

增氮节镍型 316 奥氏体不锈钢的耐冲蚀性能

周 莉¹ 曹晓恩² 杨吉春³

(1 重庆工业职业技术学院机械工程学院, 重庆 401120; 2 河钢集团邯钢公司技术中心, 邯郸 056015;
3 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘 要 采用 30 kg 真空感应炉熔炼了试验用 316 钢 (/%: 0.04C, 0.36Si, 2.00Mn, 0.009P, 0.024S, 17.74Cr, 11.74Ni, 2.56Mo) 以及采用常压充氮和加入氮化合金熔炼了试验用增氮节镍型 316 钢 (/%: 0.04C, 0.25Si, 1.86Mn, 0.012P, 0.021S, 16.90Cr, 8.18Ni, 2.64Mo, 0.36N), 经锻造和轧制成 4 mm 带材, 并经 1 100 °C 1 h 固溶处理。借助电子天平、扫描电镜以及自制的砂浆冲蚀磨损试验装置, 对试验钢的冲蚀磨损率以及冲蚀磨损后的表面形貌进行了表征与分析。结果表明, 两种试验奥氏体不锈钢的磨损率随着冲蚀角度的增大, 出现了先上升, 后下降, 再上升的趋势, 在 45° 与 90° 出现了两个峰值, 当冲蚀角度为 90° 时, 磨损率达到最大值; 两种奥氏体不锈钢的冲蚀磨损率随着冲蚀速度和冲蚀时间的增加而增大。在相同的冲蚀条件下, 增氮节镍型 316 奥氏体不锈钢具有较优的耐冲蚀磨损性能和较低的冲蚀磨损率。

关键词 增氮节镍型 316 奥氏体不锈钢 冲蚀 磨损率

Wear-Erosion Resistance of Adding Nitrogen-Saving Nickel Type 316 Austenite Stainless Steel

Zhou Li¹, Cao Xiaoen² and Yang Jichun³

(1 College of Mechanical Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120;

2 Technique Center, Handan Steel Co, Hesteel Group, Handan 056015;

3 Materials and Metallurgy School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract The tested 316 steel (/%: 0.04C, 0.36Si, 2.00Mn, 0.009P, 0.024S, 17.74Cr, 11.74Ni, 2.56Mo) is melted by a 30 kg vacuum induction furnace and the tested adding nitrogen-saving nickel 316 steel (/%: 0.04C, 0.25Si, 1.86Mn, 0.012P, 0.021S, 16.90Cr, 8.18Ni, 2.64Mo, 0.36N) is melted by nitrogen filled at ambient pressure and adding nitriding alloy, forged and rolled to 4 mm strip and solid-solution treated at 1 100 °C for 1 h. The erosion rate and the morphology of surface of steel erosion-tested are characterized and analyzed by electronic balance, SEM and home-made slurry erosion wear-erosion device. Results show that with increasing erosion impact angle the erosion rate of both tested austenite stainless steel increases and appears to rise-fall-rise, two peaks of erosion rate occur at erosion impact angle 45° and 90° and the max erosion rate occurs at 90°; with increasing velocity and time of erosion impact the erosion rate of both steels increases. At same conditions of erosion, the adding nitrogen-saving nickel 316 austenite stainless steel has better wear-erosion performance and lower erosion rate.

Material Index Adding Nitrogen-Saving Nickel Type 316 Austenite Stainless Steel, Slurry Erosion, Erosion Rate

工程上的冲蚀指的是松散的流动粒子以一定的速度与角度冲击材料表面并造成材料损耗或破坏的一种磨损过程与现象^[1-3]。冲蚀磨损又可以分为喷砂型冲蚀、泥浆型冲蚀和气蚀等方式。研究表明^[4], 冲蚀磨损占工业生产中磨损破坏总数的 8%, 是工业部门中材料破坏的重要原因之一。在喷砂型冲蚀过程中发生材料流失的速度阈值为 10 m/s, 而在泥浆型冲蚀中 10 m/s 的流速已经能形成明显的冲蚀, 这表明了介质不同, 材料的流失机理也可能不同。泥浆冲蚀比喷砂式冲蚀复杂得多, 这不仅因为泥浆冲蚀过程中往往伴随着材料的腐蚀行为, 而且在流动状态下液固两相相对材料表面的作用无论理论分析还是实验测定都较喷砂冲蚀复杂。

316 奥氏体不锈钢是一种含镍量较高的钢铁材料, 具有良好的耐腐蚀性和力学性能, 广泛应用于餐饮、医疗、化工、建筑、航运等领域^[5-7], 但是我国镍资源十分紧缺, 316 奥氏体不锈钢的生产和应用受到一定的限制。大量的研究试验发现^[8-12], 氮作为合金元素添加到奥氏体不锈钢中具有稳定奥氏体组织, 提高力学性能及耐腐蚀性能的作用, 因此增氮降镍型不锈钢的研究和开发具有重要经济价值。在我国的长江流域, 因为江水的冲刷, 造成以不锈钢为主体的基建设施使用寿命大为降低, 但是此类研究鲜有报导。基于上述背景, 本文对增氮降镍后 316 奥氏体不锈钢的耐砂浆冲蚀性能进行了研究, 为节镍型不锈钢的研究发展提供一定的理论依据。

表1 试验钢的化学成分/%

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
316 钢	0.04	0.36	2.00	0.009	0.024	17.74	11.74	2.56	-
增氮节镍型316 钢	0.04	0.25	1.86	0.012	0.021	16.90	8.18	2.64	0.36

1 试验材料及方法

通过在30 kg真空感应炉内常压充氮以及二次布料加入氮化合物的方式冶炼获得试验钢锭,钢锭尺寸为 $\Phi 105 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,其化学成分如表1所示。将试验钢锭加热到1200℃并保温2 h,以消除钢锭表面与心部的温度梯度,待钢锭温度均匀后,用400 kg空气锤锻造成25 mm×25 mm方坯,开锻温度为1 150~1 160℃,终锻温度 $\geq 930 \text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却方式为空冷。锻后的试验钢快速加热至1 250℃并保温2 h,保温后取样开轧,开轧温度为1 200℃,终轧温度为950℃,试验钢从25 mm经过6道次轧至4 mm。将轧制后的试验钢在1 100℃下固溶处理1 h,空冷后用钨丝切割机加工成100 mm×25 mm×4 mm的薄片状若干,用砂纸将薄片状试样打磨并抛光至表面光洁($Ra < 0.1$),并置于超声波清洗仪中彻底清洗、吹干,采用精度为0.1 mg的电子天平进行多次称重并记录,随后放入干燥皿中以备试验。

试样的冲蚀磨损试验在自制的实验装置上进行,利用水泵将水箱中砂粒质量分数为20%的砂浆抽入喷射管道中,经喷嘴(直径15 mm)射流持续冲蚀试样表面,试验中不断搅拌砂浆以防止固体颗粒沉降。试验中砂浆采用静置过后的长江江水上清液混合粒径为150~200 μm 的 SiO_2 颗粒配置而成,江

水上清液的pH值为7.53,呈弱碱性。试样的力学性能、硬度^[5]及冲蚀颗粒形貌如图1所示。砂浆冲蚀试验后对试样进行表面清理,干燥后采用精度为0.1 mg的电子天平进行多次称重并记录,采用扫描电镜表征试样冲蚀后的表面形貌。

为了对试验结果进行准确分析,本试验用失重法对冲蚀磨损程度进行评估,并将冲蚀磨损率定义为:

$$\varepsilon = \frac{m_1 - m_2}{S}$$

式中: ε -冲蚀磨损率/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); m_1, m_2 -冲蚀前、后的试样质量/g; S -试样被冲蚀面积/ m^2 。

2 试验结果及讨论

2.1 冲蚀角度对试样冲蚀磨损率的影响

图2为不同冲蚀角度下试样的磨损率。试验条件:室温,冲蚀时间2 h,砂粒质量分数为20%的砂浆,固体颗粒直径150~200 μm ,冲蚀速度9 m/s,冲蚀角度为15°,30°,45°,60°,75°,90°。

由图2可知,试样的磨损率随着冲蚀角度的增大,出现了先上升,后下降,再上升的趋势,在45°与90°出现了两个峰值,当冲蚀角度为90°时,磨损率达到最大值。塑性材料一般在冲蚀角度为20°~30°时出现最大磨损率,而脆性材料则随着冲蚀角度的增大,磨损率不断增大,当冲蚀角度达到90°时出现最大磨损率。在本次试验中,试样的磨损率既不同于塑性材料,也有区别于脆性材料。这是因为在砂浆冲蚀磨损过程中,当砂浆流体冲击到试样表面上,流体将沿着试样表面铺展,冲蚀颗粒的运动方向将向着流体运动的方向偏斜,所以在铺展作用的综

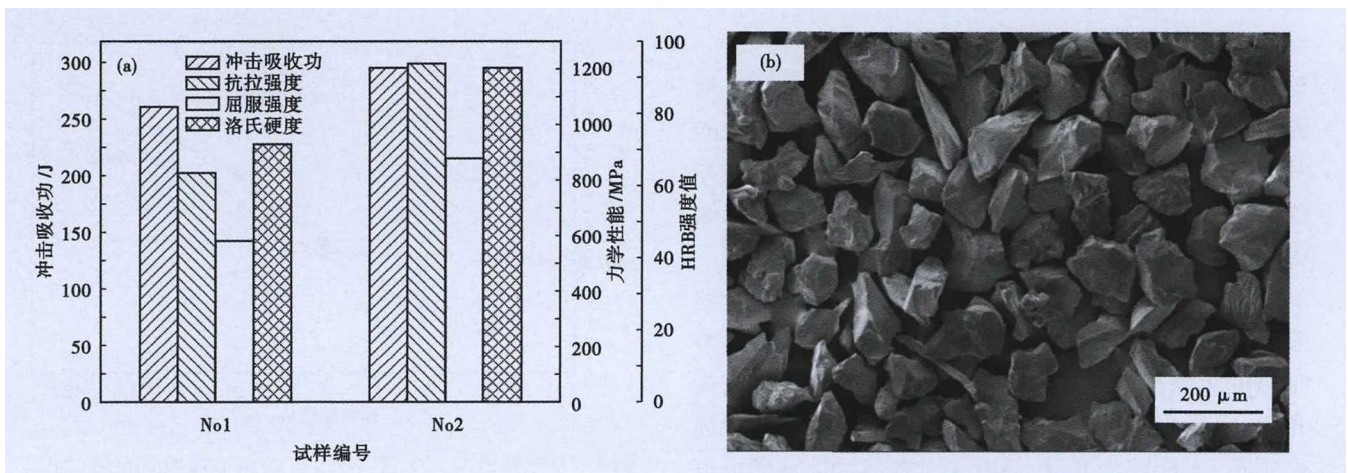


图1 (a)316钢(No1)和增氮节镍型316钢(No2)的力学性能;(b)冲蚀颗粒形貌

Fig. 1 (a) Mechanical properties of 316 steel (No1) and adding nitrogen-saving nickel 316 steel (No2); (b) Morphology of erosion solid particles

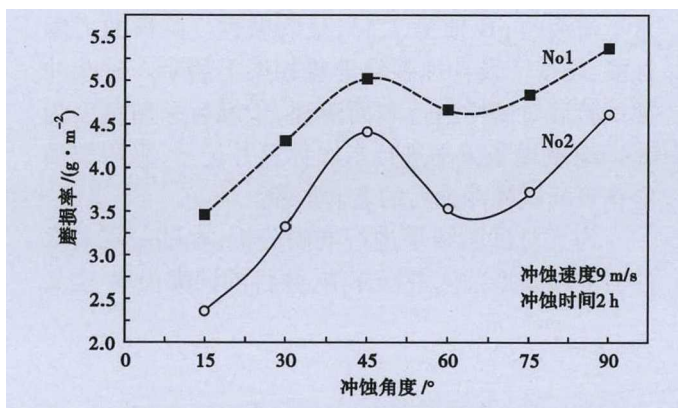


图 2 冲蚀角度对 316 钢 (No1) 和增氮节镍型 316 钢 (No2) 的磨损率的影响

Fig. 2 Effect of erosion impact angle on erosion rate of 316 steel (No1) and adding nitrogen-saving nickel 316 steel (No2)

合效应下,除 90° 冲蚀角外,大多数固体颗粒的冲蚀角度都会减小,又因为当冲蚀角度较小时,垂直于试样方向上的动能较小,当冲击能量较小时,试样表现出塑性材料冲蚀磨损的特性,所以试样的磨损率在 45° 呈现出一个峰值;当冲蚀角度为 90° 时,垂直于试样方向上的动能较大,试样以产生裂纹和脆性剥落为主,往往经过一次冲蚀就可以产生材料流失,所以试样呈现出脆性材料的冲蚀磨损特性;介于 45° 与 90° 之间,试样的磨损率有所下降,是因为处于两种冲蚀机理的过渡区间,两种冲蚀机理并存并相互竞争,随着冲蚀角度的增大逐渐呈现出脆性材料的磨损特性的过程。对

比 316 钢 (No1)、增氮节镍型 316 钢 (No2) 试样,增氮降镍并没有改变奥氏体不锈钢耐冲蚀磨损性能的规律,但是在相应的冲蚀条件下,均降低了材料的冲蚀磨损率,有利于增加材料的使用寿命,减小能源的消耗。

图 3 为冲蚀角度为 90° 时,冲蚀磨损后试样的表面形貌。由图 3 可以对比 No1、No2 试样冲蚀磨损后的表面形貌。No1 试样冲蚀磨损后,表面较为粗糙,呈现出沟壑状的冲蚀磨损形貌;No2 试样冲蚀磨损后,表面较为光滑,只有相对较浅的冲蚀磨损痕迹。No1、No2 试样对比可知,增氮降镍后奥氏体不锈钢耐冲蚀性能较高,与图 1 (a) 试样力学性能、图 2 试样的磨损率结果相符。

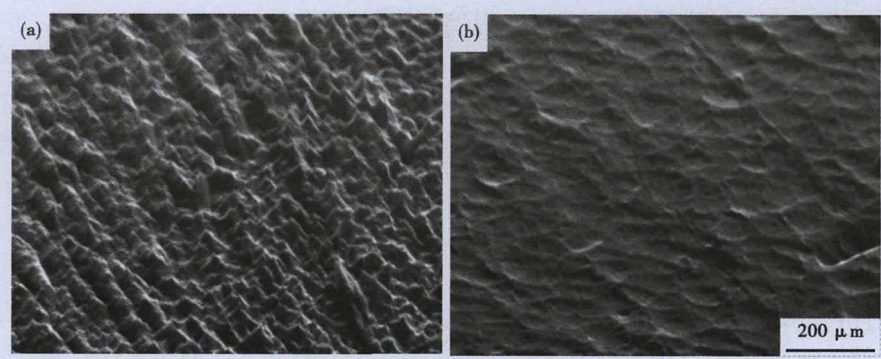


图 3 冲蚀磨损后试验钢表面形貌 (冲蚀角度 90°, 冲蚀速度 9 m/s, 冲蚀时间 2 h): (a) No1, 316 钢; (b) No2, 增氮节镍型 316 钢

Fig. 3 Morphology of surface of tested steels after wear-erosion test, erosion impact angle 90°, velocity of erosion impact 9 m/s, erosion impact time for 2 h: (a) No1, 316 steel; (b) No2, adding nitrogen-saving nickel 316 steel

2.2 冲蚀速度对试样冲蚀磨损率的影响

图 4 为不同冲蚀速度下试样的磨损率。试验条件:室温,冲蚀时间 2 h,砂粒质量分数为 20% 的砂浆,固体颗粒直径 150 ~ 200 μm,冲蚀角度为 90°,冲蚀速度为 3, 5, 7, 9, 11, 13 m/s。

由图 4 可知,试样的冲蚀磨损率随着冲蚀速度的增加而增大。砂浆冲蚀过程中,冲蚀颗粒必须穿过颗粒与试样表面之间的液膜才能冲蚀试样表面,液膜的存在使得冲蚀颗粒冲击试样表面的速度有所降低。当砂浆冲蚀速度较小时,冲蚀颗粒与砂浆的运动方向和速度基本一致,故在试验中以砂浆的流速作为冲蚀颗粒的速度,此时,砂浆冲蚀对试样冲蚀破坏较轻,试样磨损率较低;当砂浆冲蚀速度较高时,冲蚀颗粒与砂浆的速度会出现一定差别,砂浆在冲蚀到试样表面时会产生绕流,在一定程度上降低了粒子的冲击速度,但是如果冲蚀过程中出现绕流,

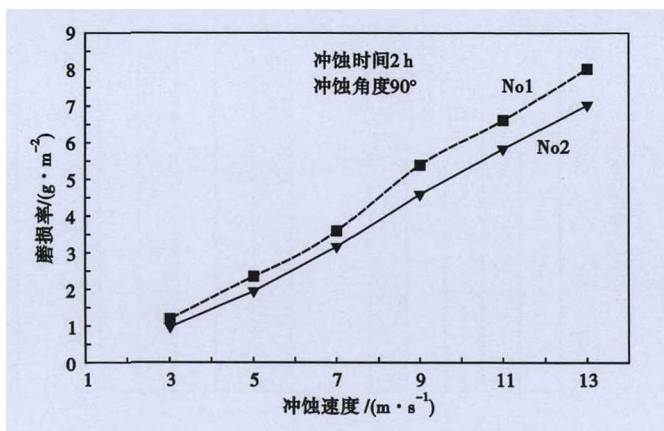


图 4 冲蚀速度对 316 钢 (No1) 和增氮节镍型 316 钢 (No2) 磨损率的影响,冲蚀时间 2 h,冲蚀角度 90°

Fig. 4 Effect of erosion impact velocity on erosion rate of 316 steel (No1) and adding nitrogen-saving nickel 316 steel (No2), erosion impact time for 2 h and erosion impact angle 90°

则会附加产生气蚀现象,冲蚀与气蚀联合作用于材料表面而使破坏加剧,所以砂浆高速冲蚀时,试样的磨损率较高。对比 No1、No2 试样,增氮降镍后,奥氏体不锈钢耐冲蚀磨损性能的规律没有改变,但是在相应的冲蚀条件下,均降低了材料的冲蚀磨损率。

图5为冲蚀速度为13 m/s时,冲蚀磨损后试样的表面形貌。由图5可知, No1 试样冲蚀磨损后出现沟壑状形貌的同时伴随着较深的冲蚀坑; No2 试样冲蚀表面较为平整,只有少量较浅的冲蚀坑。图5与图3对比可知,砂浆冲蚀速度增大后,试样的表面形貌越发粗糙,这是因为砂浆冲蚀速度增加后,不仅冲蚀颗粒垂直冲蚀试样的冲击能量增大,而且液体起到的冲刷作用也逐渐显露,造成试样被冲蚀表面材料的快速流失。

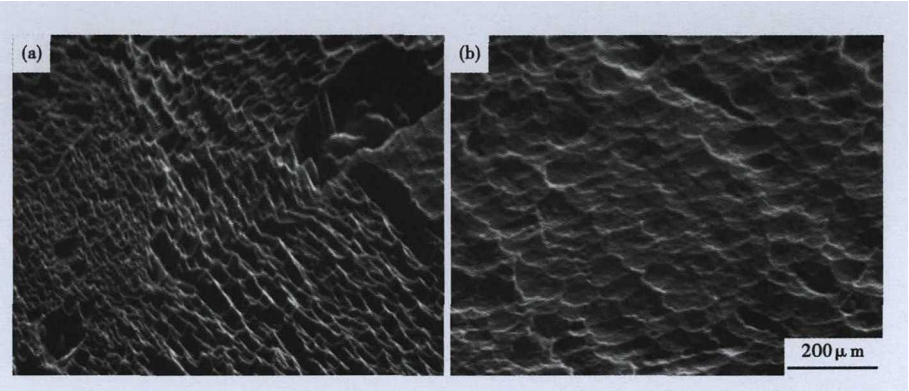


图5 冲蚀磨损后试验钢表面形貌(冲蚀速度13 m/s,冲蚀角度90°,冲蚀时间2 h): (a) No1, 316 钢; (b) No2, 增氮节镍型316 钢

Fig. 5 Morphology of surface of tested steels after wear-erosion test, erosion impact velocity 13 m/s, erosion impact angle 90°, erosion impact time for 2 h: (a) No1, 316 steel; (b) No2, adding nitrogen-saving nickel 316 steel

2.3 冲蚀时间对试样冲蚀磨损率的影响

图6为不同冲蚀时间下试样的磨损率。试验条件:室温,砂粒质量分数为20%的砂浆,固体颗粒直径150~200 μm,冲蚀角度为90°,冲蚀速度为13 m/s,冲蚀时间为2,4,6,8,10,12 h。

由图6可知,试样的冲蚀磨损率随着冲蚀时间的增加而增大,但是磨损率的增加速度逐渐减小,趋于平稳。在砂浆冲蚀初期,试样的磨损率随着冲蚀时间的延长而快速增加,这是因为砂浆中的冲蚀颗粒连续不断的冲击试样表面,试样表面的切削唇片

和碎屑被砂浆冲刷并快速脱落;当砂浆冲蚀时间继续延长,试样磨损率增长趋势逐渐放缓,这是因为随着砂浆的冲蚀,易于剥落的切削唇片和碎屑已经逐渐被冲刷掉,而砂浆中的固体颗粒对新形成的沟壑状冲蚀坑起到抛光的作用,又会使得部分试样表面逐渐光滑,达到冲蚀磨损平稳期。由图6(b)可知,在砂浆冲蚀初期,增氮降镍后的 No2 试样冲蚀磨损增加率小于 No1 试样;随着砂浆冲蚀时间的延长(>6 h), No1、No2 试样的冲蚀磨损增加率均大幅减小,但是 No2 试样的磨损增加率大于 No1 试样,这是因为增氮降镍增加了试样的耐冲蚀磨损性能,使得 No2 试样达到磨损平稳期的时间较长。

图7为冲蚀时间为12 h后,冲蚀磨损后试样的表面形貌。由图7可知, No1、No2 试样经过12 h的砂浆冲蚀后,表面形貌均较为粗糙,尤其是 No2 试

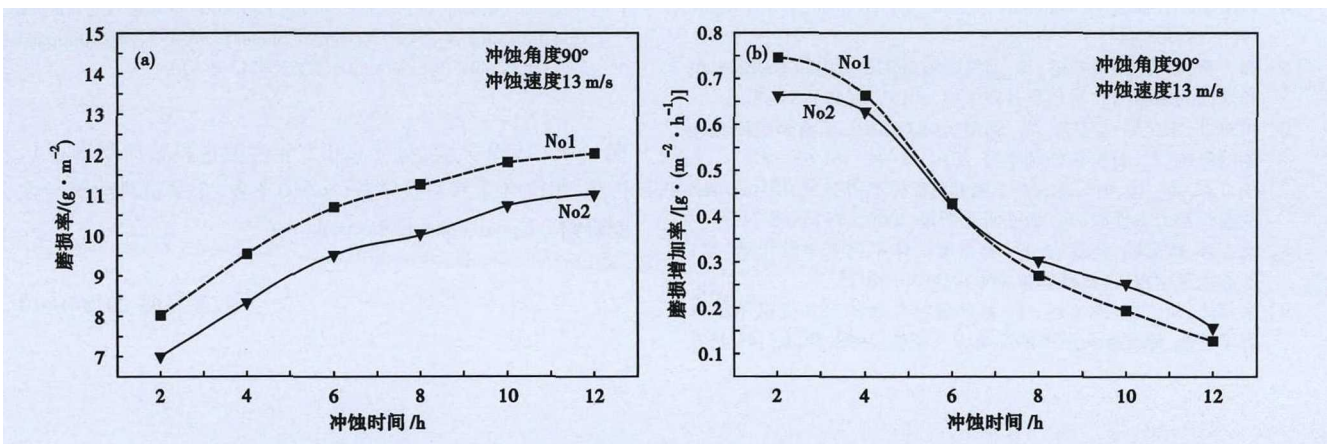


图6 冲蚀时间对316钢(No1)和增氮节镍型316钢(No2)磨损率(a)和磨损增加率(b)的影响

Fig. 6 Effect of erosion impact time on erosion rate (a) and slope of erosion rate (b) of 316 steel (No1) and adding nitrogen-saving nickel 316 steel (No2)

样,表面不再为较浅的冲蚀坑,而是类似与 No1 试样的沟壑状形貌,这是由于随着砂浆冲蚀时间的延长, No2 试样经过冲蚀颗粒不间断的累计冲刷,试样表面被破坏,由于试样冲蚀磨损的机理及规律相同,所以逐渐形成与 No1 试样相同的冲蚀形貌。但是图 7 中 No1、No2 试样的沟壑状形貌与图 3(a),图 5(a)中 No1 试样相比较浅,而且部分区域存在较为平整的高台状形貌,这是因为达到冲蚀平稳期后,砂浆中的冲蚀颗粒起到了一定的抛光作用,使得沟壑状的突出点逐渐被冲刷掉,形成较为光滑的冲蚀表面。

3 结论

(1) 奥氏体不锈钢的磨损率随着冲蚀角度的增大,出现了先上升,后下降,再上升的趋势,在 45° 与 90° 出现了两个峰值,当冲蚀角度为 90° 时,磨损率达到最大值。

(2) 奥氏体不锈钢的冲蚀磨损率随着冲蚀速度

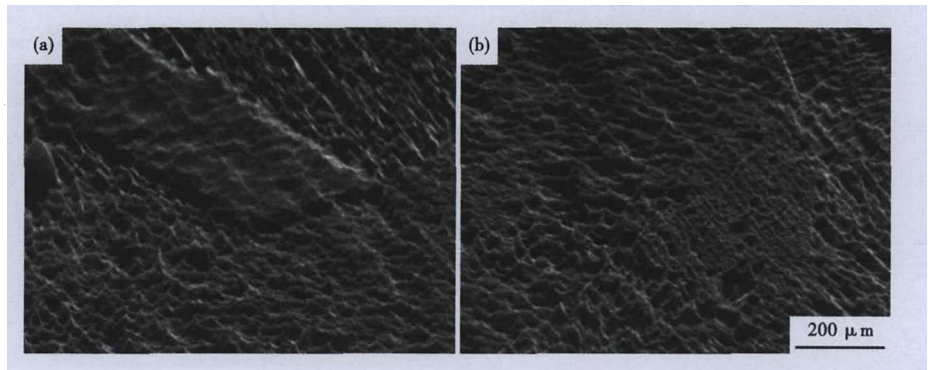


图 7 冲蚀磨损后试样表面形貌(冲蚀时间 12 h,冲蚀角度 90° ,冲蚀速度 13 m/s): (a) No1, 316 钢; (b) No2, 增氮节镍型 316 钢

Fig. 7 Morphology of surface of tested steels after wear-erosion test, erosion impact time for 12 h, erosion impact angle 90° and erosion impact velocity 13 m/s: (a) No1, 316 steel and (b) No2 adding nitrogen-saving nickel 316 steel

的增加而增大;随着冲蚀时间的延长而增大,但是磨损率的增加速度逐渐减小,趋于平稳。

(3) 增氮降镍对奥氏体不锈钢耐冲蚀磨损性能的规律没有影响,但是在相应的冲蚀条件下,均降低了材料的冲蚀磨损率。

国家自然科学基金项目(51174114);重庆市教委科学技术研究基金项目(KJ1730416);重庆工业职业技术学院内科研项目(CZY201721-YA)资助

参考文献

- [1] 李诗卓,董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京:机械工业出版社,1987:18-21.
- [2] 马颖,任峻,李元东,等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. 兰州理工大学学报,2005,31(1):21-25.
- [3] 谢文委,邓建新,周后明,等. 材料冲蚀磨损的数值模拟研究现状及展望[J]. 腐蚀与防护,2012,33(7):601-604.
- [4] Eyre T S. Treatise on Materials Science and Technology[J]. Wear, 1979,13:363-442.
- [5] 周莉,杨吉春,董梦瑶,等. 增氮降镍对 316 奥氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(10):83-88.
- [6] 侯东坡,宋仁伯,项建英,等. 固溶处理对 316L 不锈钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2010,31(12):61-65.
- [7] 李志,高谦,何冰,等. 节镍型奥氏体不锈钢 1Cr17Mn9Ni4N 的组织和力学性能[J]. 钢铁研究学报,2005,17(2):68-71.
- [8] 袁志钟,戴起勋,程晓农,等. 氮在奥氏体不锈钢中的作用[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2002,23(3):72-75.
- [9] 易邦旺,胡燕,郎文运,等. 氮含量对 Cr18Mn18N 无磁不锈钢力学性能、磁导率和组织的影响[J]. 钢铁,1998,33(3):43-45.
- [10] Dai Q X, Wang A D and Cheng X N, et al. Effect of Alloying Elements and Temperature on Strength of Cryogenic Steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 311(1/2):205-210.
- [11] 郎宇平,康喜范. 超级高氮奥氏体不锈钢的耐腐蚀性能及氮的影响[J]. 钢铁研究学报,2001,13(1):30-35.
- [12] Young-Hwan Park, Jong-Wan Kim and Sun-Koo Kim, et al. The Critical Amount of Nitrogen on the Formation of Gas Pores during Solidification of 25Cr-7Ni Duplex Stainless Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2003, 34:313-320.

周莉(1989-),女,硕士(2015年内蒙古科技大学毕业),讲师,2012年重庆科技学院(本科)毕业,金属材料组织与性能研究。E-mail: Zhouli89@yeah.net

收稿日期:2018-04-10