

42CrMo 钢火焰喷涂 Ni60/WC 涂层的电接触强化研究

李俊, 范金辉, 徐梦廓, 朱世根

(东华大学 机械学院 纺织装备教育与研究中心, 上海 201620)

摘要: **目的** 研究电接触强化对氧乙炔火焰喷涂后 42CrMo 基体表面涂层组织与性能的影响, 以改善涂层与基体之间的结合强度, 提升基体表面性能。**方法** 利用氧乙炔火焰喷涂, 在基体表面制备 Ni60/WC 涂层, 再进行电接触强化。通过金相显微镜、扫描电镜及能谱分析等方式, 对涂层及基体进行显微组织观察和物相分析, 利用维氏显微硬度仪测量涂层到基体的硬度分布, 并对电接触强化前后的数据进行对比分析。**结果** 在热喷涂涂层厚度一定的情况下, 经 15 kA 电流强度电接触强化后, 涂层的致密性显著提高, 孔隙明显减少, 与基体接触部分的界面缝隙消失, 结合方式发生改变。涂层硬度均匀性改善明显, 维氏硬度显著提高, 由原来 400HV 提升至 720HV 左右。涂层内部形成了 Cr 元素聚集区, W 元素扩散明显, 形成了合金元素碳化物, 对涂层起到弥散强化作用。**结论** 电接触强化能显著提高涂层性能与质量, 改变涂层与基体之间的结合方式。

关键词: 氧乙炔火焰喷涂; 电接触强化; Ni60/WC 涂层; 界面结合强度; 复合表面强化; 42CrMo

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0065-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.010

Electric Contact Strengthening of Flame Spraying Ni60/WC Coating on the Surface of 42CrMo Steel

LI Jun, FAN Jin-hui, XU Meng-kuo, ZHU Shi-gen

(Textile Equipment Education and Research Center, College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the effect of electric contact strengthening (ECS) on microstructure and properties of 42CrMo substrate surface coating after oxyacetylene flame spraying so as to improve the bonding strength between coating and substrate and the surface properties of the substrate. **Methods** Ni60/WC coating was prepared on the surface of 42CrMo steel by oxyacetylene flame spraying, and the coating was strengthened by ECS technology. The microstructure of coating and substrate was observed and analyzed by metallographic microscope, SEM and EDS. The hardness from coating surface to substrate was measured by vickers hardness tester. Data got before and after ECS were analyzed. **Results** With the flame spraying coating thickness controlled, dense coating got raised and the pore reduced significantly while the interface between the substrate and coating disappeared because of

收稿日期: 2016-03-20; 修订日期: 2016-06-03

Received: 2016-03-20; Revised: 2016-06-03

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目 (B602)

Fund: Supported by the Program of Key Subjects Construction in Shanghai (B602)

作者简介: 李俊 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为零件成型及其高性能化。

Biography: LI Jun (1990—), Male, Master, Research focus: material molding and its high performance.

通讯作者: 朱世根 (1963—), 男, 教授, 博导, 研究方向为成形制造与强化。

Corresponding author: ZHU Shi-gen (1963—), Male, Professor, Doctor tutor, Research focus: material forming manufacturing and strengthening.

the binding mode changing after ECS by 15 kA current strength. After strengthening by ECS technology, the hardness uniformity was greatly improved and the Vickers hardness was improved from 400HV to 720HV. Dispersion strengthening appeared as the carbide phase was formed due to the Cr element's gathering and W element's diffusion. **Conclusion** The ECS technology can upgrade the performance and quality of the coating and change the binding mode of the interface.

KEY WORDS: oxyacetylene flame spraying; ECS; Ni60/WC coating; interfacial bonding strength; composite surface strengthening; 42CrMo

Ni60/WC 涂层是一种镍基陶瓷颗粒增强体复合涂层。其中, Ni60 是自熔性镍基合金, 拥有很好的涂覆性及优良的耐磨性、耐蚀性、抗高温氧化性等综合性能^[1-2]。WC 陶瓷颗粒具有超高硬度, 受到了很多科研工作者的青睐^[3-5]。

氧乙炔火焰喷涂是采用氧乙炔燃烧火焰作为热源, 使用粉末作为喷涂材料, 利用压缩气流将经过瞬间加热熔融的粉末材料喷射沉积到经过预处理的基体表面, 形成涂层的一种喷涂方法。它具有设备简单、工艺操作简便、应用广泛、适用性强等优点, 但涂层的孔隙率大, 且与基体之间的结合强度不高, 难以适应复杂恶劣的使用环境^[6]。

电接触强化是利用通电情况下强烈的电阻热对材料表面进行改性的工艺方法, 它具有操作简单、能量利用率高、加热速度快、工件变形小等优点,

在工业生产中具有一定的应用价值^[7]。电接触强化能够有效提高涂层致密度, 改善涂层与基体界面结合强度^[8]。

本文结合以上两种技术方法, 使其能够优势互补, 最大程度地提升涂层的组织与性能。

1 实验

1.1 材料

基体材料为经过退火处理的 42CrMo 钢, 切削加工成外径 $\phi 60$ mm、内径 $\phi 30$ mm、高度 20 mm 的回转件试样。喷涂材料由上海沪泰焊材有限公司提供, 生产牌号为 Ni6035WC, Ni60 包覆 35%WC 粉末, 包覆粉末粒度 150[#]。Ni60 相关参数如表 1。

表 1 Ni60 相关参数
Tab.1 Related parameters of Ni60

Marks	Chemical constitution/%						Hardness(HRC)
	C	Cr	B	Si	Fe	Ni	
Ni60	0.6~1.0	14~17	2.5~4.5	3.0~4.5	≤15	Rest	55 ~ 62

1.2 预制涂层的制备

基体材料利用丙酮擦拭清洗, 使表面脱油脱脂, 之后通过喷砂进行表面预处理, 以粗化、活化表面。喷砂材料使用棕刚玉, 粒度 24[#], 空气压强 0.6 MPa。表面预处理后, 立即进行氧乙炔火焰喷涂作业, 制备一层厚度为 0.4~0.5 mm 的 Ni60/WC 涂层。热喷涂用枪为 QT-E2000-7/H 型, 喷涂参数为: 氧气压力 0.4~0.5 MPa, 乙炔压力 0.07~0.09 MPa, 喷涂距离 190~210 mm, 工件表面线速度 20 m/s。

1.3 涂层的二次强化及测试表征

采用东华大学自主研制的电接触强化设备, 电

接触强化是利用通电情况下强烈的电阻热, 对材料表面进行改性的工艺方法, 其工作原理如图 1 所示。接触零件之间存在接触电阻, 通入电源, 利用强烈电阻热和电极轮压力对制备好的试样进行二次强化, 强化过程中同时对工件进行水冷, 防止出现

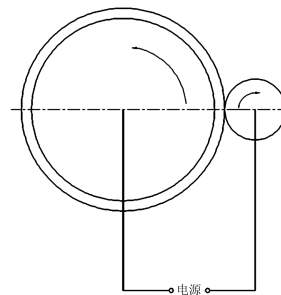


图 1 电接触强化原理

Fig.1 The principle of strengthening of electrical contacts

电极轮因过热熔融与试样表面产生粘结现象, 避免损坏机器和试样表面质量。具体工艺参数为: 电流强度 20 kA, 工件转速 0.7 r/min, 进给速度 0.4 mm/min, 电极轮压力 700 N。

采用 KEYENCE 公司 VHX-1000E 型超景深显微镜对涂层进行组织分析。采用扫描电子显微镜对电接触强化后的涂层进行面扫描, 以对涂层元素的分布及扩散情况进行表征。采用 HXS-1000A 型显微硬度仪进行硬度测量, 加载质量为 100 g, 保压时间为 15 s, 测量方式为: 由表及里, 每隔 100 μm 进行一次测试, 测量 10 次为一列, 共测量 5 列, 每列间隔 100 μm 。

2 结果及分析

2.1 显微组织分析

图 2a 为氧乙炔火焰喷涂涂层与基体横截面组

织形貌。氧乙炔火焰喷涂枪的火焰温度为 2000~3000 $^{\circ}\text{C}$, 有限的喷涂距离内, 熔融或半熔融状的粉末颗粒在强气流的推动下撞击基体表面, 形成堆叠状涂层结构, 此结构为氧乙炔火焰喷涂涂层的典型结构^[9-11]。层与层之间因凝固时间不同, 会产生明显的线状缝隙, 喷涂过程中先凝固的粉末会对之后撞击到涂层表面的粉末产生遮蔽效应, 形成形状不规则的孔洞。缝隙与孔洞极大地降低了涂层的强度。

涂层与基体之间存在明显的缝隙, 近界面处基体呈块状晶粒, 如图 2a 中 A 区域所示, 尺寸较基体内晶粒有所减小, 且大多呈白色多边形形状。这是因为基体喷涂之前经过喷砂预处理, 表面存在变形强化, 喷涂过程中, 高温会使涂层产生回复与再结晶现象, 从而产生了晶粒细化现象。白色块状晶粒为铁素体, 热喷涂过程中, 高温使工件表面产生轻微脱碳现象^[12], 故近界面处的基体主要以铁素体为主。

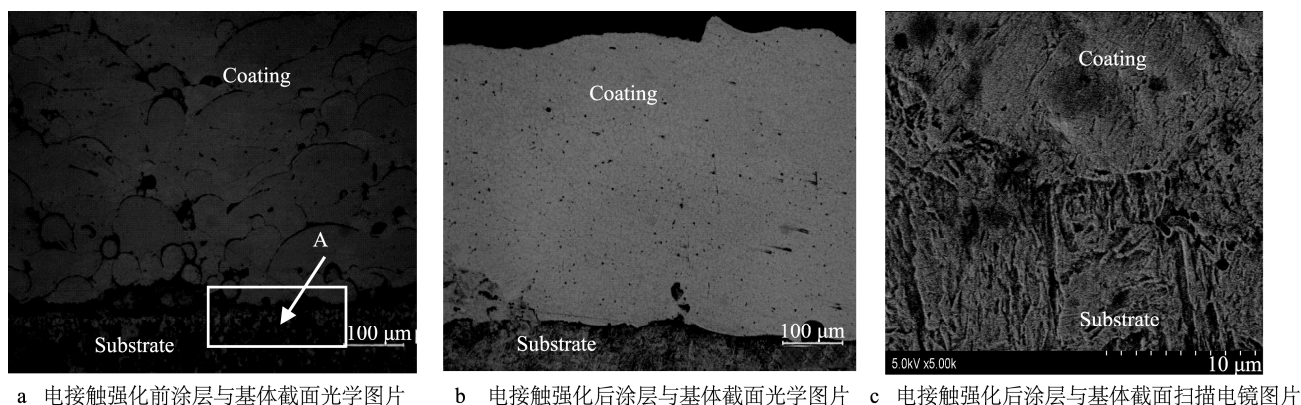


图 2 电接触强化前后涂层与基体截面形貌

Fig.2 Metallography of the coating before and after electrical contact strengthening:a) OM image of the coating before electrical contact strengthening; b) OM image of the coating after electrical contact strengthening; c) EM image of the coating after electrical contact strengthening

图 2b 为电接触强化后涂层与基体的横截面组织形貌。涂层形貌发生了很大改变, 线状缝隙和不规则孔隙消失, 堆叠状涂层结构消失, 取而代之的是细小孔隙均匀分布在涂层中, 近界面处同时存在个别较大近圆形孔洞, 基体界面处脱碳区域消失。经分析, 涂层在电接触强化的过程中, 强烈电阻热使涂层瞬间熔融, 线状缝隙断裂分解, 形成细小孔隙, 靠近不规则孔洞的部分细小孔隙会迅速扩散至孔洞表面, 使孔洞迅速长大呈近圆状, 扩散动力为孔隙表面自由能的降低^[13]。电接触强化在较强压力下进行, 靠近表面、迅速长大的气孔会在压力的作用下被挤出涂层, 而距离涂层表面较远处的孔洞会由于整个强化过程的瞬间性被困在涂层深处,

形成较大孔洞。

电接触强化后, 涂层与基体之间的界面形态明显改善, 在扫描电子显微镜下 (图 2c), 涂层与基体之间的界面消失。这是因为电接触强化之前的界面缝隙使此处的接触电阻热尤为强烈, 在强烈电阻热的作用下, 涂层与基体接触区产生了互溶与扩散, 脱碳区 (图 2a 中 A 区域) 消失, 涂层与基体的结合方式发生了变化。靠近界面处, 基体经过瞬间高温之后, 由于进行了水冷, 产生淬火效果, 形成了马氏体^[14]。

2.2 涂层元素分布及扩散

图 3 是针对图 2a 所示区域的面扫描涂层和基体相关元素分布及扩散情况。基体材料为 42CrMo,

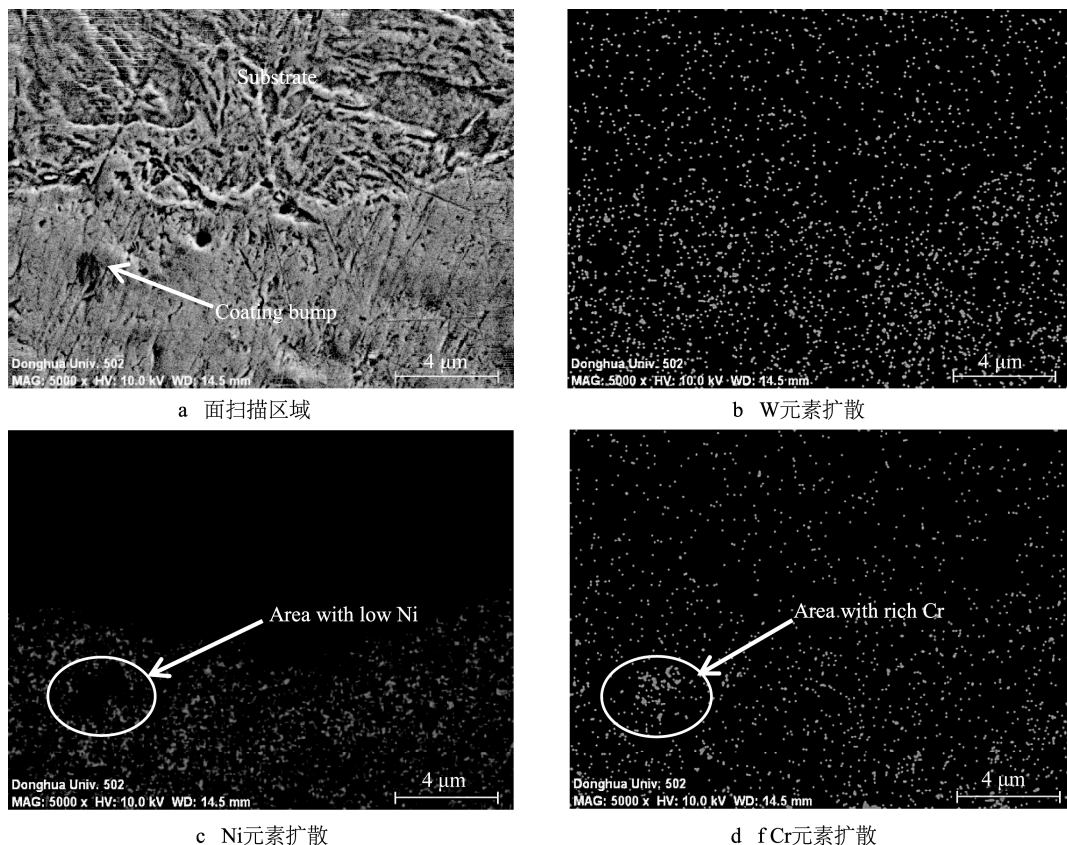


图3 电接触强化后涂层与基体的能谱分析

Fig.3 EDS for cross-section of coating and substrate after electrical contact strengthening: a) the area of surface scanning; b) image of W element diffusion; c) image of Ni element diffusion; d) image of Cr element diffusion

图3b为W元素在涂层和基体内的分布图,涂层中拥有相对较多的W元素富集区,其主要成分为WC、 W_2C 等弥散强化颗粒^[15]。以涂层与基体界面为分界线,基体内W元素相对较少,分布较均匀,近界面处相对较多,说明W元素产生了扩散,且扩散距离超过4 μm 。图3c为Ni元素分布图,涂层与基体之间拥有较明显的界限,涂层内Ni元素富集,基体内拥有少量Ni元素。由于基体材料在冶炼过程中允许少量Ni元素残留,故不能说明Ni元素向基体内部发生扩散,但在涂层界面至基体短距离范围内,存在明显的Ni元素分布淡化梯度,说明在基体表面,Ni元素存在扩散行为。

图2d为Cr元素面扫描分布图,涂层内有Cr元素富集,形成高铬区,对应位置存在明显凸起,而在Ni元素面扫描分布图中对应的位置,Ni元素密度明显降低。这说明高铬区排斥Ni元素,Cr元素为碳化物形成元素,凸起处主要为具有高硬度和高耐磨性的Cr元素合金碳化物^[16],Ni元素为非碳化物形成元素,从对C元素亲和力的角度来说,两者相互排斥。

2.3 显微硬度分布

图4为电接触前后涂层横截面硬度分布等高线图。利用Origin软件,将所测的50个数据矩阵通过Cubic Spline函数进行插值运算,细化数据,增加矩阵点,从而模拟出500 $\mu m \times 1000 \mu m$ 范围内的硬度等高线分布图。

可以看出,电接触强化前后,涂层横截面的硬度分布明显不同。图4a为涂层电接触强化前硬度等高线分布图,涂层内部硬度分布不均,最高达700HV左右,最低降至200HV左右,以点状分布于涂层内部。这是由于未电接触强化前,涂层存在明显缝隙与孔洞,致密性降低,造成涂层内部形成盆地状低硬度区,高硬度峰的出现是由于测量点落于单个熔融Ni60/WC颗粒内,没有孔隙干扰所致。涂层平均硬度在430HV左右(如图5所示),距表层0~50 μm 处,硬度相对较低,主要是由于近表层致密度相对较低,表面存在严重缺陷所致^[17]。涂层与基体界面呈犬牙状,柔和性差且等高线分布密集,

基体内部硬度低, 硬度梯度呈台阶状, 落差较大, 氧乙炔火焰喷涂涂层与基体之间的界面结合状态不理想。

图 4b 为涂层电接触强化后硬度等高线分布图。涂层硬度分布较均匀, 平均硬度为 750HV 左右 (如图 5 所示), 较强化前提高了 300HV 左右。涂层中点

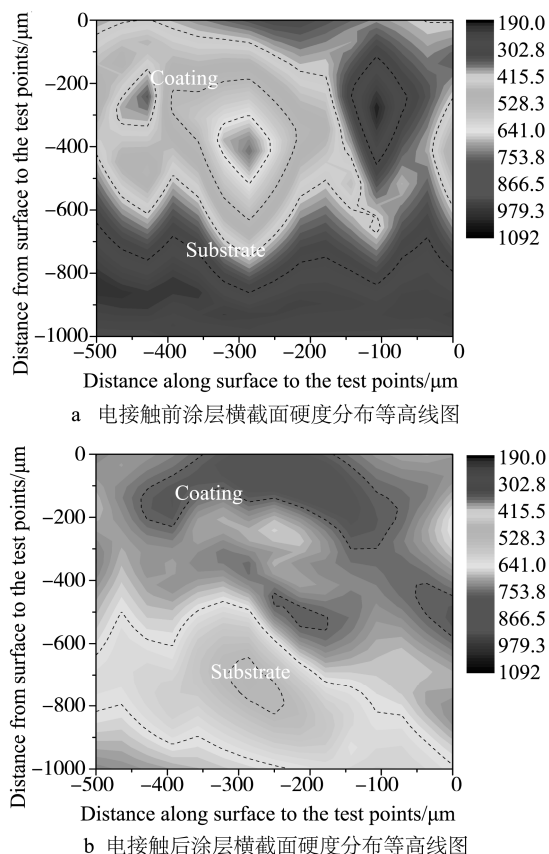


图 4 电接触前后涂层横截面硬度分布等高线图

Fig.4 Hardness distribution contour map of coating cross-section before and after electrical contact strengthening: a) hardness distribution before electrical contact strengthening; b) hardness distribution after electrical contact strengthening

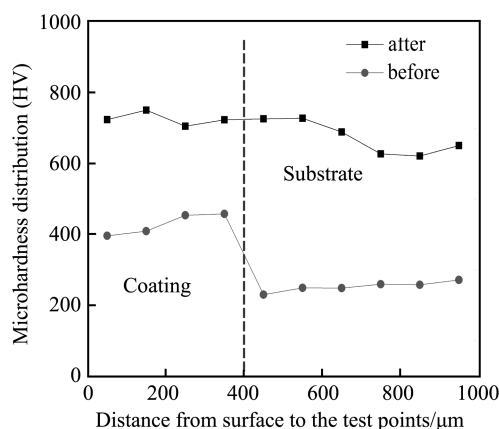


图 5 电接触前后涂层横截面平均硬度折线图

Fig.5 Average hardness line chart of coating cross-section before and after electrical contact strengthening

状硬度峰谷消失, 这是因为强烈电阻热使涂层缝隙分解, 孔隙焊合, 涂层发生熔合, 在电极压力作用下变得更加致密。界面处没发生硬度阶梯式下降的现象, 近界面处基体硬度相对涂层略微减小, 在 700HV 左右, 硬度梯度平缓。这是因为涂层与基体出现冶金结合, 近界面基体存在扩散合金元素, 在电接触强化后冷却淬火, 基体形成的马氏体硬度相对提高。

3 结论

电接触强化能有效改善氧乙炔火焰热喷涂 Ni60/WC 涂层的组织质量, 提高组织致密度, 减小孔隙率。

经过电接触强化后, 涂层与 42CrMo 基体出现元素扩散现象, 界面形成冶金结合。涂层内部的 Cr 元素形成合金化合物, 对涂层形成弥散强化。

电接触强化后, 涂层硬度为 700~800HV, 较电接触强化前提高将近 1 倍。涂层至基体内部硬度梯度平缓, 基体近界面处硬度提高。

参考文献

- [1] 朱润生. Ni60 自熔合金粉末的研究[J]. 粉末冶金工业, 2002(6): 7—16.
ZHU Run-sheng. Study on Ni60 Self-melting Alloy Powder [J]. Powder Metallurgy Industry, 2002(6): 7—16.
- [2] 陆世英, 康喜范. 镍基及铁镍基耐蚀合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.
LU Shi-ying, KANG Xi-fan. Corrosion Resistant Alloy Based on Nickel and Iron Nickel Substrate[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1989.
- [3] 董志红. WC/Ni 基合金复合涂层耐磨性研究[D]. 四川: 四川大学, 2004.
DONG Zhi-hong. The Study of Wear Resistance of Tungsten Nickel-base Alloy Composite Coating[D]. Sichuan: Sichuan University, 2004.
- [4] 汪新衡, 蒋冬青, 张蓉, 等. 激光熔覆纳米 SiC 增强 Ni 基合金涂层的组织与高温抗氧化性能[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 30—34.
WANG Xin-heng, JIANG Dong-qing, ZHANG Rong, et al. Reinforced Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Ni-based Alloy Coating by Laser Cladding of SiC Nanometer Powder [J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 30—34.
- [5] 张维平, 郎志华, 马海波. 激光熔覆 SiC/Co 复合涂层的组织与性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(1): 8—10.

- ZHANG Wei-ping, LANG Zhi-hua, MA Hai-bo. Micro-structure and Performance of Laser Cladding SiC/Co Coating [J]. Surface Technology, 2011, 40(1): 8—10.
- [6] 王海军. 热喷涂技术问答[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- WANG Hai-jun. Thermal Spray Technology Q & A[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [7] 谢家宁, 朱世根, 徐梦廓, 等. 钢基体表面 WC/Al₂O₃/Co 涂层的电接触强化研究[J]. 热加工工艺, 2014(22): 167—170.
- XIE Jia-ning, ZHU Shi-gen, XU Meng-kuo, et al. Investigation on Electrical Contact Strengthening WC/Al₂O₃/Co Adhesive Coating on Surface of Steel Substrate[J]. Hot Working Technology, 2014(22): 167—170.
- [8] 韩志兵, 朱世根, 齐小犇, 等. 纳米和微米 WC/12Co 涂层的电接触强化研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 17—20.
- HAN Zhi-bing, ZHU Shi-gen, QI Xiao-ben, et al. Study on Performance of Nano-WC/12Co and Micro-WC/12Co Coating by Electric Contact Strengthening[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 17—20.
- [9] 朱德忠, 贾长祥, 原遵东, 等. 氧-乙炔火焰喷涂枪的火焰温度测量[J]. 工程热物理学报, 1985(1): 96—98.
- ZHU De-zhong, JIA Chang-xiang, YUAN Zun-dong, et al. Flame Temperature Measurement of the Oxygen Acetylene Flame Spray [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1985(1): 96—98.
- [10] 湛峰, 陈茂军. 氧-乙炔火焰喷涂涂层的耐磨性能研究[J]. 电镀与精饰, 2008(8): 23—24.
- CHEN Feng, CHEN Mao-jun. Abrasion Behavior of Oxygen-Acetylene Flame Sprayed Coating[J]. Plating and Finishing, 2008(8): 23—24.
- [11] 袁涛, 屈轶, 史萌, 等. 汽轮机超音速火焰喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 63—65.
- YUAN Tao, QU Yi, SHI Meng, et al. High Velocity Oxygen Fuel Spraying NiCr-Cr₃C₂ Coating on Steam Turbine [J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 63—65.
- [12] 张振霞. 离子渗金属过程中的迁移研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- ZHANG Zhen-xia. Migration Research in the Process of Ion Penetration[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003.
- [13] CAMPOS M, SANCHEZ D, TORRALBA J M. Sintering Behavior Improvement of a Low Cr-Mo Prealloyed Powder Steel through Mn Additions and Others Liquid Phase Promoters, Materials Processing Technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143: 464—469.
- [14] ZHANG Fu-cheng, LU Bo, ZHANG Ji-ming. Application of Electrical Contact Heating in Grain Refining of Ultra-Pure 42CrMoVNb Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183: 33—37.
- [15] 水露雨, 朱世根, 顾伟生, 等. 电接触强化对 WC 涂层与基体结合界面的影响[J]. 热加工工艺, 2011(20): 126—128.
- SHUI Lu-yu, ZHU Shi-gen, GU Wei-sheng, et al. Effect of Electric Contact Heating on Interface Between WC Coating and Substrate[J]. Hot Working Technology, 2011(20): 126—128.
- [16] 许新军, 封振山. 热轧 45 钢表面 Ni60-WC 涂层的高频感应熔覆及其电接触强化前后的性能[J]. 材料保护, 2015(2): 44—46.
- XU Xin-jun, FENG Zhen-shan. Performance of Ni60-WC Coating with High Frequency Induction Cladding and Electrical Contact Heating on the Surface of Hot Rolled 45 Steel[J]. Material Protection, 2015(2): 44—46.
- [17] WANG Ya-lin, ZHU Shi-gen, GU Wei-sheng, et al. Electric Contact Strengthening to Improve the Bonding between WC-Co Coating and 45[#] Steel Substrate[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(5): 1142—1146.