

深井钻机刹车盘激光熔覆铁基涂层的组织与摩擦磨损性能*

陆萍萍, 王勇, 韩彬, 杨浩

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 针对深井钻机刹车盘的工况条件, 采用激光熔覆技术在 35CrMo 钢表面分别制备 Fe 基涂层和含 Cr_3C_2 的 Fe 基合金复合涂层, 研究了 2 种涂层的组织结构、显微硬度及耐干滑动摩擦磨损性能。结果表明, Fe 基涂层以亚共晶方式结晶, 在初生柱状固溶体枝晶间存在大量网状共晶组织, 主要由 $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cr_7C_3 及少量的 Cr-Fe 固溶体等组成。Fe 基复合涂层中 Cr_3C_2 大部分溶解, 枝晶凝固特征保持不变, 枝晶组织明显细化, 主要由 $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cr_7C_3 及少量的 Cr-Fe 固溶体及少量未熔的 Cr_3C_2 等组成。Fe 基复合涂层的显微硬度及其摩擦磨损性能优于 Fe 基涂层。

关键词: 激光熔覆; Fe 基合金; Cr_3C_2 ; 显微组织; 摩擦磨损

中图分类号: O532.25; O484 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2010)01-0092-05

Microstructure and Friction and Wear Properties of Laser Cladding Fe-based Alloy Coatings on Brake Disc of Deep-well Drilling Rig

LU Ping-ping, WANG Yong, HAN Bin, YANG Hao

(College of Mechanical & Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061)

Abstract: According to technological condition of brake disc of deep-well drilling rig, laser cladding Fe-based alloy coating and Fe-based alloy composite coating with Cr_3C_2 particles on 35CrMo substrate were obtained. The microstructure, micro-hardness and sliding wear resistance of the coatings were studied. The results show that the Fe-based coatings are solidified in hypo-eutectic way, and network eutectic structure existed in the primary dendrite solid solution. The main phases of Fe coating were $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cr_7C_3 and Cr-Fe solid solution. Most of Cr_3C_2 particles in Fe-based composite coating are mostly dissolved. The basic solidifying characteristic of $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ is nearly unchanged. The dendrite of the composite coatings became to be finer. The phases of $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ composite coatings were composed of $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cr_7C_3 、Cr-Fe solid solution and Cr_3C_2 . The micro-hardness and friction and wear properties of $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ composite coating were obviously better than that of Fe coatings.

Key words: laser cladding; Fe-based alloy; Cr_3C_2 ; microstructure; friction and wear

0 引言

目前深井钻机刹车盘的材质主要为 35CrMo、30CrMo、45 钢等中碳调质钢, 由于刹车处于强摩擦、高热负荷及较大制动力等极端工况下, 导致刹车盘表面存在 3 种形式的失效^[1]: ①由于紧急制动造成刹车盘表面瞬间高温产生的高温氧化; ②由于重载制动造成刹车盘表面的磨损损坏; ③由于高频、重载的周期性制动产生的热应力造成的热疲劳裂纹。为

了提高刹车盘的抗高温氧化性、耐磨性及热疲劳性能, 在中碳调质钢的基础上进行表面改性, 既可以改善表面性能又能降低成本^[2,3]。目前, 国内外对刹车盘表面进行改性的方法主要有堆焊法^[4]、无压浸渍复合涂层^[5]及等离子喷涂^[6-10]。

激光熔覆与其他表面强化技术(如等离子喷涂技术)相比, 熔覆层与基体为冶金结合, 其组织晶粒细小, 可改善强韧性, 提高抗热疲劳能力和抑制热疲劳裂纹的扩展; 同时工件热变形小, 母材的热影响区窄, 熔覆层稀释率低, 熔敷粉末金属的利用率高。文中利用激光熔覆技术, 采用添加增强相

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2009-12-06

基金项目: 国家“863”项目(2006AA09A104)

作者简介: 陆萍萍(1985—), 女(汉), 江苏扬州人, 硕士生。

Cr_3C_2 的方法在35CrMo钢表面制备具有高硬度、耐磨损的碳化铬铁基合金复合涂层($\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$),对涂层的组织结构、涂层在干摩擦条件下的摩擦磨损行为进行研究,拟解决刹车盘要求的相对高的摩擦因数、低磨损率的矛盾。

1 试验材料及方法

试验基材为35CrMo钢,其尺寸为 $\phi 70\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,表面磨光。铁基合金粉末的粒度为 $45 \sim 150\mu\text{m}$,其主要化学成分(质量分数/%)为:0.31 C, 24.25 Cr, 1.01 Si, 3.49 Ni, 0.78 B, 0.16 Mn, 3.11 Mo, 余量为Fe。 Cr_3C_2 粉末粒度为 $40 \sim 82\mu\text{m}$ 。将添加10% Cr_3C_2 的铁基合金复合粉末充分研磨混匀后,在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干2 h。

试验采用DL-HL-T5000型横流 CO_2 激光器,矩形光斑尺寸为 $10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,激光功率为3.5 kW,扫描速度为 150 mm/min ,多道搭接率为40%,采用粉末预置法。

磨损试验采用MG-200型摩擦磨损试验机,采用环-环接触方式,对摩环为淬火态45钢,硬度为55 HRC,转速为 400 r/min ,正压力为200 N,磨损

时间30 min。磨损后,采用ESJ205-4型分析天平称量,测量精度为0.1 mg。

利用MBA-1000金相显微镜、X射线衍射仪(XRD)、LEO-1450型扫描电镜(SEM)对熔覆层显微组织、物相及磨损形貌进行分析,采用HX-1000T显微硬度计测量试样横截面的硬度分布,载荷为200 g。

2 试验结果与分析

2.1 熔覆层的组织与结构

图1为激光熔覆Fe基涂层沿垂直于激光扫描方向的剖面组织形貌。从图1(a)可看出,熔覆层组织致密均匀,与基体呈冶金结合,而且未发现任何气孔及裂纹等缺陷。在较高的放大倍数下,可以清晰地看出熔覆层与基体交界处存在一条宽度较窄且在显微镜下呈较白色的亮带,显示出熔覆层与基体呈良好的冶金结合,然后为大体上垂直于界面生长的较粗大柱状树枝晶,在枝晶内弥散分布了较多的黑色颗粒,如图1(b)。向熔池中部过渡为多方向生长的树枝晶,晶粒细化,如图1(c);接近熔覆层的顶部为晶粒细小的等轴晶和树枝晶,如图1(d)。

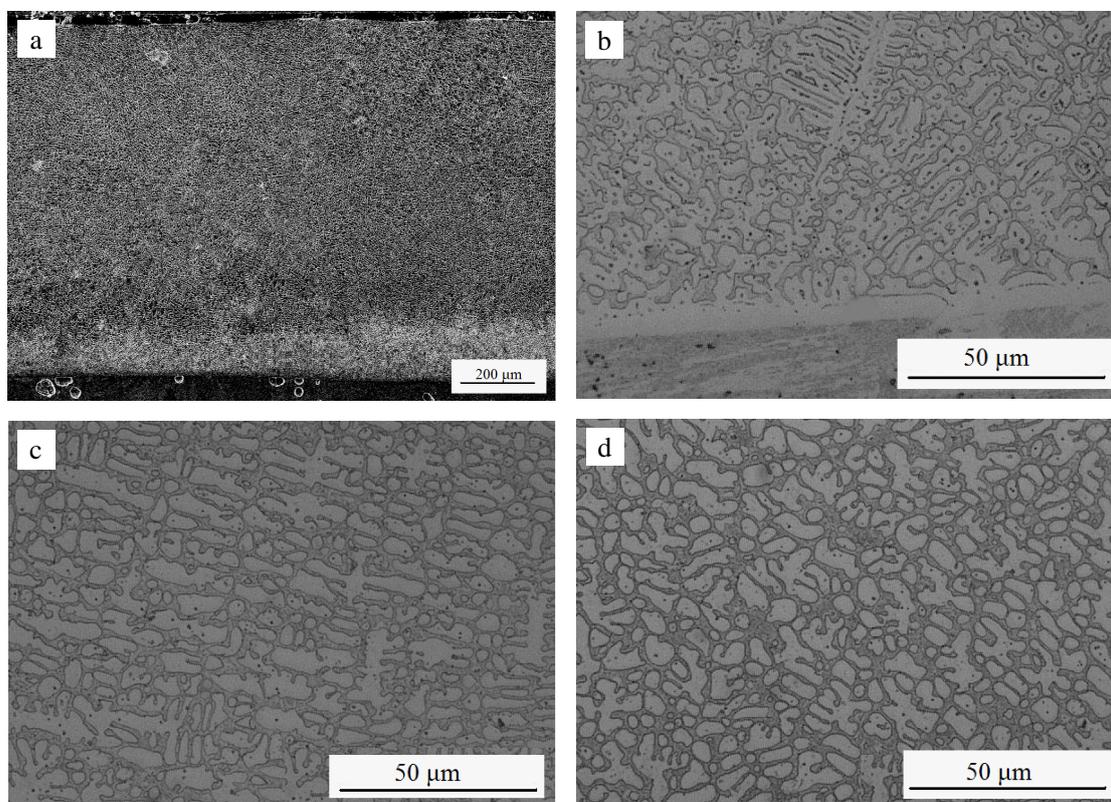


图1 激光熔覆Fe基涂层典型组织 (a) 低倍组织 (b) 界面组织 (c) 中部组织 (d) 近表层组织

Fig.1 Microstructure of laser cladding coatings (a) low magnification (b) interface area (c) middle area (d) area near surface

图2(a)、(b)分别为Fe基涂层及 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 涂层中部的显微组织。当 Cr_3C_2 加入铁基粉末后,熔覆过程中 Cr_3C_2 颗粒大部分分解并完全溶于铁基熔体,枝晶间出现细小共晶组织。 Cr_3C_2 在激光熔覆过程中溶解后,使合金熔体中C、Cr含量增加,在快速凝固过程中首先形成了富Cr碳化物,再在相对低温形成 γ 枝晶及其共晶组织。

通过对比图2(a)和(b)可看出,加入 Cr_3C_2 后组织得到明显细化^[11],减少了枝晶之间的间隙,枝晶排列更加紧密。当 Cr_3C_2 加入铁基粉末后,溶解的 Cr_3C_2 在熔池中溶解了大量的Cr元素,从而产生较大的过冷度,形核率增大,因而熔覆层晶粒细小。

图3为激光熔覆Fe基涂层和 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 复合涂层的X射线图谱。由图3可看出,铁基涂层主要由 $\gamma\text{-Fe}$ 、

Cr_7C_3 及少量的Cr-Fe固溶体等组成; $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 铁基合金熔覆层又增加了少量未熔的 Cr_3C_2 相。

分析认为,铁基涂层以亚共晶方式结晶:首先析出合金元素含量很高的非平衡 $\gamma\text{-Fe}$ 枝晶固溶体,随后冷却时形成碳化物共晶组织;而 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 涂层类似于过共晶方式结晶。 Cr_3C_2 在合金熔体中表现为2种行为:一是未完全溶解;二是已完全溶解。溶解后的Cr和C固溶于合金熔体中,在冷却时先析出大量固溶有其它元素的初生Cr碳化物 Cr_7C_3 ,进一步冷却时在未熔 Cr_3C_2 及初生碳化物间形成了细小 $\gamma\text{-Fe}$ 枝晶及其共晶组织。熔覆层具有强韧两相微观结构特征,韧性相为合金元素含量极高的亚稳 γ ,强化相为高硬度的亚稳 M_7C_3 合金碳化物。这样的组织结构为刹车盘提供了较高的耐磨性及较好的韧性。

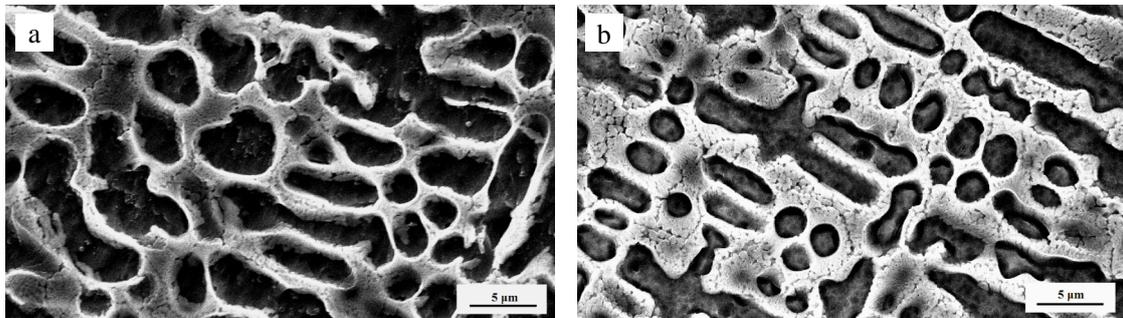


图2 激光熔覆 Fe 基及 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 涂层典型组织 (a) Fe 基 (b) $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$

Fig.2 Microstructure of laser cladding coatings (a) Fe-based (b) $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$

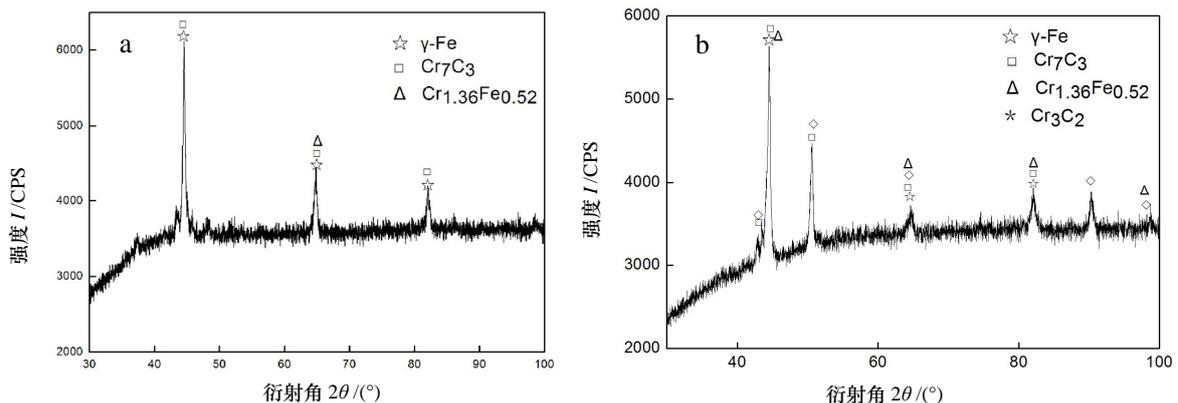


图3 激光熔覆合金涂层 X 射线衍射图 (a) Fe 基 (a) $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$

Fig.3 XRD spectra of laser cladding coatings (a) Fe-based (b) $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$

2.2 熔覆层的显微硬度与摩擦磨损性能

图4为Fe基涂层与 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 涂层的显微硬度沿层深分布。由图4可看出,曲线呈明显的三阶梯形式,分别对应熔覆区、热影响区和基体。Fe基合金涂层硬度为450 HV左右; $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 复合涂层的硬度

在距表层0.4 mm处有一极大值532 HV,而后下降到500 HV左右并一直保持到整个熔覆层再急剧下降。近表面区的高硬度与近表层极细小的枝晶和 Cr_7C_3 、 Cr_3C_2 等相相关^[11]。 Cr_3C_2 的加入使硬度增加,这是多种强化机制共同作用的结果:首先,激光熔覆时

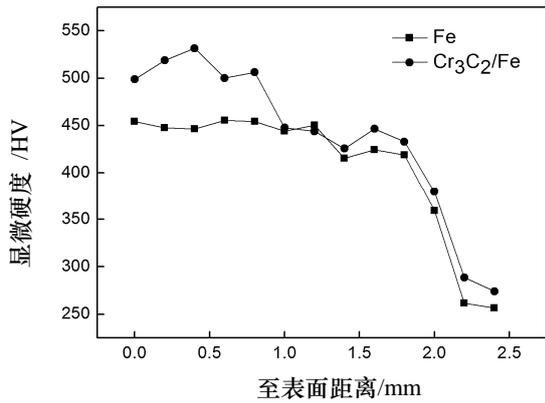


图 4 Fe 基和 Cr₃C₂/Fe 涂层的显微硬度分布情况
Fig.4 Micro-hardness distribution of two coatings

快速凝固及 Cr₃C₂ 颗粒在重新凝固过程中析出的碳化物对组织起到细晶强化作用; 其次, Cr₃C₂ 颗粒分解并溶解于基体有利于熔覆层的固溶强化; 另外, 少量未熔 Cr₃C₂ 颗粒弥散分布于基体起到弥散强化的作用。

图 5 为基体、Fe 基涂层及 Cr₃C₂/Fe 复合涂层在干滑动摩擦条件下的磨损失重。由图 5 可看出, Cr₃C₂/Fe 复合涂层的耐磨性优于 Fe 基合金涂层, 基体的耐磨

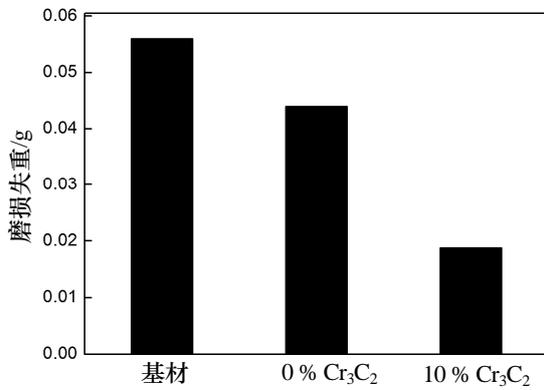


图 5 基体与不同熔覆层的磨损失重
Fig.5 Wear mass loss of substrate and different coatings

性最差, 磨损失重为 Cr₃C₂/Fe 复合涂层的 3 倍。

图 6 为基体、Fe 基涂层及 Cr₃C₂/Fe 复合涂层在干滑动摩擦条件下摩擦因数随时间的变化趋势。由图 6 可看出, Cr₃C₂/Fe 复合涂层摩擦因数高于 Fe 基合金涂层, 基体的最低。Cr₃C₂/Fe 复合涂层中大量共晶碳化物 Cr₇C₃、Cr₃C₂ 提高了涂层硬度, 在摩擦磨损过程中起到了阻摩作用, 从而提高了复合涂层的摩擦因数; 而基体和 Fe 基涂层的硬度较对偶件低, 在磨损过程中作为易损件很容易被磨耗, 从而产生较低的摩擦因数及较高的磨损率。另外, 摩擦因数都随时间而减小, 最后趋于稳定。这主要是因为摩擦初始跑和阶段, 在接触面间微凸体和磨粒的影响, 同时磨损后新接触表面积增大, 粘着增大, 都会使摩擦因数很高。但随着试样表面的磨损加剧, 摩擦环表面的磨损粒子迁移保持平衡, 会使摩擦因数急剧下降并趋于稳定。Cr₃C₂/Fe 复合涂层硬度的提高为其提供了较好的耐磨性及较高的摩擦因数, 从而满足了刹车盘的低磨损量、高摩擦因数的要求。

图 7 为基材、Fe 基涂层及 Cr₃C₂/Fe 复合涂层磨损表面形貌 SEM 照片。由图 7(c) 可看出, Cr₃C₂/Fe 复合

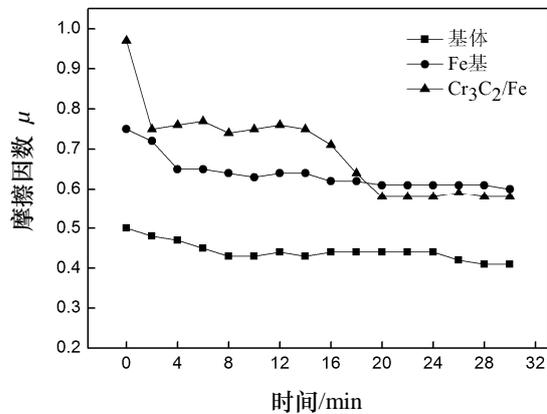


图 6 基体与不同熔覆层的摩擦因数
Fig.6 Comparison of friction coefficient

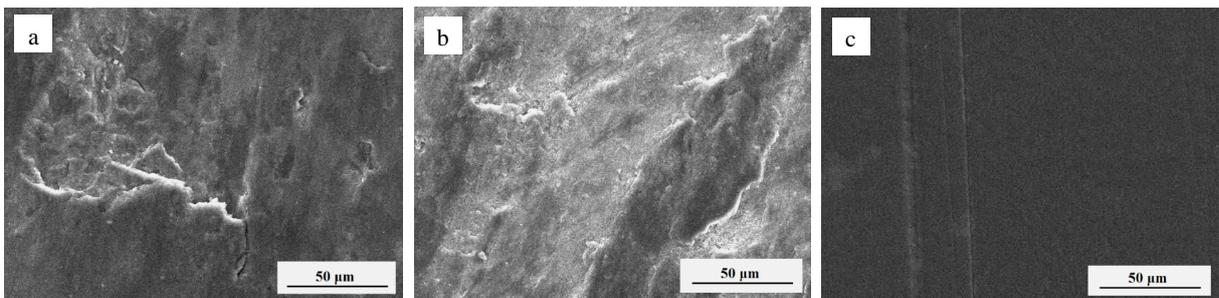


图 7 熔覆涂层的磨损表面形貌 SEM 照片 (a) 基体 (b) Fe 基涂层 (c) Cr₃C₂/Fe
Fig.7 SEM morphologies of wore surfaces of different claddings (a) substrate (b) Fe-based cladding (c) Cr₃C₂/Fe

涂层磨损表面较光滑平整,无剥落坑及裂纹产生,只出现轻微划痕;而基体和Fe基涂层磨损表面产生严重的黏着和剥落,如图7(a)和(b)。分析认为,Fe基涂层的硬度相对于偶件低,且其间的共晶碳化物呈网状分布,因此在磨损过程中,脆性的网状共晶碳化物易产生应力集中,从而产生裂纹和剥落坑,因此Fe基涂层的磨损机理主要为黏着磨损和剥落。 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 复合涂层中未熔 Cr_3C_2 和凝固时形成的富Cr的 M_7C_3 及其间大量细小的共晶碳化物在磨损过程中起到了抗磨骨架作用,且快速冷却使得涂层组织细化,赋予涂层基体 $\gamma\text{-Fe}$ 优良的强度和韧性结合,在磨损过程中可对耐磨增强相起到支撑和连接作用,最大限度地发挥耐磨增强相的抗磨骨架作用。因此, $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 涂层磨损机理主要为轻微划擦。

3 结 论

(1) 铁基涂层以亚共晶方式结晶,在初生固溶体枝晶间存在大量网状共晶组织。 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 涂层中 Cr_3C_2 颗粒大部分溶解,熔覆层凝固特征没有改变,但枝晶间的形貌发生了变化。

(2) 激光熔覆铁基涂层主要由 $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cr_7C_3 及Cr-Fe固溶体组成, $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 涂层的主要组成相为 $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cr_7C_3 及Cr-Fe固溶体以及少量未熔的 Cr_3C_2 。

(3) $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe}$ 涂层的硬度高、磨损率低,摩擦因数大,解决了刹车盘要求的摩擦因数大、磨损率低的矛盾。

参考文献:

- [1] 陈立人. 钴机刹车毂失效与CrMo钢热疲劳性能研究 [J]. 石油机械, 2004, 32(增刊): 18-21.
- [2] Strafford K N, Subramanian C. Surface engineering: an enabling technology for manufacturing industry [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 53: 393-403.
- [3] 王振廷, 陈华辉, 王永东. 感应熔覆原位合成TiC增强金属基复合涂层组织与抗磨性能的研究 [J]. 摩擦学报, 2006, 26(4): 310-313.
- [4] 王新华, 张嗣伟. 石油钻机盘式刹车副材料的摩擦磨损性能 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(12): 5-8.
- [5] 马红玉, 王镇全, 等. 无压浸渍锰白铜合金- W_2C 复合涂层的磨损特性研究 [J]. 摩擦学报, 2007, 27(4): 387-391.
- [6] 易茂中, 韩志海, 等. 等离子喷涂铁-镍-钴-碳化钨涂层制动摩擦特性的研究 [J]. 摩擦学学报, 1996, 16(2): 150-155.
- [7] 宋志坤, 何庆复, 谢基龙. 镍基热喷涂层对列车车轮铸钢抗制动热疲劳损伤作用机制探讨 [J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(4): 86-88.
- [8] 宋志坤. 车轮铸钢铁基金属涂层改善热疲劳损伤的强化机制 [J]. 金属热处理, 2007, 32(1): 46-48.
- [9] 陈爱智, 张永振, 肖宏滨, 等. 镍基WC陶瓷涂层的干滑动摩擦磨损性能 [J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(5): 52-57.
- [10] J. Mateos. Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ coatings [J]. Tribology International, 2001, 34: 345-351.
- [11] 王义厢, 李宝增, 等. 45钢表面激光熔覆铁基金属涂层显微组织与性能 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(7): 131-133.

作者地址: 中国石油大学(华东)机电工程学院 257061
Tel: (0546) 8393907
E-mail: lpp198507@163.com

• 本刊讯 •

《腐蚀控制系统工程学概论》已经出版

《腐蚀控制系统工程学概论》全面系统地阐述了产品、装备或工程建设项目在加工、装配、储存、运输、使用、维护、维修过程中所遭遇的制造环境、使用运行环境和周围环境协同作用而发生的化学、电化学变质、退化或破坏;提出了控制腐蚀要从设计开始,贯穿于设计、制造、使用、维护、维修全过程,进行全员、全方位的系统化控制的理念及其理论、原则、技术和措施,这是源于“腐蚀科学”、又超越“腐蚀科学”、是“腐蚀科学”和工业建设紧密结合的产物。

《腐蚀控制系统工程学概论》是成千上万工程技术人员的实践结果、是理论与实践的科学结晶、是腐蚀控制设计、制造与使用工程师的宝贵指南。该书可供各种行业研制、设计、制造、检验、储运、维护维修、供应、管理等部门的设计师、工程师和管理人员使用;可作为工学院大学生、研究生、博士生的教材。现已由化学工业出版社出版,定价69元。

(李金桂)