

KCJ-15 扬雪机搅笼镍基喷熔复合涂层的研究

曾锐^{1,2}, 林振荣², 张勇², 王瑞²

(1.解放军理工大学 野战工程学院, 南京 210007;
2.空军勤务学院 机场工程与保障系, 江苏 徐州 221000)

摘要:目的 在 KCJ-15 型扬雪机搅笼 NiCrBSiC 合金涂层的基础上, 添加硬质碳化钨颗粒, 并研究其在搅笼基体上的腐蚀、磨损规律。方法 制备 7 组碳化钨颗粒含量不同的镍基复合粉末, 分别在不同腐蚀液体中进行摩擦磨损实验, 随后选取抗磨性能最佳的一组, 分别进行不同载荷和不同滑动速度下的摩擦磨损试验。结果 在同一种腐蚀液体中, 喷熔层的摩擦系数随碳化钨含量的增加变化不大, 磨损率随碳化钨含量的增加先减小后增大, 其中浸泡在 HCl 和 NaCl 溶液中的试块喷熔层的摩擦系数和磨损率普遍偏高, 而浸泡在 NaOH 和 H₂SO₄ 溶液中的试块喷熔层的摩擦系数和磨损率普遍偏低。随着载荷的增加, 喷熔层的摩擦系数和磨损率增大。随着滑动速度的增加, 喷熔层的摩擦系数增大, 磨损率降低。结论 在 KCJ-15 型扬雪机搅笼 NiCrBSiC 合金涂层中, 添加碳化钨的最佳质量分数在 15%~25% 之间, 此时可获得最佳的抗磨性能。此外, 喷熔层的摩擦系数受到腐蚀液体、外部载荷和滑动速度的影响较大, 受碳化钨含量的影响较小。

关键词: 扬雪机搅笼; NiCrBSiC; 喷熔层; 碳化钨; 摩擦系数; 磨损率

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0106-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.018

NiCrBSiC Spray-fused Composite Coating of KCJ-15 Snow Lifting Mixer

ZENG Rui^{1,2}, LIN Zhen-rong², ZHANG Yong², WANG Rui²

(1.School of Field Engineering, PLA Univ of Sci& Tech, Nanjing 210007, China;
2.Department of Airfield Engineering, Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, China)

ABSTRACT: The work aims to study corrosion and wear law of NiCrBSiC/WC spray-fused composite coating of KCJ-15 snow lifting mixer. 7 groups of NiCrBSiC/WC composite powder with different WC mass fractions were prepared, and frictional wear experiments were carried out in different corrosive liquids. Then a group exhibiting best wear resistance was selected for frictional wear experiments under different load and at different sliding speed. In the same kind of corrosive liquid, friction coefficient of the spray-fused coating changed slightly with the increase of WC content, and the wear rate first decreased and then increased with the increase of WC content. The friction coefficient and wear rate of test block spray-welding coating soaked in HCl and NaCl solutions were generally high, while those of test block spray-welding coating soaked in NaOH and H₂SO₄ solutions were generally low. The friction coefficient and wear rate of spray-welding coating increased with the increase

收稿日期: 2016-10-23; 修订日期: 2017-03-22

Received: 2016-10-23; Revised: 2017-03-22

基金项目: 空军勤务学院青年科学基金 (KY2014F048B)

Fund: Air Force Logistics College Youth Science Foundation (KY2014F048B)

作者简介: 曾锐 (1980—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为机械装备。

Biography: ZENG Rui (1980—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: mechanical equipments.

of load. The friction coefficient increased and the wear rate decreased with the increase of sliding speed. When the WC content is between 15% and 25%, the best wear resistance can be obtained on NiCrBSiC alloy coating of KCJ-15 snow lifting mixer. The friction coefficient of the spray-fused coating is greatly influenced by corrosive liquid, external load and sliding speed, and slightly affected by WC content.

KEY WORDS: snow lifting mixer; NiCrBSiC; spray-fused coating; WC; friction coefficient; wear rate

KCJ-15 型扬雪机的工作原理是通过搅笼的旋转将积雪集中至风机, 然后从抛雪筒抛出。由于道面上存在坚硬的杂物, 而且积雪不均匀, 搅笼工作时会受到交变的摩擦力, 同时覆盖在搅笼上的积雪融化后, 也会不同程度地对搅笼产生腐蚀。据统计, 对于机械设备、冶金采矿和石油化工等领域, 腐蚀、磨损所造成的损失占总损失量的 15% 左右^[1], 因此为了保证扬雪机长时间的正常工作, 要求其搅笼具有优良的耐磨和防腐蚀性能。KCJ-15 型扬雪机搅笼采用机械性能优良的 45 号钢作为基体, 为了提高其耐磨性能, 一般可采用热喷熔或等离子熔覆等表面改性技术^[2-5], 给搅笼基体表面增加一层耐腐蚀、抗磨损性能优良的涂层。由于镍基合金复合材料具有良好的耐磨抗蚀性能, 在要求低、中温下耐蚀、耐磨的特殊场合, 采用简便的氧-乙炔焰喷熔 NiCrBSi 合金方法已得到广泛应用^[7-9], 非常适合野外作业的 KCJ-15 型扬雪机搅笼的快速维护修理。同时, 在 NiCrBSi 涂层中添加硬质颗粒将有助于搅笼涂层耐腐蚀、抗磨损性能的提高^[10-14]。本文在 NiCrBSiC 合金涂层的基础上, 添加硬质碳化钨颗粒, 并研究其在搅笼基体上的腐蚀、磨损情况。

1 实验

本实验所用的涂层材料为 NiCrBSi 与 WC 的复合粉末, 为了探寻 WC 含量对复合涂层材料性能的影响, 共制备 7 组复合粉末, 其中 WC 的质量分数分别为 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%。喷熔基体为 KCJ-15 型扬雪机搅笼上截取的钢板, 涂层材料 NiCrBSi 的成分如表 1 所示。

表 1 合金粉末涂层成分
Tab.1 Coating composition of alloy powder

Element	Si	B	Cr	Fe	C	Ni
Content	4.0	3.0	16.0	14.5	0.7	余量

将 NiCrBSi 与 WC 复合粉末均匀置于喷熔基体上, 选用 QH-2/h 型氧&乙炔喷熔枪进行喷熔, 形成试块。冷却后, 喷熔层的厚度控制在 2~3 mm, 并经磨削加工, 表面粗糙度小于 0.35 μm 。摩擦磨损试验均采用

SRV-4 微摩擦磨损试验机, 载荷设定为 150 N, 速度 0.05 m/s, 时间 15 min, 对偶件为直径 10 mm 的 Cr 合金钢球, 硬度为 74HRC。腐蚀液体选取了有代表性的盐酸、硫酸、氢氧化钠和氯化钠等四种溶液, 浓度均为 1 mol/L, 实验前, 将摩擦界面浸入腐蚀液体中 10 min 后取出。实验室室温 25 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 60%。

2 结果与分析

2.1 腐蚀条件下碳化钨含量对喷熔层的影响

把制备好的 7 组 WC 质量分数不同的试块, 经过腐蚀液体浸泡后, 分别在 SRV-4 试验机上进行摩擦磨损实验, 实验结果如表 2、表 3 所示。

表 2 NiCrBSi/WC 喷熔层在腐蚀条件下的摩擦系数
Tab.2 Friction coefficient of NiCrBSi/WC under corrosion condition

Solu- tion	5% WC	10% WC	15% WC	20% WC	25% WC	30% WC	35% WC
HCl	0.32	0.34	0.35	0.31	0.32	0.30	0.31
H ₂ SO ₄	0.14	0.12	0.10	0.08	0.09	0.08	0.09
NaOH	0.14	0.14	0.18	0.15	0.16	0.17	0.15
NaCl	0.30	0.29	0.27	0.26	0.25	0.26	0.27

表 3 NiCrBSi/WC 喷熔层在腐蚀条件下的磨损率
Tab.3 Wear rate of NiCrBSi/WC under corrosion condition

Solu- tion	5% WC	10% WC	15% WC	20% WC	25% WC	30% WC	35% WC
HCl	1.21	1.18	1.73	0.97	1.09	1.15	1.19
H ₂ SO ₄	1.03	1.11	0.91	0.69	0.71	0.77	0.76
NaOH	1.01	0.99	0.83	0.55	0.63	0.71	0.70
NaCl	1.32	1.02	0.91	0.82	0.87	0.90	0.91

由表 2 可知, 在同一种腐蚀液体中, 喷熔层的摩擦系数随碳化钨含量的增加变化不大。总体来看, 浸泡在 HCl 和 NaCl 溶液中的试块喷熔层的摩擦系数普遍偏高, 而浸泡在 NaOH 和 H₂SO₄ 溶液中的试块喷熔层的摩擦系数普遍偏低。这是由于 NaOH 和 H₂SO₄ 溶液对喷熔层表面的腐蚀作用不明显, 没有在表面形成不规则的腐蚀区域, 而且溶液本身对表面起到了润

滑的作用，从而使喷熔层的摩擦系数降低；而在 HCl 和 NaCl 溶液中，氯离子破坏了喷熔层表面的反应膜层，表面光滑性下降，从而导致喷熔层表面摩擦系数升高。

由表 3 可知，在同一种腐蚀液体中，喷熔层的磨损率随碳化钨含量的增加，呈现先减小后增大的趋势。总体来看，浸泡在 HCl 和 NaCl 溶液中的试块喷熔层的磨损率普遍偏高，而浸泡在 NaOH 和 H₂SO₄ 溶液中的试块喷熔层的磨损率普遍偏低，这与摩擦系数的变化规律相一致。碳化钨的加入使喷熔层整体的机械抗磨强度增大，但是碳化钨本身是一种强阴极相的导体化合物，它会加大喷熔层在腐蚀溶液中的腐蚀量，当碳化物的含量超过某一临界点时，增加的腐蚀作用将超过增大的抗磨作用，使喷熔层的磨损率增加。从实验中可以看出，这一拐点出现在 15%~25%

之间，经多次试验发现，其最小值对应碳化钨的质量分数较难精确确定，这是由于实验中受到喷熔复合粉末质量和操作人员无法精确实施喷熔作业等原因的影响^[15]。

为了更直观地了解不同碳化钨含量的复合涂层材料在腐蚀溶液中的表面情况，切取碳化钨质量分数为 10%、20%、30%试块的截面样品，在 Axiovert 40 MAT 金相显微镜下进行显微组织观察，如图 1 所示。当碳化钨的质量分数为 10%和 20%时，涂层孔隙较少，碳化钨的溶解情况良好，比较致密，这预示着其具有优良的抗磨损性能；当碳化钨的质量分数为 30%时，孔隙和夹杂明显增多，而且相当一部分碳化钨没有熔化，在腐蚀溶液中其抗磨损强度大幅降低；当碳化钨的质量分数进一步增加时，孔隙和夹杂将更加明显，其抗磨损性能也随之变差。

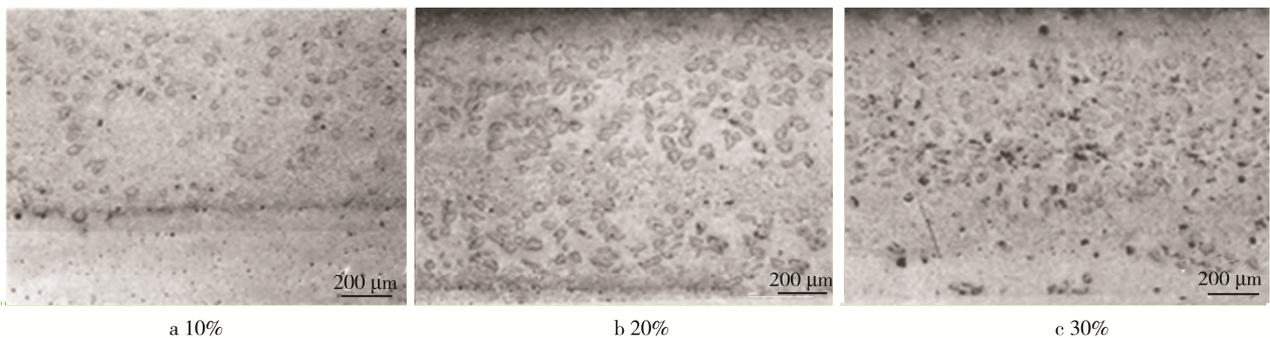


图 1 喷熔层截面
Fig.1 Section of spray-fused coating

2.2 腐蚀条件下外部载荷对喷熔层的影响

鉴于 WC 质量分数为 20%的 NiCrBSi 复合涂层在磨损实验中的优良表现，在外部载荷和滑动速度对喷熔层的影响实验中，均选取 WC 质量分数为 20%的复合涂层试块。将 5 组试块分别浸泡在腐蚀液体中，在 50~250 N 的载荷压力下，分别进行摩擦磨损实验，结果如表 4—5 所示，喷熔层表面的 SEM 图如图 2 所示。

表 4 载荷对 NiCrBSi/WC 喷熔层摩擦系数的影响
Tab.4 Effect of load on NiCrBSi/WC spray-fused coating friction coefficient

Solution	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N
HCl	0.17	0.22	0.28	0.33	0.35
H ₂ SO ₄	0.06	0.07	0.09	0.12	0.13
NaOH	0.10	0.10	0.12	0.14	0.17
NaCl	0.19	0.22	0.24	0.24	0.31

表 5 载荷对 NiCrBSi/WC 喷熔层磨损率的影响
Tab.5 Effect of load on NiCrBSi/WC spray-fused coating wear rate

Solution	×10 ⁻⁴ mm ³ /m				
	50 N	100 N	150 N	200 N	250 N
HCl	0.71	0.83	0.99	1.21	1.29
H ₂ SO ₄	0.19	0.49	0.73	0.92	1.01
NaOH	0.21	0.44	0.60	0.82	0.91
NaCl	0.47	0.69	0.80	1.10	1.17

由表 4—5 可知，在各组腐蚀液体中，喷熔层的摩擦系数和磨损率均随着载荷的增加而增大。由图 2 可知，由于载荷的作用，喷熔层表面出现了不同程度的擦伤和犁沟，增大了摩擦副之间的摩擦面积，载荷为 100 N 时的表面擦伤和犁沟程度明显比载荷为 50 N 时的更严重，导致摩擦系数随之增大。喷熔层磨损率增加的主要是由高载荷条件下机械磨损加剧造成的，同时随着载荷的不断增大，溶液的腐蚀作用相对于总磨损率的比例不断下降，机械磨损将成为喷熔层磨损的主要形式。此外，NiCrBSi/WC 复合喷熔涂层

的磨损主要是微切削形式, 外部施加载荷物体对复合喷熔涂层的切削作用受到 WC 硬质颗粒的影响, 尤其是复合喷熔涂层被切掉部分合金后, 凸起的 WC 硬质颗粒承担了较多的摩擦和磨损, 在一定程度上阻碍了摩擦副之间的切削作用, 从而使复合喷熔涂层获得了更好的抗磨损性能。

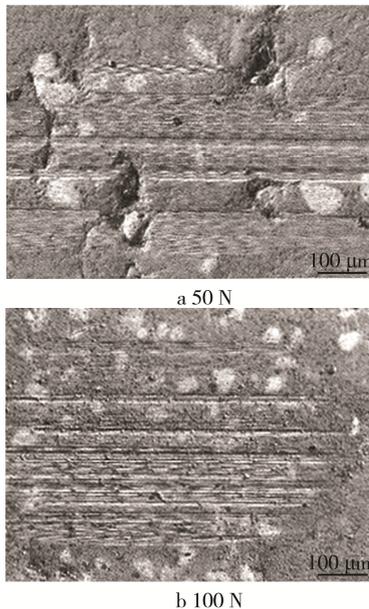


图 2 NiCrBSi/WC(20%)喷熔层在不同载荷下的磨损表面
Fig.2 Wear surface of NiCrBSi/WC(20%) spray-fused coating under different load

2.3 腐蚀条件下滑动速度对喷熔层的影响

将 5 组 WC 质量分数为 20% 的涂层试块分别浸泡在腐蚀液体中, 在 0.1~0.9 m/s 的滑动速度下, 分别进行摩擦磨损实验, 实验结果如表 6—7 所示, 喷熔层表面的 SEM 图片如图 3 所示。

表 6 滑动速度对 NiCrBSi/WC 喷熔层摩擦系数的影响
Tab.6 Effect of speed on NiCrBSi/WC spray-fused coating friction coefficient

Solution	0.1 m/s	0.3 m/s	0.5 m/s	0.7 m/s	0.9 m/s
HCl	0.21	0.39	0.30	0.29	0.30
H ₂ SO ₄	0.04	0.07	0.09	0.11	0.10
NaOH	0.11	0.15	0.16	0.16	0.17
NaCl	0.19	0.25	0.25	0.27	0.29

表 7 滑动速度对 NiCrBSi/WC 喷熔层磨损率的影响
Tab.7 Effect of speed on NiCrBSi/WC spray-fused coating wear rate

Solution	0.1 m/s	0.3 m/s	0.5 m/s	0.7 m/s	0.9 m/s
HCl	1.26	1.17	0.93	0.81	0.62
H ₂ SO ₄	0.91	0.82	0.67	0.61	0.52
NaOH	0.88	0.71	0.54	0.46	0.33
NaCl	1.08	0.95	0.86	0.77	0.69

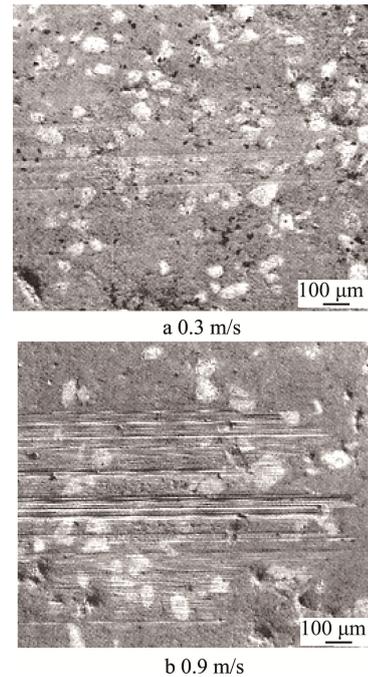


图 3 NiCrBSi/WC(20%)喷熔层在不同滑动速度下的磨损表面
Fig.3 Wear surface of NiCrBSi/WC(20%) spray-fused coating under different speed

由表 6—7 可知, 在各组腐蚀液体中, 喷熔层的摩擦系数随着滑动速度的增加而增大。由图 3 可以看出, 滑动速度为 0.9 m/s 时对试块表面的破坏程度明显比滑动速度为 0.3 m/s 时的大。这是由于随着滑动速度的增加, 喷熔层表面的犁削作用加剧, 使得摩擦副之间的摩擦加剧, 从而导致摩擦系数呈增加的趋势。喷熔层的磨损率随着滑动速度的增加呈减小的趋势。这是由于当滑动速度较低时, 喷熔层的表面温度较低, 反应膜的形成速度慢, 无法起到保护喷熔层的作用; 而当滑动速度增大后, 喷熔层的表面温度升高, 反应膜的形成速度加快, 迅速覆盖在喷熔层表面, 起到了很好的保护作用, 因此喷熔层磨损率也随之略有降低。

3 结论

1) 在同一种腐蚀液体中, 喷熔层的摩擦系数随碳化钨含量的增加变化不大, 喷熔层的磨损率随碳化钨含量的增加呈现先减小后增大的趋势, 碳化钨的最佳质量分数在 15%~25% 之间。

2) 试块浸泡在 HCl 和 NaCl 溶液中, 喷熔层受氯离子的腐蚀作用, 摩擦系数和磨损率普遍偏高。而试块浸泡在 NaOH 和 H₂SO₄ 溶液中, 喷熔层腐蚀不明显, 且有润滑的效果, 摩擦系数和磨损率普遍偏低。

3) 腐蚀液体中, 增加载荷会加剧喷熔层表面擦伤和犁沟的程度, 使喷熔层的摩擦系数和磨损率增大。增加滑动速度会加剧喷熔层表面的犁削作用和加

快反应膜的形成速度,使喷熔层的摩擦系数增大,磨损率降低。

参考文献:

- [1] 姜晓霞,李诗卓,李曙. 金属的腐蚀磨损[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 1—3.
JIANG Xiao-xia, LI Shi-zhuo, LI Shu. Corrosion and Wear of Metallic Materials[M]. Beijing: Beijing Industry Press, 2000: 1—3.
- [2] KIM H H. Assessment of Wear Performance of Flame Sprayed and Fused Ni-based Coatings[J]. Surface and Coating Technology, 2003, 72(2/3): 262—269.
- [3] 卢金斌, 弓金霞, 彭竹琴. 等离子熔覆添加碳化钨的铁基合金涂层的研究[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 4—8.
LU Jin-bin, GONG Jin-xia, PENG Zhu-qin. Study on the Coating by Plasma Cladding Fe-based Alloy Added WC [J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 4—8.
- [4] ZHU Liu, LI Jian, WU Tao. Preparation of WC-Co Composite Powder by Electroless Plating and Its Application in Laser Cladding[J]. Materials Letters, 2006, 60: 1956—1959.
- [5] TOBAR M J, ALVAREZ C, AMADO J M. Morphology and Characterization of Laser Clad Composite NiCrBSi-WC Coatings on Stainless Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200: 6313—6317.
- [6] 门志慧, 苏义祥, 梅丽文. 金属抗磨蚀 Ni67 喷焊材料及其在水轮机叶片上的应用[J]. 焊接, 2004(3): 23—26.
MEN Zhi-hui, SU Yi-xiang, MEI Li-wen. Abrasion Resisting Spray Welding Material Ni67 and Its Application to Blade of Hydraulic Turbine[J]. Welding & Joining, 2004(3): 23—26.
- [7] GLADSTON T M, FREDEFICO A P. Wear and Corrosion Resistance of NiCrBSiC Self-fluxing Coatings with the Addition of Hard Particles[J]. Heat treatment, 2013, 28 (1): 12—15.
- [8] ZHAO W M, WANG Y, HAN T, et al. Electrochemical Evaluation of Corrosion Resistance of NiCrBSi Coatings Deposited by HVOF[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 183: 118—125.
- [9] MIGUEL J M, GUILLEMANY J M, VIZCAINO S. Tribological Study of NiCrBSi Coating Obtained by Different Processes[J]. Tribology International, 2003, 36: 181—187.
- [10] 吴有伍, 谭兴龙, 吴琴. 铸造碳化钨添加量对镍基复合喷熔涂层性能的影响[J]. 铸造, 2013, 62(9): 874—877.
WU You-wu, TAN Xing-long, WU Qin. Effect of the Casting WC Powder Content on the Performance of WC Reinforced Ni-based Spray-fused Coating[J]. Foundry, 2013, 62(9): 874—877.
- [11] 王群, 向晶, 伍细斌. 细 WC 添加量对 Ni 基 WC 喷熔涂层性能的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(12): 57—61.
WANG Qun, XIANG Jing, WU Xin-bin. Effect of Fine WC Powder Content on the Performance of WC Reinforced Ni-based Spray-welding Coating[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(12): 57—61.
- [12] 任长春, 王群, 杨凤根. WC/17Co 含量对 Ni 基喷焊涂层性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012(3): 8—11.
REN Chang-chun, WANG Qun, YANG Feng-gen. Effects of WC/17Co Powder Content on Properties of WC Reinforced Ni-based Spray-welding Coating[J]. Casting Forging Welding, 2012(3): 8—11.
- [13] 孙宏柱, 谭业发, 吴刚. 颗粒增强镍基合金喷熔层腐蚀磨损行为及其人工神经网络预测分析[J]. 机械制造与研究, 2005, 34(6): 55—57.
SUN Hong-zhu, TAN Ye-fa, WU Gang. Corrosive Wear Behavior of Particles Reinforced Nickel-based Coatings and Its Forecast Analysis Based on Artificial Neural Networks[J]. Machine Building and Automation, 2005, 34 (6): 55—57.
- [14] 郭学兵, 魏超, 葛长路. 颗粒增强镍基复合涂层的耐磨性能研究[J]. 煤矿机械, 2008, 29(2): 41—42.
GUO Xue-bing, WEI Chao, GE Chang-lu. Study of Abrasive Wear Resistance of Reinforced Ni-alloy Composite Coating[J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(2): 41—42.
- [15] 孙宏柱, 谭业发, 吴刚. 镍基合金喷熔层摩擦学行为与机制的研究[J]. 机械制造与研究, 2005, 34(4): 12—15.
SUN Hong-zhu, TAN Ye-fa, WU Gang. Tribological Behavior and Mechanisms of Ni-based Alloy Spray-welding Coatings[J]. Machine Building and Automation, 2005, 34(4): 12—15.