doi：10.11933/j.issn.1007-9289.2016.01.007

感应重熔-热处理对镍基碳化钨涂层的影响

张生欣[a]，狄 平[a]，徐梦廓[a]，朱世根[a,b]
（东华大学 a. 机械工程学院，b. 纺织装备教育部工程研究中心，上海 201620）

摘 要： 为了进一步挖掘镍基碳化钨涂层的潜能，在 40Cr 基材上利用火焰喷涂制备 Ni60＋35％WC 复合涂层并对涂层进行感应重熔及热处理，利用扫描电镜（SEM）、显微硬度计和摩擦磨损试验机分析测定了涂层的显微组织、显微硬度及摩擦磨损性能。结果表明，感应重熔使涂层与基材形成良好的冶金结合，涂层致密，硬度、耐磨性显著优于基材。经淬火及回火后，涂层硬度有所提高。850 ℃淬火，400 ℃回火的涂层硬度最高，达到 866 $HV_{0.1}$，耐磨性也最好，磨损量仅为基材的 43％。

关键词： 火焰喷涂；感应重熔；镍基涂层；耐磨性；显微硬度
中图分类号： TG174.442 **文献标志码：** A **文章编号：** 1007-9289(2016)01-0046-05

Effects of Induction Remelting and Heat Treatment on WC Reinforced Ni-based Alloy Coatings

ZHANG Sheng-xin[a], DI Ping[a], XU Meng-kuo[a], ZHU Shi-gen[a,b]
(1a. College of Mechanical Engineering, 1b. Engineering Research Center of Advanced Textile Machinery, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620)

Abstract: To excavate the potential of Ni-based WC coatings further, Ni60＋35％WC composite coatings was prepared by flame spaying on 40Cr, induction remelting and heat treatment were then carried on the coatings. The microstructure, microhardness and wear performance of the coatings were studied by scanning electron microscope (SEM), microhardness tester, and friction and wear testing machine. Results show that there exists metallurgical bonding between the coatings and the substrate after induction remelting. The microstructure of the coatings is compact, and the microhardness and wear resistance of the coatings are significantly higher than the substrate. The microhardness of the coatings is improved after being quenched and tempered. When being quenched at 850 ℃ and tempered at 400 ℃, the microhardness of the coatings is the highest, up to 866 $HV_{0.1}$, its wear resistance is the best, and the abrasion loss is only 43％ that of the substrate.

Keywords: flame spaying; induction remelting; Ni-based alloy coating; wear resistance; microhardness

0 引 言

镍基自熔性合金由于其良好的耐磨耐蚀性、抗氧化性和优良的工艺性，被广泛地应用于材料表面防护和强化领域[1-2]。WC 由于其耐磨性好、硬度高、塑性好并与镍基合金相互润湿，结合强度好，被广泛用作热喷涂镍基合金的增强相，目前常在镍基自熔性合金中加入微米级的碳化钨粉末，以获得耐磨效果较为理想的金属-陶瓷复合涂层[3-5]。

火焰喷涂制得的涂层因孔洞多、与基材结合强度低等缺点，常需进行重熔。感应重熔易控制、加热频率高、涂层能迅速熔化，且对基材热影

收稿日期： 2015-09-23；**修回日期：** 2016-01-13
通讯作者： 朱世根(1953－)，男(汉)，教授，博士；**研究方向：** 成型制造与强化；**Tel：** (021) 6779 2813；**E-mail：** sgzhu@dhu.edu.cn

网络出版日期： 2016-01-30 17：39；**网络出版地址：** http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160130.1739.014.html
引文格式： 张生欣，狄平，徐梦廓，等. 感应重熔-热处理对镍基碳化钨涂层的影响[J]. 中国表面工程，2016，29(1)：46-50. ZHANG S X, DI P, XU M K, et al. Effects of induction remelting and heat treatment on WC reinforced Ni-based alloy coatings[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 46-50.

响小，得到广泛的应用[6-7]。但感应重熔是典型的高温快冷过程，类似于淬火，涂层的组织、应力状态等是不稳定的。热处理能够改善热喷涂涂层的组织和性能，张发云等[8]人采用电弧喷涂技术在低碳钢 Q235 基体上制备了铁基 TiC 复合涂层并进行热处理，得出 500～700 ℃热处理能够改善涂层的耐磨性；王立生等[9]的试验表明热处理提高了镍基合金涂层的硬度和界面结合强度；洪永昌等[10]的试验则显示热处理使得镍基合金喷焊层硬度得到了提高。

目前对热喷涂镍基碳化钨涂层进行热处理的研究较少，且重点在于对重熔后的涂层直接进行回火。文中对火焰喷涂在 40Cr 基体上制备的镍基碳化钨复合涂层进行感应重熔，又进行了淬火和回火处理，对涂层的组织和性能进行了初步的研究，以期为进一步的研究提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验用基材为退火态 40Cr，尺寸 Φ 30 mm×10 mm。涂层材料选用市售 Ni60＋WC35 粉末，粒度为 80～106 μm（－150～＋320 目），其中 Ni60 质量分数为 65%，WC 质量分数为 35%。Ni60 的化学成分如表 1 所示：

表 1　Ni60 的化学成分

Table 1　Chemical composition of Ni60 (w/%)

C	Cr	B	Si	Fe	Ni
0.7-1.0	15-18	3.0-4.5	3.5-5.5	≤15	Bal.

1.2　试验方法

40Cr 基材试样经净化和喷砂处理后，采用上海大豪瑞法喷涂机械有限公司生产的粉末火焰喷涂枪进行喷涂。氧气压力 0.4～0.5 MPa，乙炔压力 0.07～0.08 MPa，喷嘴距试样表面约 200 mm，喷涂枪与试样的角度约 90°，试样预热温度 100～200 ℃。喷涂过程中尽量保持试样表面涂层厚度均匀，获得涂层厚度 0.7～1.0 mm。利用 JQ25KW 型高频感应炉对喷涂完毕的试样进行感应重熔，设备功率为 25 kW，输入电压 380 V，频率 50～60 Hz，感应线圈为 3 匝，直径 40 mm。随后部分试样进行淬火并回火，淬火温度 850 ℃，保温 10 min 后油冷，回火温度分别为 200、400、600 ℃，保温 2 h。

试样利用线切割制备成小块金相试样和磨损试样，经镶嵌、预磨和抛光后，进行组织观察和性能测试：利用 HXS-1000A 型显微硬度计测量涂层到基体的截面硬度，载荷 100 g，保压 15 s；利用带有 OXFORD 能谱仪的 Quanta-250 型环境扫描电镜进行涂层截面组织形貌观察及元素线分布分析；利用 HSR-2M 型高速往复摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验，对磨球材料为 GCr15，直径 10 mm，硬度约 61 HRC，加载载荷50 N，运行速度 200 cycle/min，试验时间 30 min。磨损前后，试样用丙酮、乙醇清洗吹干，用精度为 0.1 mg 的天平进行称量，采用失重法并观察磨损形貌评价涂层的耐磨性。

2　结果与分析

2.1　涂层的显微硬度

图 1 为涂层试样从表面到基体的显微硬度分布图，图中折线每个节点均为相同层深 5 个测试点的平均值。由图可见，涂层截面的硬度随距表面距离的增大先上升后下降，仅经感应重熔的涂层截面硬度最低，其平均值为 806 $HV_{0.1}$，感应重熔后又经淬火，200、400、600 ℃回火的涂层截面硬度平均值分别为 825、866、843 $HV_{0.1}$，400 ℃回火的涂层截面硬度平均值最大，较热处理前提高约 60 $HV_{0.1}$。

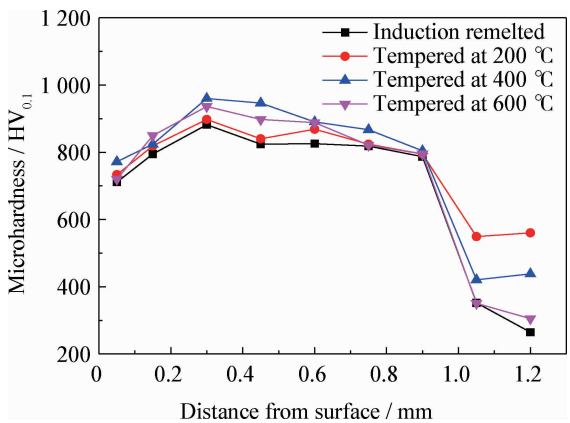


图 1　涂层截面显微硬度

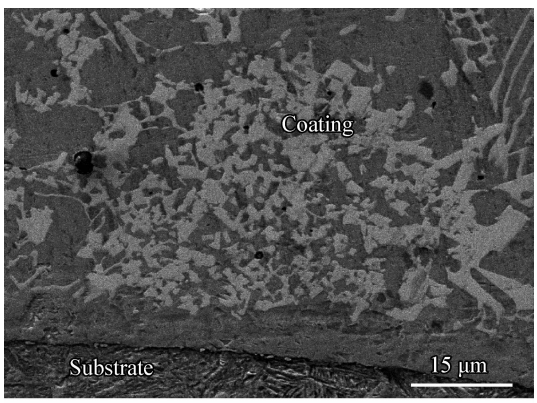
Fig. 1　Microhardness of the cross section of the coatings

分析认为涂层粉末中存在 C、Cr、B、Si 等元素及 WC，重熔时温度较高，合金元素一方面溶解进入固溶体起到强化作用，形成以 γ-Ni 固溶体为基体，WC 颗粒为增强相的复合喷焊层；另一方

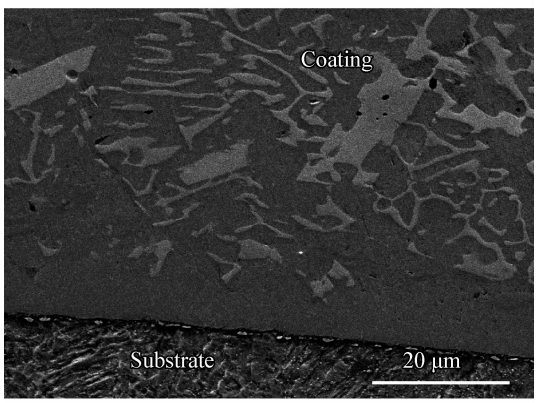
面在冷却过程中 C、Cr、B 等合金元素形成一些细小的硬质相，如 Cr_3C_2、B_4C、Cr_7C_3 等，这些硬质相弥散在固溶体间起到强化作用，因此 Ni 基 WC 复合涂层有较高的硬度[11-12]。涂层表面因质量较差，组织疏松而硬度较低。在淬火和回火过程中，合金元素充分扩散，大量碳化物、硼化物析出，并有新的硬质相产生，同时由于涂层合金中 Cr、Si、C 等元素含量较高，促使涂层产生了二次硬化现象，涂层得到了进一步的强化，因而热处理后涂层的硬度又得到了提高[13]。而温度过高则会发生涂层晶粒的长大和硬质粒子的聚集、长大，使得涂层硬度下降。

2.2 涂层的组织形貌

图 2 是涂层经感应重熔及淬火并 400 ℃回火后截面的扫描电镜(SEM)照片。从图 2(a)可见，涂层经感应重熔后，组织致密，其中的孔洞、杂质较少，涂层和基体界面处无机械嵌合而产生了过渡带，形成了冶金结合，涂层中出现了呈多边形的白亮颗粒。图 2(b)显示经过 850 ℃淬火及400℃、2h回火后，涂层变得更加致密平整，孔洞更少，涂层与基体间的过渡带平滑且变宽，部分白亮颗粒在原来的块状周围出现了须状。



(a) Induction remelting

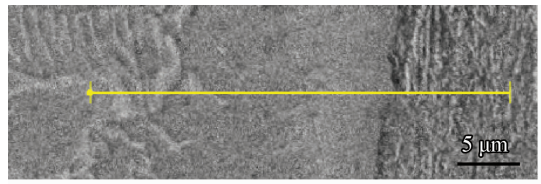


(b) Tempered at 400 ℃

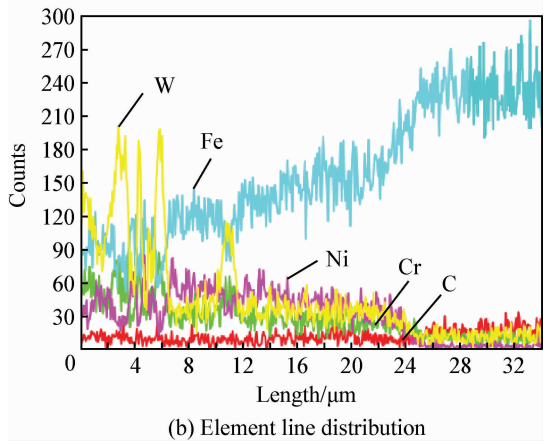
图 2 涂层截面的 SEM 形貌

Fig. 2 SEM morphologies of cross section of the coatings

图 3 是感应重熔的涂层与基体界面处的元素线分布。由图可见，感应重熔使涂层和基材界面处发生了元素互扩散，即基材中的 Fe、C 元素向涂层扩散，而涂层中的 Ni、Cr、W 元素向基材扩散，互扩散使界面处形成了冶金结合，还形成了富碳区，降低了界面两侧材料的性能差异，提高了涂层与基体的结合强度[12]。



(a) Cross section morphology



(b) Element line distribution

图 3 涂层截面元素线分布

Fig. 3 Element line distribution of cross section of the induction remelting coating

由元素线分布特征结合粉末成分可知感应重熔涂层中存在的白亮块状物为 WC，WC 颗粒与涂层形成良好的结合且在局部分布较多。这是由于镍基自熔性合金熔点较低，在重熔过程中，涂层及基体表面浅层熔化，液态合金和 40 Cr 基体相互渗透、扩散，凝固后涂层形成致密组织且与基体形成冶金结合。WC 颗粒因熔点高而未熔，仅少量发生分解与氧化，故保持原有的形状。同时可能由于 WC 比重大、易团聚以及喷涂粉末不均匀造成涂层局部 WC 较多的现象。由于高温过程促进元素扩散和 WC 的分解，因而经过淬火和回火的热处理后，涂层与基体之间元素的互扩散距离有所增大。部分 WC 发生了分解、氧化或与镍基合金中的元素发生了反应，故呈现须状。

2.3　涂层的摩擦磨损性能

对 40Cr 基体、重熔的涂层和重熔后淬火并 400 ℃回火的涂层进行摩擦磨损对比。带涂层的试样先预磨 10 min，以减少表面疏松层对结果的影响。经两次摩擦磨损试验后，3 种试样的平均磨损量见图 4。由图 4 可见，40Cr 试样的磨损量最大，感应重熔涂层的磨损量为 40Cr 的 54%，热处理后的涂层磨损量仅为 40Cr 的 43%，有涂层的试样耐磨性大幅提高。

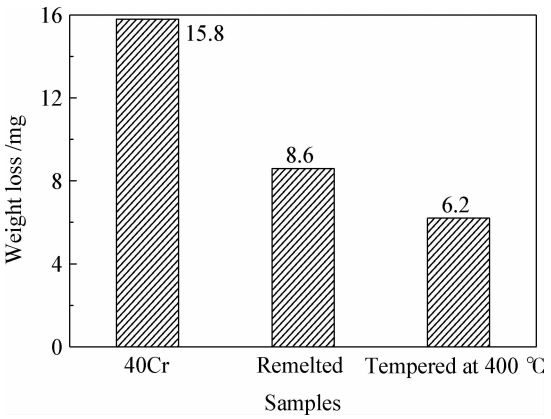


图 4　不同试样的磨损失重比较

Fig. 4　Comparision of the wear weight loss of the samples

图 5 为试样磨损后的表面形貌。从中可以更直观地看出试样表面摩擦磨损性能的优劣。图 5(a)中，40Cr 表面的划痕深且宽，平直而连续，表面有明显被外物挤压的痕迹。图 5(b)(c)中，涂层表面疏松层磨掉后，致密部分的划痕浅、窄而不连续，表面无外物明显压入的痕迹。这是由于 40Cr 硬度低，外来磨粒容易压入表面，对其进行挤压，留下深的犁沟。而镍基 WC 复合涂层中 WC 和其他硬质相的弥散强化和元素的固溶强化作用，使得涂层具有较高的硬度，磨粒嵌入表面的深度小，部分磨粒在涂层表面滚动，不能对涂层进行犁削，总体减弱了犁沟效应，减少了对涂层的磨损。即使有部分磨粒切入涂层基体，犁削作用也会在 WC 等硬质颗粒处中断，同时部分磨粒在犁削过程中被压碎或磨损，大大减弱其对涂层的犁削能力，进而减弱了对涂层的磨损[5,14]。涂层中镍基合金起基体和支撑作用，其中分布的 WC 和其他硬质相成为承载磨损的主体，这些硬质相能够有效地阻碍磨粒对涂层的犁削作用，大大提高涂层的耐磨性。

图 5(c)中涂层的划痕较图 5(b)中划痕浅而窄，划痕的连续性更差。分析认为，经淬火和 400 ℃回火后，一方面涂层组织得到改善，残余应力减少，利于涂层抵抗疲劳破坏；另一方面涂层中析出了更多的碳化物和硼化物，且在涂层中均匀分布，同时产生二次硬化，提高了涂层的硬度，抵抗挤压和微观切削的能力增强，利于磨损失重的下降[13]。热处理后，涂层中硬质相的增多且分布均匀，提高了涂层的硬度及硬度均匀性，在摩擦磨损过程中，硬质点更有效地阻止了对涂层的犁削作用，进而使得涂层具有更好的耐磨性。

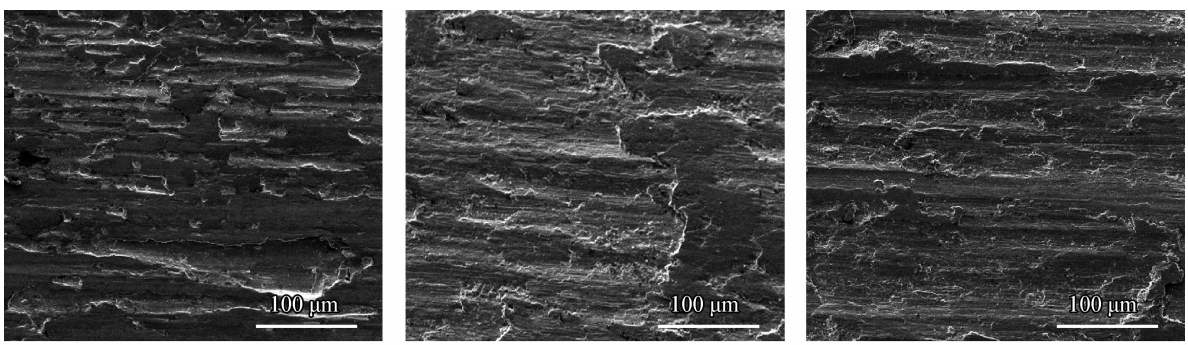


图 5　试样表面磨损 SEM 形貌

Fig. 5　SEM morphologies of the worn surfaces of the samples

3　结　论

(1) 火焰喷涂 WC 增强 Ni60 复合涂层经感应重熔，涂层组织致密，与基体形成良好的冶金结合。由于合金元素的固溶强化及 WC 等硬质相的弥散强化作用，涂层具有较高的硬度和良好

的耐磨性。

(2) 感应重熔的涂层经 850 ℃淬火和回火后,硬质相增多,涂层硬度提高,且经 400 ℃、2 h 回火的涂层硬度最高,其耐磨性也优于感应重熔后的涂层。

参考文献

[1] 张乐,陈美英,高峰,等. 预涂和感应重熔制备 Ni60 熔覆层的研究[J]. 热喷涂技术,2011,3(1):52-57.
ZHANG L, CHEN M Y, GAO F, et al. Study on Ni60 cladding layer made by pre-coating and induction remelting [J]. Thermal Spray Technology, 2011, 3(1): 52-57 (in Chinese).

[2] 张红霞,赵红利,夏建元,等. 感应重熔 Ni60/WC 涂层的界面组织与耐磨性研究[J]. 特种铸造及有色合金,2011,31(2):107-109.
ZHANG H X, ZHAO H L, XIA J Y, et al. Microstructure and interface morphology as well as wear behavior of induction remelting Ni60/WC composite coating[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(2): 107-109 (in Chinese).

[3] 王群,陈振华,丁彰雄,等. 镍基碳化钨喷焊涂层组织与磨损性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2009,36(4):57-60.
WANG Q, CHEN Z H, DING Z X, et al. Microstructure and wear performance of WC reinforced Ni-based spraying-welding coating[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(4): 57-60 (in Chinese).

[4] 董晓强,王永,张楠楠,等. 火焰重熔对镍基碳化钨涂层显微结构及性能的影响[J]. 热加工工艺,2013,42(12):154-157.
DONG X Q, WANG Y, ZHANG N N, et al. Effect of oxyacetylene flame remelting on microstructure and performance of Ni-based WC coating[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(12): 154-157 (in Chinese).

[5] 陈志刚,朱小蓉,汤小丽,等. 火焰喷涂重熔 Ni 基 WC 复合涂层的耐磨性能试验研究[J]. 物理学报,2007,56(12):7320-7329.
CHEN Z G, ZHU X R, TANG X L, et al. Experimental study of wear resistance of nickel based WC composite coating prepared by flame spraying and remelting[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(12): 7320-7329 (in Chinese).

[6] 安树春,程汉池,栗桌新,等. 热喷涂涂层的重熔后处理工艺研究进展[J]. 表面技术,2009,38(2):73-77.
AN S C, CHENG H C, LI Z X, et al. Progress of post-remelting technology for hot sprayed coating[J]. Surface Technology, 2009, 38(2): 73-77 (in Chinese).

[7] 张梦清,张伟,于鹤龙,等. 不同方法制备 NiCrBSi 涂层的结构与摩擦学性能[J]. 中国表面工程,2014,27(6):75-81.
ZHANG M Q, ZHANG W, YU H L, et al. Microstructure and tribological properties of NiCrBSi coatings prepared by different methods[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(6): 75-81 (in Chinese).

[8] 张发云,贺定勇,蒋建敏,等. 热处理对铁基 TiC 复合涂层的组织及磨损性能的影响[J]. 中国表面工程,2014,27(3):81-85.
ZHANG F Y, HE D Y, JIANG J M, et al. Influence of heat treatment on microstructure and wear behavior of Fe-TiC composite coatings[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(3): 81-85 (in Chinese).

[9] 王立生,林涛,侯婷,等. 热处理对镍基合金涂层与基体结合界面的影响[J]. 北京科技大学学报,2011,33(1):59-64.
WANG L S, LIN T, HOU T, et al. Effect of heat treatment on interfaces between Ni-based alloy coatings and substrates[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(1): 59-64 (in Chinese).

[10] 洪永昌,王明辉. 激光重熔和时效处理的镍基合金热喷焊层组织和性能的研究[J]. 机械工程学报,2012,48(10):75-81.
HONG Y C, WANG M H. Research of Microstructure and Properties of Ni-based alloy hot sprayed-welding layers by laser remelted and aging treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 75-81 (in Chinese).

[11] 鲍君峰,于月光,刘海飞,等. 火焰喷焊 Ni 基 WC 复合涂层的性能研究[J]. 矿冶,2006,15(4):27-29.
BAO J F, YU Y G, LIU H F, et al. Study on properties of flame spray welded Ni-based WC composite coating[J]. Mining & Metallurgy, 2006, 15(4): 27-29 (in Chinese).

[12] 于美杰,王成国,孙宏飞,等. WC 增强镍基复合喷焊层的组织与磨粒磨损性能研究[J]. 材料热处理学报,2006,27(3):116-120,147.
YU M J, WANG C G, SUN H F, et al. Microstructure and wear performance of WC reinforced Ni-based composite coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(3): 116-120, 147 (in Chinese).

[13] 王宏宇,许晓静,陈康敏,等. 中温回火对钛基体上镍基喷焊涂层组织和性能的影响[J]. 焊接学报,2006,27(2):51-54,58.
WANG H Y, XU X J, CHEN K M, et al. Influence of medium-tempering treatment on microstructure and properties of Ni-based spray-welded coating on titanium substrate[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2006, 27(2): 51-54, 58 (in Chinese).

[14] XU M K, ZHU S G, DING H. Electrical contact strengthening of induction-clad Ni-40% WC composite coatings on 40Cr substrates[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 279: 32-38.

(责任编辑:王文宇)