

热喷涂技术在产品再制造领域的应用及发展趋势*

张 伟, 郭永明, 陈永雄

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 再制造产业已列为国家发展战略性新兴产业, 热喷涂技术具有喷涂材料广泛、基体形状与尺寸不受限制、涂层厚度容易控制、工艺操作简单、成本低效率高、能赋予零件表面特殊性能等特点, 是实现损伤零部件表面尺寸恢复和性能提升的关键技术手段, 已成功应用于国防工业、印刷、航空航天、石油化工、矿山机械、电力等领域装备零部件的再制造。文中综述了等离子喷涂、高速火焰喷涂、高速电弧喷涂及其他热喷涂技术的特点及其在再制造领域的典型应用, 提出热喷涂技术应用于再制造领域未来的发展趋势主要表现在: 加强热喷涂技术在再制造领域的适应性研究、深入复合技术的研究和应用、推动热喷涂技术在高效规模化生产应用中的研究以及加强热喷涂再制造技术标准、工艺规范等方面的研究。

关键词: 再制造工程; 热喷涂技术; 涂层; 表面性能

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)06-0001-10

Applications and Future Development of Thermal Spraying Technologies for Remanufacturing Engineering

ZHANG Wei, GUO Yong-ming, CHEN Yong-xiong

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Remanufacturing engineering has become one of the key contents in the national developing strategic emerging industry. As a key technology for remanufacturing engineering, thermal spraying has the characteristics such as wide kinds of feed materials, little restriction on substrate geometry and dimensions, controllable coating thickness, simple processing management, low investment, high deposition efficiency and special surface properties. Thermal spraying can also be regarded as a key technology due to its capability of remanufacturing damaged parts and property upgrade. As a result, it performs a booming development applied in many equipment components remanufacturing in the industries such as national defence, printing, aerospace, petrochemical, mining machinery and electric power. In this study, the present status of research and typical applications of thermal spraying technologies used in remanufacturing field was reviewed, including supersonic atmospheric plasma spraying, high velocity flame spraying and high velocity arc spraying methods. The characteristics of the thermal spray techniques were analyzed, and some remarks on the future development of the technologies used in remanufacturing field were put forward, including enhancing the adaptability investigations of thermal spraying available for remanufacturing, the multi-technology researches and applications, the high-efficiency and wide-scale industry study of thermal spraying and the related thermal spray remanufacturing standards or process criterions.

Key words: remanufacturing engineering; thermal spraying technologies; coating; surface properties

0 引 言

再制造工程是以机电产品全寿命周期设计和管理为指导, 对废旧机电产品进行修复和改造

的一系列技术措施或工程活动的总称, 是废旧装备高技术修复、改造升级的产业化^[1-2]。装备再制造已成为国家大力发展战略性新兴产业的核心内容之一。国外将再制造产业称为“朝阳产业”或称其为“潜在的巨人”。徐滨士于上世纪 90 年代后期在维修工程、表面工程基础上提出并积极倡导发展再制造工程^[3-4], 并针对我国废旧机电产品的状况和特点, 通过多年科研实践探索, 提出并发展了以“尺寸恢复和性能提升”为特色

收稿日期: 2011-09-09; 修回日期: 2011-11-07

基金项目: * 国家科技支撑计划 (2008BAC46B01, 2011BAF11B07, 2011BAC10B05); 再制造技术重点实验室基金 (9140C850205090C 8502)

作者简介: 张 伟 (1971—), 男(汉), 河北宁晋人, 教授, 博士。

的再制造技术模式。该模式的重要技术特点是将先进表面工程技术充分融入再制造,实现了废旧零件的尺寸恢复和性能提升^[5-6]。热喷涂技术作为表面工程技术领域中发展较快、应用较广的重要技术手段,具有喷涂材料广泛、基体形状与尺寸不受限制、涂层厚度容易控制、工艺操作简单、基体受热影响小、能赋予零件表面特殊性能等特点,已经作为一种再制造修复成形技术在国防工业、印刷、航空航天、石油化工、矿山机械、电力等领域得到广泛重视和应用^[7-10]。

文中围绕等离子喷涂技术、高速火焰喷涂技术与高速电弧喷涂技术,介绍了三种工艺的基本原理、特点、发展以及在再制造领域的一些典型应用,并对热喷涂技术在再制造领域的发展前景作了展望。

1 基于等离子喷涂技术的再制造

等离子喷涂技术始于上世纪50年代末期,是利用等离子弧对喷涂材料进行加热、加速,最终形成涂层的工艺方法,是热喷涂技术中热源温度最高、能量最集中的工艺方法,具有焰流温度高、射流速度快的特点,理论上可以喷涂所有具有物理熔点的材料^[11-13]。传统等离子喷涂技术可制备高熔点金属(W、Mo、Ta等)涂层、陶瓷涂层(Al_2O_3 、 ZrO_2 等),同时也用于放热反应型自粘结涂层(Ni/Al、Al/Ni等复合粉末)的制备。在喷涂金属及其合金、金属陶瓷粉末时,涂层结合强度常低于40 MPa,涂层孔隙率大于3%,且多为拉应力状态,常用于对涂层结合强度要求较低场合。

上世纪90年代中期以来,超音速等离子喷涂(Supersonic Atmospheric Plasma Spray, SAPS)技术的出现使等离子喷涂陶瓷涂层、金属及其合金涂层的结合强度、致密性等性能提高1倍以上^[14-16];另一方面,液料等离子喷涂技术的日益成熟以及低压等离子喷涂-薄涂层工艺(Low Pressure Plasma Spray-Thin Films, LPPS-TF)的问世,使等离子喷涂技术在制备纳米/亚微米结构涂层、薄涂层(5~50 μm)、易氧化涂层(Fe基、Al基、Cu基等)方面显示出独特的潜力^[17-18]。

等离子喷涂技术多用于解决航空、航天领域等高温部件的修复再制造。基于以上技术工艺的发展,等离子喷涂技术不但更多的应用于金属

零部件表面抗常温腐蚀、冲蚀、磨损的再制造,而且在新型热障涂层、固体氧化物燃料电池、人工关节涂层、半导体绝缘涂层等领域也有着极大的应用前景^[17-18]。

1.1 用于重载履带车辆薄壁零部件的再制造

重载履带车辆传动、行动和操纵部分表面损伤的零件中有许多薄壁零件,约占60%,这类零件在车辆系统的各总成中,主要用于部件单元的密封(部件单元的润滑油密封)和其它零件的定位,因此对这类零件的精度、表面性能要求较高。

研究表明^[8,16],这类薄壁零件的内表面通常都承受磨料磨损,但因与之相配合的零件差别和受力不同,其磨损特点有很大差别。例如,主离合器总成中的压缩轮盘的内表面,与耐磨铸铁制造的2个密封环相配合,服役时,重载履带车辆扬起的灰尘、砂土等侵入该部位而形成 SiO_2 沙粒的磨料磨损,但由于结合部分的受力小、速度慢,其磨损机理为低应力犁沟式磨料磨损,其平均磨损速率为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ mm}/(\text{h} \cdot \text{km})$ ($\text{h} \cdot \text{km}$ 为百公里);负重轮总成中的回绕挡油盖与压缩轮盘一样,都为45钢模锻后调质处理,经机械加工后的薄壁零件,其内表面与自压油挡(中间镶有弹性钢圈的橡胶圈)相配合,车辆行走时扬起的灰尘将直接侵入摩擦副,且该摩擦副还承受因地面不平而产生的冲击载荷,回绕挡油盖的内表面虽然在制造时已镀铬处理,但磨损极为严重,平均磨损速率高达 $6.0 \times 10^{-3} \text{ mm}/(\text{h} \cdot \text{km})$,磨损机理为高应力凿削式磨料磨损。

上世纪70、80年代,徐滨士带领课题组成员在国内首次应用普通等离子喷涂技术修复重载履带车辆的薄壁零件,选用镍包铝作喷涂底层材料,面层材料主要以铁基、镍基合金为主,重点对压缩轮盘中的内圆密封环配合表面和回绕挡油盖内圆自压油挡配合表面进行了修复强化^[19]。

对经等离子喷涂修复的重载履带车辆的薄壁零件,分两批共6辆车进行了装车考核试验。结果表明,对于密封环配合表面,喷涂修复层比新品的耐磨性能提高了2.13倍;对于自压油挡配合表面,喷涂层的耐磨性比新品提高7.34倍。按当时的新品零件价格,再制造修复零件与新品经济性比较如表1所示。

表 1 再制造修复件与新件件的经济性比较

Table 1 Economy comparison of remanufacturing repair units and new ones

零件名称	新品价格/元	新品毛坯重/kg	旧件喷涂后效果	节省碳钢/kg	节约资金/元
压缩轮盘	22	9.7	一件顶 3 件新品	19.4	44
密封盖	71	42	一件顶 3 件新品	84	142

于是,徐滨士院士当时就提出了“强化修复”的概念,即报废零件经过等离子喷涂处理,不仅恢复了尺寸,而且延长了使用寿命。这一技术思路为重载履带车辆的维修制度改革奠定了技术基础。

1.2 重载车辆发动机活塞裙部的再制造

活塞裙部是活塞组的重要组成部分,它主要起导向、传热作用,并承受来自曲柄连杆机构的侧向推力。铝合金活塞在使用过程中,因活塞与缸套的非正常配合运动,致使活塞裙部产生划伤、磨损,进而影响缸套的寿命。针对活塞的工况和磨损形式,考虑到基体材质,王海军等人通过采用超音速等离子喷涂 AlSi+Ni/Al 复合涂层对活塞裙部进行修复强化^[16],如图 1 所示。涂层与基体结合强度大于 55 MPa,显微硬度比基体提高 2 倍以上,喷涂后的活塞经磨削处理后如图 2 所示。经过 1 100 h 的台架考核试验,得到了活塞裙部的耐磨损性能比基体提高 1 倍以上,实现了活塞裙部再制造。

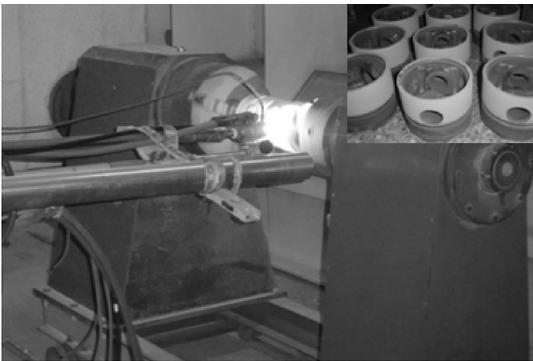


图 1 超音速等离子喷涂再制造活塞

Fig. 1 Remanufacturing process of supersonic plasma spraying pistons

1.3 印刷机械网纹辊的再制造

雕刻网纹辊通常应用在柔性印刷、凹版印

刷、高品质的涂布及层压复合机械上^[20]。传统加工基材一般选用优质碳素钢管,钢管的壁厚为 7~10 mm。辊体结构均采用带轴辊体形式,即用法兰盘和芯轴与钢管连接在一起。通过在金属基辊体表面电镀铜或电镀铬处理后,电刻蚀网纹(着墨孔)。在印刷过程中,刮墨刀的作用会对网纹辊产生一定的磨损,使着墨孔的开口度逐渐变小,同时深度逐渐变浅,网纹辊的传墨性下降。针对网纹辊表面高耐磨性的要求,可采用等离子喷涂陶瓷涂层修复传统镀铬失效辊,然后用激光雕刻制成陶瓷网纹辊。图 3 所示为村田激光技术有限公司生产的陶瓷网纹辊,它是由等离子喷涂技术在辊体表面制备 Cr₂O₃ 涂层,并经过高精度的磨削及镜面抛光后,再采用激光雕刻机精密雕刻而成。采用等离子喷涂技术再制造后的陶瓷网纹辊硬度高(1 100~1 300 HV),在耐磨损、耐腐蚀、亲水性能方面都有大幅度提升,



图 2 后续加工后的活塞形貌

Fig. 2 Photo of the remanufactured pistons after machining

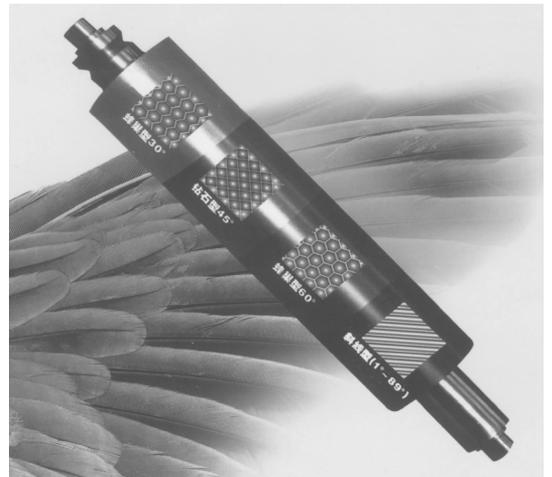


图 3 等离子喷涂氧化铬陶瓷网纹辊

Fig. 3 Plasma spraying ceramic anilox roll

印刷图像清晰、逼真^[21]。王海军等人^[22-23]采用超音速等离子喷涂技术制备了 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 等氧化物陶瓷涂层,在涂层组织、微观力学性能方面显示出孔隙少、涂层致密且显微硬度高的优势特点,是目前制备网纹辊表面涂层最好的工艺方法之一。

1.4 航空航天发动机高温部件的再制造

随着航空发动机技术的不断发展与性能提升,发动机的工作温度也逐步升高。目前先进发动机的压气机出口温度已达到 $650\text{ }^\circ\text{C}$,燃烧室及加力燃烧室的工作温度接近 $2\ 000\text{ }^\circ\text{C}$,涡轮进口温度达到 $1\ 650\sim 1\ 750\text{ }^\circ\text{C}$ ^[24-25]。这些部位的零件多采用钛合金、镍合金等材料制造,承受的温度有限,往往因高温疲劳而失效。研究表明,通过调整基体材料的方法提高零部件的使用温度已经很难有所突破。

热障涂层是航空、航天领域应用比较成熟的一项强化修复技术,它是通过采用等离子喷涂技术在高温合金基体表面制备氧化物陶瓷涂层,通过陶瓷涂层的隔热作用,实现了航空、航天发动机热端部件使用温度(耐高温性能)的提升^[26-27]。航空发动机叶片(如图4所示)、尾翼喷管采用等离子喷涂技术制备 $\text{MCrAlY}-\text{Y}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 双层结构热障涂层修复后,零件的隔热性能比基体提高了 $50\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 。近几年,国内韩志海^[28-29]等人在超音速等离子喷涂技术制备微纳米结构热障涂层方面取得了重大进展,实现了陶瓷涂层片层结构内部微观柱状晶的控制,进一步提高了涂层的隔热和抗热震性能,为航空、航天发动机关键零部件再制造性能的进一步提升打下基础。

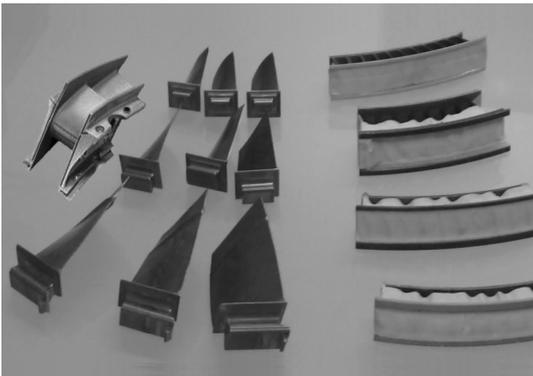


图4 等离子喷涂再制造航空发动机叶片
Fig. 4 Plasma spraying aeroengine vanes

2 基于高速火焰喷涂(HVOF/HVAF)技术的再制造

超音速(高速)火焰喷涂(high velocity oxygen fuel)技术(简称HVOF),是指利用气体或液体燃料,在高压大流量的氧气或空气助燃下形成高强度燃烧火焰,再通过特殊结构的喷管对这种高强度火焰进一步压缩、加速,使其达到超音速焰流,并以这种超音速焰流做热源加热、加速喷涂材料并形成涂层的工艺方法^[7-8,16]。超音速火焰喷涂是在爆炸喷涂的基础上发展而来的一项新技术,由美国Browning公司在20世纪80年代初期最先研制成功。1982年该技术以“Jet-Kote”为商品成为HVOF技术发展的第一代喷涂设备。HVOF发展至今,已经历了三个时代的发展。第三代HVOF系统以1992年研制成功的JP-5000型喷枪为标志,它采用液体燃料(煤油)为燃烧剂,火焰功率可达 $100\sim 200\text{ kW}$,送粉速率可提高至 $6\sim 8\text{ kg/h(WC-Co)}$ 。该系统具有非常高的速度(喷涂 $15\sim 45\text{ }\mu\text{m}$ 的 WC-12Co 粒子速度达 $400\sim 600\text{ m/s}$)和相对低的火焰温度($2\ 000\sim 2\ 700\text{ }^\circ\text{C}$),适合制备 WC-Co 、 $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2$ 等金属陶瓷材料涂层^[30-34],以及低熔点的金属及其合金材料(铁基、镍基自熔性合金)涂层,涂层的耐磨性能好,结合强度高(WC-Co 涂层结合强度大于 70 MPa)。

进入21世纪以来,采用空气助燃的大气超音速火焰喷涂系统(HVAF)出现,其焰流温度更低($1\ 400\sim 1\ 600\text{ }^\circ\text{C}$)、粒子速度更快($700\sim 800\text{ m/s}$),在制备 Cu 基、 Al 基等易氧化材料涂层及其 WC-Co 、 $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2$ 等金属陶瓷涂层方面显示出独特的优势。而以Metco公司WokaStar600系统为代表的新一代煤油超音速火焰喷涂系统则在喷枪稳定性方面取得了进展。另外,针对高速火焰喷涂技术不能制备传统的高熔点陶瓷材料涂层,国内外一些公司也在积极研发适用于火焰喷涂技术的新型陶瓷材料。高速火焰喷涂技术在再制造中的应用领域得到进一步拓宽。

目前,结合超音速火焰喷涂具有粒子速度快,结合强度高,涂层内部为压应力,可以厚成形(几个毫米)的特点,超音速火焰喷涂技术适用于各类大型磨损失效轴、辊的再制造,可广泛应用于航空航天、钢铁冶金、石油化工、造纸及生物医

学等领域损伤部件的再制造。

2.1 钢铁冶金辊类部件的再制造

钢铁冶金领域热镀锌槽中的沉没辊、稳定辊,经受严重的熔融锌液腐蚀,使用寿命较短^[35-36]。一般工作 1~2 周,因辊面腐蚀而产生严重的粘锌渣现象,在镀锌过程中对钢板产生划伤,影响镀锌板质量。对镀锌工作辊传统的修复方法是采用车削减小尺寸修复法,重新获得好的辊面状态。但经几次加工后,整个辊体因超差而报废。采用超音速火焰喷涂技术,在沉没辊、稳定辊上制备 80~120 μm 的 WC-12Co 涂层,再加上后期的封孔处理。结果表明,涂层孔隙率小于 1%,硬度在 1 000~1 100 HV 之间,具有优异的抗粘锌、耐磨损性能,再制造后辊子的使用寿命从原来的 2 周提高到 7~9 周,效果显著,如图 5 所示,修复辊在使用一个周期(约 15 天)后,表面没有出现腐蚀,可以继续使用。

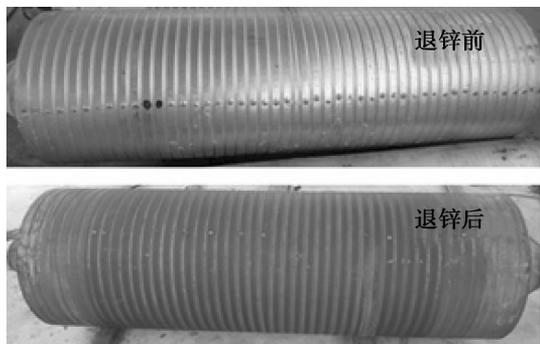


图 5 HVOF 喷涂再制造的修复辊使用一个周期(约 15 天)后的表面状态

Fig. 5 Surface state of HVOF spraying sinking rolls over a cycle of 15 days

连续退火炉中的高温炉辊在钢板退火时,与钢板接触部位往往 3 个月左右就会产生积瘤,从而导致钢板划伤,影响钢板(特别是薄板)的质量。传统的方法是在停炉后采用釉石对辊面进行修磨,继续使用。但因辊体材料和结瘤物(Fe、Mn 及其氧化物)亲和性好,修复辊很快又重新结瘤,使用寿命、生产效率受到限制。针对此类辊的修复问题,采用超音速火焰喷涂工艺,在预处理后的辊面制备 100 μm 的 NiCr-Cr₃C₂ 涂层(如图 6 所示)或 MCrAlY 基陶瓷复合涂层,不仅能提高辊体表面的高温硬度,还可以显著改善辊子的抗结瘤性能,可将修复后炉辊的使用寿命提高到 2~3 年,表现出较高的再制造价值。

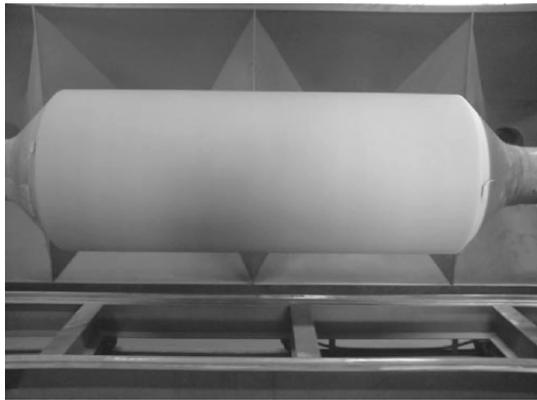


图 6 HVOF 修复再制造中低温炉辊

Fig. 6 HVOF spraying annealing roll

2.2 航空航天起落架等部件的再制造

飞机起落架因在飞机起落阶段承受严重的冲击和磨损,通常是在起落架表面镀硬铬层,由于镀铬层的硬度有限,使起落架的寿命很难满足要求,报废严重。针对起落架的实际工况,目前国外多采用超音速火焰喷涂技术(HVOF)来修复强化起落架,图 7 为 HVOF 喷涂波音 737 飞机起落架部件^[37]。喷涂材料选用 WC-Co、WC-CoCr 金属陶瓷,修复后涂层的硬度比原镀铬层高出 50%,再制造后的起落架在使用寿命、经济效益方面比传统的镀铬工艺成效显著^[38]。

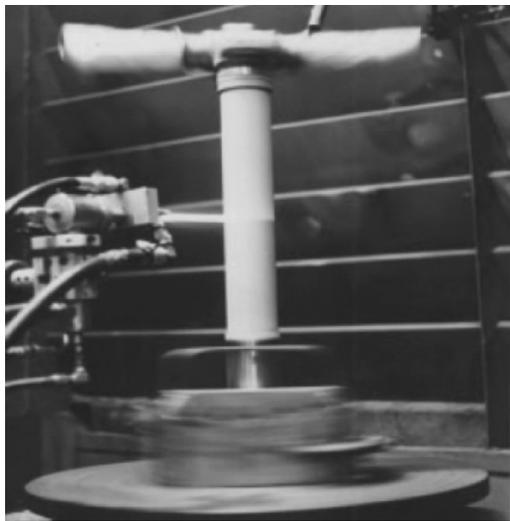


图 7 飞机起落架 HVOF 热喷涂修复再制造过程

Fig. 7 Remanufacturing process of HVOF spraying aircraft undercarriage

2.3 造纸行业工作辊的再制造

造纸行业的工作辊,对辊面的表面粗糙度有

较高要求,目前需每隔半个月到4个月精磨一次。由于表面耐磨性不高,辊子的使用周期和寿命受到较大影响。对严重磨损的工作辊,采用HVOF在辊体表面制备 $150\ \mu\text{m}$ 的WC-Co涂层,涂层孔隙率低于0.5%,硬度比基体材料提高5~6倍。图8为铁岭永兴热喷涂有限公司HVOF再制造造纸辊过程,再制造后的造纸工作辊的寿命可达24个月,甚至更久,提高了5倍以上,大幅度降低了工作辊的维护成本。



图8 造纸辊 HVOF 修复再制造过程

Fig. 8 Remanufacturing process of HVOF spraying paper making roll

2.4 石油化工球阀、柱塞等零件的再制造

在石油化工领域,许多球阀、柱塞等零件尺寸大、磨损严重,使用寿命较短。例如,工作温度在 $540\ ^\circ\text{C}$,压力高达140 MPa的含有腐蚀性砂浆的管线中的金属座球阀,球阀材质一般为316或304不锈钢,经高压砂浆冲刷后,磨损非常严重,形貌如图9所示。严重影响了阀门正常通断功能,有时使用几周就因磨损需要更换。对这一类球阀零件,采用超音速火焰喷涂WC-Co涂层对其进行尺寸修复再制造,如图10所示。涂层硬度



图9 磨损失效的球阀

Fig. 9 The photo of abrasion failure ball valve

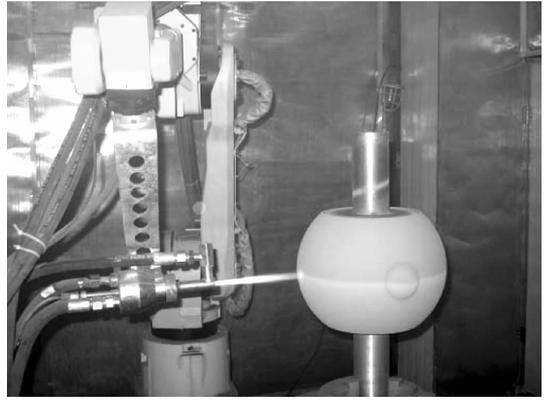


图10 球阀 HVOF 喷涂修复再制造过程

Fig. 10 Remanufacturing process of HVOF spraying ball valve

可达 $1\ 200\sim 1\ 300\ \text{HV}$,耐磨粒磨损和冲蚀磨损性能比基体提高3~5倍。

3 基于高速电弧喷涂技术的再制造

高速电弧喷涂是上世纪90年代研制成功的热喷涂技术,它利用气体动力学原理,将高压空气或高温燃气通过特殊设计的喷嘴加速后,作为电弧喷涂的高速雾化气流来加速和雾化熔融金属,将雾化粒子高速喷射到工件表面形成致密涂层^[39]。近年来,高速电弧喷涂技术已经取得了较快的发展,尤其是新型喷涂枪和逆变喷涂电源的不断研发,使该技术工艺稳定可靠。喷涂材料也取得了长足的进步,就丝材形式而言,有实芯丝材和粉芯丝材;就材料性能而言,有防腐类丝材、不锈钢类丝材、自粘结底层丝材、耐高温氧化、硫化腐蚀及冲蚀类丝材、高硬度耐磨丝材、防滑丝材以及多种性能复合的丝材等。

高速电弧喷涂技术作为再制造工程的关键技术之一,具有以下显著特点:

(1) 效率高、成本低。高速电弧喷涂的粒子速度可达 $100\ \text{m/s}$ 以上,涂层致密度和结合强度略低于等离子喷涂和超音速火焰喷涂,但与二者相比,高速电弧喷涂的最大优势是效率高、成本低。例如,喷涂碳钢丝时效率可达 $16\ \text{kg/h}$,约相当于粉末火焰喷涂和等离子喷涂的4倍以上,成本不到等离子喷涂的 $1/5$ 。

(2) 涂层厚度大、零件尺寸限制少。由于电弧喷涂的沉积效率非常高,涂层的厚度可从几百微米到厘米量级,因此工程应用选择灵活性大,在零件的外表面及约 $200\ \text{mm}$ 以上孔径的内孔部

位都可沉积涂层,尤其是应用在大型工件磨损、变形的尺寸恢复方面空间广阔。

(3) 应用领域广。高速电弧喷涂技术可以赋予零件耐高温、防腐蚀、耐磨损、抗疲劳、防辐射等性能。在恢复零部件产品的磨损、腐蚀失效尺寸的同时,可有效提升产品的表面性能^[40]。目前,电弧喷涂技术已在装备发动机、石油化工、矿山机械和电力行业传动部件及结构件的修复与再制造等方面得到了一定的应用,效果显著。

3.1 发动机缸体、曲轴的再制造

重载装备车辆发动机的缸体主轴承座孔在使用中长期承受交变应力及瞬间冲击,变形严重,而且表面产生腐蚀和磨损,造成尺寸超差和划伤^[41-42]。研究表明,在恢复零件精度尺寸和性能的同时,如何便于后续加工是涂层材料设计的关键。采用电弧喷涂不锈钢涂层的试验发现,涂层耐蚀性较好,但硬度较高不利于后续加工,且涂层易产生裂纹,使用中存在隐患,不能满足再制造产品的可靠性要求。在此基础上,改进材料和工艺的设计,发现使用自动化高速电弧喷涂技术制备不锈钢+低熔点合金的伪合金复合涂层(如图 11 所示),防腐耐磨效果好,而且涂层残余应力较低、硬度可控,后加工方便,经考核,该再制造产品获得了较好的应用效果^[43-44]。



图 11 发动机缸体自动化高速电弧喷涂再制造过程
Fig. 11 Remanufacturing process of automatic arc spraying cylinder body

曲轴作为汽车发动机中附加值较高的零件,重量只有发动机的 10%,成本约为整机的 20%。曲轴的主要失效形式表现为轴颈的磨损与划伤。有研究使用新型粉芯丝材制备的 Fe 基非晶纳米

晶复合涂层结合强度高、氧化物少、耐磨性好(如图 12 所示)^[45]。使用该材料对曲轴的再制造研究发现,非晶纳米晶复合涂层可满足轴颈磨损曲轴的表面性能指标要求,表面具有较高硬度,使再制造产品质量与新品相当,与新品加工相比,无须进行后续碳氮共渗热处理,而综合成本仅为原新品的 1/10。

统计计算表明,使用高速电弧喷涂技术实现 5 000 余台某型发动机缸体的再制造和 1 400 余根曲轴的再制造,与制造同等数量产品相比,再制造节约约 4×10^6 kW·h,减少二氧化碳排放约 50 吨,节能效果在 90% 以上,再制造单件产品所需的喷涂金属丝材不到新品重量的 3%,节能、节材效果显著^[46]。



图 12 发动机曲轴机器人自动化高速电弧喷涂再制造过程

Fig. 12 Remanufacturing process of robot-based automatic arc spraying the engine crankshaft

3.2 石油化工钻机设备零部件的再制造

石油钻机等设备中一些大功率曲轴以及各类泵柱塞经常发生磨损失效,损失严重。研究表明,采用高速电弧喷涂修复再制造柱塞,使用寿命是原先表面淬火柱塞的 1 倍以上,且成本低于喷焊镍基合金。对于一些大直径柱塞,喷焊对工件会产生变形,无法使用喷焊修复。而用高速电弧喷涂再制造一个 12 吨左右的柱塞,并对涂层作封孔处理,其再制造产品使用性能优于新的柱塞,而成本只有新柱塞的 1/4^[47]。

3.3 矿山机械关键部件的再制造

油压机或水压机是矿山机械中的重要装备,由于重复的往复运动,柱塞零件易造成大面积划伤,以致无法正常工作。更换新柱塞成本较高,损失巨大。采用高速电弧喷涂“Ni95Al5 +

3Cr13”复合涂层体系或其它耐磨损涂层技术,可以修复磨损的柱塞。例如,某型 500 吨的油压机,柱塞重约 1.4 吨,因轴向划痕损伤严重,划痕深度约 0.2~0.8 mm,造成漏油。采用电弧喷涂 NiAl 打底层和 3Cr13 工作层恢复柱塞的原始尺寸,同时涂层的耐磨损性能较基体材料提高了 2~3 倍,应用效果良好。据统计更换一根新柱塞约需 4 万元,而对损坏的柱塞进行喷涂处理成本仅为 1 000 元左右,经济效益显著^[48]。

3.4 电力行业的结构件再制造

电厂锅炉管道和叶轮片等零部件都因磨损、冲蚀、腐蚀等原因失效,损坏、维修率高。采用高速电弧喷涂技术制备 45CT、SL30、FeAl 金属间化合物耐高温腐蚀和耐磨的复合涂层^[49-50],对损伤工件进行修复再制造。结果表明,使用 FeAl/Cr₃C₂ 新型喷涂丝材,采用自动化高速电弧喷涂技术制备了具有优异抗热腐蚀与冲蚀性能的复合涂层,涂层中生成的新型 Fe₃Al 和 FeAl 金属间化合物抗高温热腐蚀性能优异,Cr₃C₂ 颗粒弥散分布于涂层中,起到了硬质相的抗冲蚀强化效果。应用该技术对火电厂锅炉高温省煤器等管道进行了喷涂施工,结果表明,涂层的抗高温腐蚀与冲蚀性能是工业高温用 20 钢的 2 倍以上,降低了电厂维护的成本,有效避免了爆管等故事的发生,并使资源得以二次利用。

除了上述三种热喷涂技术之外,其他热喷涂技术如普通火焰喷涂技术、燃气爆炸喷涂技术、电热爆炸喷涂技术等再制造领域也得到一定的研究和应用^[9,51-54]。另外,热喷涂技术与其它表面技术的复合也是倍受关注的发展趋势,如先采用等离子或高速电弧热喷涂的技术对损伤部位进行尺寸修复,再施以激光重熔的工艺使修复层和基体间形成冶金结合,该种复合工艺不但提高了结合强度,减小了孔隙率,而且比单一的激光熔覆工艺的效率要高。还可以在其他表面工程技术再制造零件的基础上,再制备一层热喷涂涂层,进一步提升再制造产品的表面性能。例如针对炼油厂烟气轮机叶片工况条件恶劣,承受腐蚀气体和多种硬质颗粒的冲蚀,损伤严重的问题,采用激光熔覆恢复叶片几何尺寸和力学性能,再用等离子喷涂提高叶片的表面性能,可使再制造后的叶片使用寿命超过原型新品^[55]。

4 展望

各种热喷涂技术已经历了多年的发展并逐渐被市场所认可,在再制造工程领域已得到了不同程度的应用。“十二五”,随着国家战略性新兴产业——再制造产业的发展,热喷涂技术作为再制造产品尺寸恢复、性能提升的有效技术手段,将更多的应用于再制造产业。结合再制造产业的特点,应用于再制造的热喷涂技术将在以下几个方面得到发展和提高:

(1) 加强各类热喷涂技术应用于再制造领域的适应性研究。当前,再制造企业在我国尚处起步阶段,面对大量的损伤零部件还没有系统科学的技术工艺和解决方案。针对许多零部件的热喷涂再制造,还缺少全面的论证和系统的研究,许多企业和研究机构都是针对某种具体零部件的再制造需求,通过经验尝试某种热喷涂技术,若碰巧成功了,就采用此技术,没有从技术性、环境性、经济性等方面综合考虑方案的合理性。这种模式不利于热喷涂技术在再制造领域的长久发展。随着大量损伤零件的修复需求的提出,需要科研院所和企业联合攻关,在对各种热喷涂技术原理和基本性能,以及各类型再制造零部件失效特征和性能要求等充分分析研究的基础上,展开系统全面的试验研究和理论分析,经一定周期和一定规模的中试考核合格后,再确定科学合理的再制造技术方案。通过几年研究和应用试验,获得系统全面的各类热喷涂技术适应性解决方案。

(2) 加强复合技术的研究和应用,包括热喷涂技术自身在材料、工艺及设备方面的复合研究,以及热喷涂技术和其他技术的复合研究,以适应再制造产品对技术的需求。目前,虽然已有较多关于高性能复合喷涂材料及新设备的文献报道,如新型体系设计的复合材料、纳米材料、非晶材料,但大多成熟度还不够,需要不断完善。同时,也出现了热喷涂技术与其他如电磁感应加热、火焰重熔、激光熔覆等技术的复合,以解决再制造产品的性能要求。但此方面的研究还比较少,今后需更多的从再制造产品生产效率、成本等方面综合考虑各类技术复合的合理性。

(3) 加强热喷涂技术在高效、规模化生产应用中的研究。一方面,目前许多热喷涂技术成果还仅处于实验室或小样本试验阶段,技术设备

(特别是国产喷涂系统)长期不间断运转的可靠性、稳定性差。另一方面,目前多采用人工喷涂和低精度操作装置的作业手段,与未来高度产业化生产相差甚远,虽然有单位已开展了操作机和机器人自动喷涂系统方面的研究,但缺少过程监控和质量反馈控制技术的投入,产品质量稳定性仍需提高,尚不能投入到大规模生产中去,不适用于再制造规模化生产的需求。通过加强高稳定性、自动化和智能热喷涂技术的研究,提高生产效率、产品可靠性和质量,改善作业环境。

(4) 加强热喷涂再制造技术标准、工艺规范等方面的研究。目前许多喷涂再制造技术的规范化程度不高,质量控制体系不健全。应加强各种热喷涂再制造技术标准的制定,规范热喷涂再制造工艺,加强管理,推动热喷涂技术在再制造领域的可持续发展。

参考文献

[1] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.

[2] 朱胜, 姚巨坤. 装备再制造设计及其内容体系 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 1-6.

[3] Xu Binshi, Zhu Sheng. Advanced remanufacturing technologies based on nano-surface engineering [C]. Proc. 3rd Int. Conf. on Advances in Production Eng, Guangzhou, 1999: 35-43.

[4] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 1-12.

[5] 徐滨士, 马世宁, 刘世参, 等. 21世纪维修工程的新进展—再制造工程 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2000, 14(1): 8-12.

[6] Xu Binshi, Liu Shican, Wang Haidou. Developing remanufacturing, constructing recycling economy and building saving-oriented society [J]. Journal of Central South University of Technology. 2005, 12 (S2): 1-6.

[7] 徐滨士, 刘世参. 中国材料工程大典 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, 16: 1-10.

[8] 王海军. 热喷涂实用技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 1-8.

[9] 吴子建, 吴朝军, 曾克里, 等. 热喷涂技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2006, 1.

[10] Schorr Brian S, Stein Kevin J, Marder Arnold R. Characterization of thermal spray coatings [J]. Wear, 1999, 42 (2/3): 93-100.

[11] Ma X Q, Cho S, Takemoto M. Acoustic emission

source analysis of plasma sprayed thermal barrier coatings during four-point bend tests [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 139: 55-62.

[12] 刘纯波, 林峰, 蒋彦亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势 [J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 1-11.

[13] 吴涛, 朱流, 酆剑, 等. 热喷涂技术与现状 [J]. 国外金属热处理, 2005, 26 (4): 2-6.

[14] 张平, 王海军, 朱胜, 等. 高效能超音速等离子喷涂系统的研制 [J]. 中国表面工程, 2003(3): 12-16.

[15] 王海军, 刘向平, 张平, 等. 高效能超声速等离子弧喷涂技术研究 [J]. 机械工人, 2004(9): 28-31.

[16] 王海军. 热喷涂工程师指南 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 1-8.

[17] 周克崧, 刘敏, 邓春明, 等. 新型热喷涂及其复合技术的发展 [J]. 中国材料进展, 2009, 28(9-10): 1-8.

[18] 尹志坚, 王树保, 傅卫, 等. 热喷涂技术的演化与展望 [J]. 无机材料学报, 2011, 26(3): 225-232.

[19] 装甲兵工程学院. 徐滨士院士科研文选 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001, 223-240.

[20] 周静, 韦云隆, 张隆平, 等. 等离子喷涂耐磨涂层及热障涂层的新进展 [J]. 表面技术, 2001(4): 23-25.

[21] Pawlowski L. Technology of thermally sprayed anilox rolls, state of the art, problems and perspectives [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 5(3): 317.

[22] 王海军, 郭永明, 陆欢. 电弧功率对超音速等离子喷涂氧化铝粒子状态及涂层性能的影响 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2007, 21 (5): 16-18.

[23] 王海军, 谢兆钱, 郭永明, 等. 高效能超音速等离子喷涂粒子特性及涂层特点 [J]. 中国表面工程, 2010, 23 (3): 84-87.

[24] 吴朝军, 吴晓峰, 杨杰. 热喷涂技术在我国航天领域的应用 [J]. 金属加工, 2009(18): 23-26.

[25] Traeger F, Ahrens M, Vaben R, et al. A life time model for ceramic thermal barrier coatings [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A358: 255-265.

[26] Miller R A. Current status of thermal barrier coatings an overview [J]. Surf. Coat. Technol., 1987, 30: 1.

[27] Wright P K, Evans A G. Mechanisms governing the performance of thermal barrier coatings [J]. Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., 1999, 4: 255.

[28] Han Zhihai, Xu Binshi, Wang Haijun, et al. A comparison of thermal shock behavior between cur-

- rently plasma spray and recently supersonic plasma spray $\text{CeO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ graded thermal barrier coatings [J]. *Surface and Coating Technology*, 2007, (201): 5253-5256.
- [29] 韩志海, 王海军, 王斌利, 等. 超音速等离子喷涂制备先进陶瓷涂层的特点 [J]. *有色金属(冶炼)*, 2008(增刊): 61-66.
- [30] Guilemany J M, Nutting J, Dong Z, et al. The influence of WC-Co HVOF thermal spraying on the microstructure of an Al-4%Cu alloy substrate [J]. *Wear*, 1995, 33(7): 1055-1062.
- [31] Vuoristo P, Nieminen R, Niemi K, et al. Rolling contact fatigue failure mechanisms in plasma and HVOF sprayed WC-Co coatings [J]. *Wear*, 1997, 212(1): 66-77.
- [32] Stewart D A, Shipway P H, McCartney D G. Abrasive wear behaviour of conventional and nanocomposite HVOF-sprayed WC-Co coatings [J]. *Wear*, 1999, 225(2): 789-798.
- [33] Yang Y Y, Li X M, Shao T M, et al. Impact wear performances of $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{NiCr}$ coatings by plasma and HVOF spraying [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 1997, 202(2): 208-214.
- [34] Hamatani H, Ichiyama Y, Kobayashi J. Mechanical and thermal properties of HVOF sprayed Ni based alloys with carbide [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2002, 3(4): 319-326.
- [35] 张志彬, 阎殿然, 何继宁, 等. 国内外耐液态锌腐蚀材料的研究现状 [J]. *腐蚀与防护*, 2010, 31(1): 75-77.
- [36] 姚舜, 毕刚, 郝荣亮, 等. 连续退火炉辊热喷涂涂层失效方式与涂层材料使用 [J]. *重型机械*, 2007(1): 1-5.
- [37] Sartwell S, Bretz P E. HVOF thermal spray coatings replace hard chrome [J]. *Advanced Materials Processes*, 1999(8): 25.
- [38] 周克崧. 热喷涂技术替代电镀硬铬的研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(S1): 182-191.
- [39] Priit K, Irina H, Rennol V. Solid particle erosion of thermal sprayed coatings [J]. *Wear*, 2005, 258(1/2/3/4): 488-496.
- [40] 徐滨士, 王海斗. 再制造工程中的热喷涂技术 [J]. *热喷涂技术*, 2009(1): 1-7.
- [41] 徐滨士, 马世宁, 刘世参, 等. 21世纪的再制造工程 [C]. *西部大开发科教先行与可持续发展—中国科协2000年学术年会文集*, 北京, 2000: 753.
- [42] 丁彰雄, 曾志龙, 赵辉. 热喷涂技术在船舶柴油机关键零件再制造中的应用 [J]. *热喷涂技术*, 2009(1): 67-71.
- [43] 白金元, 徐滨士, 陈永雄, 等. 自动化电弧喷涂 1Cr18Ni9Ti-Al 复合涂层再制造废旧发动机缸体 [J]. *中国表面工程*, 2007, 20(6): 40-43.
- [44] Chen Y X, Xu B S, Xu Y, et al. Structure and sliding wear behavior of 321 stainless steel—Al composite coating deposited by high velocity arc spraying technique [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2008, 18: 603-609.
- [45] 程江波. 再制造电弧喷涂铁基非晶纳米晶涂层的制备与表征 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [46] 梁秀兵, 陈永雄, 白金元, 等. 自动化高速电弧喷涂技术再制造发动机曲轴 [J]. *中国表面工程*, 2010, 23(2): 112-116.
- [47] 刘松. 电弧喷涂技术的发展及在石油行业的应用 [J]. *石油机械*, 1997(07): 47-49.
- [48] 王银军, 王孝建, 赵建国, 等. 电弧喷涂修复 500t 油压机柱塞 [J]. *矿山机械*, 2004(2): 62-64.
- [49] Chen D, Chen G, Ni S, et al. Phase formation regularities of ultrafine TiAl NiAl and FeAl intermetallic compound powders during solid-liquid reaction milling [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 457: 292-295.
- [50] 朱子新. 高速电弧喷涂 Fe-Al/WC 涂层形成机理及高温磨损特性 [D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [51] 许磊, 张春华, 张松, 等. 爆炸喷涂研究的现状及趋势 [J]. *金属热处理*, 2004, 29(2): 21-25.
- [52] 徐滨士. *表面工程与维修* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 85-87.
- [53] 朱亮, 张周伍. 电爆技术用于超细粉末和表面喷涂的研究进展 [J]. *材料导报*, 2005, 19(12): 76-79.
- [54] 金国. 电热爆炸定向喷涂微纳米晶涂层摩擦学性能及其机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [55] 陈江. 表面工程应用实例—激光熔覆加等离子喷涂对烟气轮机叶片再制造 [J]. *中国表面工程*, 2009, 22(2): 22.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072

装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室

Tel: (010) 6671 8475

E-mail: zhangwei18@sina.com

网络出版时间: 2011-11-24 16:43:43

网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20111124.1643.001.html>