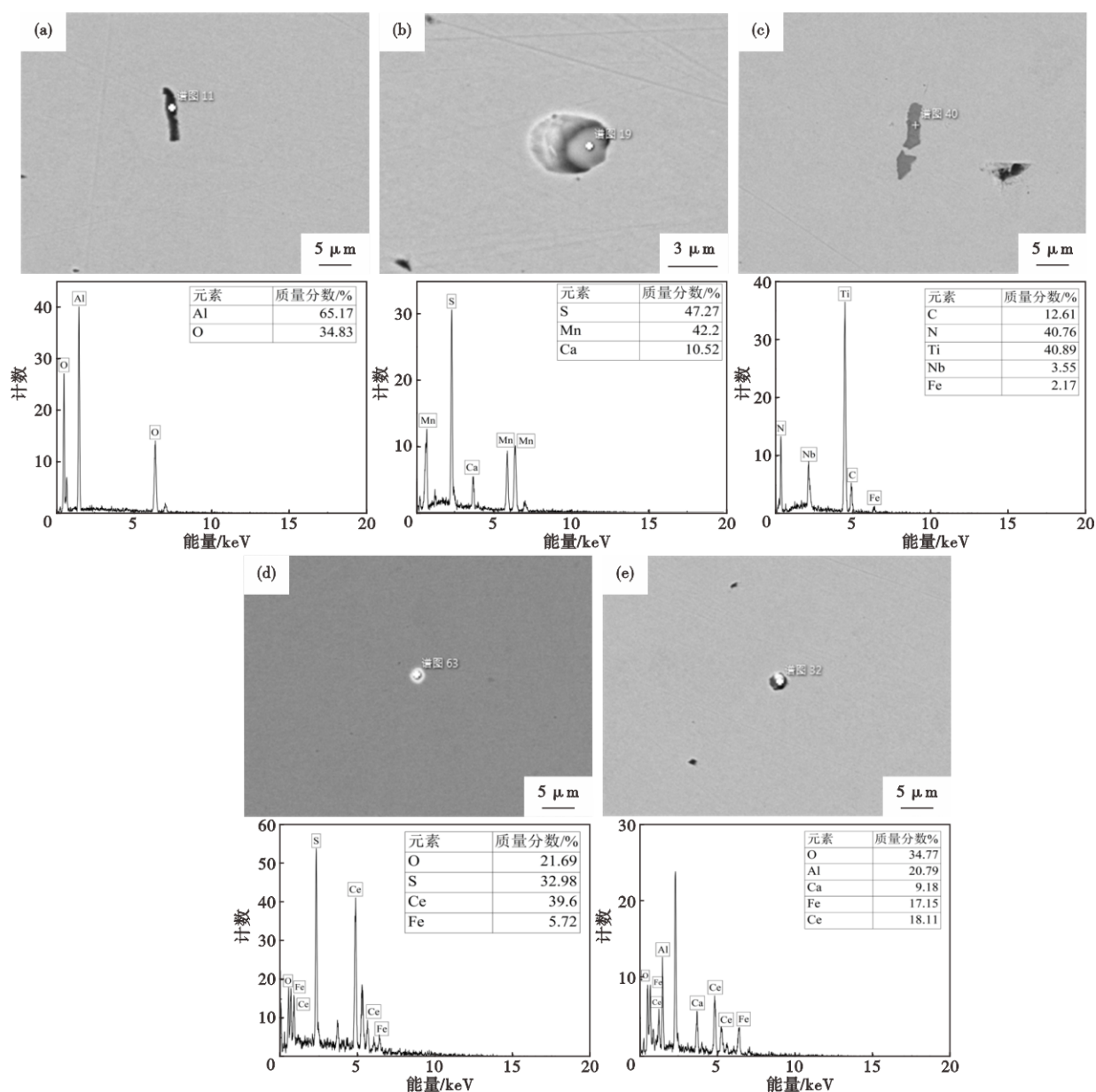


图3 NM550 (RE) 中夹杂物SEM形貌及EDS能谱:(a) Al_2O_3 , (b) MnS, (c) (Ti, Nb)(C, N), (d) Ce-O-S, (e) Ce-O-Al-Ca
Fig. 3 SEM morphology and EDS spectra of inclusions in NM550 (RE) : (a) Al_2O_3 , (b) MnS, (c) (Ti, Nb)(C, N), (d) Ce-O-S, (e) Ce-O-Al-Ca

化使得晶界面积有所提高,大角度晶界占比增加,从而阻碍裂纹的扩展^[15];并且,根据低温韧性 with 晶粒尺寸的关系建立了Hall-Petch公式^[16-17],如式(1)所示。

$$TB = T_0 - KBd^{-1/2} \quad (1)$$

式中,TB为韧脆转变温度, T_0 、KB为常数,d为晶粒尺寸。

根据Hall-Petch方程可知,当晶粒尺寸减小后,韧脆转变温度降低,低温冲击韧性得到提高。球状弥散分布的稀土夹杂物不易产生应力集中也是韧性提升的原因之一。

2.2 磨损性能分析

两种实验钢的磨损失重结果见表3,其中,NM550钢平均磨损失重为2.351 06 g,而添加稀土Ce后的NM550(RE)钢平均磨损失重为2.123 65 g,耐磨性为常规NM550钢的1.11倍,因其硬度略高,材料抵抗磨粒切削和塑性变形的能力较强,同时,稀土改性后的夹杂物尺寸细小,如图3所示,韧性有所提升,呈球状或类球状的稀土夹杂物缓解了应力集中,不易作为裂纹源^[18],因此,可以获得较好的耐磨性。

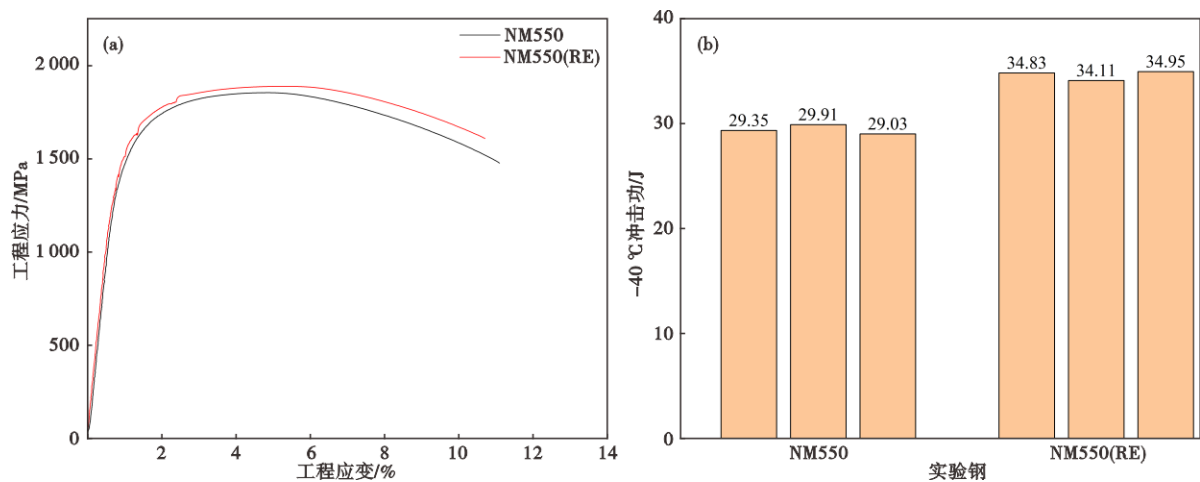


图4 两种实验钢的力学性能:(a)工程应力-应变曲线,(b)-40 °C冲击功

Fig. 4 The mechanical properties of the two experimental steels: (a) engineering stress-strain curve, (b) impact energy at -40 °C

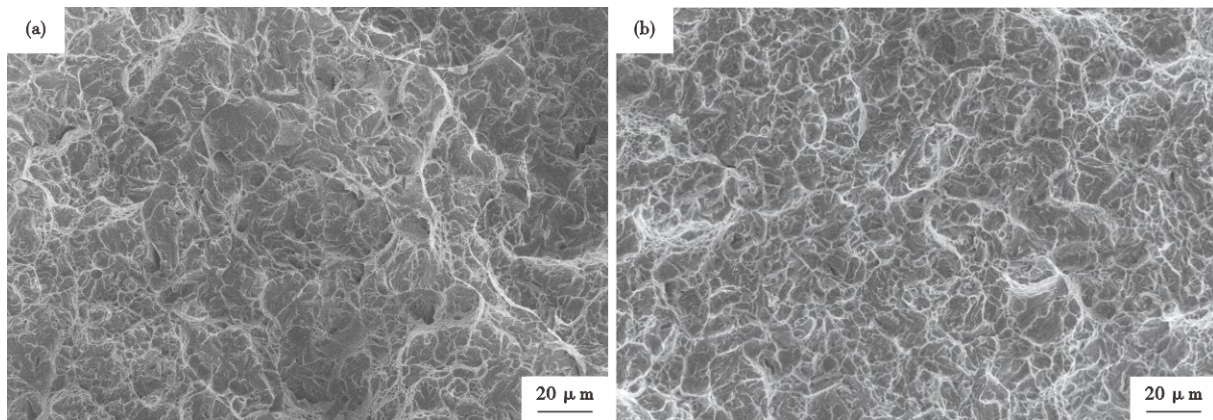


图5 两种实验钢-40 °C冲击断口SEM图:(a)NM550,(b)NM550 (RE)

Fig. 5 SEM micrographs of impact fracture at -40 °C of the two experimental steels: (a) NM550, (b) NM550 (RE)

表3 两种实验钢磨损失重结果

Table 3 Wear weight loss results of the two experimental steels

实验钢	磨损前重量/g	磨损后重量/g	磨损失重/g	平均磨损失重/g	相对耐磨性
NM550	96.203 83	93.848 49	2.355 35	92.351 06	1
	96.214 76	93.868 54	2.346 22		
	96.359 20	94.007 58	2.351 62		
NM550(RE)	95.561 11	93.435 37	2.125 74	92.123 65	1.11
	95.500 52	93.372 44	2.128 08		
	95.343 49	93.226 37	2.117 12		

图6为两种钢的磨损形貌图,观察位置位于磨损试样磨损槽中心。两种钢的磨损形貌均以犁沟为主。如图6(a)(b)(c)所示,NM550钢试样表面划痕明显多于NM550(RE)钢,并且产生较深的犁沟,且其路径会发生偏移。这可能是因为常规NM550钢中形状不规则的大尺寸MnS,特别是本身脆硬的 Al_2O_3 、(Ti, Nb)(C, N)夹杂物热膨胀系数(分别为 $8.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $6.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)和弹性模量与基体差别

较大,导致二者相容性较差^[19],在磨损过程中发生开裂或从基体中剥落,剥落后的硬质颗粒可作为新的磨粒参与磨损过程,在基体表面产生进一步切削作用,形成较深的犁沟,从而增加磨损失重。而添加稀土元素Ce后,由于Ce对夹杂物的改性作用,细小且弥散分布的稀土夹杂物与基体的弹性模量、线膨胀系数(分别为 $11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $12.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)等基本物理性能差异小,因而二者之间的相容性更高,

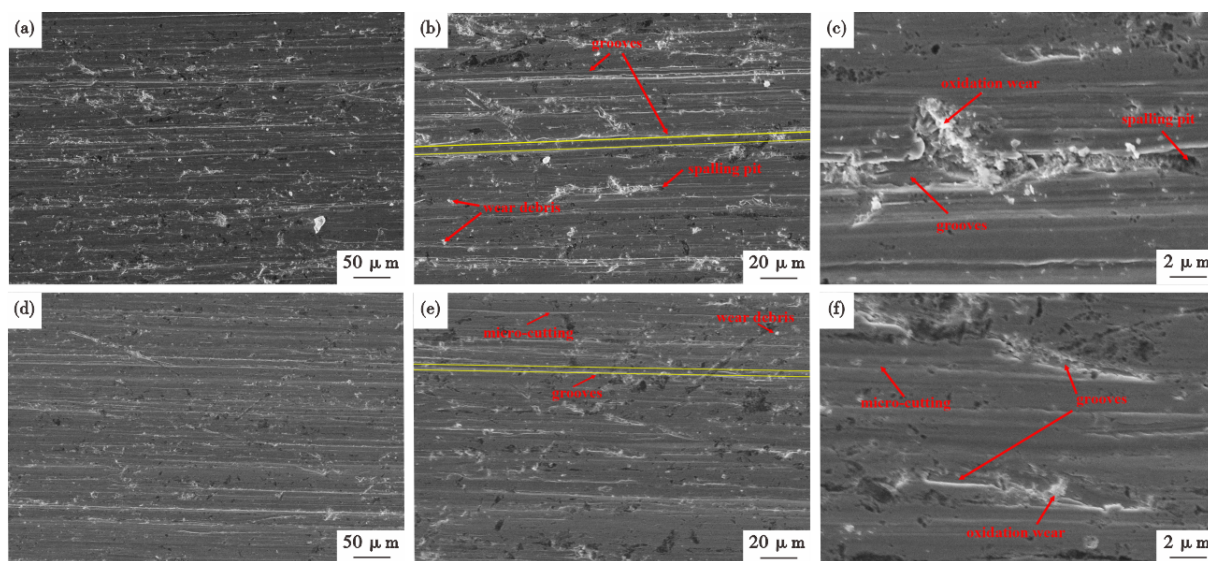


图6 两种实验钢磨损形貌图:(a)(b)(c)NM550;(d)(e)(f)NM550 (RE)

Fig. 6 Wear morphology micrographs of the two experimental steels : (a)(b)(c)NM550; (d)(e)(f)NM550 (RE)

磨损过程中不易发生脱落形成二次磨粒,从而减轻试样表面的犁削损伤,降低磨损失重^[20],并且改性球化后的稀土夹杂物缓解了应力集中,减少了裂纹的萌生和扩展,这也有利于耐磨性能的提升。根据Rabinowica等^[21]提出的材料磨损微观切削理论以及Moore等^[22]提出的材料塑变磨损理论,材料在磨粒磨损过程中产生的磨损量与材料硬度、断裂韧度成反比,NM550(RE)钢板因同时具有较高的硬度和韧性,在磨损过程中可有效阻碍磨料压入基体,阻止了犁沟的继续发展,使得犁沟的宽度和深度减小,因此,NM550(RE)钢表现出较高的耐磨性能。稀土元素Ce的添加起到细化晶粒的作用,晶粒细化后,晶界增多,不仅增强了对裂纹扩展的阻碍能力,而且位错运动受到了更强阻碍,同时,还能提高材料表层的加工硬化能力,使得材料在磨粒磨损过程中抵抗磨粒压入和切削的能力增强,从而提高材料的

耐磨性能。

3 结论

1)常规NM550钢与NM550(RE)钢组织均为马氏体,屈服强度均在1 400 MPa以上,表面硬度分别为553、579HBW,添加稀土后,-40℃冲击功提升至34.63 J,NM550(RE)钢综合力学性能优异。

2)常规NM550钢与NM550(RE)钢G65干砂磨损损失重分别为92.351 06、92.123 65 g,添加Ce后,NM550(RE)钢可以获得良好的耐磨性,其耐磨性为常规NM550钢的1.11倍。

3)NM550(RE)钢中细小且弥散分布的稀土夹杂物与基体热膨胀系数近似,相容性更高,缓解了受力过程中的应力集中,减少了裂纹的萌生和扩展,同时较高的硬度和韧性,可以阻碍磨料压入基体,阻止犁沟的扩展,使犁沟和微切削深度和宽度减小,提高耐磨性。

参考文献

- [1] 邓想涛,王昭东,黄 龙,等.连铸坯内生超硬TiC超级耐磨钢的研究与应用[J]. 轧钢,2019,36(6): 6-10.
- [2] 邓想涛,王昭东,张 逊,等. HB450低合金超高强耐磨钢回火过程中的组织性能演变[J]. 钢铁,2011,46(5): 60-63.
- [3] 张德勇,娄军魁,彭 静,等. 耐磨钢发展现状及应用行业分析[J]. 特钢技术,2024,30(4): 1-7.
- [4] 郑 健,邓想涛,王昭东,等. Nb元素对低合金耐磨钢组织性能的影响[J]. 轧钢,2018,35(2): 12-14+25.
- [5] 胡筱旋,王瑞珍,周 芸,等. 钒、氮含量对耐磨钢NM400组织及性能的影响[J]. 钢铁,2014(10): 89-94.
- [6] 陈敏侠,钱亚军,易春洪. 高性能NM450耐磨钢的研发[J]. 金属热处理,2026,51(2): 72-76.
- [7] Zdravecká E, Tkáčová J, Ondáč M. Effect of microstructure factors on abrasion resistance of high-strength steels[J]. Research in Agricultural Engineering, 2014, 60(3): 115-120.
- [8] Wen E D, Song R B, Xiong W M. Effect of tempering temperature on microstructures and wear behavior of a 500 HB grade wear-resistant steel[J]. Metals, 2019, 9(1): 45-52.
- [9] 周剑波,王新华. 低合金耐磨钢中稀土赋存状态的热力学分析[J]. 钢铁,2025,60(6): 197-204.

- [10] 孙建昌, 牛泽鹏, 穆鸿敏, 等. 稀土Ce对低合金耐磨钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(4): 40-47.
- [11] 王晓磊, 邓想涛, 付天亮, 等. 稀土铈对内生TiC型超级耐磨钢组织性能的影响[J]. 钢铁, 2021, 56(7): 115-122.
- [12] Wang H, Bao Y P, Zhao M, et al. Effect of Ce on the cleanliness, microstructure and mechanical properties of high strength low alloy steel Q690E in industrial production process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2019, 26(11): 1372-1384.
- [13] 王朝峰, 金丹, 刘存波, 等. 工程机械用高强耐磨钢35MnB的热处理工艺优化[J]. 金属热处理, 2026, 51(2): 218-224.
- [14] 郝春磊. 稀土对50CrV弹簧钢夹杂物、组织及性能的影响[D]. 大连: 大连工业大学, 2023.
- [15] 陈伟男. 稀土微合金化加氢反应器用钢的组织性能及热处理工艺[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [16] Lonsdale D, Flewitt P E J. The role of grain size on the ductile-brittle transition of a 2. 25 Pct Cr-1 Pct Mo steel[J]. Metallurgical Transactions A, 1978, 9(11): 1619-1623.
- [17] Morris J W. The influence of grain size on the mechanical properties of steel[J]. Ductile Brittle Transitions. 2001
- [18] Wang X Q, Wu Z W, Li B, et al. Inclusions modification by rare earth in steel and the resulting properties: A review[J]. Journal of Rare Earths, 2024, 42(3): 431-445.
- [19] Lian X T, Chen L, Fan Z W, et al. Effects of modified inclusions and precipitates alloyed by rare earth element on corrosion and impact properties in low alloy steel [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(10): 1719-1730.
- [20] Wang X Q, Wu Z W, Li B, et al. Inclusions modification by rare earth in steel and the resulting properties: A review[J]. Journal of Rare Earths, 2024, 42(3): 431-445.
- [21] Rabinowicz E, Dunn L A, Russell P G. A study of abrasive wear under three-body conditions[J]. Wear, 1961, 4(5): 345-355.
- [22] Moore M A, King F S. Abrasive wear of brittle solids[J]. Wear, 1980, 60(1): 123-140.