

激光与光电子学进展

45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层的工艺参数对熔覆层车削性能的影响

王胜^{1*}, 郑志谊², 周明安¹, 刘文军¹, 张恩铭¹

¹衢州职业技术学院机电工程学院, 浙江 衢州 324000;

²浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 以液压立柱材料 45 钢为基体, 316 不锈钢粉末为熔覆材料, 采用不同的工艺参数在基材表面进行激光熔覆试验, 制备 316 不锈钢涂层; 然后利用 FANUC 数控机床对不锈钢涂层进行车削加工, 采用数字化测试技术对车削成形试样熔覆层的表面宏观形貌、切屑形态、表面粗糙度、圆柱度、洛氏硬度、显微组织等进行研究, 综合分析 45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层的车削加工性能, 优选出最佳的激光熔覆工艺参数。在激光功率为 800 W、送粉速率为 0.28 g/s、轴向进给速度为 0.110 mm/s 的最佳熔覆工艺参数下, 熔覆层的表面宏观形貌和切屑形态最佳, 车削后熔覆层的表面粗糙度最小, 圆柱度最高, 且熔覆层的硬度值可达到 40.3 HRC, 内部显微组织呈细化趋势。45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工技术为液压立柱材料 45 钢的高质量修复和再利用提供了重要的参考价值。

关键词 激光加工; 316 不锈钢粉末; 激光熔覆; 精车加工; 数字化测试; 洛氏硬度; 表面质量

中图分类号 TG162.71; TG666

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114010

Influence of Laser Cladding Parameters on Turning Performance of Laser-Cladded 316 Stainless Steel Coating on 45 Steel Surface

Wang Sheng^{1*}, Zheng Zhiyi², Zhou Ming'an¹, Liu Wenjun¹, Zhang Enming¹

¹Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

²College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Using the hydraulic column material 45 steel as the substrate and 316 stainless steel cladding powder as the cladding material, we performed laser cladding experiments on the substrate surface to fabricate the 316 stainless steel coating under various process parameters. Then, we used a FANUC CNC machine to complete the turning of the cladding layer and study its macro morphology, chip morphology, surface roughness, cylindricity, Rockwell hardness, and microstructure after turning using digital testing technology. The turning performance of the laser cladding layer on a 45 steel surface was thoroughly analyzed to select the best laser cladding parameters. When the laser power is 800 W, the powder feeding rate is 0.28 g/s, and the axial feed rate is 0.110 mm/s. The cladding layer's macro morphology and turning chip morphology are the best, and the turned surface has the lowest surface roughness and the best cylindricity. The cladding layer's hardness can reach 40.3 HRC, and the internal metallographic structure shows a trend of refinement. The new technology of laser cladding the 316 stainless steel cladding layer on the surface of 45 steel coupled with turning processing can provide an important reference for the

收稿日期: 2020-11-14; 修回日期: 2020-12-17; 录用日期: 2020-12-27

基金项目: 浙江省基础公益研究计划(LGC21E050002)、衢州市科技计划(2020K17)、浙江省教育厅一般科研项目(Y202044634)、国家自然科学基金(51605252)

通信作者: *158942287@qq.com

high-quality repair and reuse of hydraulic column material 45 steel.

Key words laser technique; 316 stainless steel powder; laser cladding; fine turning; digital testing; Rockwell hardness; surface quality

OCIS codes 140.3325; 140.3390

1 引言

45 钢具有超强的机械制造与数控加工性能,是制造液压立柱的主要材料^[1]。液压立柱长期服役在恶劣的环境下,导致立柱材料 45 钢表面被大面积腐蚀,如不对其进行防护,就会影响液压立柱的使用寿命^[2]。目前,45 钢表面修复的传统方法以电镀修复为主,但这种方法存在修复周期长、对环境污染大、修复工艺复杂、修复后 45 钢表面质量和耐磨性差等一系列问题^[3]。鉴于此,国内外学者一直在努力探寻行之有效的 45 钢材料表面修复技术,也产生了较多的研究成果,成果之一就是创新性设计了在 45 钢材料表面激光熔覆 316 不锈钢的新方法。胥少平等^[4]采用机器视觉技术对不同工艺参数下的熔覆试样进行全面分析与检测,确定了一套针对 316L 不锈钢粉末的最佳熔覆工艺参数。为了研究 316L 不锈钢粉末在激光增材成形过程中改善轴类零件微小孔钻削加工性能的机理,高飞等^[5]在 45 钢表面进行了 316L 不锈钢粉末的激光熔覆加工,并利用数字检测设备分析了激光熔覆工艺参数对 316L 不锈钢增材成形件小孔钻削质量的影响规律。为了提升 45 钢金属零件表面的耐蚀性,刘朋等^[6]采用激光熔覆技术在 45 钢表面制备 316L 熔覆层,并对熔覆层的组织、物相、硬度等进行了综合分析表征,最终得出了熔覆层表面硬度随熔覆工艺的变化规律。郝少祥等^[7]采用不同的热处理工艺对 45 钢表面进

行处理,通过研究热处理工艺对 45 钢表面粗糙度的影响得出了最佳的热处理修复工艺参数。Apolinario 等^[8]在 304 奥氏体钢表面进行 316 奥氏体不锈钢涂层的激光熔覆试验,结果表明,激光熔覆明显改善了 304 钢表面的力学性能与耐磨性。Kaplan 等^[9]建立了激光熔覆模型,研究了激光熔覆过程中熔覆层的组织变化规律,为钢材表面激光熔覆层质量的提高提供了参考。

综上所述,国内外主要研究了激光熔覆工艺参数对熔覆层质量及性能的影响,但尚未涉及激光熔覆耦合车削加工的新技术。此外,目前对 45 钢表面的修复质量控制与再制造还有待完善,而现有研究还未涉及熔覆层表面的车削再制造技术。因此,本文研究了液压立柱材料 45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工的新技术,以提高熔覆层的形状规整度和车削质量为目标,通过分析 45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层的工艺参数与车削性能之间的关系,探索激光熔覆耦合车削加工的新型激光熔覆技术。

2 激光熔覆试验

2.1 试验材料

基体采用模拟腐蚀后的 45 钢圆柱体,其规格为 $\Phi 45 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。先对 45 钢基体试样表面进行熔覆粉末的增收吸附处理,然后进行激光熔覆加工。316 不锈钢粉末的化学成分如表 1 所示^[10]。

表 1 316 不锈钢熔覆粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of 316 stainless steel powder for laser cladding

Element	Nr	Ci	Mo	C	Si	P	N	S	O
Mass fraction /%	11.100	17.200	2.010	0.010	0.350	0.030	0.052	0.002	0.003

2.2 试验参数

如表 2 所示,采用 9 组不同的工艺参数进行激光熔覆试验,然后选择特定的车削经验参数(主轴转速 $S=2000 \text{ r/min}$,精车刀量 $\Delta d=0.5 \text{ mm}$,进给速度 $F=0.05 \text{ mm/r}$)对熔覆成形的 9 件试样的 316 熔覆层表面进行车削加工。通过综合分析熔覆层的车削加工性能,最终优选出最佳的激光熔覆工艺参数。

2.3 试验平台

采用型号为 RFL-S6-10L 的激光熔覆装置进行激光熔覆试验,其中的激光器是额定电压为 3000 W 的 FL-DLight-976-10 型光纤耦合多模激光器,其发射激光的波长平均为 960 nm;通过激光器的整合与设计,使光斑均匀分布,光斑尺寸控制在 $15 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 范围内,并设置激光扫描方向的熔池宽度为 25 mm ^[11]。采用表 2 所示的 9 种不同的工艺参数进

表 2 激光熔覆加工工艺参数
Table 2 Laser cladding parameters

Sample number	Laser power /W	Power feeding rate /($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)	Axial feed speed / ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
A1	800	0.25	0.055
A2	800	0.26	0.088
A3	800	0.28	0.110
A4	1600	0.25	0.055
A5	1600	0.28	0.110
A6	1600	0.26	0.088
A7	2500	0.25	0.055
A8	2500	0.28	0.110
A9	2500	0.26	0.088

行激光熔覆试验,试验结束后在 CK6140 数控车床上采用山特维克可乐满公司的 35°机夹车刀进行表

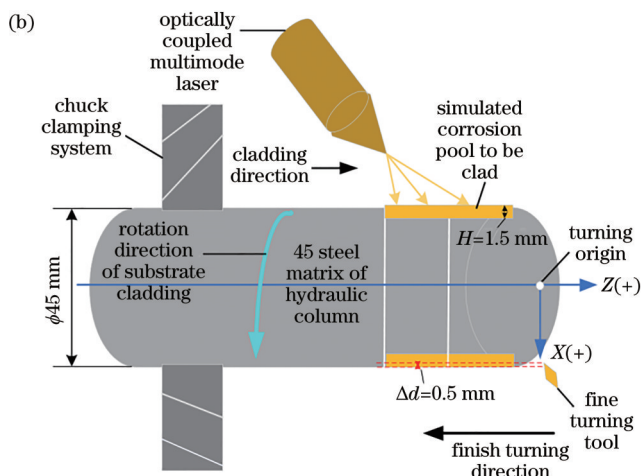
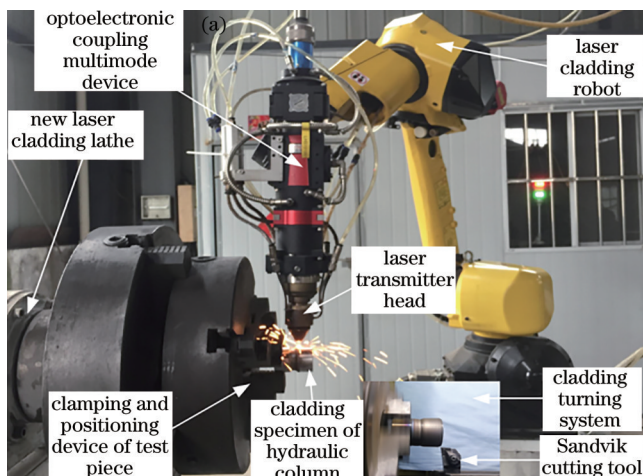


图 1 激光熔覆试验平台及加工图。(a)激光熔覆试验平台;(b)原理图

Fig. 1 Experimental platform and processing drawing of laser cladding. (a) Laser cladding platform; (b) schematic

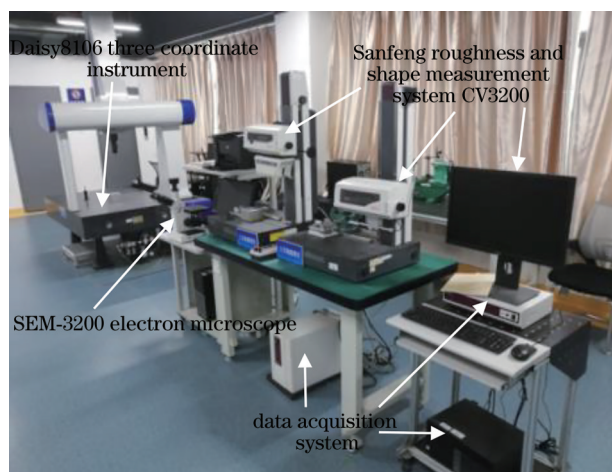


图 2 数字化检测平台

Fig. 2 Digital detection platform

面精车加工。试验示意图如图 1(a)、(b)所示。

2.4 检测平台

试验完成后,将激光熔覆耦合车削加工成形的 9 件试样放置在室温为 $(22\pm 1)^\circ\text{C}$ 的数字化测试试验室内静置 24 h,之后进行一系列检测。数字化检测平台如图 2 所示^[12]。

采用分辨率为 3×10^7 pixel 的高清电子图像采集设备观察试样表面的宏观形貌和切屑形态^[13];采用 Daisy8106 三坐标测量设备测量熔覆层精车后的圆柱度^[13-14];采用 CV3200 型粗糙度仪测量熔覆层的表面粗糙度,测量时设置的取样长度为 2 mm,评定长度为 10 mm,测量方向为平行于圆柱体中心轴线方向;采用高精洛氏硬度仪测量熔覆层表面的硬度值;采用 SEM-3200 扫描电子显微镜(SEM)观察熔覆层的组织形貌^[14-15]。

3 熔覆试验参数对车削性能的影响

3.1 对切屑形态的影响

采集 9 件试样在车削过程中产生的切屑形态和弹簧状切屑的占比,采集结果如图 3 所示。观察图 3(a)可以发现,9 件熔覆试样在相同的车削加工参数下,产生的切屑形态明显不同:A1、A2 和 A3 试样的切屑呈细长的弹簧状,A4、A5 和 A6 试样的切屑呈粗长的崩碎状,A7、A8 和 A9 试样的切屑呈细粒条形黏结状形态。结合表 2 分析可知,A1、A2 和 A3 试样对应的激光功率均为 800 W,而 A4、A5、A6 和 A7、A8、A9 试样对应的激光功率分别为 1600 W 和 2500 W。由此可以推测出激光功率对 316 不锈钢熔覆层耦合车削加工时的切屑形态影响最大,切

屑形态随激光功率参数的增大逐渐向粗粒崩碎状发展,而粗粒崩碎状切屑是车削加工中应尽量避免的,因为在该切屑形态下的工件表面车削质量和表面粗糙度受切屑的影响最大^[16]。分析图 3(a)还可以发现,当激光功率控制在 800 W 时(对应 A1、A2、A3 试样),切屑呈细长的弹簧状,而细长的弹簧状切屑是车削加工过程中最理想的切屑形态^[16],有利于切屑的有效排出,在此切屑形态下工件划伤的概率大大降低,保证了 316 熔覆层车削加工的表面质量。

结合图 3(b)可以发现,A1、A2、A3 试样在车削过程中产生的弹簧状切屑的占比最高(平均约为 97%),A4、A5、A6 试样产生的弹簧状切屑的占比最低(平均约为 14.3%),而 A7、A8、A9 试样产生的弹簧状切屑的占比最低(平均为 3%)。

综上所述可知,在选择 A1、A2、A3 试样的激光熔覆参数时,弹簧状切屑占比可达 97.3%,即 316 不锈钢熔覆层耦合车削加工的切屑形态以细弹簧状为主,此切屑形态为熔覆层车削加工的最佳形态^[17-20]。

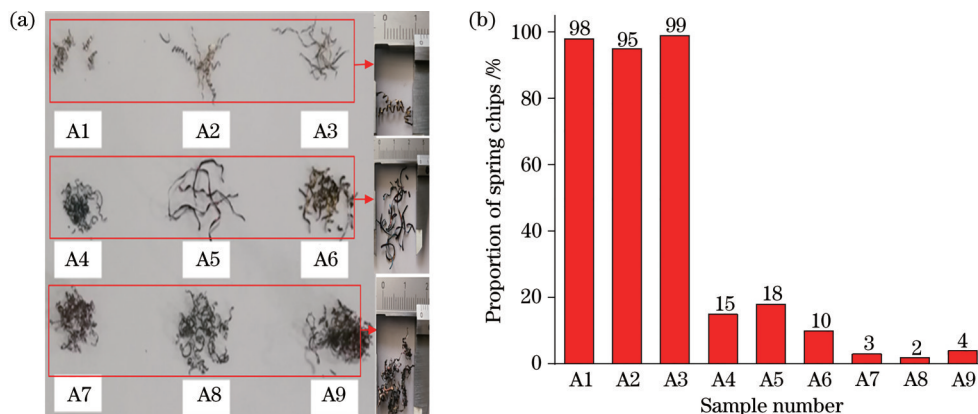


图 3 9 件试样的切屑形态。(a)切屑的宏观形貌;(b)弹簧状切屑的占比

3.2 对切削表面宏观形貌的影响

9 件试样车削前后的表面形貌如图 4(a)、(b)所示。从图 4(a)可以看出,9 件试样的 316 不锈钢熔覆层与 45 钢基体结合得较好,宏观形貌最好的是 A3 试样,其熔覆层规整且均匀。316 熔覆层耦合车削加

工后的表面形貌如图 4(b)所示,可见,车削再加工后 9 件试样的表面形貌差别较大:A1、A2、A3 试样的表面较光滑,表面光亮且无划痕,而其余 6 件试样表面均存在不同程度的划痕,表面质量相对较差。

综上所述可知,在 45 钢表面激光熔覆 316 不锈

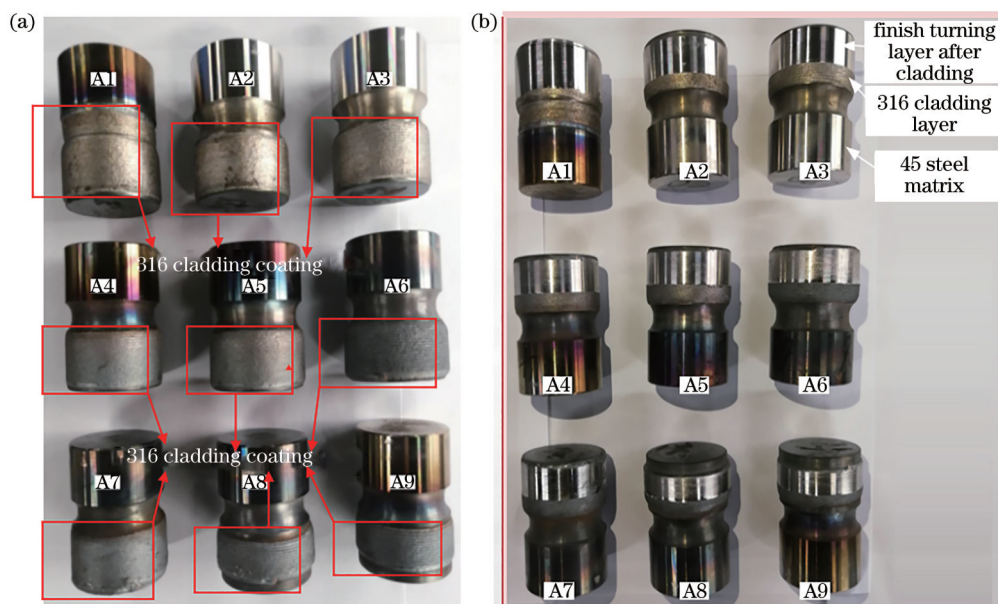


图 4 车削加工前后试样表面的宏观形貌。(a)车削前;(b)车削后

Fig. 4 Macro morphologies of samples before and after turning. (a) Before turning; (b) after turning

钢涂层耦合车削加工技术成形的 9 件试样中,车削加工表面宏观形貌较好的为 A1、A2、A3 试样。再次结合图 4 分析可知,表面质量最佳的为 A3 试样。因此,选择 A3 试样对应的工艺参数进行 316 合金激光熔覆耦合车削加工试验,既能获得高质量的 316 不锈钢涂层,又能得到高质量的车削表面。

3.3 对切削表面粗糙度的影响

在表 2 所示的加工参数下,激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工后的表面粗糙度(R_a)如图 5 所示,表面粗糙度检测误差如图 6 所示。结合表 2 和图 5 分析可知,在 9 件试样中,A3 和 A5 试样的表面粗糙度较小,分别为 $0.20 \mu\text{m}$ 和 $0.22 \mu\text{m}$ 。这两件试样对应的送粉速率均为 0.28 g/s ,激光功率均控制在中低值范围内(分别为 800 W 和 1600 W)。表面粗糙度较大的试样为 A8 和 A9 试样,分别为 $1.30 \mu\text{m}$ 和 $1.20 \mu\text{m}$ 。结合表 2 分析可知,这两件试样对应的送粉速率分别为 0.28 g/s 和 0.26 g/s ,均对应最大的激光功率(2500 W)。综上分析可知,在激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削试验过程中,车削表面的粗糙度受激光功率的影响较大,激光功率越大,表面粗糙度越大,表面

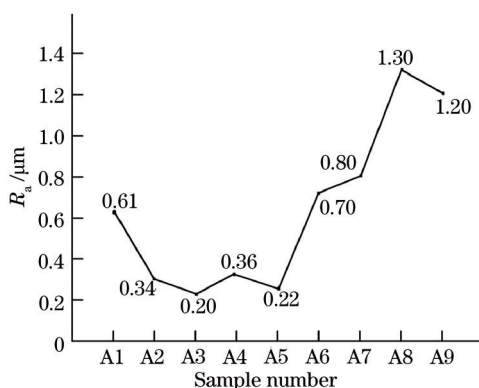


图 5 各试样的表面粗糙度

Fig. 5 Surface roughness of each sample

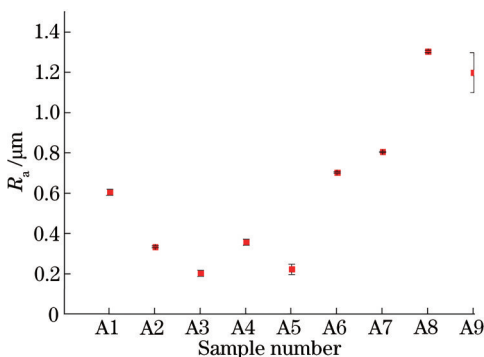


图 6 各试样表面粗糙度的检测误差棒

Fig. 6 Measuring error bar for surface roughness of each sample

质量越差。再次分析图 5 可知,在 A3 试样对应的激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工参数下,试样的表面粗糙度最小,表面质量最高。

3.4 对切削表面圆柱度的影响

在表 2 所示的激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工参数下,各试样的圆柱度如图 7 所示,其表面粗糙度检测误差如图 8 所示。结合表 2 和图 7 分析可知,A2、A6、A9 试样对应的圆柱度均较大,其中 A6 试样的圆柱度最大,为 $21 \mu\text{m}$ 。这三件试样对应的激光功率在 $800 \sim 2500 \text{ W}$ 范围内变化,送粉速率和轴向进给速度均处在中等值(分别为 0.26 g/s 和 0.088 mm/s)。再次分析图 7 可知,圆柱度较小的是 A3、A5、A8 试样,其中 A3 试样的圆柱度最小,为 $7.8 \mu\text{m}$ 。再次结合表 2 分析可知,这三件试样的激光功率在 $800 \sim 2500 \text{ W}$ 范围内变化,送粉速率和轴向进给速度均处于最大值,分别为 0.28 g/s 和 0.110 mm/s 。

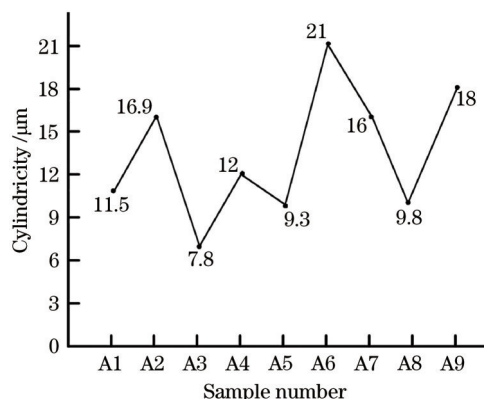


图 7 各试样的圆柱度

Fig. 7 Cylindricity of each sample

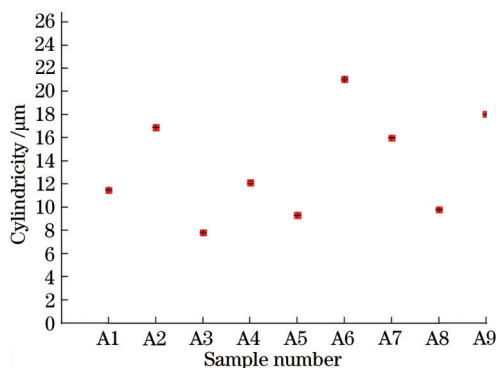


图 8 各试样圆柱度的检测误差棒

Fig. 8 Measuring error bar for cylindricity of each sample

综上分析可知,激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工后的圆柱度对激光熔覆工艺参数中的送粉速率和轴向进给速度较为敏感。在车削参数一定的条件下,要获得高质量的圆柱度,需要选择较

高的送粉速率和轴向进给速度。再次结合图 3~5 所示的切屑形貌、表面宏观形貌和表面粗糙度可知,在 A3 试样对应的工艺参数下,激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工过程的切屑形态以及车削表面宏观形貌最佳,试样的表面质量最高。

3.5 对切削表面硬度的影响

激光熔覆 316 不锈钢涂层车削前后的洛氏硬度如图 9 所示,洛氏硬度检测误差如图 10 所示。结合表 2 和图 9 分析可知,车削前各熔覆层的硬度均低于车削后的,这表明熔覆后的车削加工有利于提升 316 不锈钢涂层的硬度。分析车削后的各试样不难发现:A1 试样的洛氏硬度最小,为 37.8 HRC,该试样对应的激光功率、送粉速率、轴向进给速度在 9 组加工参数中处于最小值;A7、A8 和 A9 试样的洛氏硬度均较大,且 A8 试样的洛氏硬度最大,为 43.3 HRC,而且这三件试样对应的激光功率为 9 组加工参数中的最大值,为 2500 W;A3 试样的洛氏硬度达到了 40.3 HRC,与 A8 试样的洛氏硬度(43.3 HRC)仅相差 3 HRC,处于中等偏上的硬度区间。

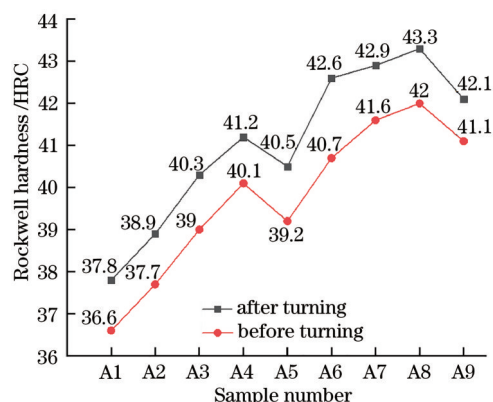


图 9 熔覆层车削前后的洛氏硬度

Fig. 9 Rockwell hardness of cladding layer before and after turning

综上所述可知,对激光熔覆 316 不锈钢涂层进行车削加工后,表面硬度值整体提升,且表面硬度对激光熔覆工艺参数中的激光功率较为敏感。综合分析图 3~5、图 7 和图 9 可知,在保证车削质量的前提下,将 A3 试样对应的参数作为激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工的最佳工艺参数,可以得到具有较高硬度的车削表面。

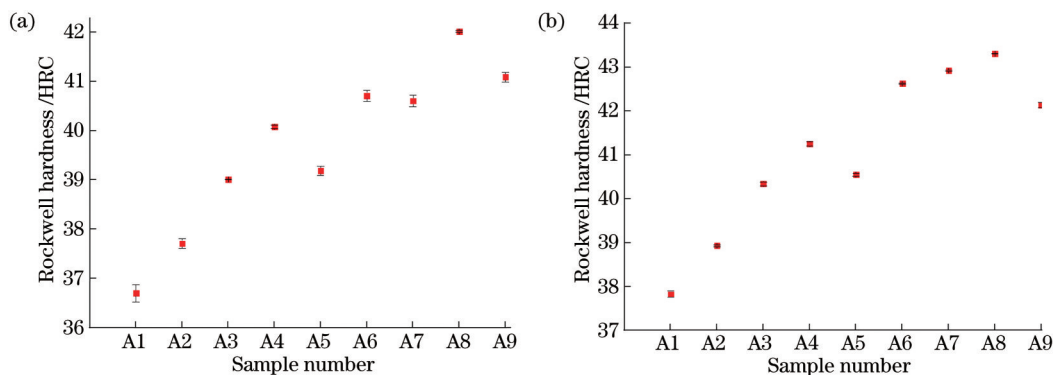


图 10 熔覆层车削前后洛氏硬度的测量误差棒。(a)车削前;(b)车削后

Fig. 10 Measuring error bar for Rockwell hardness of cladding layer before and after turning. (a) Before turning; (b) after turning

3.6 对切削面组织特征的影响

结合图 9 所示的洛氏硬度检测值,选取洛氏硬

度较高(A3)和洛氏硬度最低(A1)的试样进行显微组织的对比观察,观察结果如图 11 所示,其中

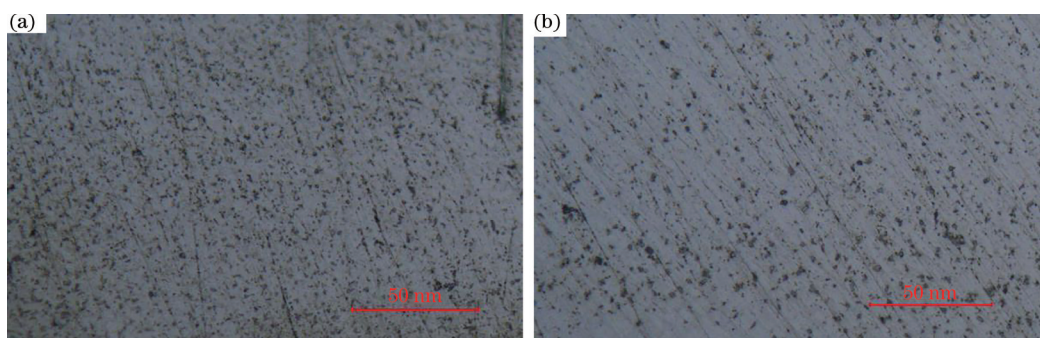


图 11 激光熔覆 316 不锈钢涂层车削后的显微组织。(a) A3 试样;(b) A1 试样

Fig. 11 Microstructures of laser cladding 316 stainless steel layer after turning. (a) A3 sample; (b) A1 sample

图 11(a)为熔覆层车削后 A3 试样的显微组织,图 11(b)为熔覆层车削后 A1 试样的显微组织。分析图 11(a)可知,A3 试样中的晶粒以细小粒状为主,晶粒与晶粒之间连接紧密,且分布均匀,因此该试样的硬度较高。分析图 11(b)可以发现,A1 试样中的晶粒间隔较大,分布松散,晶粒多呈粗粒状,并有呈粗条状分布的趋势,因此该试样的硬度较低。

4 结 论

本文研究了车削加工液压立柱用 45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层时切屑的形态以及切削表面的宏观形貌、粗糙度、圆柱度、洛氏硬度和显微组织,得到的具体结论如下:

1) 在激光功率为 800 W、送粉速率为 0.28 g/s、轴向进给速度为 0.110 mm/s 的工艺参数下,激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工后的表面宏观形貌和切屑形态最佳,最佳切屑占比高达 99%,表面粗糙度和圆柱度最高,车削质量最好。

2) 激光功率对激光熔覆 316 不锈钢涂层车削后表面粗糙度的影响最大,随着激光功率增大,切削表面的粗糙度增大;切削表面的圆柱度对送粉速率和轴向进给速度的影响较为敏感,要想获得较高的圆柱度,在激光熔覆过程中需要选择合适的送粉速率和轴向进给速度。

3) 在 45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层,熔覆层与 45 钢基体的结合质量较高,且车削后硬度最大值可达 43.3 HRC。车削加工后,熔覆层中的晶粒排列较均匀,且部分试样的组织呈细化趋势,组织形貌较好。

4) 45 钢表面激光熔覆 316 不锈钢涂层耦合车削加工技术能够实现液压立柱 45 钢表面的高质量修复,而且熔覆层的车削性能良好;该技术为液压立柱材料 45 钢的高质量修复和再利用提供了重要的参考价值。

参 考 文 献

[1] Chen W. Common fault analysis and maintenance process introduction of hydraulic support column[J]. New Technology & New Products of China, 2015, 10(7): 63.
陈伟. 液压支架立柱常见故障分析及检修工艺介绍[J]. 中国新技术新产品, 2015, 10(7): 63.

[2] Chang X H. Study on the structural strength of hydraulic support column in use in mine[J]. Mechanical

Management and Development, 2020, 35(10): 124-125, 138.

常先红. 关于矿用液压支架立柱在使用中的结构强度研究[J]. 机械管理开发, 2020, 35(10): 124-125, 138.

[3] Zhao J L. Research on optimization of welding process of hydraulic support column middle cylinder[J]. Mechanical Management and Development, 2020, 35(10): 105-107.

赵军龙. 关于液压支架立柱中缸焊接加工工艺的优化研究[J]. 机械管理开发, 2020, 35(10): 105-107.

[4] Zan S P, Jiao J K, Zhang W W. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061406.
管少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061406.

[5] Gao F, Bai H Q, An Y W, et al. Experimental research on small hole drilling of 316L stainless steel additive forming parts[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(9): 48-53, 36.

高飞, 白海清, 安熠蔚, 等. 316L 不锈钢增材成型件小孔钻削实验研究[J]. 现代制造工程, 2019(9): 48-53, 36.

[6] Liu P, Chen Z K, Jin Q M, et al. Microstructure and corrosion behaviors of 316L coating fabricated by laser cladding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 031402.

刘朋, 陈志凯, 金全明, 等. 激光熔覆制备 316L 涂层组织及腐蚀行为研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 031402.

[7] Hao S X, Qu Q P, Li L J. Effect of heat treatment process of steel 45 on surface roughness of mechanical parts[J]. Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 31(2): 32-35.

郝少祥, 曲全鹏, 李林峻. 45 钢热处理工艺对其零件表面粗糙度的影响[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2019, 31(2): 32-35.

[8] Apolinario L H R, Wallerstein D, Montealegre M A, et al. Predominant solidification modes of 316 austenitic stainless steel coatings deposited by laser cladding on 304 stainless steel substrates[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(3): 3617-3628.

[9] Kaplan A F H, Weinberger B, Schwoecker D. Theoretical analysis of laser cladding and alloying[J]. Processing of SPIE, 1997, 3097: 499-506.

[10] Wu W H, Wu K Q, Xiao Y F, et al. Effect of atomization pressure on the properties of 316L

- stainless steel powders used in 3D printing[J]. Powder Metallurgy Technology, 2017, 35(2): 83-88.
- 吴文恒, 吴凯琦, 肖逸凡, 等. 气雾化压力对 3D 打印用 316L 不锈钢粉末性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2017, 35(2): 83-88.
- [11] Zhang K, Yang G L, Hu Y, et al. Effects of selective laser softening process on work hardening area of 304 stainless steel[J]. Applied Laser, 2017, 37(2): 161-168.
- 张坤, 杨高林, 胡勇, 等. 激光选区软化对 304 不锈钢加工硬化区域的影响[J]. 应用激光, 2017, 37(2): 161-168.
- [12] Wang S, Wu S L, Yang F. Innovative platform design of digital inspection and practical teaching in precise products quality of precision numerical control [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, 37(1): 215-217.
- 王胜, 巫少龙, 杨帆. 精密数控产品质量的数字化检测实验教学创新平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(1): 215-217.
- [13] Guo W, Zhang Y P, Chai R X. Numerical simulation and experimental study of single-track laser cladding of 304 stainless steels[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 091401.
- 郭卫, 张亚普, 柴蓉霞. 单道次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091401.
- [14] Guo Y X, Yang K L, Guo X L, et al. Quick evaluation of the pipeline equivalent sand-grain roughness based on the surface roughness parameters [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 178-185.
- 郭永鑫, 杨开林, 郭新蕾, 等. 基于表面粗糙度参数的管道当量粗糙度快速评测[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 178-185.
- [15] Cheng X J, Huang G L, Liu J, et al. Effect of different surface treatment on tappet microstructure and wear resistance[J]. Surface Technology, 2018, 47(11): 119-125.
- 程祥军, 黄国龙, 刘军, 等. 不同表面技术对挺柱组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 119-125.
- [16] Ayres P, Vestartas P, Thomsen M R. Enlisting clustering and graph-traversal methods for cutting pattern and net topology design in pneumatic hybrids [M]//Rycke K D, Gengnagel C, Baverel O, et al. Humanizing digital reality. Singapore: Springer, 2018: 285-294.
- [17] Garcia R F, Feix E C, Mendel H T, et al. Optimization of cutting parameters for finish turning of 6082-T6 aluminum alloy under dry and RQL conditions[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41(8): 1-10.
- [18] Yu T B, Shi B W, Song B X. Process parameters optimization of single-track laser cladding for 45 steel gear remanufacturing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1549: 032144.
- [19] Ding L, Li H X, Wang Y D, et al. Heat treatment on microstructure and tensile strength of 316 stainless steel by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0406003.
- 丁利, 李怀学, 王玉岱, 等. 热处理对激光选区熔化成形 316 不锈钢组织与拉伸性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406003.
- [20] Li X W, Song G, Zhang Z D, et al. Microstructure and properties of 316 stainless steel produced by laser-induced arc hybrid additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202006.
- 李旭文, 宋刚, 张兆栋, 等. 激光诱导电弧复合增材制造 316 不锈钢的组织 and 性能[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202006.