

复杂环境高强度耐蚀耐磨钢 HNM450 的开发及应用

陈振业^{1,2} 齐建军¹ 龙杰³ 陈子刚⁴ 杨浩¹ 吕建会³

(1 河钢集团钢研总院, 石家庄 050000; 2 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819;

3 河钢集团舞阳钢铁有限责任公司, 平顶山 462500; 4 河钢集团邯郸钢铁集团有限公司, 邯郸 056000)

摘要 研发了满足磨煤机复杂服役工况的高强度耐磨钢 HNM450。其抗拉强度 1 727 MPa, 断后伸长率 14.5%, 平均 HBW 硬度值 522, -20 °C 冲击功 38 J, 具有良好的强度、塑性和低温韧性。模拟磨煤机实际服役工况的腐蚀磨损对比试验结果显示: HNM450 产品 200 °C 高温 pH = 5 的弱酸性潮湿环境和 200 °C 高温, pH = 9 的弱碱性潮湿环境下的耐腐蚀耐磨性能均明显优于 HARDOX450 钢。HNM450 钢已经用于下游用户磨煤机的制造, 实现了对进口耐磨钢 HARDOX450 的国产化替代。

关键词 耐磨钢 HNM450 力学性能 微观组织 腐蚀磨损 复杂服役环境

Development and Application of High Strength Corrosion-Resistant and Wear-Resistant Steel HNM450 in Complex Environment

Chen Zhenye^{1,2}, Qi Jianjun¹, Long Jie³, Chen Zigang⁴, Yang Hao¹ and Lü Jianhui³

(1 Technical Department, Technology Research Institute of HBIS, Shijiazhuang 050000;

2 The state key laboratory of rolling automation, Northeastern University, Shenyang 110819;

3 Hebei Iron and Steel Group, Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Pingdingshan 462500;

4 Hebei Iron and Steel Group, Handan Iron and Steel Co Ltd, Handan 056000)

Abstract The high-strength wear-resisting steel HNM450 to meet the complex working conditions of the coal mill has been developed. Its tensile strength is 1 727 MPa, elongation after fracture is 14.5%, average HBW hardness number is 522, and impact energy at -20 °C is 38 J, it has good strength, plasticity and low temperature toughness. The comparative test results of corrosion and wear simulating the actual working condition of the coal mill show that the corrosion and wear resistance of HNM450 products at 200 °C high temperature, pH = 5 in the weak acidic humid environment and at 200 °C high temperature, pH = 9 in the weak alkaline humid environment is obviously better than that of HARDOX450 steel. HNM450 steel has been used in the manufacture of coal mills for downstream users, realized the domestic substitution of imported HARDOX450 steel.

Material Index Wear Resistant Steel HNM450, Mechanical Properties, Microstructure, Corrosion Wear, Complex Service Environment

耐磨钢广泛应用于煤矿、工程、冶金和农业等机械制造领域, 是重要的基础材料之一^[1-3]。因此, 降低或减少磨损, 以延长机械设备及其部件的使用寿命, 一直是设计、制造和使用各种机械设备所需要考虑的重要问题^[4-5]。

近期重点客户希望河钢研发供磨煤机用耐高温酸碱环境的高强度耐磨钢以替代从瑞典进口的耐磨钢 HARDOX450, 以降低企业制造成本。

1 成分设计

参考 GB/T 24186-2009《工程机械用高强度耐磨钢板》的成分要求, 国内 NM450、NM500 产品以及国外进口产品 HARDOX450、JFE-EH450 等的实物成分, 考虑到磨煤机长期在 200 °C 高温酸性或碱性且潮湿的环境服役, 设计了适应复杂环境的高强度

耐磨钢 HNM450 的化学成分。为保证钢板的强韧性以及良好的焊接性能和高温性能, 其化学成分设计采取低碳高锰方案及 Ni-Cr-Mo-B 微合金化处理, 同时严格控制钢中 P、S 等有害元素含量^[6], HNM450 钢的化学成分见表 1。

2 生产工艺控制

2.1 冶炼工艺

采用二次精炼、VD 真空处理、钙处理等洁净钢生产技术, 降低钢中的有害气体及夹杂物含量。为保证钢中的有效 B 含量, 加 B 前钢水应脱氧良好, 并有一定的 Ti 含量, 从而提高 B 的收得率^[7]。HNM450 钢冶炼后采用弧连铸机得到 250 mm × 2 600 mm × 6 000 mm 的连铸坯。

2.2 轧制工艺

表 1 HNM450 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of HNM450 steel/%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	B	Nb	Ti	Al	Ceq
0.20 ~ 0.30	0.25 ~ 0.35	0.9 ~ 1.2	≤0.010	≤0.003	0.15 ~ 0.25	0.70 ~ 0.90	0.26 ~ 0.35	≤0.002	0.010 ~ 0.020	0.010 ~ 0.015	0.02 ~ 0.04	≤0.60

注: Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Cu + Ni) / 15

表 2 HNM450 钢与 HARDOX450 钢 20 mm 板力学性能, 920 ~ 950 °C 淬火, 300 ~ 350 °C 回火
Table 2 Mechanical properties of HNM450 steel and HARDOX450 steel 20 mm plate, 920 ~ 950 °C quenching, 300 ~ 350 °C tempering

钢种	HBW 硬度值	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A_{50} %	-20 °C 冲击功/J			-40 °C 冲击功/J		
HNM450	516 ~ 529	1350	1727	14.5	39	37	35	34	37	39
HARDOX450	455 ~ 473	1207	1472	15	38	39	41	36	35	39

表 3 HNM450 钢与 HARDOX450 钢板全厚度硬度对比
Table 3 Full thickness hardness comparison between HNM450 steel and Harbox450 steel

钢种	规格/mm	各部位 HB 硬度值										同板 HB 硬度值差
		上表	上 1/8 处	上 1/4 处	上 3/8 处	中心	下 3/8 处	下 1/4 处	下 1/8 处	下表	平均值	
HNM450	20	529	528	525	521	516	519	522	525	528	524	13
HARDOX450	20	473	470	469	460	455	458	463	466	470	465	18

将 250 mm 厚的板坯加热至 1 220 °C, 采用奥氏体再结晶区及奥氏体未再结晶区两阶段轧制工艺, 一阶段再结晶区开轧温度 1 100 ~ 1 150 °C, 晾钢厚度 60 mm, 第二阶段未再结晶区开轧温度为 900 ~ 930 °C, 终轧温度 800 ~ 860 °C, 钢板厚度 20 mm, 轧后水冷, 返红温度 650 ~ 700 °C。

2.3 热处理工艺

钢板加热至 920 ~ 950 °C, 保温 1 h 后采用辊式淬火机淬火处理, 辊速为 0.4 m/s, 高压段水量为 2 000 ~ 3 500 m³/h, 低压段水量为 800 ~ 4 000 m³/h。淬火后 300 ~ 350 °C 低温回火处理。

3 力学性能

取同样厚度 (20 mm) 的 HNM450 和 HARDOX450 钢板的力学试样进行了性能检测及对比分析。根据 GB/T228.1-2010 的要求, 沿钢板轧制方

向取钢板的拉伸试样, 沿垂直轧制方向取冲击试样, 利用 CTM9100 万能试验机进行拉伸试验, 利用 Zwick/RKP450 摆锤冲击试验机进行了 -20 °C 和 -40 °C 的低温冲击试验, 对两种 20 mm 厚的钢板进行了全厚度硬度测试。两种钢板的主要力学性能如表 2 所示, 全厚度硬度如表 3 所示。

由试验数据可知: HNM450 钢板的强度和硬度均高于瑞典产品 HARDOX450, 达到了 GB/T 24186-2009 对 NM500 的性能要求, 断后伸长率略低于 HARDOX450。-20 °C 和 -40 °C 条件下, HNM450 钢的冲击功与 HARDOX450 基本相当。HNM450 的厚度方向硬度波动性较小

4 显微组织

对 HARDOX450、HNM450 钢的表面、心部进行了显微组织观察, 其微观组织如图 1 所示, 对两种钢

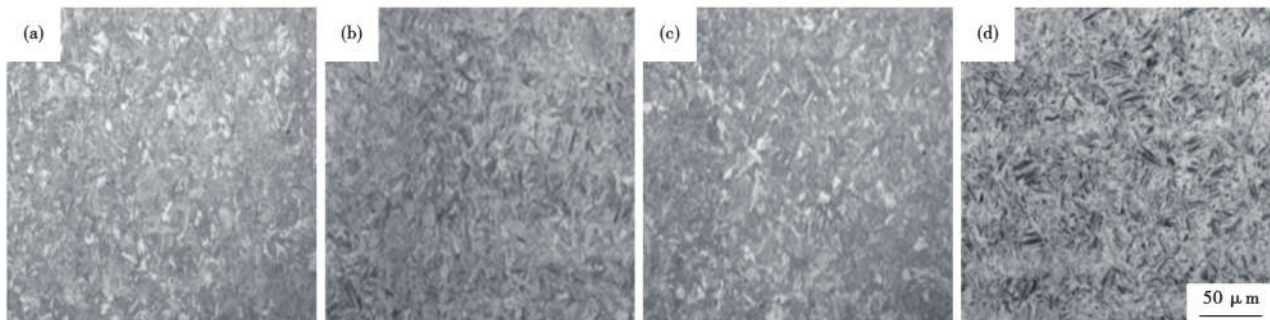


图 1 HARDOX 450 钢表面 (a) 和心部 (c) 以及 HNM450 钢表面 (b) 和心部 (d) 组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure at surface (a) and center (c) of HARDOX 450 steel and at surface (b) and center (d) of HNM450 steel

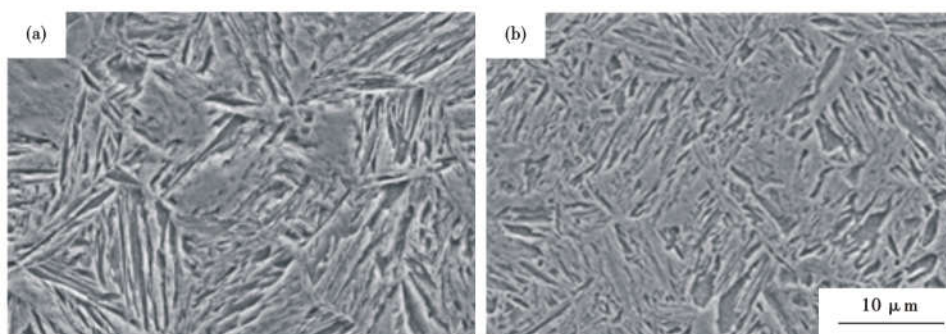


图 2 试验钢 (a) HARDOX450 钢和 (b) HNM450 钢厚度 1/4 处 SEM 形貌
Fig. 2 SEM morphology at 1/4 thickness of tested steel HARDOX450 (a) and HNM450 (b)

表 4 HNM450 与 HARDOX450 钢的磨粒磨损试验结果对比
Table 4 Comparison of abrasive wear test results of HNM450 and HARDOX450 steel

钢种	60 min 评价失重/g	120 min 平均失重/g
HNM450	0.0232	0.0190
HARDOX450	0.0331	0.0260

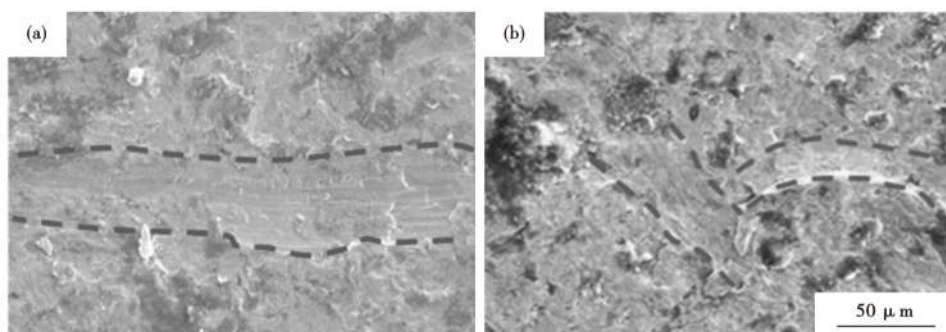


图 3 (a) HARDOX450 钢; (b) HNM450 钢磨损试验后表面形貌
Fig. 3 Morphology of surface of (a) HARDOX450 and (b) HNM450 steel after wear test

板厚度 1/4 处进行了 SEM 观察,其 SEM 形貌如图 2 所示。从显微组织和 SEM 形貌图可知:两种耐磨钢的组织均为马氏体组织,且表面和心部的组织形态差别不大,其中 HNM450 钢的马氏体组织比 HARDOX450 钢更为细小,细化后的马氏体板条具有更高的硬度,有利于提高耐磨钢的耐磨性能^[8]。

5 常规环境耐磨性能研究

取 HNM450 和 HARDOX450 钢板同一位置样品,加工成尺寸为 50 mm × 10 mm × 2.5 mm 的磨损试样,试样表面打磨至光滑,两个端面与侧面严格垂直,在 MLD-10 型动载磨料磨损试验机上进行磨损对比试验。磨料选用 8 ~ 10 目的石英砂(直径 Φ2 ~ 3 mm),耐磨机圆盘转速设定为 200 r/min,试验时间分别选取 1 h 和 2 h,每个条件下进行三组平行试验。表 4 试验结果表明:在 1 h 和 2 h 同等条件

的磨损试验后, HNM450 钢的失重均小于 HARDOX450 钢。图 3 为磨损试验后试样表面的高倍照片,可以看出,磨损后 HARDOX450 钢的犁沟宽度较大且方向平直,犁沟中的钢板本体被磨掉,而 HNM450 钢犁沟较窄,且遇到硬相的钉扎作用而改变方向,进一步说明 HNM450 钢的耐磨性能优

于 HARDOX450 钢。

6 磨煤机服役工况下的耐磨性能

所设计的耐磨钢主要用于制造磨煤机的分选筛,介质为磨细后的煤粉(含一定的水分),实际环境温度温度为 150 ~ 200 °C,根据煤种的不同有弱碱、弱酸两种环境。采用旋转圆盘式磨损试验机,模拟实际工况,进行了对比耐磨试验研究。

将试验机圆盘埋在加热至 200 °C 的湿石英砂中,湿石英砂介质分别采用稀盐酸和氨水调节至 pH = 5、pH = 9 的酸碱环境。试验机圆旋转线速度

为 1.5 m/s。每个实验重复 3 次,取平均值。

6.1 酸性环境腐蚀磨损试验结果分析

在 pH = 5 弱酸性介质中经 20 h 腐蚀磨损试验后,两种耐磨钢的试验面上都生成了明显的腐蚀产

表 5 两种耐磨钢在 pH = 5 弱酸性介质中腐蚀磨损 20 h 后的失重

Table 5 Weight loss of two kinds of wear-resistant steels corrosion wearing after pH = 5 weak acid medium for 20 h

钢种	试样编号	初重/g	终重/g	失重/mg	平均失重/mg
HARDOX 450	11	19.0798	19.0510	28.8	34.20
	12	19.2911	19.2499	41.2	
	13	19.1831	19.1505	32.6	
HNM450	21	20.0432	20.0151	28.1	26.20
	22	19.8053	19.7749	30.4	
	23	19.5775	19.5574	20.1	

注:11、12、13-HARDOX450 钢的平行试样,21、22、23-HNM450 钢的平行试样

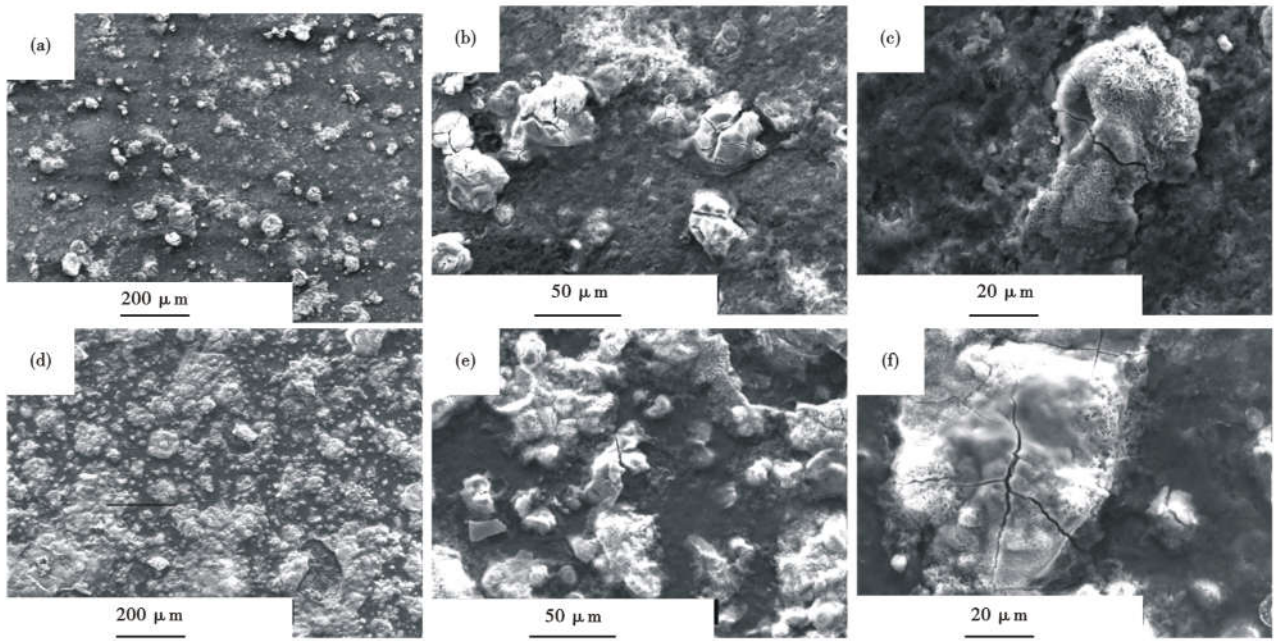


图 4 1# 耐磨钢 HARDOX450 (a)(b)(c) 和 2# 耐磨钢 HNM450 (d)(e)(f) 在弱酸性介质中腐蚀磨损 20 h 后的表面形貌
Fig.4 Surface morphology of 1# wear resistant steel HARDOX450 (a)(b)(c) and 2# wear resistant steel HNM450 (d)(e)(f) corrosion-wearing after weak acid medium for 20 h

物膜,宏观上两种耐磨钢表面的膜颜色比较相似,但 HARDOX450 钢表面的膜比 HNM450 钢厚一些。

对腐蚀磨损后的试样,先进行试验面的 SEM 分析,然后根据国标 GB/T16545-2015《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》规定计算失重。pH = 5 的介质中两种试样 20 h 试验后的失重结果如表 5 所示。1# 耐磨钢(HARDOX450)的平均失重为 34.2 mg, 2# 耐磨钢(HNM450)的平均失重为 26.2 mg。可知,200 °C 条件下,HNM450 在弱酸性介质中的耐腐蚀磨损性能明显优于 HARDOX450 钢。

图 4 高温酸性条件下腐蚀磨损试验后的试样 SEM 电镜照片。可以看出,1# 钢(HARDOX450)表面存在一层腐蚀产物膜,膜上存在大量腐蚀产物颗粒。在高倍下可以看到腐蚀产物膜上存在大量孔洞,腐蚀介质可以通过这些孔洞较容易地传输到钢材基体表面,导致腐蚀产物膜对金属基体的保护作用减弱^[9-11]。2# 钢(HNM450)表面也存在一层腐蚀产物膜,但与 1# 钢不同的是,膜上没有腐蚀产物颗粒,而是存在大量扁平状的凸起。在高倍下腐蚀产物膜上未发现孔洞,2# 钢上生成的腐蚀产物膜比较致密。

6.2 碱性环境腐蚀磨损试验结果分析

pH = 9 的介质中两种试样 20 h 试验后的失重结果见表 6。取 HARDOX450 钢的三个平行试样,编号分别为 14、15、16,取 HNM450 钢的三个平行试样,编号分别为 24、25、26,1# 耐磨钢的平均失重为

表 6 两种耐磨钢在 pH = 9 弱碱性介质中腐蚀磨损 20 h 后的失重

Table 6 Weight loss of two wear-resistant steels corrosion-wearing after pH = 9 weakly alkaline medium for 20 h

钢种	试样编号	初重/g	终重/g	失重/mg	平均失重/mg
HARDOX 450	14	19.0125	18.9927	19.8	19.50
	15	19.3034	19.2900	13.4	
	16	19.9367	19.9114	25.3	
HNM450	24	19.8021	19.7958	6.3	5.70
	25	19.7882	19.7832	5.0	
	26	20.0383	20.0325	5.8	

注:14、15、16-HARDOX450 钢的平行试样,24、25、26-HNM450 钢的平行试样

19.5 mg, 2# 耐磨钢的平均失重仅为 5.7 mg,二者存在巨大差异。由失重对比可知:200 °C 条件下,2# 耐磨钢(HNM450)在弱碱性介质中的耐腐蚀磨损性能远优于 1# 耐磨钢(HARDOX450)。

图 5 为高温碱性条件下腐蚀磨损试验后的试样 SEM 电镜照片。可以看出,1# 钢表面在弱碱性介质中 20 h 试验后表面存在两层腐蚀产物,黑色的内层膜和白色、不连续的外层膜。在高倍下可以看到内层腐蚀膜上没有明显的孔洞,相对于在弱酸性介质中,腐蚀产物膜更致密,这有利于抑制基体的进一步腐蚀,这与 1# 钢碱性环境下的磨损失重(19.50 mg)小于酸性环境下的磨损失重(34.20 mg)的结果互相印证。2# 钢表面在弱碱性介质中 20 h 试验后表面能看到的腐蚀产物非常少,而主要看到的是因石

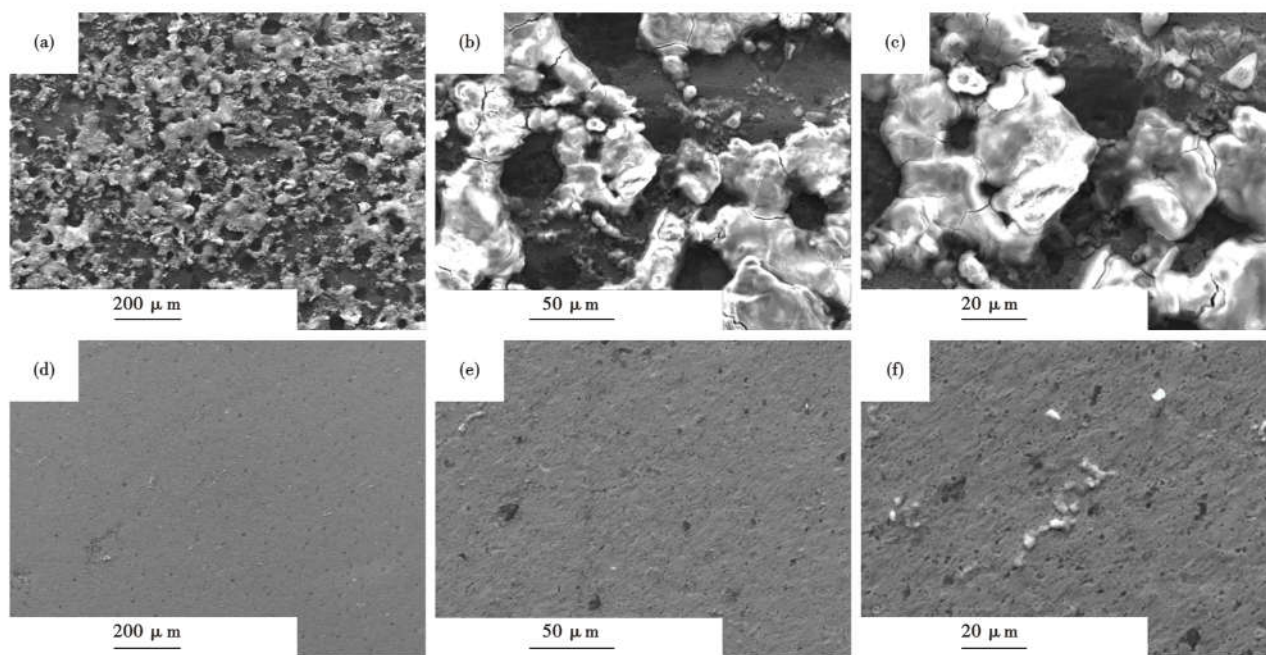


图 5 1# 耐磨钢 HARDOX450 (a)(b)(c) 和 2# 耐磨钢 HNM450 (d)(e)(f) 在弱碱性介质中腐蚀磨损 20 h 后的表面形貌
Fig. 5 Surface morphology of 1# wear resistant steel HARDOX450 (a)(b)(c) and 2# wear resistant steel HNM450 (d)(e)(f) corrosion-wearing after weak alkaline medium for 20 h

英砂犁削而形成的塑性变形沟痕,且 2# 钢的失重明显小于 1# 钢的失重。这说明 2# 钢(HNM450)的耐碱性环境腐蚀磨损性能大幅优于 1# 钢(HARDOX450)。

7 工业应用

采用 HNM450 钢替代 HARDOX450 钢,用于制造某型号磨煤机,并且已经在下游发电厂的生产线投产运行。运行 20000 h 以来,采用 HNM450 钢制造的磨煤机网筛及转子体表面情况良好,未出现任何磨损现象,外观情况优于使用了同样时长的 HARDOX450 钢配件。

8 结论

(1)研发的 HNM450 钢,抗拉强度 1 727 MPa,

断后伸长率 14.5%,HBW 硬度值 526,-20 °C 冲击功 38 J,具有良好的强度、塑性和低温韧性。

(2)在 200 °C 高温、潮湿、酸性或碱性(pH = 5 或 pH = 9)的环境中,HNM450 钢的耐腐蚀磨损性能均优于 HARDOX450 钢。

(3)200 °C 潮湿的条件下,HNM450 耐磨钢在弱碱性(pH = 9)介质中耐腐蚀磨损性能优于其在弱酸性(pH = 5)介质中的耐腐蚀磨损性能。

(4)HNM450 钢已经替代 HARDOX450 钢用于制造磨煤机在下游用户生产线投产运行。

河北省“三三三人才”培养资助项目(A201803007)

参考文献

- [1]曹艺,王昭东,姜在伟,等. 高强韧性低合金耐磨钢的开发与研究[J]. 轧钢,2011,28(6):3-7.
- [2]邓锋,胡锋,吴开明. 低合金高强度耐磨钢的发展及应用[J]. 金属材料与冶金工程,2016,44(2):29-35.
- [3]李文斌,费静,曹忠孝,等. 我国低合金高强度耐磨钢的生产现状及发展方向[J]. 机械工程材料,2012,36(2):6-10.
- [4]Ryabov V V,Kniazuk T V,Mikhailov M S, et al. Structure and Properties of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machine Building[J]. Inorganic Materials: Applied Research,2017,8(6):827-836.
- [5]Jiang Z Q,Fu H C,Yin E S, et al. Investigation and Application of High Strength Low Alloy Wear Resistant Cast Steel[J]. Materials Technology,2011,26(2):58-61.
- [6]郑健,温长飞,黄龙,等. 低合金高强度耐磨钢板 NM500 的研发[J]. 金属热处理,2019,44(3):42-46.
- [7]陈振业,王会岭,赵燕青,等. 新型 V-Ti-B 微合金化调质 Q690E 钢板的开发[J]. 特殊钢,2019,40(1):1-3.
- [8]胡日荣,蔡庆伍,武会宾,等. 热处理工艺对 NM500 耐磨钢组织和力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报,2013,35(8):1015-1020.
- [9]李德发,吴开明,官计生,夹杂物属性对 NM500 耐磨钢腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理,2019,44(11):81-84.
- [10]郑爱琴,宋新莉曹宇,等. 含铜低合金耐磨钢在盐雾环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术,2019,31(3):279-284.
- [11]宋凤明,杜林秀,孙国胜,等. 疏浚用耐磨蚀钢耐磨性能的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2018,30(1):74-78.

陈振业(1983-),男,博士生(东北大学),高级工程师,2006年武汉大学(本科)毕业,中厚板开发和工艺研究。
E-mail:chenzhenye@hbisco.com

收稿日期:2021-03-25