

铝合金热喷涂技术的研究进展和应用展望

方学锋,王泽华,刘腾彬

(河海大学机电学院,江苏常州 213022)

摘要:分析了国内外铝基材料热喷涂技术研究所取得的成就和存在的问题,提出了涂层材料的设计和热喷涂工艺选择的原则,探讨了涂层与基体的结合机理以及提高其结合强度的措施,并对铝基材料采用热喷涂技术的应用进行了展望。

关键词:轻量化;铝合金;热喷涂;涂层;应用

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7235(2005)10-0013-03

Development and Review of Thermal Spraying Technology on Aluminum Alloy

FANG Xue-feng, WANG Ze-hua, LIU Teng-bin

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: The research and the progress of thermal spraying technology on aluminum substrate have been reviewed. And the bonding mechanics of the thermal spraying cladding, the design of coating material, and the measurements to improve the bonding strength are specially analyzed.

Key words: light weighting; aluminum alloy; thermal spraying; coating; application

在汽车上,铝合金主要用于汽缸体、汽缸盖、活塞、车轮、进气管、方向盘、变速器壳、离合器壳、摇臂罩、油泵壳、散热器、油冷却器、蒸发器、冷凝器、地板和支架等^[1]。在铁道车辆上铝合金已用于制造车体和传动齿轮箱等。铝合金是汽车和铁道车辆实现轻量化的首选材料,然而铝合金的硬度低、耐磨性差,这一突出的弱点制约了铝合金的进一步应用,也制约了车辆轻量化的快速发展。因此,研究开发铝合金表面强化技术,提高其表面硬度和耐磨性,对扩大铝合金的应用,实现运载工具的进一步轻量化,具有十分重要的意义。

1 铝基材料热喷涂技术研究进展

1.1 热喷涂

热喷涂是将涂层材料加热到熔融或半熔融状态,同时借助于焰流或高速气体将其雾化,并推动这些雾化后的粒子喷射到基体表面,沉积为具有某种功能的涂层的技术。在热喷涂过程中,熔融的涂层

材料粒子不断地撞击,沉积下来形成了变形颗粒与基材表面之间、颗粒与颗粒之间互相咬合在一起的层状组织的涂层^[2]。

热喷涂是一种非常有特色的工艺,具有凝固迅速的特点,可得到极细晶粒结构的亚稳态相。高速射流可使喷涂、压实和烧结等过程一体化^[3]。热喷涂技术能使工件表面或局部具有耐磨、抗高温等性能。

1.2 铝合金热喷涂技术的研究进展

铝合金因为硬度低、耐磨性差,受磨损时失效快,因而使用受到很大的限制。而热喷涂层的高抗磨性正好可以弥补这一不足。热喷涂层中所含的氧化物、氮化物等第二相粒子均可增加涂层硬度,提高耐磨性,而涂层孔隙尚能保持一层润滑膜,还能容纳因磨损所产生的碎屑,从而使接触面积保持清洁,起到减磨作用^[4]。

欧美在 20 世纪 90 年代就开始研究铝合金表面喷涂耐磨涂层技术。美国 Sandia 国家试验室和 GM

收稿日期:2005-05-02

第一作者简介:方学锋(1982-),男,安徽安庆人,硕士。

公司一直在合作研究提高铝发动机机体耐久性的经济方法,即向发动机气缸壁喷涂耐磨涂层。该喷涂方法是在1650的高温下,钢丝熔化和雾化后形成小熔滴,被带进超音速射流中喷射到铝基体的缸壁上,快速形成高耐磨的金属/金属-氧化物复合涂层^[5]。

我国西安交通大学赵文轸和西安第二炮兵工程学院苏勋加等人采用铸造性能较好的ZL101铝合金作基体材料,涂层材料为Ni-Cr合金粉末,用MTC05P火焰喷枪对经除油喷砂后的试样表面进行喷涂,结果测得结合强度分别为8.29 N/mm²(无底层)和7.90 N/mm²(0.05 mm铜粉打底)^[6]。这种结合力一般是不能满足机件要求的。对此喷涂层进行激光重熔后,无底层试样最大结合强度不超过50 N/mm²,0.05 mm铜粉打底的试样强度最低值约50 N/mm²。山东大学田宪法等人对基材ZL108用激光熔覆法,使铝合金表层快速熔化,并将表面涂层(一种为纯硅粉加少量铝粉,另一种为钛粉+碳+铝粉)中的硬质相材料熔入表层,使铝合金表层强化,达到提高表层硬度和耐磨性的目的^[7]。钛+碳+铝涂层经激光熔覆处理后,生成TiC颗粒,使浅表层(约0.3 mm范围内)的硬度比原基体提高70%~100%,达到190 HV~210 HV,耐磨性也明显改善。然而,考虑到机械零件表层一般需要切削加工和高耐磨性能,这一硬化层深度和耐磨性能就显得不足。西安第二炮兵工程学院李平、王汉功等^[8]采用2 mm 1070A铝线材和2 mm的TA2钛线材,在2A12铝合金表面进行Ti-Al双线超音速电弧喷涂,涂层中存在Ti-Al金属间化合物,孔隙率为2.8%,结合强度为27 N/mm²~33 N/mm²,平均结合强度达29.4 N/mm²;显微硬度最高达HV_{0.2}913,最低为HV_{0.2}324,平均硬度HV_{0.2}631;耐磨性是2A12铝合金的17倍。研究表明,该涂层基本上满足自由表面和中小载荷对零件表面涂层结合力的要求,但总体来看,结合力仍然偏低,硬度波动比较大。

涂层性能与涂层材料和喷涂工艺密切相关,热喷涂技术的发展和应用的与热喷涂材料的发展互相促进、紧密相连的。

铝基体的耐磨涂层主要有WC、Ni、Co、Cr、Fe-Al合金。西安交通大学梁工英和华中科技大学郑启光等研究了在铝材表面喷涂(随后激光熔覆)形成的较高硬度的Ni-WC涂层^[9],长春光学精密机械学院材料工程研究所龚晓辉等^[10]研究了作为低散热发动机关键部件的铝合金活塞顶部的热障层,在铝合金与

氧化物陶瓷之间采用等离子喷涂技术加上起粘结剂作用的镍合金层,清华大学李言祥、马剑等^[11]研究了铝基体先等离子喷涂复合陶瓷涂层Metco4MP,再激光二次熔覆Metco101NS氧化铝粉末。研究表明,常用合金元素中,镍、铬具有高耐磨性,硅与铝既有良好的亲和性,又可增加熔体流动性。硼可脱氧,生成低熔点化合物浮于表面,并可以与镍生成坚硬的硼化物^[12],抗磨。SiC颗粒强度高,耐磨性好,以20%的SiC颗粒增强6061铝合金,强度可由原合金的310 N/mm²提升到496 N/mm²,弹性模量由68 GPa增至103 GPa,但断裂收缩率却由12%降到5.5%^[13]。

不同的工作环境,要求涂层材料具有不同的性能,如耐磨涂层和减磨涂层,有必要试验不同涂层的硬度和耐磨损性能,找出最佳涂层材料。当涂层与基材难以结合时,可通过中间过渡层,实现双向牢固结合。

喷涂工艺包含表面预处理、热源参数选择、喷涂材料的送进量、雾化参数、工件温度和喷涂气氛控制、涂层后处理等,重点要注意基材表面预处理和喷涂过程中的保护。

喷涂工艺参数是决定涂层质量的关键。这就要求对工艺参数进行优化,保证被喷涂的材料粒子都能加热到熔融或半熔融状态,高速射向基体并均匀地沉积,形成致密的与基体有良好结合的涂层。

涂层后处理包含封孔处理、扩散处理和重熔处理。如在铝表面喷涂Fe-Al合金,在涂层表面刷上含铝的水玻璃,然后在900~1000下保温1 h,这样会产生Fe-Al扩散合金层,提高涂层的结合强度和防腐性能^[2]。涂层重熔后,可提高致密度,使成分更加均匀,而且消除残余应力。综观当前的研究发现,后处理容易被忽视,但它的作用却不可忽视。

评价制备工艺是否能够满足涂层要求,还必须最终通过长期的试验确定。但涂层制备工艺应满足工艺适应性,必须保证涂层的稳定性以及涂层与基体间接口的稳定性。

2 铝基体与涂层材料的结合强度

铝基表面进行热喷涂处理可得到耐磨层,但是铝表面易形成氧化膜,在大气中无论进行何种预处理都不能彻底去除,喷涂后氧化膜将夹于铝和涂层接口之间,阻碍了基体金属原子和涂层金属原子的良好接触,从而造成涂层与基体的结合强度差。这是铝基表面热喷涂结合强度低的关键所在。

在喷涂温度和一定压力的条件下,铝基体与涂

层材料作为不同材料相结合,它们的交界区称为接口。基体与涂层结合接口至基体深处分为四层:熔化和凝固层、再结晶的细化晶粒层、喷砂影响区里再结晶恢复层、未改变的原始基体^[14]。接口结合的具体内容有接口结构、接口结合机理、接口的物理性质和接口的稳定性等。铝基材料接口的组成不仅包括氧化物,还有在喷涂过程中生成的各种平衡和非平衡产物,如金属间化合物、共价键化合物、复合氧化物以及固溶体等。通过表面形貌分析和电子透射显微分析,可发现在接口处有大量的接口择优生长、相邻相之间的取向、局部的共格和准共格界面^[15]。

涂层材料与铝基体能否很好的结合,可看它们是否很好的浸润,浸润性好,则喷涂层与基材的界面张力大,附着就好。根据热力学定义 $(\partial G/\partial A_s)_{T,P,nB}$ 界面张力与铝合金的本性有关,温度和压强是由喷涂工艺决定的,同时与熔融金属的组成有关^[16]。由于铝表面能不高(标准摩尔吉布斯熵和热容分别为28.33,24.34 J/K mol^[16]),可通过清洗、离子轰击、电清理等铝材表面活化,提高表面能,增加与涂层的附着力。

国内外学者已认识到了轻合金表面热喷涂耐磨

涂层技术的优越性,对铝基材料热喷涂进行了一些试验研究,但受喷涂材料、工艺成熟度等条件的影响,涂层与基体的结合强度不高,涂层均匀性不好,技术上没有很大的突破。

为获得良好的涂层和基体的结合,低的孔隙率、致密的涂层,其基本的条件首先是要选择合适的涂层材料,使涂层与基体有较好的浸润性和兼容性,这样附着力大,增大内压力;其次是被喷涂的粒子要在低温下有高的飞行速度,动能大,确保与基体有良好结合,以及沉积粒子之间的好结合。同时焰流温度低,速度快,粒子受大气污染小,涂层产生压应力等也是有利条件^[2]。

3 应用展望

铝合金是实现运载工具轻量化最好的材料之一。由于铝合金硬度低、耐磨性能差的缺点,制约了它在一些重要零部件上的应用。随着科学技术的发展,能在铝合金工件表面喷涂一层硬度高、耐磨性能好并与基体牢固结合的材料,利用其质量轻的优点,将有力地扩大铝合金的应用,同时也加快运载工具轻量化技术的发展,促进交通运输行业的发展。

参考文献:

- [1] 刘静安. 铝材在汽车工业上的开发和应用[J]. 铝加工,1996,19(3):1-10.
- [2] 戴达煌,周克崧,袁镇海. 现代材料表面技术科学[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
- [3] Kumar D,Mod S C. 采用热喷涂进行金属陶瓷复合材料的近净成形[J]. 朱有利译,中国表面工程,1997,37(4):45-47.
- [4] Sawa M, Oohori J. Application of Thermal Spraying Technology at Steel Works[A]. Proceedings of 14th International Thermal Spray Conference (ITSC 95) [C]. Kobe, Japan, May, 1995, 37-42.
- [5] 孙国平,杨向明. 改善铸铝基体性能的热喷涂技术[J]. 铁道机车车辆工人,1997,(5):28-29.
- [6] 赵文轸,苏勋加,王汉功. 铝表面激光熔覆硬质合金层的结合强度[J]. 兵器材料科学与工程,1997,20(1):41-46.
- [7] 田宪法,耿浩然,郁可,等. 铝-硅合金表面激光合金化处理[J]. 机械工程材料,2003,27(8):44-46.
- [8] 李平,王汉功. 铝合金表面 Ti-Al 双丝超音速电弧喷涂涂层的组织与性能研究[J]. 材料工程,2003(3):17-20.
- [9] 梁工英,贺柏龄,苏俊义,等. 铝合金激光熔覆 Ni-WC 涂层的组织及耐磨性[J]. 中国激光,1998,25(10):950-954.
- [10] 龚晓辉,肖作江,初本利,等. 铝合金表面等离子喷涂镍层的显微分析[J]. 中国有色金属学报,1998,8(2):338-340.
- [11] 李言祥,马剑. 铝基体表面等离子喷涂后激光二次熔覆陶瓷层的研究[J]. 应用激光,1998,18(6):245-248.
- [12] Knotek Oetal. Structure of Ni-Cr-B-Si Coating Alloys[J]. Vac Sci Technol,1975,112(4):770-772.
- [13] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津:天津大学出版社,2000.

(下转第 18 页)

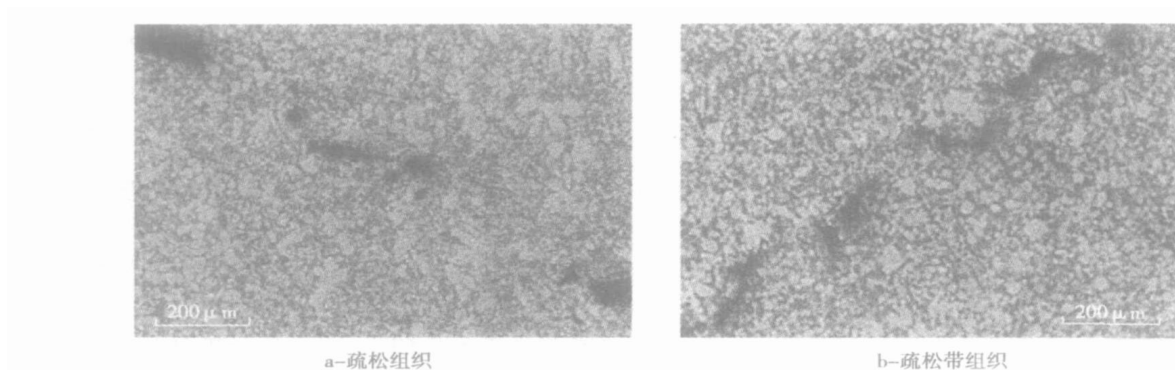


图3 失效零件的金相组织

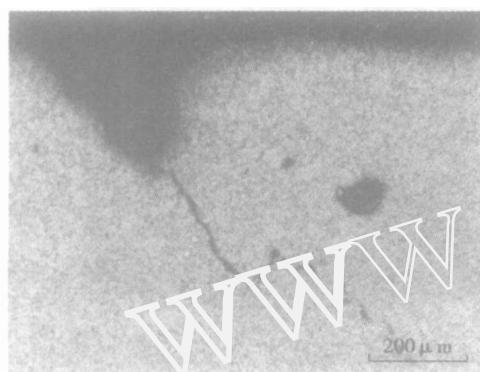


图4 失效零件的裂纹扩展图

下降。当受到外应力作用大于此处抗拉强度,或当零件冷却时产生较大的内应力时,均在该处造成应力集中。从而产生微裂纹,并在随后的使用过程中微裂纹迅速扩展,形成的裂纹并与疏松带汇合,随之不断扩展,最终导致整个零件断裂失效。

3 结论

YL112 铝合金压铸零件失效主要是由于组织中存在较多的疏松、孔洞,特别是疏松带等铸造缺陷。建议严格控制压铸工艺,以减少疏松、孔洞等缺陷,或者通过增加工作面的厚度,以增加零件的抗拉强度,避免零件过早失效。

参考文献:

- [1] 李荣德,于海朋,袁晓光. 合金元素在压铸合金中的作用及研究现状[J]. 特种铸造及有色合金,2004,136(1):18-21.
- [2] 陈叙. 铝铸件气孔缺陷的研究[J]. 铝加工,1995,18(5):1-4.
- [3] 黄新民. 变质和热处理工艺对铸造铝硅铜合金组织性能的影响[J]. 热加工工艺,1999(5):40-41.

(上接第15页)

- [14] Guilemany J M, Nutting J, Sobolev V V, et al. Interface Structures of HVOF Sprayed WC-Co Coating on a Copper Substrate[J]. Materials Science and Engineering,1997, A232:119,28.
- [15] 叶恒强. 材料界面结构与特性[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [16] 程兰征,章燕豪. 物理化学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1998.

捷如公司在设计制造中国最高档的拉弯矫直机列

上海捷如实业有限公司正在为东北轻合金有限责任公司制造一条薄带材拉弯矫直机列,可于2006年初投入运转。据称其各项指标均超过国产同类机列的,全部电机都是交流变频式的,一些技术参数如下:

带材最大宽度,1 500 mm;带材厚度,0.08 mm~1.00 mm;拉力,96 kN;最大清洗速度,260 m·min⁻¹;最大机列速度,300 m·min⁻¹。

机列上的切边机及弯曲机是从日本生田公司引进的。

(王祝堂)