

阀芯端帽激光合金化扫描路径及耐磨性研究

李淑玉¹ 田新国² 李成彪²

(¹青岛理工大学汽车与交通学院, 山东 青岛 266033)
(²青岛理工大学机械工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要 基于阀芯端帽的外形特征及磨损状况,对阀芯端帽工作面激光合金化的扫描路径进行规划。根据实际使用中阀芯端帽工作面上不同的磨损状况将其划分为三个区域,设计双向螺旋式扫描路径,实现阀芯端帽工作面上不同区域的合金化面积比不同。使用 Nd:YAG 激光器进行编程加工,将采用双向螺旋式扫描路径的试件与采用直纹式扫描路径的试件分别进行磨擦实验。研究发现,采用双向螺旋式扫描路径时,阀芯端帽工作面的耐磨性能是直纹式扫描路径的 2.5 倍,而变形量约为直纹式扫描路径的 1/3。

关键词 激光技术;激光合金化;路径规划;耐磨性能

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0203004

Study on Wear-Resistance and Scanning Path of Laser Alloying on End Cap Working Face

Li Shuyu¹ Tian Xinguo² Li Chengbiao²

(¹College of Automotive and Transportation, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China)
(²College of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract The scanning path of laser alloying on the working surface of valve core end caps is programmed based on its shape characteristics and wear conditions. According to the different wear statuses in actual working surface, the working face of valve core end caps is divided into three alloying areas. And a bi-directional spiral path is designed in order to achieve those different areas with different alloying area ratios on the working surface. Subsequently, Nd:YAG laser device is utilized to achieve programming machining, and the fabricated samples are tested in wear test separately with bi-directional spiral scanning path and straight scanning path. It is observed that the wear-resisting property of the working surface of the valve core end caps scanned through bi-directional spiral path is 2.5 times different when scanned by straight scanning path, and its deformation is just about one third of the samples which are scanned by straight scanning path.

Key words laser technique; laser alloying; path planning; wear resistance

OCIS codes 140.3390; 140.3530; 140.3580

1 引言

自动流量平衡阀是一种自力式流量控制阀,可以有效地解决复杂管网的流量失调问题,自动保障管网的安全运行,被广泛应用在消防、供暖、石油和化工等系统管网中^[1]。其中,阀芯端帽是自动流量平衡阀的核心部件之一,工作时通过其上下运动来保持流量的动态恒定。阀芯端帽与阀体之间不断摩擦而极易被磨损或被流体腐蚀,严重时甚至会影响

自动流量平衡阀的正常工作。激光合金化技术可以在不牺牲结构整体特性的前提下,在一些表面性能不够优越的基体材料上获得耐磨、耐蚀、耐高温的表面合金层^[2~7],可以用来对阀芯端帽工作面进行强化,提高阀芯端帽工作面的表面硬度、耐磨擦和耐腐蚀等性能。

阀芯端帽工作面激光合金化的过程简单,但对加工质量产生影响的因素有很多,包括合金化材料、

收稿日期: 2012-09-18; 收到修改稿日期: 2012-10-09

作者简介: 李淑玉(1966—),女,本科,副教授,主要从事特种加工与模具技术等方面的研究。

E-mail: tianxinguo1988@163.com

激光功率、扫描速度、搭接率、保护气体流速、光斑直径及形状等。国内外众多学者对激光合金化等表面强化方法进行了大量的研究,并取得了一系列的研究成果^[8~12],但对激光合金化扫描路径方面的研究极少。激光合金化的光斑直径受到激光功率的限制,目前大面积的激光合金化都采用直纹式扫描路径进行多道搭接扫描,即激光束在工件表面沿直线往复运动,在相邻两次扫描间会形成搭接区,由于二次加热效应,搭接区具有形态复杂的特殊组织特征,整体上表现为一种宏观的呈周期性出现的组织状态,并带来性能的周期性变化,很容易在搭接处导致零件早期失效^[13]。此外,激光合金化的加工时间主要由合金化加工的扫描速度与路径决定,当合金化处理的工艺参数(如激光功率、扫描速度等)确定后,扫描路径将成为影响加工效率的决定因素。综合以上,对激光合金化扫描路径规划的策略进行研究具有重要的现实意义。本文基于对阀芯端帽外形特征、磨损状况及合金化加工规律的研究,对阀芯端帽工作面激光合金化的扫描路径进行规划,并将规划后的扫描路径与常用扫描路径在耐磨性方面进行分析比较。

2 激光合金化扫描路径的规划

阀芯端帽工作面激光合金化系统如图 1 所示。其工作台由水平移动的 x 轴、 y 轴及转动的 z 轴组成,对阀芯端帽工作面进行激光合金化处理时,由工件沿 x 轴方向的平动和沿 z 轴方向的转动来完成工件相对激光头的移动,在阀芯端帽工作面上得到直纹式或螺旋式等扫描路径。

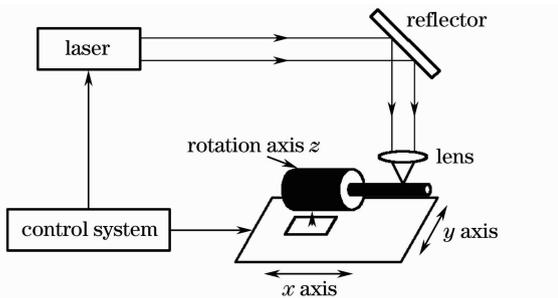


图 1 激光合金化系统
Fig. 1 Laser alloying system

阀芯端帽为回转体类薄壁零件,整体尺寸较小,受热后易发生变形,为了使阀芯端帽工作面在激光合金化处理后得到良好的加工质量,除了选择合适的工艺参数外,还需要设置合理的扫描路径。在阀芯端帽的实际使用中,发现其工作面磨损程度不一

致,工作面中间部分的磨损较为严重且越靠近中部越严重,而工作面两端的磨损则较轻,根据上述实际情况将阀芯端帽工作面划分为三个区域:靠近阀芯端帽工作面上沿的区域 I、阀芯端帽工作面的中间区域 II 及靠近阀芯端帽工作面下沿的区域 III,如图 2 所示。自动流量平衡阀在管网中正常工作时,管网内的压力常在一个确定数值上下小范围内变化,此时阀体内弹簧被部分压缩,阀芯端帽上过流面积同时小范围变化以保持管网压力的恒定,所以阀芯端帽工作面的区域 II 磨损最为严重,区域 III 次之,区域 I 最轻。所以,在合金化时可以减小区域 II 扫描路径的角度和相邻两条路径间的距离,从而提高该区域的合金化面积比,即工件表面激光合金化轨迹的有效面积与工件表面有效面积之比,区域 III 和区域 I 的合金化面积比依次减小,并注意保证相邻区域间扫描路径过渡平缓。综合考虑上述因素,阀芯端帽工作面激光合金化时采用双向螺旋式扫描路径,即扫描路径由两条旋向相反的螺旋线组成,起点间隔 180° ,如图 3 所示。图中 A 点为双向螺旋式扫描路径的一个起点,与该点间隔 180° 存在另一起点。

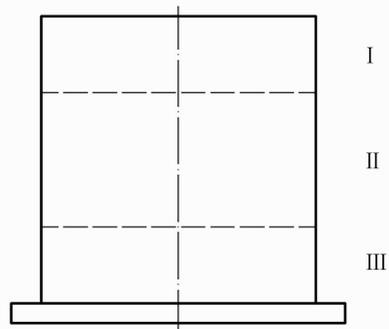


图 2 阀芯端帽工作面合金化区域划分
Fig. 2 Alloying area partition of working face

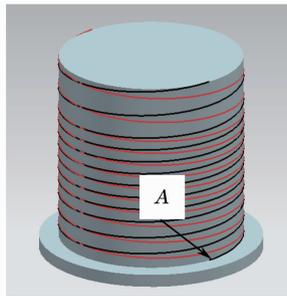


图 3 双向螺旋式扫描路径
Fig. 3 Bi-directional spiral scanning path

3 实验及数据分析

实验设备采用 JHM-1GY-500 型多功能激光加

工机, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 脉冲工作电流为 $100 \sim 450 \text{ A}$, 脉冲频率为 $1 \sim 200 \text{ Hz}$ 连续可调, 脉冲宽度为 $0.1 \sim 20.0 \text{ ms}$ 连续可调, 所用 Nd:YAG 激光器可输出的最大单脉冲能量为 90 J 。阀芯端帽工作面的内径为 12 mm , 外径为 14 mm , 长度为 15 mm , 材质为 304 不锈钢, 合金化材料选择 TiC。加工工艺参数为脉冲工作电流 75 A , 扫描速度为 80 mm/min , 脉冲频率为 60 Hz , 脉冲宽度为 0.5 ms , 光斑直径为 1.5 mm , 区域 I 的合金化面积比为 40% , 区域 II 的合金化面积比为 80% , 区域 III 的合金化面积比为 60% , 实际合金化效果如图 4 所示。图中 B 点为双向螺旋式扫描路径的一个起点, 与该点间隔 180° 存在另一起点。

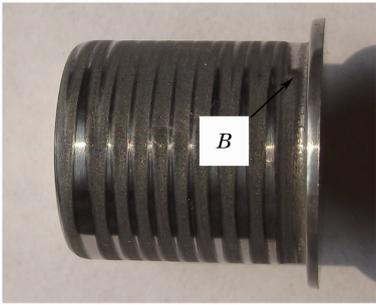


图 4 采用双向螺旋式扫描路径的实物图

Fig. 4 Product show of the bi-directional spiral scanning path

采用自行设计的摩擦实验装置模拟阀芯端帽的实际运动, 将采用直纹式扫描路径的试件与采用双向螺旋式扫描路径的试件分别进行磨擦实验, 摩擦实验装置由弹簧 1、阀芯端帽 2、磨块 3、连杆 4 及电磁激振器 5 组成, 如图 5 所示。实验中用 20 号机油对阀芯端帽工作面进行润滑, 弹簧通过磨块对阀芯端帽工作面施加的径向载荷为 15 N , 磨块材料为淬火+低温回火处理的 GCr15, 硬度为 60 HRC , 摩擦面表面粗糙度 $R_a \leq 1.2 \mu\text{m}$, 磨块结构如图 6 所示, 阀芯端帽由电磁式激振器带动进行往复直线运动, 振动频率为 5 Hz , 时间为 30 min 。

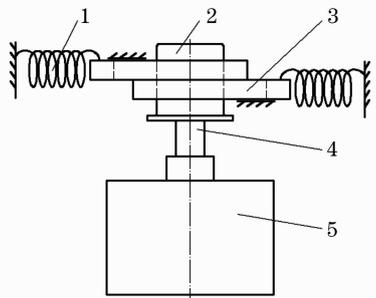


图 5 摩擦实验装置示意图

Fig. 5 Sketch map of friction test equipment

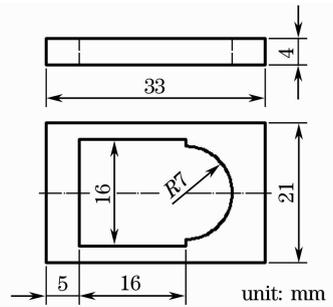


图 6 磨块结构图

Fig. 6 Structure chart of grinding block

摩擦实验中, 采用直纹式及双向螺旋式扫描路径进行激光合金化的试样磨损量随时间变化情况如图 7 所示。实验结果表明: 随着时间的增加, 采用直纹式及双向螺旋式扫描路径试样的磨损量均增大, 但后者增大缓慢, 实验结束时, 采用直纹式扫描路径试样的磨损量约为采用双向螺旋式扫描路径试样磨损量的 2.5 倍, 也就是说采用双向螺旋式扫描路径试样的耐磨性能是采用直纹式扫描路径试样的 2.5 倍。用扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样摩擦面, 图 8(a)、(b) 分别为采用直纹式和双向螺旋式扫描路径所得合金层的磨损形貌。在摩擦实验后, 采用直纹式扫描路径的试样磨损表面较为粗糙, 并出现材料剥落现象; 而采用双向螺旋式扫描路径的试样磨损表面较为光滑, 并未出现明显的犁沟或剥落。此外, 采用双向螺旋式扫描路径进行激光合金化处理时, 阀芯端帽工作面在加工过程中径向受热比较均匀, 阀芯端帽受热产生的变形量比采用直纹式扫描路径时要小得多, 经测量平均变形量为 0.01 mm , 采用直纹式扫描路径时则可达 0.03 mm , 前者为后者变形量的 $1/3$ 。可见, 阀芯端帽工作面激光合金化处理时, 采用双向螺旋式扫描路径可以有效提高其耐磨性能。

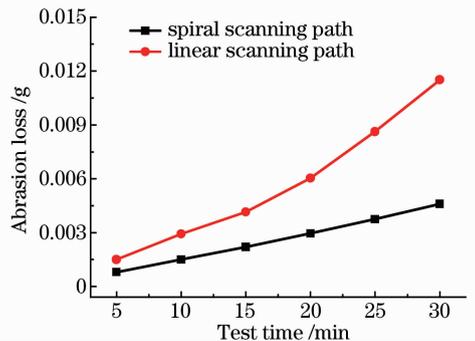


图 7 直纹式及双向螺旋式扫描路径的磨损量与时间关系曲线

Fig. 7 Curves of abrasion loss versus time of linear and spiral scanning path

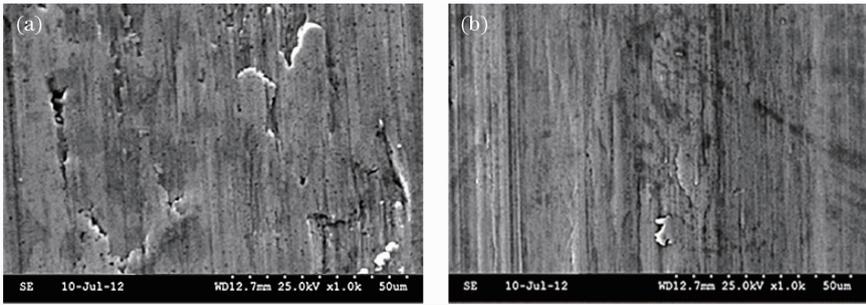


图 8 磨损形貌的扫描电子显微镜图片。(a)直纹式扫描路径的摩擦面;(b)螺旋式扫描路径的摩擦面
Fig. 8 SEM pictures of wear morphology. (a) Rubbing surface of linear scanning path;
(b) rubbing surface of spiral scanning path

阀芯端帽工作面激光合金化处理后,表面合金层的 X 射线衍射(XRD)分析结果如图 9 所示。实验中使用 Ni 过滤的 Cu 靶 Ka 射线,波长 0.15406 nm,工作电压为 40 kV,工作电流为 30 mA,扫描范围 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$,扫描速率 $1.5^{\circ}/\text{min}$ 。由图可知,阀芯端帽工作面的激光表面合金层主要由马氏体、残余奥氏体、 Cr_{23}C_6 及 TiC 组成,而使用扫描电子显微镜对表面合金层进行观察,如图 10 所示。可见细小均匀的亮白色 TiC 颗粒弥散分布在合金层中。阀芯端帽工作面激光合金化处理后,其耐磨性能得到较大的提高,这是因为:合金层中内马氏体及一定数量弥散分布的 TiC 等硬质相的强化作用,以及合金层内大量残余奥氏体的存在,合金化过程中马氏体相变造成的变形和急冷造成的内应力,使得残余奥氏体内位错密度极高甚至产生形变孪晶,具有组织硬化作用,有效提高了合金层的硬度,这样采用双向螺旋式扫描路径进行激光合金化处理后,在阀芯端帽工作面上形成了以合金化带为硬骨架的菱形封闭网纹,合金层的高硬度使其在摩擦过程中接触应力的作用下不易变形,还能有效阻挡摩擦过程中相接触的阀体表面微小硬质凸出物压入而产生磨料磨损,使得合金层在经耐磨性实验后,磨擦表面较为光滑,并未出现明显的犁沟或剥落,而相邻两条合金化带

之间仍为较软的基体,在阀芯端帽与阀体相对运动的过程中,这些未被激光合金化处理的区域必然磨损较多而形成微型凹坑,从而在阀芯端帽工作面相邻两条合金化带之间能够储存少量润滑油,在阀芯端帽的运动中对其工作面起到润滑作用,从而增强阀芯端帽的耐磨性能,延长其使用寿命,并在一定程度上提高自动流量平衡阀的反应速度。

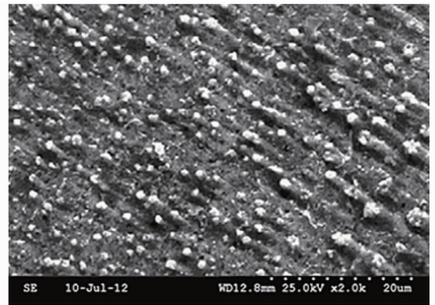


图 10 合金层高倍扫描电子显微镜图片
Fig. 10 High-expansion SEM picture of the alloy layer

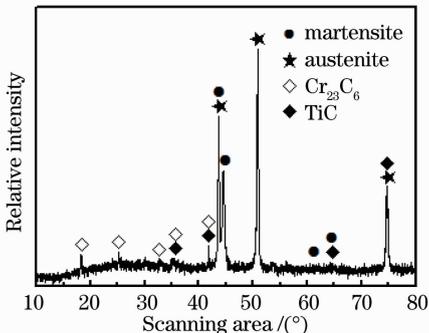


图 9 合金层 X 射线衍射分析图谱
Fig. 9 XRD spectrum of the clad layer

4 结 论

采用 Nd:YAG 激光器对阀芯端帽工作面进行激光合金化处理,对合金化过程中激光束的扫描路径进行规划,根据端帽在实际工作中工作面上不同的磨损状况将其划分为三个区域,设计双向螺旋式扫描路径,实现阀芯端帽工作面上不同区域的合金化面积比不同。

采用自行设计的摩擦试验装置模拟阀芯端帽的实际运动,将采用直纹式扫描路径的试件与采用双向螺旋式扫描路径的试件分别进行磨擦实验,发现采用双向螺旋式扫描路径时,阀芯端帽工作面的耐磨性能是采用直纹式扫描路径的 2.5 倍,而变形量约为直纹式扫描路径的 1/3。

参 考 文 献

1 Shen Xinrong, Li Zengzhen, Li Jiangli. Experimental

- investigation of an automatic flux compensation valve[J]. *Fluid Machinery*, 2006, **34**(11): 4~7
- 沈新荣, 李增珍, 李江莉. 一种自动流量平衡阀的实验研究[J]. *流体机械*, 2006, **34**(11): 4~7
- 2 Cui Xiangpeng, Liu Qibin. Microstructure and corrosion resistance of laser alloying on 45 steel with chromium, molybdenum and boron[J]. *China Surface Engineering*, 2011, **24**(2): 57~60
- 崔祥鹏, 刘其斌. 45 钢激光合金化铬钼硼的显微组织及抗蚀性能[J]. *中国表面工程*, 2011, **24**(2): 57~60
- 3 K. F. Tam, F. T. Cheng, H. C. Man. Enhancement of cavitation erosion and corrosion resistance of brass by laser surface alloying with Ni-Cr-Si-B[J]. *Surf. & Coat. Technol.*, 2002, **149**(1): 36~44
- 4 J. Duta Majumbar, A. Weisheit, B. L. Mordike *et al.*. Laser surface alloying of Ti with Si, Al and Si + Al for an improved oxidation resistance [J]. *Mater. Sci. & Engng. A*, 1999, **266**(1-2): 123~134
- 5 Li Da, Qian Ming, Jin Chang *et al.*. Laser alloying of magnesium alloy AZ91D with Al-Si powder and its corrosion performance[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1395~1400
- 李 达, 钱 鸣, 金 昌等. AZ91D 镁合金 Al-Si 粉末激光合金化及腐蚀性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1395~1400
- 6 Fan Ding, Dai Jingjie, Sun Yaoning *et al.*. Microstructure and property of TiC/Ti composite coating by laser surface alloying [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2006, **32**(4): 13~15
- 攀 丁, 戴景杰, 孙耀宁等. 激光表面合金化制备 TiC/Ti 复合涂层的组织与性能研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2006, **32**(4): 13~15
- 7 Wang Liqin, Ying Lixia, Zhang Sanchuan *et al.*. Microstructure and performance of laser alloying Si_3N_4 /graphite composite coating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 855~858
- 王黎钦, 应丽霞, 张三川等. 氮化硅/石墨激光合金化涂层的组织结构与性能研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 855~858
- 8 Zhang Youzhou, Wang Wei, Wang Qinguo. Laser rapid remelting heat treatment and surface alloying of 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(1): 72~79
- 张友寿, 王 巍, 王勤国. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢激光快速熔凝处理与表面合金化[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(1): 72~79
- 9 Cui Zeqin, Wang Wenxian, Wu Hongliang *et al.*. Microstructure and wear resistance of AZ31B magnesium alloy by laser cladding with Al-Si/ Al_2O_3 - TiO_2 powders[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603020
- 崔泽琴, 王文先, 吴宏亮等. 镁合金表面激光熔覆 Al-Si/ Al_2O_3 - TiO_2 复合涂层界面特征及耐磨性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603020
- 10 Li Mingyu, Chao Mingju, Liang Erjun *et al.*. Investigation on laser surface modification of copper[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0803001
- 李明玉, 晁明举, 梁二军等. Cu 材料激光表面强化研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0803001
- 11 Sun Rongmin, Feng Shuqiang, Wen Zongyin *et al.*. Research on laser alloying processing of low-Ni-Cr infinite chilled cast iron roller[J]. *Applied Laser*, 2009, **29**(6): 493~496
- 孙荣敏, 冯树强, 温宗胤等. 低镍铬无限冷铸铁轧辊激光表面合金化的工艺研究[J]. *应用激光*, 2009, **29**(6): 493~496
- 12 Xu Changqing, Li Guijiang. Microstructure and wear resistance of TiC carbide-reinforced composite coating prepared by laser surface alloying [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1770~1772
- 许长庆, 李贵江. 激光表面合金化制备 TiC 颗粒增强复合材料微观结构及磨擦学性能研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1770~1772
- 13 Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong, Ye Yunxia. *Laser Processing Technology*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004
- 张永康, 周建忠, 叶云霞. *激光加工技术*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004

栏目编辑: 宋梅梅