

# Q235 结构钢堆焊熔覆表面的摩擦磨损性能

李 聪<sup>1</sup>, 陈雪琴<sup>2</sup>, 彭道衡<sup>1</sup>, 王金凤<sup>1</sup>

(1. 湖北汽车工业学院材料科学与工程学院, 湖北 十堰 442002;

2. 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

**[摘要]** 耐磨性能的改善是表面熔覆层性能的重要研究方向。采用 CO<sub>2</sub> 气体保护药芯焊丝电弧堆焊技术在 Q235 表面制备了强熔覆层, 利用金相显微镜、扫描电镜和摩擦磨损试验研究了基体相、熔覆层和界面区的组织和性能变化特点。结果表明: 在界面区组织中不仅发现了细小的针状马氏体组织, 且晶粒明显细化; 基体区、熔覆层和界面区的摩擦系数依次减小, 磨损形貌二次电子图显示基体磨损面积较大, 塑形变形严重, 且局部有“剥离坑”产生, 界面区由于发生了强烈的元素扩散和冶金反应, 产生大量硬质相, 提高了组织耐磨性, 使其磨损“犁沟”和塑形变形程度相比熔覆层有较大改善。

**[关键词]** CO<sub>2</sub> 气体保护药芯焊丝电弧堆焊; 堆焊熔覆层; 摩擦磨损

**[中图分类号]** TG117.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-1560(2019)10-0070-05

## Friction and Wear Properties of the Surfacing Welding Cladding Surface on Q235 Structural Steel

LI Cong<sup>1</sup>, CHEN Xue-qin<sup>2</sup>, PENG Dao-heng<sup>1</sup>, WANG Jin-feng<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The improvement of wear resistance is one of important developing directions of surfacing cladding layers. The high-strength welding cladding layers were prepared on the Q235 surface by surfacing cladding method, of which the flux cored wire was protected in CO<sub>2</sub> gas. Metallographic microscope, scanning electron microscope and friction and wear tests were employed to investigate the change characteristics of microstructure and properties of matrix phases, cladding layers and their interface regions. Results showed that the fine needle-like martensite structure was obviously found in the interfacial zone, and the crystals were refined obviously. The friction coefficients of matrix, the cladding layer and interface decreased in turn. Moreover, the secondary electronic morphologies of wear morphology presented tremendous wear of matrix, severe plastic deformation and local “stripping pit”. In the interfacial regions, a lot of hard phases were formed because of element diffusion and metallurgical reaction, which could improve the wear resistance and reduce the tendency of “stripping pit” and plastic deformation compared to cladding layer.

**Key words:** CO<sub>2</sub> gas and flux cored wire; surfacing welding cladding layer; friction and wear

## 0 前言

由于使用和服役条件比较恶劣, 结构用钢经常会产生腐蚀、磨损、疲劳等失效情况, 且大多发生在零部件的表面, 因此需要对其表面进行使用前预强化和使用后修补。根据工程上材料特殊的服役条件和性能要求, 开发强韧结合、性能梯度变化的新型表层金属基复合材料具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。

从本质上看, 不同制造工艺的金属热涂层的制备

原理都是相同的, 即利用待熔覆合金在表面熔融和凝固的过程, 将预置于金属基体表面的合金化材料熔化或将已经熔化的金属快速熔敷于基体表面, 随后冷却使其凝固成固态强化层, 形成冶金组织的过程。和传统的熔化堆焊工艺相比, 激光熔覆和等离子熔覆等低稀释率的表面处理技术发展迅速, 但在大型工件的修复过程中, 其制备成本、生产效率以及涂层力学性能上还有较大提升空间。除了制备方法外<sup>[5,6]</sup>, 如何在涂层

**[收稿日期]** 2019-05-08

**[基金项目]** 中央引导地方科技发展专项(2019ZYD023); 湖北省教育厅自然科学重点项目(D20181801)资助

**[通信作者]** 李 聪(1985-), 讲师, 主要研究方向为材料表面改性、先进材料连接技术, 电话: 18772873950, E-mail: licong\_122@163.com

制备过程中生成 Fe-Cr(B)-C 等一些强韧基体的碳化物硬质相也是近年来先进涂层发展的重点。本工作利用 CO<sub>2</sub> 气保堆焊在 Q235 表面制备 YD507 合金熔覆层,通过合理的堆焊层设计,层间温度控制技术制备优良的合金涂层,并通过对其组织的观测和性能的研究,进一步解释工艺参数对其组织性能的影响机理。

## 1 试验

### 1.1 试验方法、设备及材料选择

本试验采用 CPXDS-500 型 CO<sub>2</sub>/MAG 气体保护半自动药芯焊丝电弧堆焊设备,通过熔化焊丝形成滴状过渡或喷射过渡方式进行 Q235 表面熔覆层的制备,选用 Q235 钢作为母材基板,并将其制成尺寸为 140 mm×30 mm×16 mm 的样品,焊丝材料则选用强韧性和耐磨性俱佳的 YD507 高铬合金药芯焊丝,焊丝直径为 1.6 mm。基体材料和药芯焊丝主要合金成分见表 1。

表 1 基板与 YD507 药芯焊丝主要化学成分 %

成分	C	Cr	S	P
Q235 基材	0.180	-	0.030	0.030
YD507 药芯焊丝	0.100	14.500	0.015	0.015

### 1.2 试验堆焊层设计

为了制备具有一定厚度和冶金结合力强的金属涂层,设计了图 1 的堆焊层示意图,和通常的大剂量一次涂层制备方式不同,本试验采用“多次小剂量”的多次多道熔覆制备技术,该涂层制备最大的特点是:后一道次的堆焊过程总是“叠压”在先前已制备涂层和涂层之间的结合处,这样不仅可以修补前一道次涂覆的缺陷,而且还能清理材料表面氧化皮、裂纹等缺陷;实现层间温度有效控制;每一道次的涂层制备均采用不同的热输入量,不仅可以对前一涂层形成二次热处理,还能控制熔覆过程的相变,使熔覆层和界面区形成以“针状马氏体”为主体的相区域。

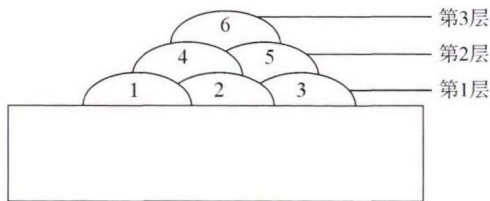
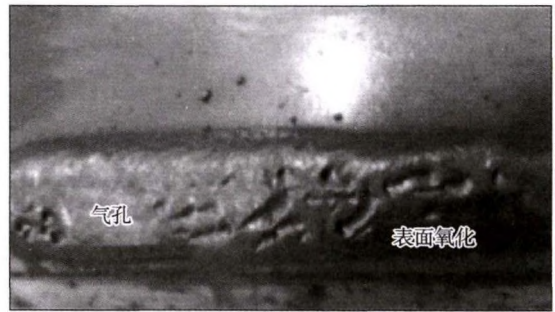


图 1 堆焊层焊道分布示意

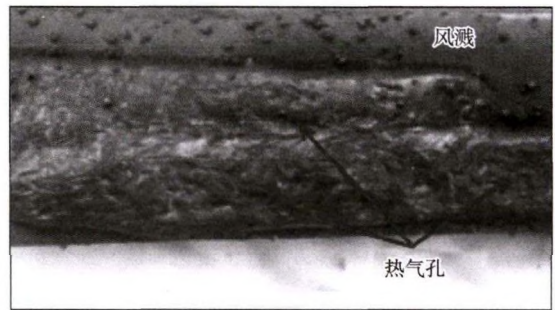
### 1.3 试验工艺参数确定

碳钢、合金钢在焊接过程中都可能会产生气孔,不仅会减小焊缝的有效承载面积,而且也可能形成应

力集中,使焊缝的强度、韧性、疲劳性能下降。堆焊熔覆过程中经常会产生气孔、夹杂和飞溅等缺陷,图 2 显示了在工艺参数选取不合适的情况下产生的各类缺陷,从图 2 观测到呈现“条虫状”和“树枝状”的反应 CO<sub>2</sub> 气孔<sup>[7]</sup>,该气孔为反应热气孔,合适的焊接速度和焊后冷却才能避免气孔的产生;过大的热输入和 CO<sub>2</sub> 保护气体流量还会导致图 2b 所示的飞溅和图 2a 所示的覆层表面被氧化。



(a) 气孔和氧化



(b) 气孔和飞溅

图 2 堆焊层焊接过程中的缺陷

为了避免缺陷,获得质量较高的堆焊层,利用正交试验优选出了优质熔覆层的主要参数范围,由于本试验是多层多道焊接,所以焊接电压、电流和保护气体流量逐层施焊过程中按表 2 进行调节。

表 2 堆焊工艺参数范围

堆焊电流/ A	堆焊电压/ V	堆焊速度/ (m·h <sup>-1</sup> )	保护气流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	喷嘴距工件 高度/mm
190~200	20~24	120	10~15	16

### 1.4 测试分析

采用 CPXDS-500 型 CO<sub>2</sub>/MAG 气体保护半自动药芯焊丝电弧堆焊设备,通过熔化焊丝形成滴状过渡或喷射过渡方式制备熔覆层。利用 JSM-6510LV 型扫描电镜 (SEM) 进行涂层表面和磨损形貌表面观察,利用 M-2000 型摩擦磨损试验机进行摩擦和磨损性能观察和研究。

选取宏观和微观形貌无缺陷的样品,从中分别截取基体、熔覆层和界面区,制成标准摩擦磨损试样进行摩擦磨损试验。本试验摩擦副采用 40Cr 高强度钢(硬度

HRC35),摩擦状态为干摩擦,试验加载力 90 N,磨损时间 40 min。为了进一步说明各区域耐磨性的差异,利用扫描电镜分别获取 30 倍、100 倍和 1 000 倍的磨损样品形貌二次电子相。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观形貌

图 3 是熔覆层不同区域 400 倍下的金相图。从微

观形貌来看,基体区、界面区和熔覆层有明显组织差异,基体区主要是原有的铁素体和珠光体组织,熔覆层则主要是大尺寸的马氏体组织,界面区则出现了 3 种相的混合组织,且马氏体组织越细小,基材越靠近熔合区铁素体和珠光体的晶粒变得越细小,珠光体的片层间距减小,直至接近熔合区铁素体和珠光体比例混合均匀,熔覆层越远离熔合区马氏体的晶粒普遍变得越细小,相组织和晶粒尺寸在界面区均出现了细化现象。

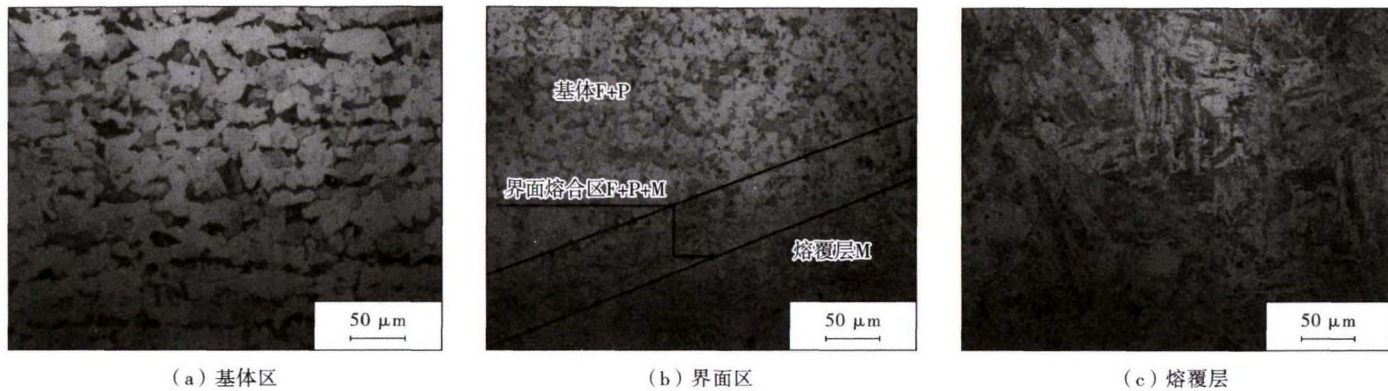


图 3 熔覆层不同区域的金相组织

### 2.2 摩擦磨损性能

图 4 显示了基体区、熔覆层区和界面区 3 个区域的摩擦系数大小,基体区的摩擦系数最大,熔覆层表面次之,界面区最小。这说明界面区的耐摩擦性能最好,熔覆层也比基体抗摩擦性能更优;因为在熔覆过程中

界面区是基体和焊丝发生冶金反应的区域,该区域不仅发生了相变而且晶粒发生了细化,成分和组织更均匀,这都能提高组织的耐磨性。而熔覆层由于还有大量的 Cr 元素,因此生成了大量 Fe-Cr-C 系列硬质相,该系列硬质相均具有高的硬度和好的耐磨性。

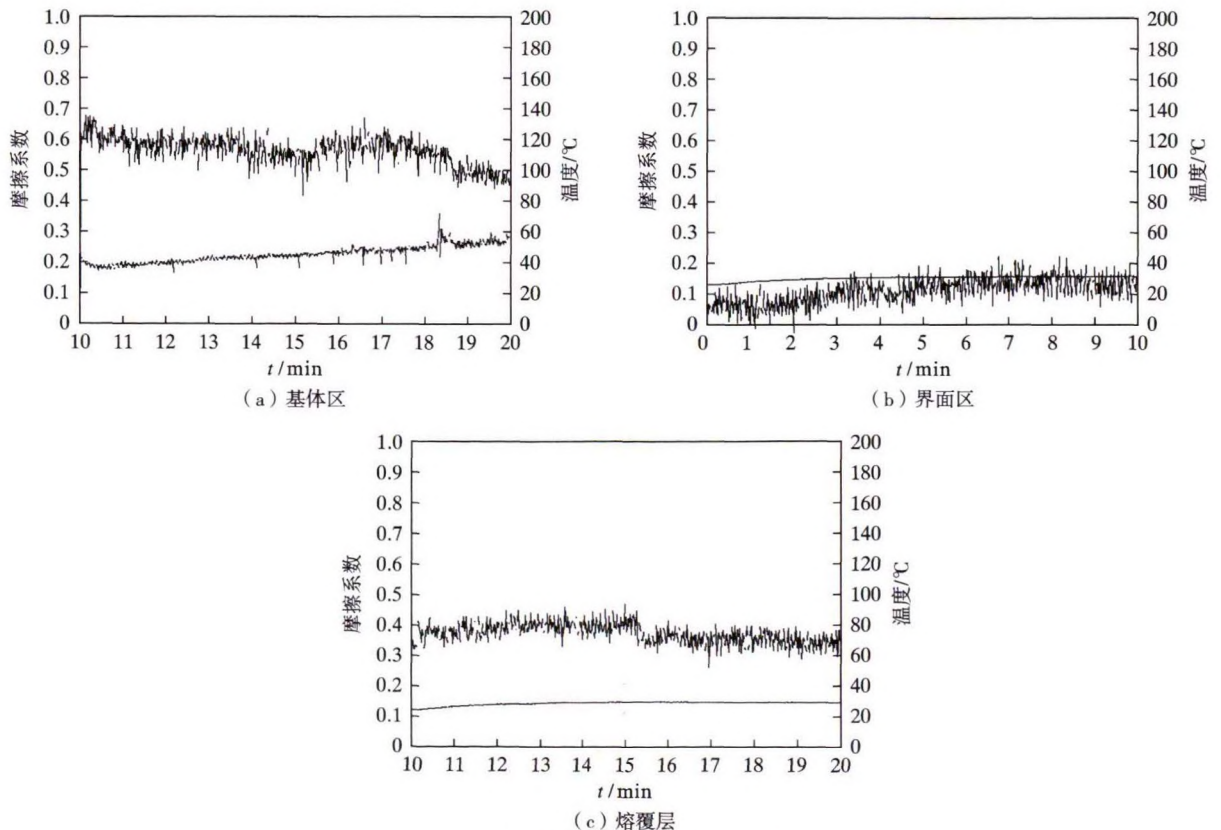


图 4 熔覆层不同区域摩擦曲线

图 5a 基体表面的磨损主要为“黏着磨损”,表面磨损比较严重,从 100 倍的扫描电镜形貌可以看到金属表面发生较大的塑性变形,1 000 倍的形貌显示局部区域出现了“剥离坑”。图 5b,图 5c 熔覆表层的磨损面积

明显小于基体,低倍和高倍扫描电镜图发现了大量塑性变形,产生明显的“犁沟”,这种“犁沟”造成局部金属脱落和切削<sup>[3,7,8]</sup>,相比熔覆表层,界面区磨损面积和磨损程度都要低很多。

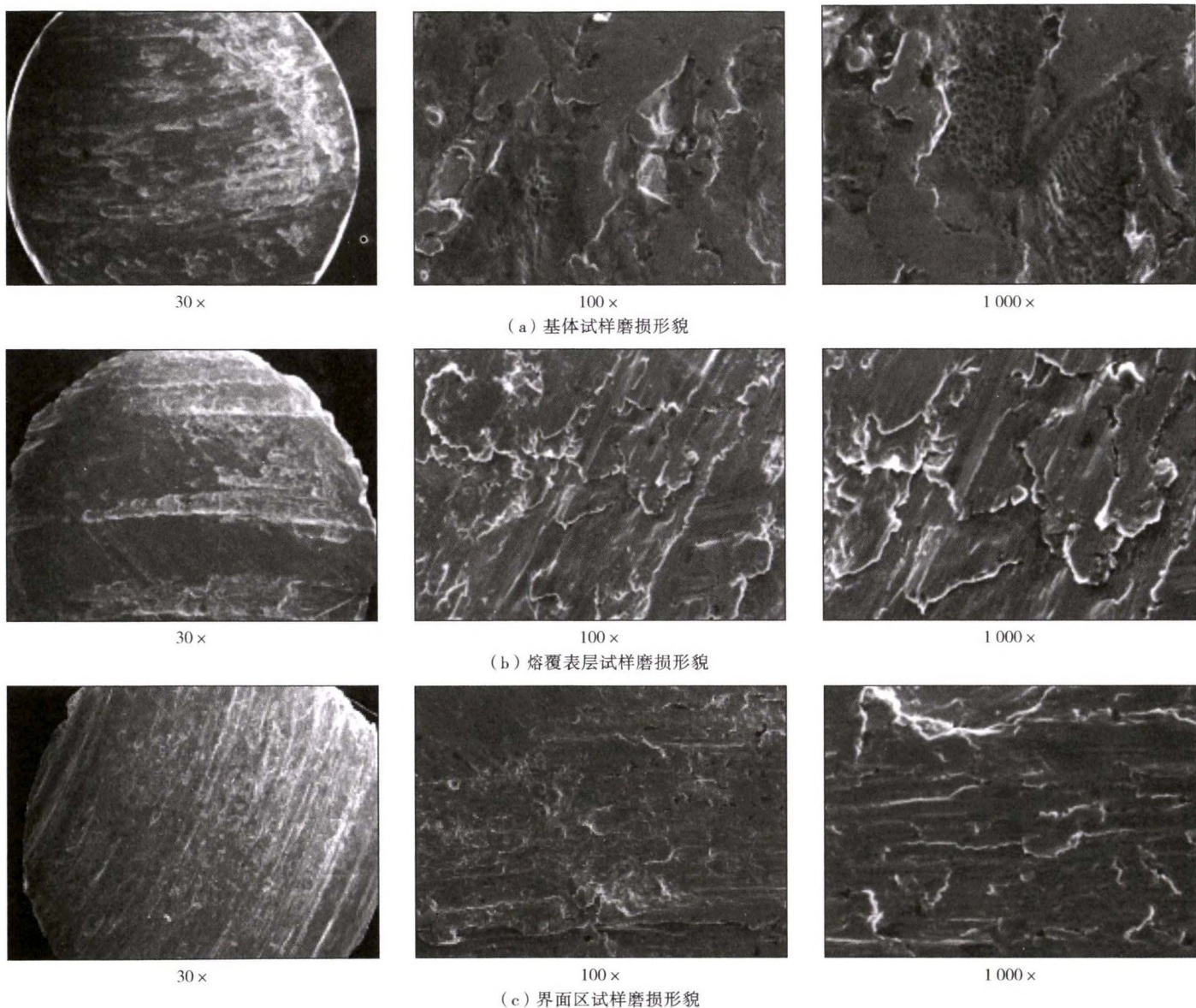


图 5 熔覆各区域磨损形貌

合金元素 Cr 能在基体表面通过固溶强化<sup>[9,10]</sup>的形式形成硬质相  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,堆焊合金中 Cr 的含量越多,则硬质相的数量也越多,这使得堆焊层耐磨性也随之提高。Cr 元素的最佳加入量并非越高越好,而是与堆焊层中 C 元素的含量有关,只有当 Cr/C 质量比在适当范围内时,Cr 元素才能明显地改善堆焊层的耐磨性,当 Cr/C 质量比在 5.0~7.0 时,初生碳化物呈有序排列,组织均匀,过高或过低都会使组织不均匀,耐磨性能不理想<sup>[11]</sup>。堆焊层中共晶  $\text{M}_7\text{C}_3$  主要以较粗大的板条形态存在,且分布不均匀,其周围产生严重的应力集中,受磨损时易造成硬质相与基体脱离,从而使耐磨性变

差;反之,当堆焊金属共晶组织中的  $\text{M}_7\text{C}_3$  形态大都呈现小的颗粒状弥散分布且条状较少时,堆焊层耐磨性较好,因此获得细小、均匀分布的杆状硬质相有助于提高堆焊层的耐磨性<sup>[12]</sup>。

### 3 结 论

(1)在合适的工艺参数范围下通过  $\text{CO}_2$  半自动药芯焊丝电弧堆焊技术在 Q235 钢表面制备了高强度涂层,采用 3 层 6 道的多层叠压施焊方式完成,涂层温度控制良好,没有明显缺陷。

(2)金相形貌能够清楚地观测到基体区、界面区、熔覆层3区组织,基体区和熔覆层主要以原相为主,在界面区组织中仅发现了细小的针状马氏体组织,且晶粒明显细化。

(3)基体区、熔覆层和界面区的摩擦系数依次减小,基体磨损最严重,塑形变形大,并在局部区域发现“剥离坑”,熔覆层虽然磨损有所改善,但也有塑形切削,磨损“犁沟”现象发生,界面区的摩擦磨损性能最好,这是由于界面区元素扩散和冶金反应强烈有关,产生的硬质相提高了材料的耐磨性。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] LIU D S, LIU R P, WEI Y H. Effect of titanium additive on microstructure and wear performance of iron-based slag-free self-shielded flux-cored wire [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 207, 579-586.
- [ 2 ] 吴剑钊,于爱兵,牛威杨,等. W6Mo5Cr4V2 高速钢 WC/Co 激光熔覆表面的摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2017, 50(3):19-22.
- [ 3 ] 宣天鹏. 表面镀覆层失效分析与检测技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2012:35-39.
- [ 4 ] LIU D S, LIU R P, WEI Y H, et al. Comparative behaviour of cobalt and iron base hardfacing alloys [J]. Surface Engineering, 2012, 28(5), 338-344.
- [ 5 ] 杨绍斌,董伟,徐晓辰,等. Fe-Cr-C 系堆焊耐磨材料的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2012, 26(3):96-100.
- [ 6 ] 张凌峰. Fe-Cr-C 系粗药芯焊丝堆焊热过程及组织性能研究[D]. 济南:山东大学, 2012:12-13.
- [ 7 ] 王娟. 表面堆焊与热喷涂技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:23-25.
- [ 8 ] 庄明辉. 高硼铁基堆焊合金组织结构形成机理及耐磨性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017:4-7.
- [ 9 ] ZHUANG M H, LI M Q. Effect of Ti addition on phase constitution and wear resistance of Fe-B-C hypereutectic overlays produced using powder-wire composite arc welding [J]. Materials Transactions, 2017, 58(6):945-950.
- [ 10 ] 朱茂生,付莉超,杨健,等. 药芯焊丝电弧焊(FCAW)的焊接电流对 Fe-Cr-C 合金堆焊金属组织与耐磨性的影响[J]. 材料导报, 2014, 28(S1):427-430.
- [ 11 ] 王智慧,万国力,贺定勇,等. Fe-Cr-B-C 堆焊合金的组织与耐磨性[J]. 材料工程, 2014(9):57-62.
- [ 12 ] 周野飞. Fe-Cr-C-X 堆焊合金显微组织演变及其耐磨性[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2013:79-80. [ 编校:王宇 ]
- 
- (上接第 69 页)
- [ 12 ] 王晓原,刘海红. 基于投影寻踪自回归的短时交通流预测[J]. 系统工程, 2006, 3(2):20-21.
- [ 13 ] WANG F K, CHEN J C. Capability index using principal components analysis [J]. Quality Engineering, 1998, 11:21-27.
- [ 14 ] YUSDAR H, ANUAR A R, HANAFAI M M, et al. Analysis of Phosphate Rock Dissolution Determining Factors Using Principal Component Analysis in Some Acid Indonesian Soils [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(1/2):273-282.
- [ 15 ] 毕傲睿,骆正山,王小完,等. 基于土壤腐蚀主成分的金属管道退化维纳过程研究[J]. 材料保护, 2018, 51(1):37-42.
- [ 16 ] FRIEDMAN J H, STUETZLE W. Projection pursuit regression [J]. Journal of the American Statistical Association, 1981, 76(376):817-823.
- [ 17 ] 李祚泳,徐源蔚,汪嘉杨,等. 基于投影寻踪回归的规范指标的气象灾情评估[J]. 应用气象学报, 2016, 27(4):480-487.
- [ 18 ] 王金龙,黄炜斌,马光文,等. 梯级水电站群联合优化调度规则制定的投影寻踪回归法[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2):37-43.
- [ 19 ] 王志兴,李成振,陈刚. 冰情预报的投影寻踪回归模型[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5):174-177.
- [ 20 ] 李启月,徐敏,董陇军,等. 光面爆破效果参量预测的投影寻踪回归模型及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10):3976-3981.
- [ 21 ] 李世玲. 基于投影寻踪和遗传算法的一种非线性系统建模方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005(4):22-28.
- [ 22 ] 邴其春,龚勃文,林赐云,等. 基于粒子群优化投影寻踪回归模型的短时交通流预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(12):4277-4282.
- [ 23 ] 方崇,代志宏,张信贵. 人工鱼群投影寻踪回归在洞室岩爆预测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5):932-937.
- [ 24 ] 王甜甜,刘强. 基于 BAS-BP 模型的风暴潮灾害损失预测[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(3):457-463.
- [ 25 ] 张欣莉,丁晶. 参数投影寻踪回归及其在年径流预测中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000(3):13-15. [ 编校:郑霞 ]