

基于激光熔覆的船用柴油机结构件修复技术研究

冯 丰¹, 张永洋², 李晨曦¹

(1. 陕西柴油机重工有限公司, 陕西 兴平 713105; 2. 海军装备部装备采购中心, 北京 100071)

摘 要: 对激光熔覆技术进行了总体介绍; 就该技术应用于船用柴油机结构件修复的可行性及技术难点进行了分析。通过激光熔覆技术在船用柴油机气缸及曲轴磨损修复中的实际应用, 展示了该技术的绿色再制造特质及广阔的应用前景。
关键词: 船用柴油机; 修复; 激光熔覆; 绿色再制造
中图分类号: TK426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)05-0050-03

The Research on Structure Repairing of Marine Diesel Engine Based on Laser Cladding

Feng Feng¹, Zhang Yongyang², Li Chenxi¹

(1. Shanxi Diesel Engine Heavy Industry, Co., Ltd., Shanxi Xingping 713105;
2. Ship Department in Marine Equipment Procurement Center, Beijing 100071)

Abstract: The Technology of laser cladding is briefly introduced. The feasibility of application of this technology on structure repairing of marine diesel engines is studied, as well as the technical difficulties. The actual application of laser cladding to the repairing of marine diesels' cylinders and crankshafts show that this technology features green remanufacturing characteristics, and enjoys broad application prospect.
Key words: marine diesel engine; repairing; laser cladding; green remanufacturing

0 引言

激光熔覆技术是利用高能密度的激光, 使材料表面成分、组织结构和性能实现预期变化的高新技术; 同时, 它也是涉及光、机、电、计算机、材料、物理、化学等多门学科领域的跨学科高新技术。激光熔覆工艺和设备的研究进展决定了这一学科和高新技术的发展水平^[1]。

作为新兴的表面改性技术, 它的发展可以追溯到 20 世纪 60 年代。当时许多学者致力于在低熔点基体上熔覆抗磨材料, 这些材料包括: 钨及其碳化物, 钼、钽、铌、铪、钛及其碳化物和氧化铝。大部分采用等离子或火焰喷涂的方法, 将熔覆材料预置在基体材料上, 随后进行激光熔覆, 并于 1976 年诞生了第一个论述高能激光熔覆的专利。

由于技术上的问题, 激光熔覆经历了发展相对缓慢的时期。进入 20 世纪 80 年代, 激光熔覆技术得到了迅速的发展^[2]。激光熔覆适用于局部易磨损、冲击、剥蚀、氧化腐蚀; 局部要求特殊性能(光敏、热敏、超导、强磁性)的零部件。

激光熔覆主要有以下优点: 界面为冶金结合, 组织极细, 覆层成分及稀释率可控, 覆层厚度大, 热变形小, 易实现选区熔覆, 工艺过程易实现自动化。激光技术成功地将金属的延性、高强度和陶瓷相的高熔点、较好的化学稳定性、高强度等性能有机地结合起来, 形成新的复合材料, 具有广阔的应用前景^[3]。国内外已先后开展了在软钢、不锈钢、可锻铸铁、灰铸铁、铝合金及特殊合金上用钴基、镍基、铁基等自熔合金粉末及陶瓷相进行激光熔覆的工作。

本文从工艺、技术难点等方面对激光熔覆技术应用于船用柴油机气缸磨损修复的可行性进行分析。该技术如能应用推广将极大降低柴油机维修费用；且通过降低柴油机气缸的报废率可减少对环境的污染。因此，该技术具备绿色再制造的特质，是一项很有前途的工程技术。

1 激光熔覆工艺

激光熔覆常采用的方法有：预置涂层法和同步送粉法^[1]。预置涂层法较为简便易行，成本也不高，但所得到的熔覆层其结合强度相对较低，且存在易产生气泡等缺陷，故在使用中须注意控制与优化各工艺参数以减少缺陷。而同步送粉法可以减少缺陷的产生，提高熔覆层的质量，降低熔覆的稀释率，并易于实现自动控制。采用同步送粉法并优选合金体系和工艺参数，能够解决铸铁表面预置涂层激光熔覆易产生裂纹和气孔的工艺难题。同步送粉法的缺点包括：由于保护气体的冲刷作用，可能吹走较多粉末材料而造成浪费；并且还要增加送粉装置购置成本等。但是由于其熔覆层质量好、加工自动化程度高，因而在生产应用中前景更为广阔^[4]。

预置涂层式激光熔覆的主要工艺流程：先对基体将要熔覆的表面进行预处理；然后用热喷涂或粘结等方式在基材表面预置涂层材料；根据材料与性能要求的不同，采用一定的参数进行激光扫描处理，熔覆后可根据不同需要再进行适当热处理；目前对粉末合金材料进行预置的主要方法是采用热喷涂或粘结方法，较为普遍的是用等离子喷涂设备进行粉材的喷涂，由于其火焰温度较高，可获得厚度均匀且与基体结合牢固的镀层^[5]。

同步送粉式激光熔覆的主要工艺流程为：根据需要对基体待熔覆表面进行预处理；用喷嘴在激光扫过基体的同时，将待熔覆的合金粉末送入激光作用区，在激光束作用下粉末和基体材料表面同时熔化；激光束移开后熔化的金属冷却结晶，形成与基体材料具有冶金结合的熔覆层。

同步送粉法（一体或两体）具有工艺参数、过程易实现自动化控制，激光能量吸收率高，无内部气孔，覆层宏观质量可控，生产效率高等优点。尤其对熔覆金属陶瓷而言，可显著提高熔覆的抗开裂性能，促进硬质陶瓷相在覆层内均匀分布；多道搭接时，效果更加显著。在进行激光熔覆过程中，可以通过调节粉末流速、粉末喷嘴形状以及激光束聚焦点相对基体表面的高度等工艺参数，实现熔覆层与基体的良好结合。而同步送粉法两体式，因其

不能保证粉末均匀加热，工艺参数调整的可能性小，工艺过程依赖于样品的摆放位置，因此，同步送粉法一体式将是激光熔覆工艺发展的趋势。目前，国外主要采用同步送粉法，且设备日趋自动化、现代化，工艺过程控制自动化^[6]。国内由于受送粉设备发展的限制，主要采用预置粉末法；同步送粉法也有一定程度的发展，但未能完全实现自动化控制。在导光系统方面，国外已研制出矩形积分反射镜、点状振动反射镜和透射式或透反射式的导光系统。当采用光导纤维时，可实现柔性导光。目前，国外光导纤维已可传输的功率达千瓦激光^[2]。在送粉装置方面，国外已研制出自动化程度很高的同轴一体式送粉装置，可进行工艺参数反馈控制。

2 船用柴油机结构件修复激光熔覆技术难题

船用柴油机结构件修复的激光熔覆存在一些技术难题，包括防止熔覆层裂纹的产生、多道搭接技术等，这些技术问题的解决对激光熔覆技术广泛应用于船用柴油机结构件修复起决定性作用。

2.1 熔覆层裂纹

裂纹是激光熔覆技术中最棘手的问题，镀层中若有裂纹存在，将对结构件的性能产生很大的影响。裂纹产生的原因很多，但主要还是与激光熔覆处理后材料内部存在较大的残余应力有关。如果基材与熔覆材料二者的热物理参数，如线膨胀系数、热导率等，差别较大，在高能激光束的作用下，很容易导致热应力的产生。激光熔覆层中的裂纹大多是由于在熔覆层内的局部热应力超出材料的屈服强度极限产生的；而熔覆层的熔化和凝固过程中，交界面处基材的固态相变等均会导致体积变化，产生组织应力。这两种应力综合作用结果如果表现为拉应力状态时，容易在气孔、夹杂物尖端等处形成应力集中，导致裂纹产生。熔覆过程中工艺参数、熔覆层厚度以及处理工艺等多种因素也会对裂纹的产生有影响^[7]。总而言之，通过优化工艺方法和参数，调整应力状态，尽可能降低拉应力，可减少熔覆层的开裂；添加合金元素等方法亦可提高熔覆层抗开裂能力。

2.2 多道搭接

多道搭接技术是激光熔覆大规模产业化的基础之一。因为激光作用的宽度较窄，在实际应用时，若须对工件的较大范围表面进行熔覆，就必须用搭接技术以得到所需的熔覆宽度。已有研究表明：激

光熔覆层冷却后的再次扫描对其物相、成分和硬度等影响不大, 这为进行搭接提供了条件。已有研究: 在 45# 钢基底上进行铁基合金加 Nb205 的多道搭接激光熔覆实验发现, 由于搭接的过程中激光的二次加热, 促进了共晶体中 Ni 的硅化物的重溶, 相邻两道搭接区的组织与其他区域的树枝状枝晶组织明显不同, 微小的颗状晶粒均匀地分布在奥氏体基体上, 特别是搭接区的硬度与未受搭接影响的区域基本一致, 而且在熔覆层的接近表面部位硬度分布更加均匀。可见在激光熔覆中, 用搭接来增加表面熔覆层的面积是可行的。有研究者先在基体材料表面熔覆一些互相平行的互不搭接且有一定间隔的熔覆道, 获得单个无裂纹的熔覆道, 然后在两个相互平行但互不连接的熔覆道之间^[8], 再进行一次搭接熔覆, 使每条搭接道的影响基本上只限于搭接的两个熔覆道上。如此, 较易获得大面积的无裂纹激光熔覆层, 并可通过后热处理的方法来减少残余应力。

3 船用柴油机气缸磨损修复

采用激光熔覆技术可对船用柴油机磨损件、腐蚀件进行表面改性。使用合金粉末受高能激光加热使其在基体表面迅速加热并熔化, 可以修复设备缺陷并且显著改善基体表面耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化等性能; 修复范围、修复深度可以实现在线控制。适合修复一些浅表磨损、腐蚀类零部件损伤, 对基体内部金相组织的影响较小, 对大型结构件进行修复时, 采用高功率密度快速熔覆, 零部件结构变形可降低到零件的装配公差内, 对零部件结构形状不产生破坏性影响。

对某船用柴油机采用内窥镜检查各缸套表面时, 发现第 A3 缸表面有较深划痕, 如图 1 所示。发生此种故障后, 通常情况下气缸只能报废, 但是如果利用激光熔覆则有可能对磨损划伤部位进行修复, 然后再进行镗缸, 对修复表面进行精加工, 修复后气缸仍能够使用。采用激光熔覆对磨损部位进行修复的结果如图 2 所示。



图 1 气缸发生故障时表面情形

在某次船用柴油机大修过程中发现某柴油机曲轴表面出现较为明显的磨损, 如图 3 所示。因在之

前柴油机大修时已对该曲轴进行了磨轴处理, 所以本次不能再进行“磨轴”处理, 必须要保证曲轴轴颈处强度。采用激光熔覆对该曲轴磨损部位进行表面修复, 其修复效果图 4 所示。

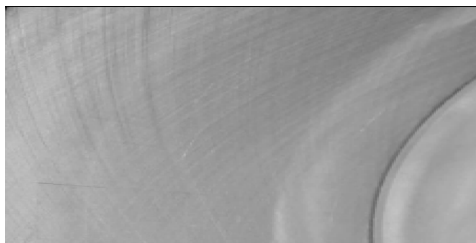


图 2 采用激光熔覆修理后表面情形



图 3 曲轴轴颈修复过程

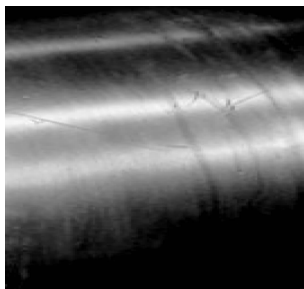


图 4 曲轴轴颈修复效果

4 结束语

激光熔覆是一种具有诸多优点且处于快速发展的先进加工技术, 其包括送粉在内的工艺过程已逐渐成熟, 能应用的材料范围极为广泛, 并已经开始使用纳米材料来改进熔覆层的性能, 特别适用于船用柴油机气缸等高价件的修复。

船用柴油机结构件采用激光熔覆技术修复后, 其熔覆层具有较低的稀释率, 无开裂、气孔、夹渣, 使用时无脱落; 熔覆层与基体冶金结合, 性能均匀, 外观平整, 能满足预定的使用性能要求, 如: 耐磨、耐蚀、硬度、高温强度及抗高温氧化等性能要求。

(下转第 56 页)

3 检测分析及阀面裂纹原因分析

(1) 检测中发现阀面上的十余条裂纹, 其起裂点都在堆焊耐热合金的阀面外周与侧面的交界处。开裂断口检测表明: 断口上覆盖许多黄褐色的热腐蚀产物, 腐蚀产物中 S、Cr、Fe 等元素含量较高, 这些腐蚀产物主要是 Cr_2S_3 、 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 等, 由高温燃气中的硫沿枝晶或疏松浸入基体所致。

(2) 裂纹断口检测表明: 存在高温疲劳断口特征, 但在整个断口中其疲劳辉纹面积所占份额不大。

断口清洗后可明显观察到阀面上存在许多枝晶疏松缺陷, 这些皮下枝晶疏松在使用中磨损露头即可形成阀面裂纹源, 继而可发展成疲劳裂纹源。

断口检测表明, 断口无纤维区及剪切唇区, 从阀面裂纹源开始呈放射状往基体方向扩展, 表明堆焊合金材质较脆。

金相检测表明, 堆焊合金组织中存在许多脆性相。断口上放射状扩展区主要沿树枝晶开裂且呈现解理开裂特征。

(3) 阀面中心到阀盘边缘由于温差较大产生的热应力、堆焊材料与基体材料膨胀系数不同产生的附加内应力、柴油机燃气爆发压力、气阀下落的冲击力, 上述这些应力与高温燃起的共同作用, 亦是造成阀面开裂的因素。

(4) 送检气阀的裂纹是在装机试验后发现的, 属早期失效裂纹。若环境致裂因素另外考虑的话, 针对进排气阀而言, 排气阀阀面堆焊残余应力较大, 是使用中造成阀面开裂的重要因素之一。

根据司太立公司提供的资料: stellite12M1 合金在 800°C 及以上温度应力消除是迅速的, 但送检进排气阀基体材料是 4Cr10Si2Mo, 限制了气阀阀面堆焊合金残余应力的安全消除, 仍可存在较高残余应力。

由以上分析可得到如下结论:

(1) 裂纹性质: 大部分沿枝晶开裂, 部分呈热疲劳开裂。

(2) 阀面开裂原因, 排除气阀环境工作因素外:

① 阀面堆焊合金存在较大面积树枝晶疏松缺陷;

② 阀面堆焊合金组织存在脆性相, 组织均匀性较差;

③ 阀面堆焊合金存在较高焊接残余拉应力。

4 建议改进措施

建议改进焊接工艺或焊接方法 (如激光熔覆法); 改进消除应力的工艺方法 (如有资料报道用正火); 严格按堆焊操作规程作业, 消除疏松缺陷及组织缺陷。

(上接第 52 页)

目前激光熔覆技术在工件修复再制造中的研究已经进入广泛应用阶段, 可以预料激光熔覆将在再制造业中占有重要的地位。

参考文献

- [1] 李伟翔, 张光钧. 激光熔覆技术与进展 [J]. 上海工程技术大学学报, 2008, 22 (3): 254-257.
- [2] 宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (14): 29-39.
- [3] 张光钧. 激光表面工程的发展趋势 [J]. 机械制造, 2005, 43 (485): 1-5.
- [4] 孙耀宁, 梁泽芬, 张旭东. 不锈钢表面激光熔覆耐磨

涂层的进展及关键技术分析 [J]. 热加工工艺, 2009, 24 (2): 1-6.

- [5] 王茂才, 刘湘生, 王烈炯. 烟机涡轮盘和叶片的损伤分析与激光随形熔铸重建 [J]. 金属热处理, 2002, 27 (10): 17-20.
- [6] 邱星武. 激光熔覆技术 [J]. 热处理技术与装备, 2010, 31 (2): 37-41.
- [7] Sexton L, Lavin S, Byrne G, et al. Laser cladding of aerospace materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 122: 63-68.
- [8] Shepeleva L, Medres B, Kaplan W D, et al. Laser cladding of turbine blades [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 125: 45-48.