

阀芯端帽工作面激光合金化 TiC 工艺及性能研究

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 采用 Nd:YAG 激光器对阀芯端帽工作面进行激光合金化处理, 得到以 TiC 为主要增强相的激光表面合金层。通过 X 射线衍射仪、显微硬度计、扫描电子显微镜及能谱仪对合金层的物相组成、显微组织及室温油润滑条件下的耐磨性能进行了检测和分析。结果表明, 阀芯端帽工作面激光合金化处理后, 合金层的物相主要由马氏体、残余奥氏体、Cr₂₃C₆ 和 TiC 组成; 合金层组织致密, 无微裂纹或气孔等缺陷, 与基体成良好的冶金结合, 显微硬度达 358 HV, 约为基体的 1.6 倍; 合金层的耐磨能力为基体的 5.2 倍, 磨损表面较为光滑, 未出现明显的犁沟或剥落。

关键词 激光技术; 激光合金化; TiC; 微观组织; 显微硬度; 耐磨性

中图分类号 TN249; TG174.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.121403

Process and Performance Study of Laser Alloying TiC on End Cap Working Face

Li Shuyu¹ Tian Xinguo² Li Chengbiao²

¹ College of Automotive and Transportation, Qingdao Technological University,
Qingdao, Shandong 266033, China

² College of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University,
Qingdao, Shandong 266033, China

Abstract The end cap working face is strengthened by Nd:YAG laser, and alloy layer of TiC is obtained. The phase composition, microscopic structure and wear-resisting property are analyzed by X-ray diffraction instrument, microhardness tester, scanning electron microscope and energy dispersive spectroscopy. Analysis and tests indicate that the main phases of alloy layer consist of martensite, retained austenite, Cr₂₃C₆ and TiC. The microstructure of the alloy layer is fine, without microcracks, pores or other defects. The alloy layer is metallurgically bonded to the substrate, and its microhardness is up to 358 HV, which is about 1.6 times of that of the substrate. The wearout surface is relatively smooth, without obvious furrows or spalling phenomena.

Key words laser technique; laser alloying; TiC; microstructure; microhardness; 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^[1,2]。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, 严重时会影响自动流量平衡阀的正常工作。此外, 阀芯端帽属于薄壁回转体类零件, 采用传统热处理方法对其工作面进行强化, 不仅成本较高而且极易引起变形。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^[3~8], 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硬度和耐摩擦性能。

TiC 陶瓷相具有高熔点、高硬度、良好的热稳定性、对激光束的高吸收率及同 γ -Fe 良好的相容性等突出

收稿日期: 2012-09-14; **收到修改稿日期**: 2012-09-17; **网络出版日期**: 2012-10-19

作者简介: 李淑玉(1966—), 女, 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

优点,被广泛用作耐磨材料的增强相^[9],而且激光表面合金化制备 TiC 颗粒增强复合涂层已经在铝合金改性中得到成功应用,复合材料涂层的硬度和耐磨性能均得到明显改善^[10,11]。但对 TiC 陶瓷相在不锈钢尤其是薄壁不锈钢材料的应用方面研究较少。本文采用 Nd:YAG 激光器和 TiC 合金粉末在阀芯端帽工作面进行激光合金化,以期改善阀芯端帽工作面的硬度和耐磨性能。利用 X 射线衍射仪(XRD)、显微硬度计、扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪对合金层的物相组成、微观组织及耐磨性能进行了研究。结果表明,经激光合金化处理后,TiC 增强相有效地提高了阀芯端帽工作面的硬度和耐磨性能。

2 实验材料与方法

阀芯端帽工作面外径为 14 mm,内径为 12 mm,长 15 mm,材质为 AISI304 奥氏体不锈钢,合金化前用砂纸打磨试样表面,然后用无水酒精清洗干净。合金粉末以 TiC 为主,占总质量的 95%,粒径为 1~3 μm ,纯度为 99.8%,另外添加少量的石墨粉和稀土,分别占总质量的 4%和 1%,混合后用无水酒精调匀,均匀涂覆于试样表面,预置层厚度为 0.1 mm,在空气中自然干燥。激光合金化使用 JHM-1GY-500 型激光多功能加工机,采用 Nd:YAG 激光器,波长为 1.06 μm ,实验中脉冲工作电流为 75 A,扫描速度为 80 mm/min,光斑直径为 1.5 mm,脉冲宽度为 0.5 ms,脉冲频率为 60 Hz,用氩气做保护气。

激光合金化处理后,将阀芯端帽工作面用线切割沿径向切开,制备成端面金相试样,将浓盐酸和浓硝酸按体积比 3:1 配制作成腐蚀剂。利用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪对合金层进行物相分析,实验中使用 Ni 过滤的 Cu 靶 $K\alpha$ 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 $1.5^\circ/\text{min}$ 。用 S-3500N 型扫描电子显微镜和能谱仪对合金层的微观组织和成分进行观察和分析,用 FM-700A 型数字显微硬度计测定合金层的硬度。采用自行设计的摩擦实验装置模拟阀芯端帽的实际运动,对其耐磨性能进行测试。

3 实验结果与分析

3.1 激光表面合金层的物相组成

激光表面合金层的 X 射线衍射分析结果如图 1 所示,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,表明激光合金化在阀芯端帽工作面“生成”了以 TiC 为增强相的合金层。

3.2 激光表面合金层的微观组织

激光表面合金化试样横截面的扫描电子显微镜图片如图 2 所示,可以看出试样明显分为三个区域:合金化区、过渡区和基体。合金层组织致密,未出现微裂纹或气孔等缺陷,并与基体形成良好的冶金结合。对图中所示合金化区域进行进一步放大观察,如图 3 所示,可见细小均匀的亮白色 TiC 颗粒弥散分布在合金层中。

使用能谱分析仪对图 3 中随机所取点进行成分分析,结果如表 1 所示。根据成分分析结果可知,合金层中该点处的 Ti 和 C 原子数之比接近 1:1,进一步说明了阀芯端帽工作面经激光合金化处理后,表面合金层

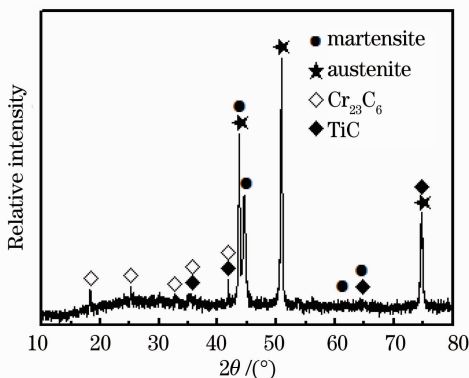


图 1 合金层 X 衍射分析图谱

Fig. 1 XRD spectrum of the alloy layer

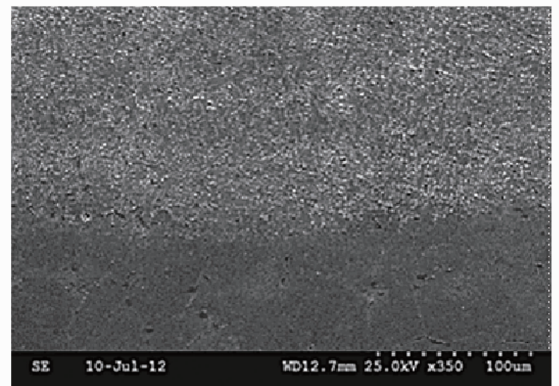


图 2 试样端面扫描电子显微镜图片

Fig. 2 SEM picture of the sample section

中弥散分布的亮白色颗粒为 TiC,与 X 射线衍射分析结果一致。由于激光合金化后,表面合金化区域凝固时的冷却速度可以达到急冷淬火技术的冷却速度,能够使晶粒得到有效细化,而合金层中均匀致密的微观组织有助于其耐磨性能的提高。

表 1 能谱分析结果

Table 1 Analysis results by energy dispersive spectroscopy (EDS)

Element	C	Ti	Cr	Fe	Ni	Total
Fraction of number of atoms /%	18.35	12.86	13.58	49.08	6.13	100.00
Mass fraction /%	4.75	13.26	15.21	59.04	7.74	100.00

使用 FM-700A 型数字显微硬度计测定试样硬度,结果如图 4 所示。试样硬度由表及里逐渐降低,且呈现出 3 个台阶形状,对应着试样由表及里的合金层区、热影响区和基体 3 个区域。其中,合金层硬度达 358 HV,约为基体硬度的 1.6 倍,主要原因是合金层中高硬度的 TiC 和马氏体的分布,同时 Cr-C 等稳定碳化物也可有效地提高硬度。

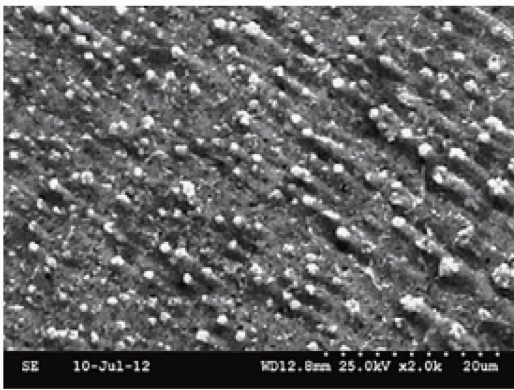


图 3 合金层高倍扫描电子显微镜图片

Fig. 3 High-power SEM picture of the alloy layer

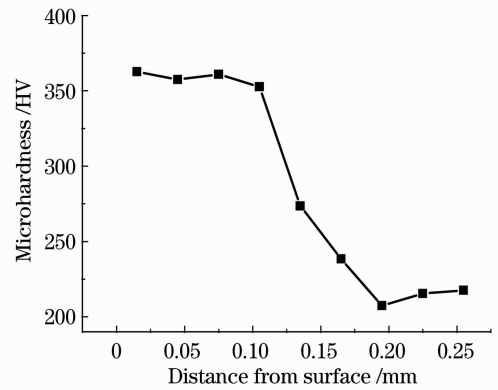


图 4 激光表面合金层的硬度分布

Fig. 4 Microhardness distribution of the laser surface alloy layer

3.3 激光表面合金层的耐磨性能

采用自行设计的摩擦实验装置模拟阀芯端帽的实际运动,以测试阀芯端帽工作面激光表面合金层的耐磨性能。摩擦实验装置主要由弹簧、阀芯端帽、磨块、连杆及电磁激振器 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,阀芯端帽由电磁激振器带动进行往复直线运动,振动频率为 5 Hz。

激光表面合金层和基体的磨损量随时间变化情况如图 7 所示。摩擦实验结果表明:随着时间的增加,激光表面合金层和基体的磨损量均增大,但前者增大缓慢,实验结束时,基体的磨损量约为激光表面合金层的

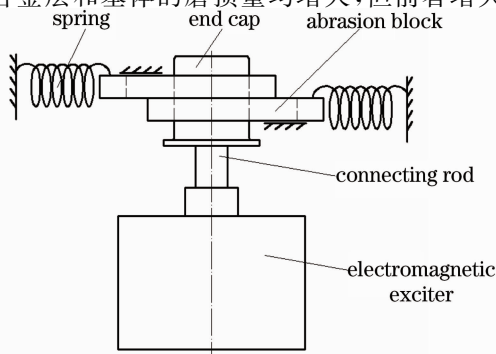


图 5 摩擦实验装置示意图

Fig. 5 Sketch map of friction experimental device

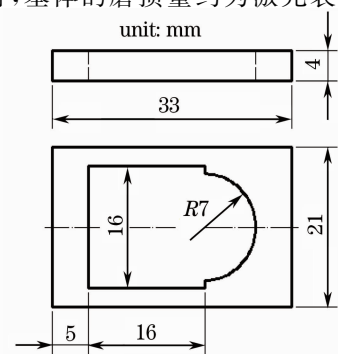


图 6 磨块结构图

Fig. 6 Structure chart of abrasion block

5.2倍,也就是说激光表面合金层的耐磨能力是基体的5.2倍。用扫描电子显微镜观察试样摩擦面,图8(a)、(b)分别为基体和激光表面合金层的磨损形貌。在摩擦实验后,基体磨损表面出现了明显的犁沟,并伴有剥落;而激光表面合金层的磨损表面较为光滑,并未出现明显的犁沟或剥落,可见,阀芯端帽工作面激光合金化处理可以有效提高其耐磨性能。这主要归结于激光表面合金层中弥散分布的TiC颗粒,表现出TiC的高耐磨性。此外,激光合金化过程中合金化区域的急热急冷促进了极细马氏体、高位错密度和高晶格缺陷的形成,进而提高了合金层的耐磨性能。

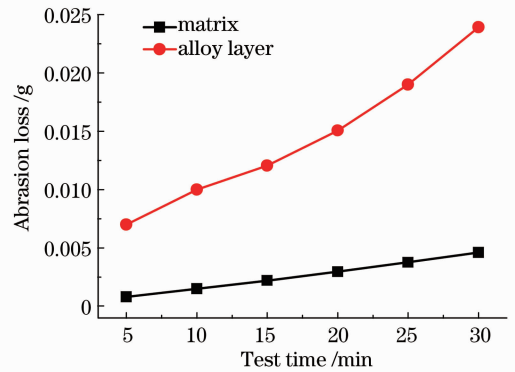


图7 激光表面合金层和基体磨损量-时间曲线

Fig. 7 Abrasion loss versus time for alloy layer and matrix

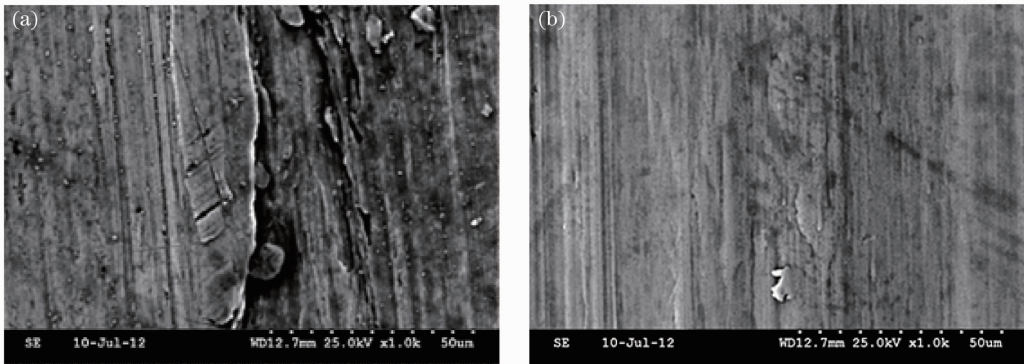


图8 磨损形貌扫描电子显微镜图片。(a)基体;(b)激光表面合金层

Fig. 8 SEM pictures of wear surface profile. (a) Matrix; (b) alloy layer

4 结 论

1) 以TiC为主要合金化材料,添加少量的石墨粉和稀土,采用Nd:YAG激光器对阀芯端帽工作面进行激光合金化,得到以TiC为主要增强相的合金层。合金层组织致密,未出现微裂纹或气孔等缺陷,并与基体形成良好的冶金结合。

2) 激光合金化处理后,阀芯端帽工作面的硬度由表及里逐渐降低,且呈现出三个台阶形状,其中合金层平均显微硬度达358HV,约为基体硬度的1.6倍;合金层的耐磨能力为基体的5.2倍,磨损表面较为光滑,并未出现明显的犁沟或剥落。通过激光合金化TiC可以有效提高阀芯端帽工作面的硬度和耐磨性能。

参 考 文 献

- 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
- Zhou Yangmin, Guo Jianxiang, Fang Junxi *et al.*. Finite element analysis of automatic flow control valve's change face[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006, (1): 146~147
周扬民, 郭健祥, 房俊喜 等. 自动流量平衡阀可变化流面端帽的有限元分析[J]. *机床与液压*, 2006, (1): 146~147
- Yu Ligen, Li Xiaoxuan, Wang Huaming. Microstructure and wear resistance of a laser surface alloyed γ -TiAl intermetallic alloy Ti-48Al-2Cr-2Nb[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, **29**(5): 328~331
于利根, 李晓轩, 王华明. Ti-48Al-2Cr-2Nb金属间化合物激光表面合金化组织与耐磨性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, **29**(5): 328~331
- 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]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **149**(1): 36~44
- 5 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. Eng. A*, 1999, **266**(1-2): 123~134
- 6 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
- 7 Li Guijiang, Xu Changqing, Meng Dan *et al.*. Research progress on laser surface alloying[J]. *Foundry Technology*, 2008, **29**(8): 1136~1139
李贵江, 许长庆, 孟 丹 等. 材料表面激光合金化研究进展[J]. 铸造技术, 2008, **29**(8): 1136~1139
- 8 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
- 9 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摩擦学性能研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1770~1772
- 10 S. Tomida, K. Nakata, S. Saji *et al.*. Formation of metal matrix composite layer on aluminum alloy with TiC-Cu powder by laser surface alloying process[J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, **142-144**: 585~589
- 11 H. C. Man, S. Zhang, F. T. Cheng *et al.*. *In situ* synthesis of TiC reinforced surface MMC on Al6061 by laser alloying [J]. *Scripta Metallurgica*, 2002, **46**(3): 229~234