

滑动干摩擦条件下 HVOF 高铝青铜涂层的摩擦磨损性能

路 阳 周晶晶 杨效田 丁明辉

(兰州理工大学材料科学与工程学院; 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室)

摘 要 针对高铝青铜粉体材料的涂覆应用,采用 HVOF 技术制备铝青铜(Cu-14Al-X)粉体材料涂层,并与 304 不锈钢进行滑动干摩擦试验,结合扫描电子显微镜、能谱和电子探针等手段研究涂层的摩擦磨损性能。结果表明,在滑动干摩擦条件下,HVOF 高铝青铜涂层的主要磨损形式是粘着磨损及轻微的磨粒磨损。摩擦热使涂层达到了理想粘着摩擦表面的要求,因此涂层具有十分优良的减摩性能,尤其是在高载荷条件下。HVOF 高铝青铜涂层的硬度(HV)为 500,该硬度保证了涂层具有较低的磨损率,属于轻微磨损。

关键词 高铝青铜;超音速火焰喷涂;滑动干摩擦;摩擦磨损性能

中图分类号 TG146;TG135

文献标志码 A **文章编号** 1001-2249(2011)06-0583-04

DOI: 10.3870/tzzz.2011.06.027

Friction and Wear Behavior of HVOF High Al Bronze Coating on 45 Stainless Steel under Dry Sliding

Lu Yang, Zhou Jingjing, Yang Xiaotian, Ding Minghui

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology)

Abstract: Cu-14Al-X powder coating was prepared by HVOF. Dry sliding experiment against 304 stainless steel was carried out to evaluate the friction and wear behavior of Cu-14Al-X coating by SEM (scanning electron microscope), EDS (energy dispersive spectrometer), EPMA (electronic probe micro-area analysis). The results reveal that under dry sliding conditions, main wear mechanism of Cu-14Al-X coating is characterized by adhesive wear with slightly abrasive wear. The coating possesses excellent self-lubrication and wear resistance, especially under high loads, as a result of friction heat changing the coating to a perfect adhesive tribology surface. Micro-hardness of the coating reaches 500Hv, which makes the coating exhibit a lower wear rate, belonging to the mild wear.

Key Words: High Al Bronze, HVOF, Dry Sliding, Friction and Wear Properties

铝青铜具有强度高、硬度高、耐磨耐蚀性好,冲击无火花,导热系数高、刚度稳定、热导率大、耐烧结、抗粘着等优点,因此被广泛用于铁路、航空及航海等领域^[1~3]。但传统铝青铜存在不能胜任高载、高速工作等缺点。20世纪90年代德国、日本相继研发专利合金并成功用于实践以来,经过多年努力,国内在开发新型铝青铜方面也取得了明显进展,开发出KK^[4]、HY1^[5]、轧钢设备用YJ2ZQMnAl耐磨青铜以及高铝青铜Cu-14Al-X等^[6~8],其性能均优于普通铝青铜。

为了降低Cu-14Al-X的成本以及拓宽其应用范围,本课题组将合金制备成粉体材料并采用不同方法将其制备成工件表面保护层,以实现更好的工业化推广应用。激光熔敷技术和等离子喷焊技术都能制备出性能

优良的基体保护涂层^[9~11],但激光熔敷技术制备的Cu-14Al-X涂层性能优于等离子喷焊层,说明不同的涂层制备方法对制备的涂层性能具有重要影响。另外,考虑到激光熔敷技术和等离子喷焊技术制备涂层成本较高,而超音速火焰喷涂(HVOF)技术制备的涂层具有结合强度高、耐磨性能好、结构致密,生产成本低等特点,在制备碳化物陶瓷材料涂层方面显示出巨大的优势^[12,13],所以本研究试图寻找一种成本较低、操作方便、更适合该合金粉体材料的涂覆方法,并通过对该方法制备的涂层性能的研究,进一步研究该合金的各项性能。本课题采用HVOF技术制备Cu-14Al-X涂层,通过测试摩擦因数和磨损率,结合摩擦表面成分分析和形貌观察,研究该涂层在滑动干摩擦条件下的摩擦磨损性能

收稿日期:2011-02-11;修改稿收到日期:2011-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774040,50804019);中俄国际合作交流资助项目(2009DFR50570)

第一作者简介:路阳,女,1957年出生,教授,甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室,兰州(730050),电话:13919178020, E-mail: joyking@mail2.lut.ca

通讯作者:周晶晶,女,1984年出生,硕士研究生,兰州理工大学13号信箱(730050),电话:13893334542, E-mail: canlanyintian@126.com

能。

1 试验材料和方法

采用的涂层材料是自主研发的新型高铝青铜,其化学成分见表1。通过HVOF技术将高铝青铜粉末喷涂在45钢基体上制备涂层。在喷涂之前,用丙酮清洗基体并对基体进行粗化处理。DM-5000 HVOF设备喷涂高铝青铜粉末的参数如下:氧气流量为 $30\text{ m}^3/\text{h}$;燃料流量为 18 L/h ;送粉器流量为 800 L/h ;送粉器压力为 10 MPa ;氮气送粉。

表1 高铝青铜的化学成分 %

w_B					
Al	Fe	Cu	Mn	Ni	Co
12~16	2.0~4.0	70~80	0.5~2.0	0.2~0.5	0.2~0.5

采用HVS-1000显微硬度计测试涂层的显微硬度;摩擦试验在MMW-1万能摩擦磨损试验机上进行,采用低速销盘式摩擦副。上试样为待测试样,尺寸是 $\phi 6\text{ mm} \times 14\text{ mm}$;下试样为对磨件304不锈钢,尺寸是 $\phi 4\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。将5个试样分别在100、200、300、420、540 N的载荷下进行滑动干摩擦试验,用TP-114电子天平称取试样磨损前后的质量,计算涂层的磨损率。设定摩擦时间和转速分别是 15 min 和 103 r/min 。每次试验前,分别将试样与对磨件用900号水砂纸打磨并用丙酮清洗,最终使对磨件表面平均粗糙度为 $0.1\sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。用扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)和电子探针(EPMA)分析了磨损后涂层的表面形貌、微区成分以及元素分布,进一步研究涂层的摩擦磨损机理。

2 试验结果与分析

2.1 摩擦磨损性能

图1为高铝青铜涂层摩擦因数随载荷的变化情况,可以看出,随着载荷由低到高的变化,涂层的摩擦因数呈现逐渐递减的趋势。在载荷为100 N时,摩擦因数为0.21,这对于干摩擦来说是非常小的^[14]。在载荷继续增加到300 N以上的过程中,摩擦因数仍然在逐渐减小,但此时变化的幅度较小,最后趋于稳定。说明涂层不但具有良好的减摩性,而且此减摩性能在高载荷条件下表现得更好。这是由于滑动干摩擦产生的摩擦热软化甚至熔化了材料表面,使材料表面发生了塑性变形,增大了涂层表面固体润滑作用,减小了磨粒磨损,有效地降低了接触面间的剪切力,从而增加了材料自身的减摩性。

图2为磨损率随着载荷的变化情况。从图2可见,涂层的磨损率随着载荷的增加也呈现递减的趋势,并都

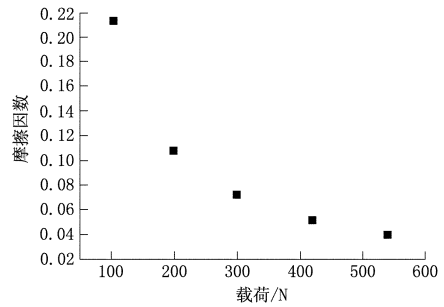


图1 不同载荷下超音速火焰喷涂(HVOF)高铝青铜涂层的摩擦因数

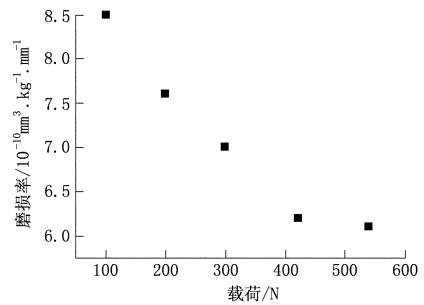


图2 不同载荷下超音速火焰喷涂(HVOF)高铝青铜涂层的磨损率

在同一数量级上,具有一定的稳定性。从磨损率来划分,当磨损率在 $(10^{-8}\sim 10^{-9})\text{ mm}^3/(\text{kg} \cdot \text{mm})$ 时,材料的磨损属于轻微磨损^[15],而涂层在不同载荷下的磨损率均小于 $10^{-9}\text{ mm}^3/(\text{kg} \cdot \text{mm})$,因此属于轻微磨损的范畴。说明HVOF高铝青铜涂层具有很好的减摩耐磨性。

2.2 磨损表面检测

图3为涂层磨损后的SEM照片。由图3中磨损后的涂层形貌可见,HVOF高铝青铜涂层主要磨损机制为粘着磨损及轻微的磨粒磨损。不同载荷下,磨损机理略有不同,随着载荷的增加粘着磨损表现得越严重。以300 N为分界点,当载荷低于300 N时粘着带的数量较少、尺寸较小,这时磨粒磨损表现得更加突出。但是,当载荷高于300 N时,情况则相反,涂层伴有不同程度的塑性变形,且载荷越大塑性变形越严重,粘着磨损越突出。这是因为高铝青铜涂层中存在一些硬质K相(AlFe、FeMn₃、Al₇Cu₄Ni等),在摩擦过程中率先脱离基体变成磨粒在摩擦副间运动,同时对涂层产生了犁削作用,造成不同程度的划痕,因而涂层在低载荷下磨粒磨损表现突出。但随着载荷的增加,这些硬质K相被挤压的数量以及变形的程度也随之增大,再加上摩擦热对他们的软化作用,使之在不断的加载过程中发生塑性变形,所以在高载情况下,涂层以粘着磨损为主。

从100 N和200 N的照片中选取不同区域做EDS分析,所选区域和分析结果见图4和表2、表3,其中A区域为非粘着带;B区域为粘着带。可以看出,铜、铝的

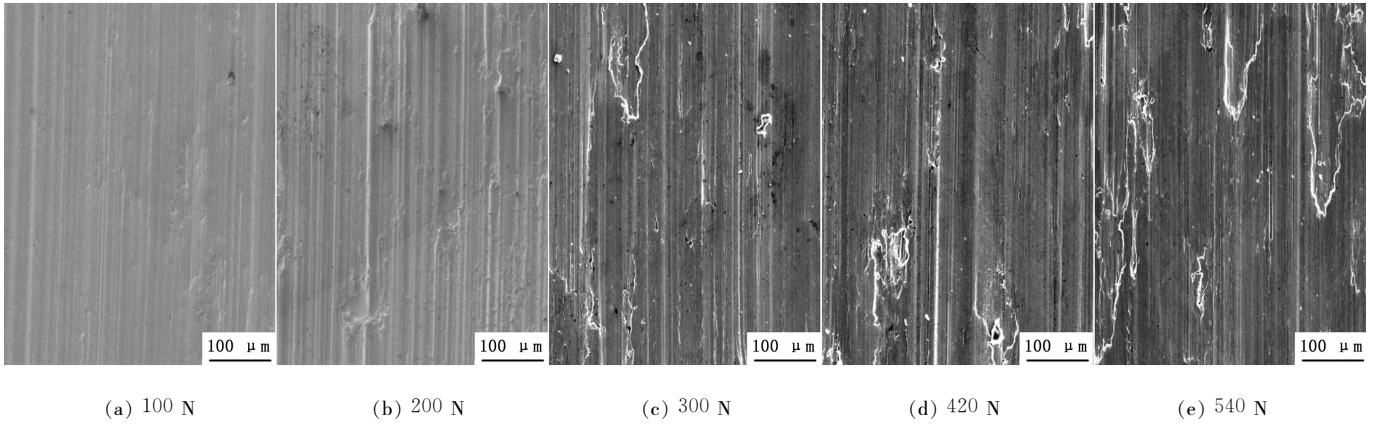


图3 磨损后不同载荷下超音速火焰喷涂(HVOF)高铝青铜涂层的表面形貌

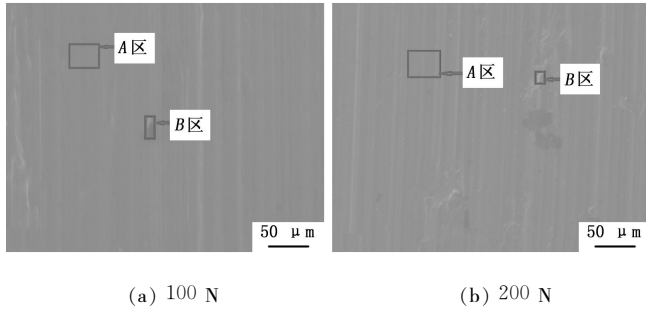


图4 磨损后涂层表面微区成分分析选区

含量在粘着部位有明显地减少,且载荷越大含量减少越多,这表明在摩擦过程中涂层中的铜、铝发生了转移,且载荷越大,转移量越大;另外铁的含量无论是在粘着部位还是非粘着部位都略有增加,说明不锈钢中的铁在摩擦过程中向涂层进行了转移;而氧元素在温度较高的粘着带的含量明显高于非粘着带的含量,这是因为材料在干摩擦过程中,表面产生的大量摩擦热很难及时有效地

导出而造成热积累,使摩擦面的温度升高,导致摩擦表面氧化,而粘着部位的温度高于非粘着部位,所以氧化较严重。

摩擦试验结束后,对磨件 304 不锈钢磨损表面上有涂层颜色的粘着斑点,并且载荷越大粘着斑点的尺寸越大、数量越多,说明滑动干摩擦过程中高铝青铜涂层向不锈钢发生了转移并且载荷越大转移越多,这也与前面所提到的涂层中铜、铝发生了转移的结论相符合。这些元素的转移是因为滑动干摩擦过程中的剪切没有发生在结点的分界面上,而是发生在被摩擦热软化的金属基体内部,软金属会被粘接到硬金属表面上,在渐增的加载过程中,粘附着的金属就会越来越多,有的甚至会脱落形成磨屑。金属的转移现象是粘着磨损的一个重要特征^[16],因此可以再次证明该涂层在干摩擦件下发生了粘着磨损。

表2 100 N 下高铝青铜磨损后表面不同区域的主要元素含量

区域 (A、B)	w(Cu)	x(Cu)	w(Al)	x(Al)	w(Fe)	x(Fe)	w(Mn)	x(Mn)	w(Ni)	x(Ni)	w(Co)	x(Co)	w(O)	x(O)
摩擦前	78.01	66.38	14.05	24.14	3.06	4.90	1.44	1.42	2.42	2.23	1.02	0.94	—	—
A 区	75.71	63.53	11.50	21.32	7.02	6.87	1.20	1.12	2.22	1.96	1.01	0.91	1.34	4.29
B 区	69.92	49.88	12.77	21.45	5.25	4.26	1.22	1.00	2.57	1.98	0.98	0.76	7.29	20.66

表3 200 N 下高铝青铜磨损后表面不同区域的主要元素含量

区域 (A、B)	w(Cu)	x(Cu)	w(Al)	x(Al)	w(Fe)	x(Fe)	w(Mn)	x(Mn)	w(Ni)	x(Ni)	w(Co)	x(Co)	w(O)	x(O)
摩擦前	78.01	66.38	14.05	24.14	3.06	4.90	1.44	1.42	2.42	2.23	1.02	0.94	—	—
A 区	75.57	65.27	10.97	21.45	5.41	4.83	1.29	1.24	2.25	1.66	1.04	0.66	2.48	4.88
B 区	69.45	47.32	10.58	10.58	5.10	3.95	1.16	0.91	2.32	1.71	0.87	0.64	10.53	28.49

2.3 温度、硬度对摩擦磨损性能的影响

在干摩擦条件下,除温度以外,影响摩擦因数的因素还有载荷、滑速、材料、表面膜等,由于这些因素的变化都会对摩擦热的形成和发展产生影响,因此温度是干摩擦过程最明显的特征。根据粘着理论中摩擦因数的表达式可以看出, $\mu = \tau'_b / \sigma_{xy}$, 式中, τ'_b 为较软金属的剪切强度; σ_{xy} 为材料的压缩屈服强度。想要得到较低的摩擦因数 μ , 可以在硬金属表层上面覆盖一薄层软金属,即达到理想粘着摩擦表面的要求(表面软,亚表面

硬^[15]见图5)。这样材料的承载能力由硬金属主体来保证(它的 σ_y 大),而剪切则发生在软金属薄层里(它的 τ'_b 小),因此摩擦因数就降低了^[16]。滑动干摩擦条件下产生的摩擦热使 HVOF 高铝青铜涂层表面温度升高并软化,硬度下降,但涂层内部受热影响较小,仍然可以维持材料原有的力学性能,因而获得了相对于干摩擦来说较小的摩擦因数。而金属表层温度一般随着载荷、速度而变化,载荷、速度越高,摩擦表面温度越高,因此摩擦因数越小。另外试验测得 HVOF 高铝青铜涂层的硬

度(HV)为500,此硬度明显高于激光熔敷层硬度(HV)为340和等离子喷焊层硬度(HV)为270,这是因为在HVOF技术中,熔融粒子以高达300~650 m/s的速度被喷涂在基体表面,因此可获得硬度、结合强度高,结构致密的高质量涂层。一般情况下,材料的硬度会随温度的升高而降低,但是HVOF高铝青铜涂层原本较高的硬度使涂层亚表面受温度影响后依然可以维持一个较高的硬度,因此涂层具有较好的承载能力来保证较低的磨损率。由此可见,温度和硬度共同影响了HVOF高铝青铜涂层在滑动干摩擦条件下的摩擦磨损性能。

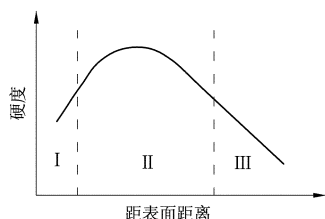


图5 理想粘着摩擦表面示意图

如果把摩擦形式换为水润滑或边界润滑便可以实现该涂层材料更为优异的减摩耐磨性^[14]。因为在摩擦过程中,水和润滑油都有冷却剂的作用,这更有利于维持材料的力学性能从而提高它的耐磨性。但是在足够大的载荷下,水和润滑油的冷却作用只能抵消很少的摩擦热,所以材料的减摩性并不会受到太大的影响。

综上所述,无论是干摩擦条件下还是在边界润滑或是水环境中,HVOF高铝青铜涂层都是一种优良的耐磨材料。

3 结论

HVOF高铝青铜涂层在滑动干摩擦条件下主要的磨损机制是粘着磨损以及轻微的磨粒磨损,并且载荷越大粘着磨损越严重。摩擦热使得涂层表面达到了粘着磨损机制下理想的表面结构(表面软、亚表面硬),因此HVOF高铝青铜涂层具有十分优良的减摩性能,尤其是在高载荷条件下。高铝青铜粉体材料通过HVOF技术获得了硬度高、结构致密的高质量涂层,该硬度(HV)为500时很好地维持了涂层的力学性能,从而保证了涂层较低的磨损率,使涂层磨损属于轻微磨损。

参 考 文 献

- [1] 丁朝模. 有色金属进展(重有色金属)第四卷[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1995.
- [2] 方正春. 耐热和导电铜合金的发展现状[J]. 材料开发与应用, 1997, 12(4): 27-31.
- [3] 李文生, 王智平, 路阳. 高强铜基合金材料的研究与应用现状[J]. 有色金属, 2002, 54(2): 30-34.
- [4] 李元元, 夏伟, 张文, 等. 高强度耐磨铝青铜合金及其摩擦学特性[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(3): 76-80.

- [5] 梁金生, 梁广川, 高兴华. 铜基合金模具材料的研究[J]. 金属热处理, 1995(9): 12-13.
- [6] 徐建林, 王智平. 铝青铜合金的研究与应用进展[J]. 有色金属, 2004, 56(4): 51-54.
- [7] 路阳, 王智平, 李文生, 等. 热处理对铜合金模具材料组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2002, 27(3): 40-42.
- [8] 路阳, 金峨馨, 李文生, 等. Fe对高铝青铜摩擦磨损性能的影响[J]. 材料导报, 2008, 22(2): 135-137.
- [9] 李亚斐. 铜合金粉体材料涂层摩擦磨损性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2009.
- [10] BIJAYA ADAK, PHILIP NASH, DAJUN CHEN. Microstructural characterization of laser cladding of Cu-30Ni [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(8): 2 051-2 054.
- [11] DUBOURG L, HLAWK F, CORNET A. Study of aluminum-copper-iron alloys: application for laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2002(2): 329-332.
- [12] 查柏林, 王汉功. HVO/AF超音速火焰喷涂技术在工业中的应用[J]. 机械工人, 2005(9): 30-32.
- [13] 饶琼, 周香林, 张济山, 等. 超音速喷涂技术及其应用[J]. 热加工工艺, 2004(10): 49-52.
- [14] JIA J H, CHEN J M, ZHOU H D, et al. Friction and wear properties of bronze-graphite composite under water lubrication[J]. Tribology International, 2004, 37(5): 423-429.
- [15] 高彩桥. 摩擦金属学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988.
- [16] 林复生. 简明摩擦学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1987.

(编辑:刘卫)

我国压铸行业革新前进 发展空间巨大

在国内,铸造业是关系国计民生的重要行业,是汽车、石化、钢铁、电力、造船、纺织、装备制造等支柱产业的基础,是制造业的重要组成部份。据国际模具及五金塑胶产业供应商协会秘书长罗百辉介绍,我国铸造生产企业主要分布在东部,西部产量较少,目前全国铸造企业约有24000家,从业人员约120多万。

随着新压铸技术以及工艺的融入,铸件也不再局限于汽车工业和仪表工业,而是逐步扩大到其它各个工业部门,如农业机械、机床工业、电子工业、国防工业、计算机、医疗器械、钟表、照相机和日用五金等几十个行业。

全球经济一体化的浪潮对压铸行业也产生了巨大影响,铸件市场上的竞争手段越来越多。除了对铸件本身的质量、价格、交货期限及相关服务要求更加苛刻外,采购商们又普遍提出了一些额外的附加要求,主要体现在贸易技术壁垒方面,而供应商所提出的种种认证、认可方面的要求,则已经成为行业内最常用的技术壁垒手段。在越来越苛刻的对铸件本身的质量要求、价格和交付期限、相关服务的基础上,采购商们普遍地提出了一些额外的附加要求。体现在贸易技术壁垒方面,对于供应商所采取的种种认证、认可方面的要求,已经成为最常用的手段。

另外,外国大型铸造企业纷纷加大了在华投资的力度,通过直接投资和并购的方式增加在华投资。这一方面提高了我国铸造业的总体水平,另外一方面也增加了国内市场的竞争程度。

(摘自机电商情网)