

激光与光电子学进展

激光填粉焊接 B340LA 高强钢工艺特性研究

李洁^{1,2}, 张屹^{1,2}, 梁志超^{1,2}, 陈聪^{1,2*}¹湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;²湖南大学智能激光制造湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082

摘要 激光焊接 B340LA 高强钢是汽车轻量化设计制造的重要技术难题。采用 Fe30 金属粉末作为填料开展了 B340LA 高强钢激光填粉焊接工艺试验, 研究了对接间隙、焊接速度和填粉速度对焊缝质量的影响规律, 发现在优化工艺参数条件下, 可以得到焊缝形貌平整, 焊缝强度高于母材的优质焊缝。结果表明, 对接间隙是影响表面余高和塌陷的最重要工艺参量, 随着对接间隙的增大, 焊缝形貌下凹量增大, 当对接间隙为 0.15 mm 时, 焊缝出现塌陷。焊接速度对焊缝表面余高和塌陷影响较小, 随着焊接速度的增加, 焊缝形貌平整, 未出现塌陷现象。填粉速度对抗拉强度的影响较大, 随着填粉速度的增加, 焊接件的组织大范围细化, 抗拉强度增加。当填粉速度 < 8.27 g/min 时, 焊接接头断裂在焊缝位置; 当填粉速度 ≥ 8.27 g/min 时, 焊接接头断裂在母材, 此时焊接接头强度高于母材。该研究成果丰富了激光焊接基础理论, 为车用 B340LA 高强钢激光焊接提供技术支撑。

关键词 激光技术; 激光焊接; 工艺特性; 焊缝形貌; 抗拉强度; 高强钢

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221052

Process Characteristics of Laser Powder Filling Welding of B340LA High-Strength Steel

Li Jie^{1,2}, Zhang Yi^{1,2}, Liang Zhichao^{1,2}, Chen Cong^{1,2*}¹State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;²Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Laser Manufacturing, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China

Abstract Laser welding of B340LA high-strength steel is crucial for lightweight designing and manufacturing of automobiles. In this study, Fe30 metal powder was employed as a filler to perform B340LA high-strength steel laser powder filling welding, and the effect of the butt gap, welding speed, and powder feeding rate on weld quality was investigated. Furthermore, a high-quality weld with smooth weld morphology and better weld strength compared to base metal was obtained under optimized process parameters. Moreover, the butt gap was the most important process parameter affecting surface clearance and collapse, and the concave amount of the weld profile increased as the butt gap increased. However, when the butt gap was 0.15 mm, the weld collapsed. Welding speed had little effect on weld surface reinforcement and collapse. As the welding speed increased, the weld morphology became flat, and no collapse was observed. Furthermore, the powder feeding rate significantly influenced the tensile strength. As the powder feeding rate increased, the microstructure of the weldments was refined at a wide range, and the tensile strength increased. When the powder feeding rate was less than 8.27 g/min, the fracture of the welded joint occurred at the weld. However, when the powder feeding rate was ≥ 8.27 g/min, the welded joint broke at the base metal, and the strength of the welded joint was higher than that of the base metal. The research results enrich the basic theory of laser welding and provide technical support for B340LA high-strength steel laser welding of vehicles.

Key words laser technique; laser welding; process characteristics; weld morphology; tensile strength; high-strength steel

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-25; 录用日期: 2022-06-22; 网络首发日期: 2022-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(51975205)、湖南省自然科学基金(2021JJ40068)

通信作者: *chencong@hnu.edu.cn

1 引言

B340LA 高强钢是低合金高强度冷轧钢,具有强度高、成形性好等优点,广泛应用于汽车座椅、车顶、车身底盘、横梁及支架结构中,是实现汽车轻量化的主选材料之一^[1-2]。在实际应用过程中,B340LA 高强钢的有效连接是汽车轻量化研究的关键技术难题^[3]。目前,B340LA 高强钢的连接主要采用钨极氩弧焊(TIG)、电阻点焊等方式,对激光焊接技术研究较少^[4-5]。激光焊接具有热输入小、焊接速度快、精度高、易于实现自动化等突出优点,广泛应用于汽车制造领域^[6-7]。然而,激光焊接对工件的装配精度和窄间隙要求高,对于工件的宽间隙工况,常常采用激光填粉焊接进行连接^[8-9]。

激光填粉焊接是指利用纳米或微米级别的金属粉末作为焊料的一种高精度、高柔性的激光焊接技术,可以降低激光焊接对工件装配精度的要求,解决宽间隙下焊缝不连续、塌陷、咬边等缺陷问题,并提高激光的利用率^[10]。此外,填充合适的金属粉末可以细化晶粒,改善焊缝组织,提升力学性能,获得高质量的焊接接头^[11]。Missori 等^[12-15]发现在铝合金激光焊接时,添加不同元素的粉末,可以改变焊缝组织,提高焊接接头强度。陈铠等^[16-17]研究了几种高强铝合金的激光填粉焊接,发现填粉焊接提高了焊接过程的稳定性,抑制了焊缝热裂纹。进一步地,Wang 等^[18]采用配比的 Al-Si-Ni 粉末进行铝合金激光填粉焊接,发现填充粉末可以获得组织均匀、抗拉强度为母材 83% 的

高质量焊缝。Errico 等^[19]研究了不同工艺参数对不锈钢激光填粉焊接的焊缝形状及气孔率的影响,发现光斑直径的变化是导致焊接工艺不同的根本原因,在宽间隙下采用填粉焊接能够减少缺陷产生。目前,激光填粉焊接的研究主要集中在焊接铝合金和不锈钢板等材料,关于 B340LA 高强钢的填粉焊接工艺鲜有报道。

因此,本文选用 B340LA 高强钢作为焊接母材,Fe30 作为添加金属粉末进行激光填粉焊接试验。然后研究了对接间隙、焊接速度和填粉速度对焊缝表面形貌的影响,重点研究了填粉速度对焊缝表面形貌、抗拉强度、微观组织的变化规律,得出了 B340LA 高强钢激光填粉焊接的优化工艺参量。

2 试验方法

激光填粉焊接试验方法如图 1 所示,主要装置有激光器、位移平台和送粉器。光纤激光器采用 IPG YLS-5000 型光纤激光器,最大输出功率为 5 kW,激光束波长为 1070 nm,传输光纤芯径为 200 μm 。激光焊接头为 Precitec YW50 型透镜式聚焦焊接头,准直焦距为 150 mm,聚焦焦距为 200 mm,聚焦光斑直径为 0.25 mm。四路同轴送粉头是 YW50 焊接头的一部分,具有四个内径为 2 mm 和倾角为 22.5° 的粉末喷嘴,采用 DPSF-2 型盘式双筒送粉器。电动位移平台采用 PSA-400-11X 型,最大行程为 400 mm,控制器为配套 SC300-2B 型。采用纯度为 99.99% 的氩气,作为试验过程中的送粉和保护气体。

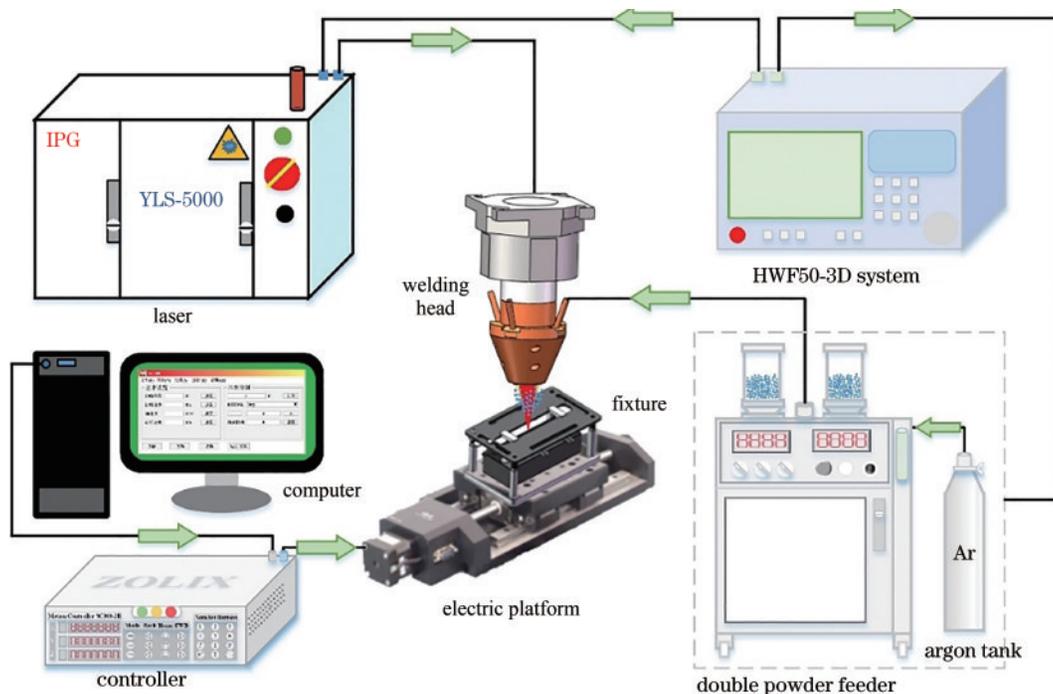


图 1 激光填粉焊接试验装置

Fig. 1 Experimental setup for laser powder feeding welding

在激光填粉焊接过程中,激光控制系统发出两路信号,一路信号传输至 YLS-5000 光纤激光器控制激光器出光,其产生的连续激光束通过光纤传输至焊接头,再经过焊接头辐照到焊件表面,另一路信号传输至送粉器,送粉器在氩气的驱动作用下通过送粉头同轴输送粉末实现激光填粉焊接。与此同时,计算机发出一路信号通过位移控制器对电动位移平台进行运动控制,从而实现连续激光填粉焊接。

试验材料为宝钢集团有限公司生产的 1.6 mm 厚的 B340LA 型高强钢,其化学成分如表 1 所示。填充粉末为自熔性和润湿性较好的 Fe30 粉末,大小为 100~325 目(45~150 μm)。在试验开始前,利用 FA2104 型电子天平和团队设计的 LabVIEW 填粉速度测量软件进行标定,试验结果如图 2 所示。结果发现,实际填粉速度与模拟值之间呈现出良好的线性关系。

表 1 B340LA 高强钢化学成分

Table 1 Chemical composition of B340LA high-strength steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
Mass fraction /%	0.07	0.04	0.78	0.02	0.01	Bal.

表 2 单一因素试验参数表

Table 2 Single factor test parameter table

No.	Laser power P/W	Welding speed $v/(mm \cdot s^{-1})$	Powder feeding rate $M/(g \cdot min^{-1})$	Butt gap D/mm
1#	1200	20	12.69	0.05
2#	1200	20	12.69	0.10
3#	1200	20	12.69	0.15
4#	1200	20	12.69	0.20
5#	1200	20	12.69	0.25
6#	1200	20	12.69	0.30
7#	1200	20	0.75	0.05
8#	1200	20	5.06	0.05
9#	1200	20	8.27	0.05
10#	1200	20	12.69	0.05
11#	1200	20	15.81	0.05
12#	1200	16	12.69	0.05
13#	1200	18	12.69	0.05
14#	1200	20	12.69	0.05
15#	1200	22	12.69	0.05
16#	1200	24	12.69	0.05

在试验完成后,利用线切割方式,将焊接试件切成标准样件,然后经镶嵌、打磨、抛光再研磨制成金相样件,由于材料为 B340LA 型号的高强钢,采用饱和状态的苦味酸乙醇溶液对金相样件腐蚀后,利用蔡司(ZEISS)研究级倒置式材料显微镜 Axio Vert. A1 观察

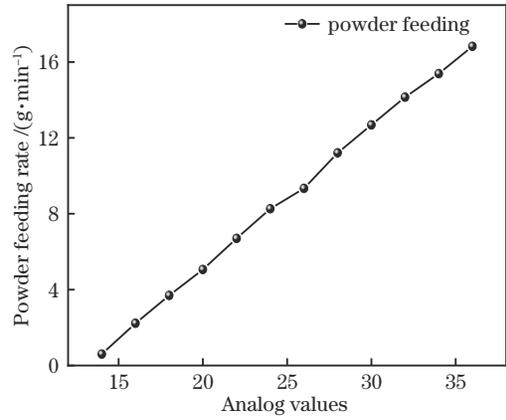


图 2 填粉速度与模拟值的关系

Fig. 2 Relationship between powder feeding rate and analog quantity

在试验过程中,由于加入了金属粉末,影响激光填粉焊接工艺的因素变多,其中对接间隙、焊接速度、填粉速度等因素将直接影响焊接质量,在保证激光功率、添加粉末种类和离焦量一定的情况下选用表 2 所示的参数研究单因素工艺对焊接性能影响。1#~6#、7#~11#、12#~16#分别为对接间隙 D 、填粉速度 M 和焊接速度 v 三个参数的激光填粉焊接单因素试验结果。

试件横截面形貌。横截面形貌特征测试方式如图 3 所示,力学性能检测采用的拉伸设备为 MTS 公司生产的 E43.104 电子万能试验机,试验过程中拉伸速率为 2 mm/min。

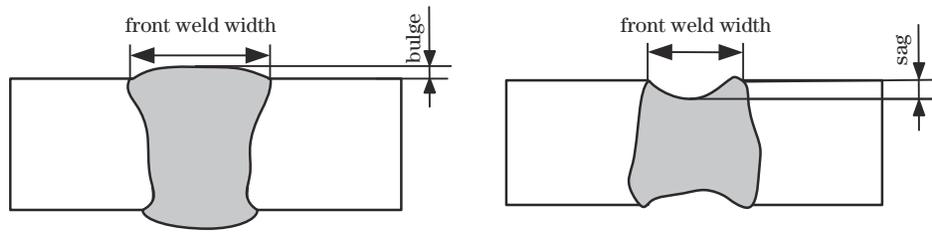


图3 横截面形貌特征测试方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the test method of cross-sectional topography

3 结果与讨论

3.1 焊缝形貌特征

如图4(a)所示,当激光功率为1.2 kW、焊接速度为20 mm/s、填粉速度为8.27 g/min、对接间隙为0.05 mm时,激光填粉焊接B340LA 高强钢可以得到

理想的焊缝:焊缝表面形貌均匀饱满,无堆高和飞溅等缺陷,截面形貌焊后无间隙和塌陷,表面平整,无明显的重熔层出现。但是,当工艺参数选择不恰当时,如图4(b)所示,焊缝表面形貌不平整,截面形貌出现塌陷等缺陷。在激光功率为1.2 kW时,得到的优质焊缝速度为20 mm/s,提升了激光填粉焊接的效率。

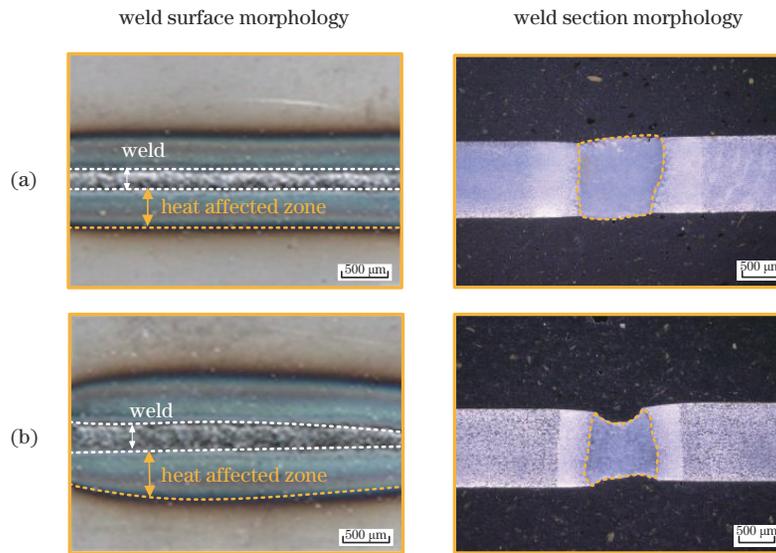


图4 典型焊缝表面及截面形貌特征。(a) $P=1.2\text{ kW}$, $v=20\text{ mm/s}$, $M=8.27\text{ g/min}$, $D=0.05\text{ mm}$; (b) $P=1.2\text{ kW}$, $v=16\text{ mm/s}$, $M=12.69\text{ g/min}$, $D=0.05\text{ mm}$

Fig. 4 Typical weld surface and section morphology. (a) $P=1.2\text{ kW}$, $v=20\text{ mm/s}$, $M=8.27\text{ g/min}$, $D=0.05\text{ mm}$; (b) $P=1.2\text{ kW}$, $v=16\text{ mm/s}$, $M=12.69\text{ g/min}$, $D=0.05\text{ mm}$

3.2 工艺参数对焊缝形貌特征的影响

3.2.1 对接间隙对焊缝形貌特征的影响

如图5(a)所示,随着对接间隙的增大,上熔宽先变小后变大:当对接间隙为0.05 mm时,上熔宽达到最大值;当对接间隙为0.2 mm时,上熔宽达到最小值。由图5(b)可知,随着对接间隙的增加,塌陷值一直在增加。塌陷值是指塌陷最低点与工件上表面的相对差值,正值代表塌陷,负值代表余高。当对接间隙 $<0.15\text{ mm}$ 时,焊缝平整,继续减小对接间隙,焊缝余高增大;当对接间隙 $\geq 0.15\text{ mm}$ 时,焊缝出现塌陷。

上熔宽和塌陷值变化主要与激光束与工件和粉末之间的作用有关。如图6(a)所示,当对接间隙为0.05 mm (小于光斑直径)时,激光束与母材和粉末同时作用,熔化的液态金属共同填充对接间隙形成焊缝,

此时焊缝饱满且有余高。如图6(b)所示,当对接间隙为0.25 mm (等于光斑直径)时,激光束与母材和粉末同时作用,母材和粉末熔化形成的液态金属在重力作用下向下填充,形成塌陷,塌陷值较小。如图6(c)所示,当对接间隙为0.3 mm (大于光斑直径)时,激光束主要与粉末作用,熔化的粉末和部分母材形成的液态金属不足以填充对接间隙,因此焊缝会出现较大塌陷。这是因为当对接间隙大于光斑直径时,一方面母材直接吸收的能量减少,难以继续向下熔化,另一方面,大间隙会使得上表面的液态金属延展流动变大,工件表面会停留大面积流动的液态金属,因此上熔宽变大。

3.2.2 填粉速度对焊缝形貌特征的影响

如图7所示,随着填粉速度的增加,上熔宽增加,塌陷值变小,余高变大。当填粉速度 $<8.27\text{ g/min}$ 时,

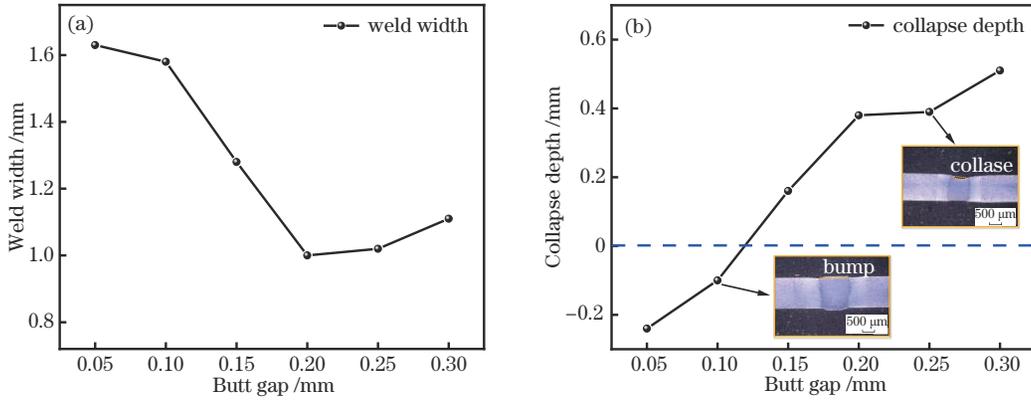


图 5 对接间隙对焊缝形貌特征的影响。(a)熔宽;(b)上表面余高/塌陷量

Fig. 5 Influence of butt gap on weld morphology. (a) Weld width; (b) bump/collapse depth of upper surface

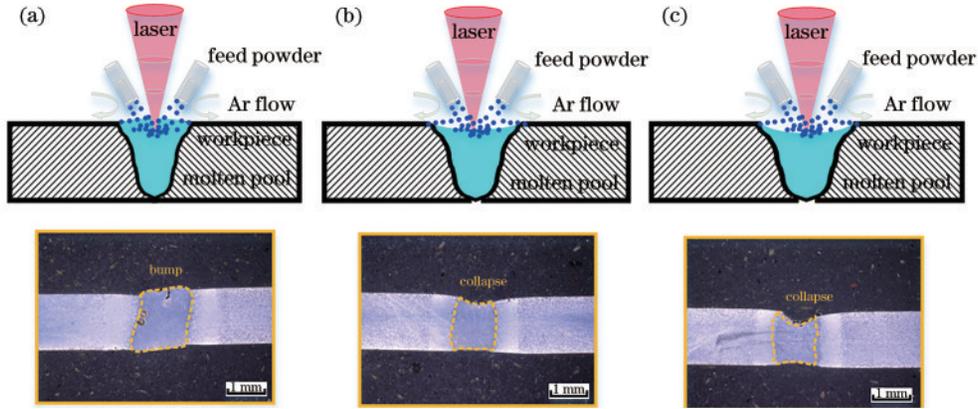


图 6 不同对接间隙熔池特征演化。(a) 0.05 mm; (b) 0.25 mm; (c) 0.30 mm

Fig. 6 Evolution of molten pool with different butt gaps. (a) 0.05 mm; (b) 0.25 mm; (c) 0.30 mm

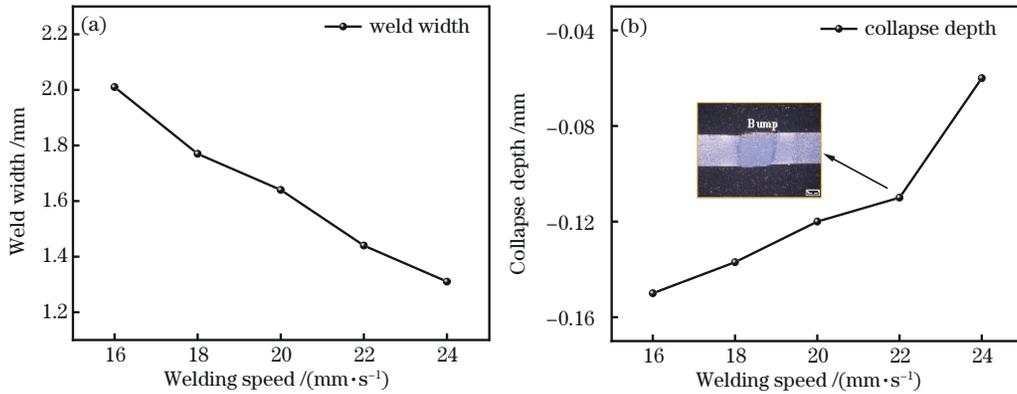


图 7 填粉速度对焊缝形貌特征的影响。(a)熔宽;(b)上表面余高/塌陷量

Fig. 7 Influence of powder feeding rate on weld morphology. (a) Weld width; (b) bump/collapse depth of upper surface

塌陷随填粉速度增加而减小;当填粉速度为 8.27 g/min 时,塌陷逐渐消失,产生余高;当填粉速度 > 8.27 g/min 时,余高随填粉速度的增加而增大。

上熔宽和塌陷值变化主要与激光束与粉末作用有关。如图 8(a) 所示,当填粉速度较小时,落入激光束作用点的粉末数量较少,熔化的粉末和母材形成的液态金属不足以填满焊缝间隙,因此会导致焊缝产生塌陷,上熔宽较小。当填粉速度较大时,如图 8(b) 所示,

落入激光束作用点的粉末数量较多,熔化的粉末和母材形成的液态金属可以填满焊缝间隙,能够得到均匀饱满的焊缝。粉末的增多,补充了上表面液态金属,在氩气流的影响下,液态金属向两边排出,因此上熔宽增大。

3.2.3 焊接速度对焊缝形貌特征的影响

如图 9 所示,随着焊接速度的增加,上熔宽和上表面余高变小,当焊接速度为 24 mm/s 时,焊缝余高

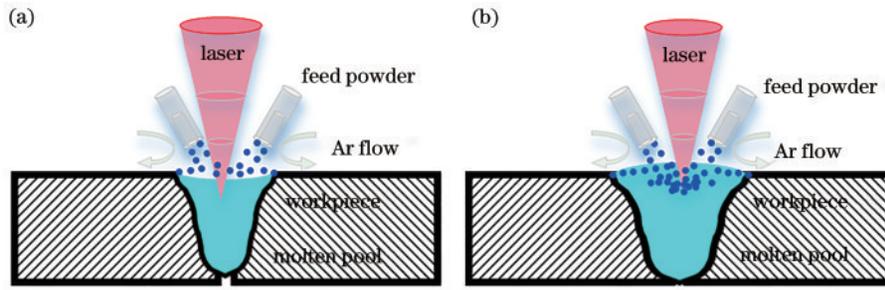


图 8 不同填粉速度下熔池流动的演化。(a)少量粉末;(b)大量粉末

Fig. 8 Evolution of molten pool flow with different powder feeding rates. (a) Little powder; (b) bulk powder

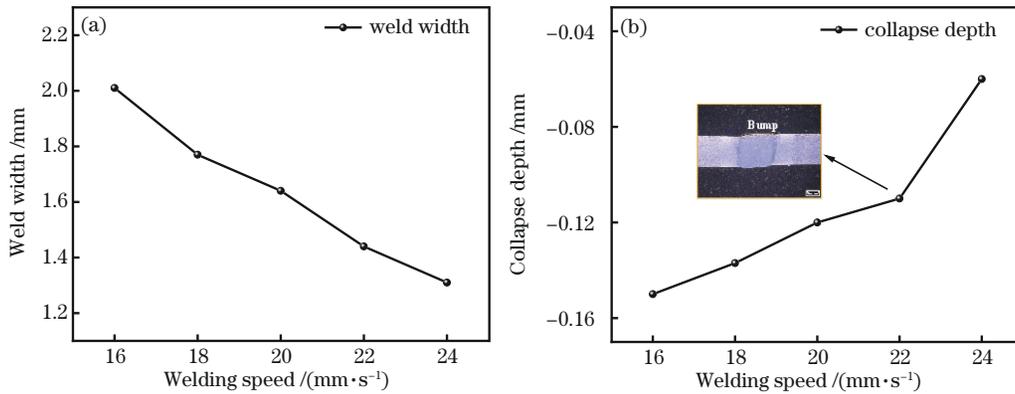


图 9 焊接速度对焊缝形貌特征的影响。(a)熔宽;(b)上表面余高/塌陷量

Fig. 9 Evolution of molten pool flow with different welding speeds. (a) Weld width; (b) bump/collapse depth of upper surface

为 0.06 mm。这是因为:当激光功率不变,焊接速度较小时,激光线能量较大,熔化的母材和金属能够填满焊接缝隙,上表面有金属液滴的积累,因此熔宽较大;当焊接速度增加时,激光线能量减少,单位时间内熔化的金属较少,因此熔宽变小。由此可知,在激光焊接过程中添加足量的粉末,能有效抑制塌陷现象的产生。

对比了对接间隙、填粉速度和焊接速度对焊缝形貌特征的影响,如图 10 所示,结果发现,焊接速度对激光填粉焊接中焊缝的余高和塌陷影响较小。从余高和

塌陷角度考虑工艺参数发现,填粉速度和对接间隙对塌陷值影响的交点接近于塌陷值为 0,可进一步缩小工艺窗口。因此,对于激光填粉焊接,本试验可以作为优化工艺参数的依据。

3.3 工艺参数对抗拉强度的影响

为了确定各工艺参数对焊缝质量的影响,本文对各工艺参数下的焊件抗拉强度进行了检测分析。如图 11(a)、(b)所示,在本文试验参数范围内,改变对接间隙和焊接速度对焊件的抗拉强度影响不大(断裂在母材区),而改变填粉速度对焊件的抗拉强度有较大影响。如图 11(c)所示,随着填粉速度的增加抗拉强度变大。当填粉速度 < 8.27 g/min 时,焊接接头断裂处发生在焊缝处;当填粉速度 ≥ 8.27 g/min 时,焊接接头强度高于母材。

对焊缝组织进行显微观察,随着填粉速度的增加,焊缝中的细小晶粒越来越多,接头强度随之增大。如图 12(a)所示,当填粉速度为 0.75 g/min 时,焊缝组织中出现了大量的贝氏体等轴晶,晶粒很大,几乎看不到细小晶粒的存在。此时抗拉强度低于母材。由图 12(b)可知,随着填粉速度的增加,当填粉速度为 5.06 g/min 时,焊缝出现了细小晶粒组织。由于细小晶粒组织的数量不足,断裂区仍出现在焊缝区。由图 12(c)可知,随着填粉速度的进一步增加,当填粉速度为 8.27 g/min 时,焊缝中细小晶粒组织增多,抗拉强度变大,当焊缝强度大于母材强度时,焊缝断裂在母

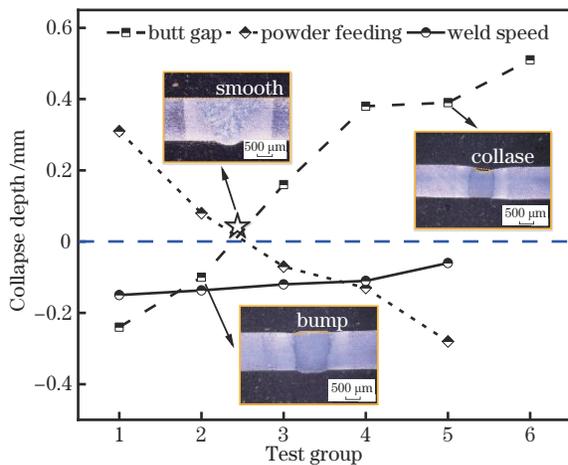


图 10 工艺参数对焊缝形貌特征的影响

Fig. 10 Influence of process parameters on weld morphology

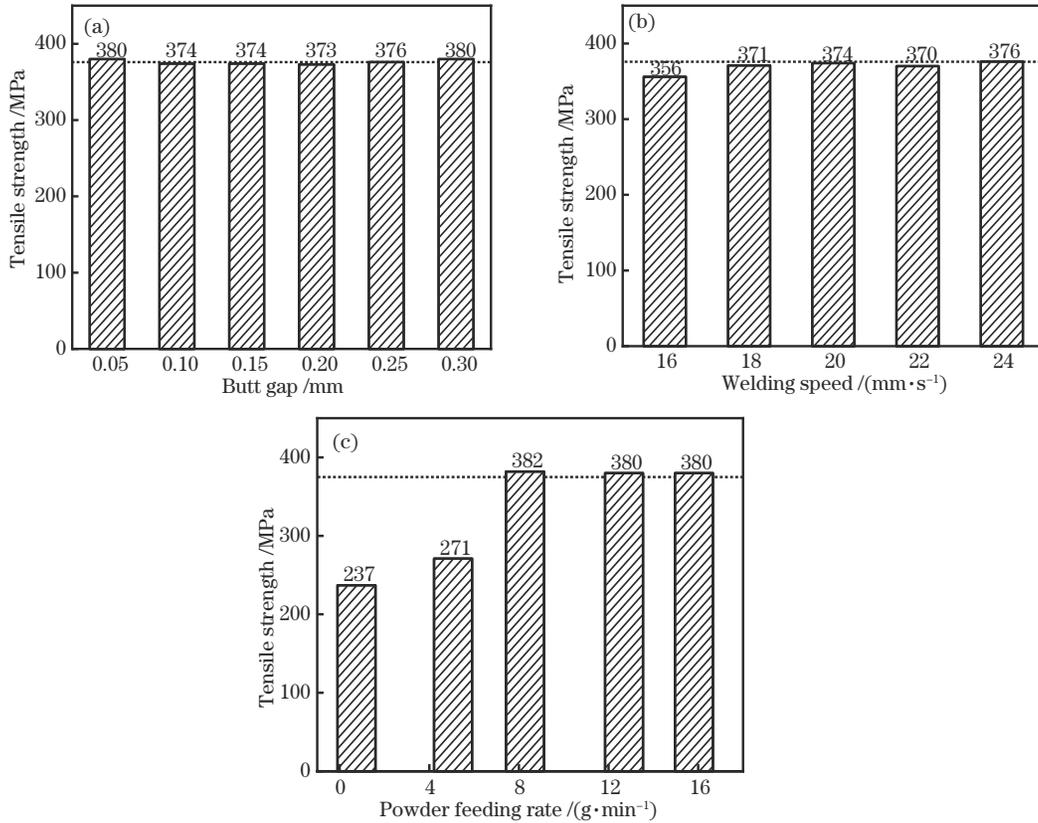


图 11 工艺参数对抗拉强度的影响。(a)对接间隙;(b)焊接速度;(c)填粉速度

Fig. 11 Effect of process parameters on tensile strength. (a) Butt gap; (b) welding speed; (c) powder feeding rate

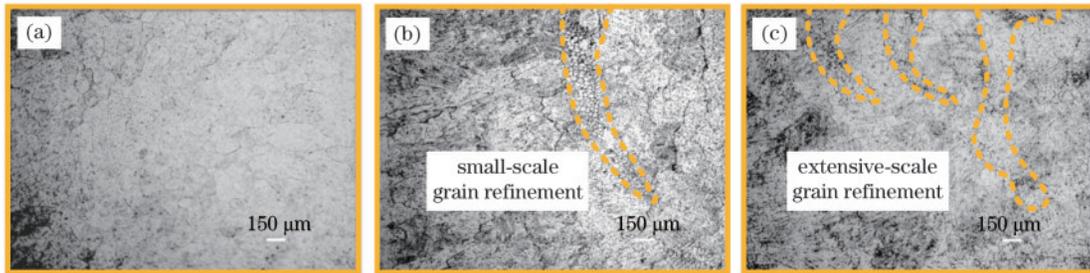


图 12 不同填粉速度下焊缝组织形貌。(a) 0.75 g/min; (b) 5.06 g/min; (c) 8.27 g/min

Fig. 12 Microstructure of weld with different powder feeding rates. (a) 0.75 g/min; (b) 5.06 g/min; (c) 8.27 g/min

材上。

4 结 论

本文采用 Fe30 金属粉末作为填料开展了 B340LA 高强度激光焊接工艺研究,分析了填粉速度、对接间隙和焊接速度对焊缝表面形貌和拉伸性能的影响规律,并解释了其影响机理,最终得到如下结论。

1)当激光功率为 1.2 kW、焊接速度为 20 mm/s、填粉速度为 8.27 g/min、对接间隙为 0.05 mm 时,激光填粉焊接 B340LA 高强度能够获得表面平整、无塌陷的焊缝。

2)对接间隙和填粉速度与上熔宽呈正相关,焊接速度与上熔宽呈负相关。当对接间隙增大到 0.15 mm 时,焊缝开始出现塌陷,对接间隙越大,塌陷值越大;当填

粉速度 < 8.27 g/min 时,焊缝表面塌陷;当填粉速度 \geq 8.27 g/min 时,焊缝表面成形饱满,出现余高。

3)对接间隙和焊接速度对抗拉强度的影响较小,填粉速度对抗拉强度的影响较大。拉伸强度随着填粉速度的增加而增大。当填粉速度 < 8.27 g/min 时,焊接接头断裂在焊缝;当填粉速度 \geq 8.27 g/min 时,焊缝组织大范围细化,接头强度高于母材,接头断裂在母材。

参 考 文 献

- [1] 龚晓叁, 韩绍昌, 黄开发. B340LA 低合金高强度电阻点焊工艺试验优化与分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(23): 65-67, 71.
Gong X S, Han S C, Huang K F. Optimization on welding parameters of resistance spot welding process for

- B340LA[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(23): 65-67, 71.
- [2] Li J, Zhang Y, Liu W, et al. Prediction of penetration based on plasma plume and spectrum characteristics in laser welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 75: 593-604.
- [3] 李永兵, 李亚庭, 楼铭, 等. 轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(18): 44-54.
Li Y B, Li Y T, Lou M, et al. Lightweighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(18): 44-54.
- [4] 李彬坡, 刘鹏, 赵宝中, 等. 不等厚 B340LA/B1500HS 异种高强钢薄板 TIG 焊接头成形及组织性能[J]. *电焊机*, 2014, 44(8): 40-43.
Li B P, Liu P, Zhao B Z, et al. Study on formation and microstructural properties of TIG welded-joints for unequal-thickness B340LA/B1500HS dissimilar high-strength steel[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(8): 40-43.
- [5] 张龙柱, 任虎, 贾彩霞, 等. 三种典型汽车高强钢点焊工艺性研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(15): 172-176, 183.
Zhang L Z, Ren H, Jia C X, et al. Spot welding technology of three typical high strength steels for automobile[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(15): 172-176, 183.
- [6] 赵燕春, 张培磊, 顾俊杰. 双束激光焊接的研究现状[J]. *材料导报*, 2018, 32(S1): 345-349.
Zhao Y C, Zhang P L, Gu J J. Research status on dual-beam laser welding[J]. *Materials Review*, 2018, 32(S1): 345-349.
- [7] Chen C, Xiang Y Z, Gao M. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of dissimilar aluminum alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 60: 180-187.
- [8] 姜慧玲, 彭笑雨, 鞠恒, 等. 激光填粉焊接接头残余应力的数值模拟分析[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(9): 130-136.
Jiang H L, Peng X Y, Ju H, et al. Numerical simulation analysis of residual stress of laser powder filling welded joint[J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(9): 130-136.
- [9] 方荣超, 张军, 曾军河, 等. 35 钢/Q355B 钢窄间隙摆动激光填丝焊研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(16): 1602014.
Fang R C, Zhang J, Zheng H J, et al. Narrow gap wobble laser with filling wire for welding of 35 steel and Q355B steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(16): 1602014.
- [10] 应俊龙, 李智勇, 熊曦耀. GH3030 高温合金激光填粉焊接工艺及性能研究[J]. *应用激光*, 2021, 41(2): 252-256.
Ying J L, Li Z Y, Xiong X Y. Study on technology and properties of GH3030 superalloy by laser powder-filling welding[J]. *Applied Laser*, 2021, 41(2): 252-256.
- [11] 张屹, 梁志超, 张哲豪, 等. B340LA 变厚截面板变功率激光焊接试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(2): 51-57.
Zhang Y, Liang Z C, Zhang Z H, et al. Experimental research on variable power laser welding of the B340LA tailor rolled banks[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(2): 51-57.
- [12] Missori S, Sili A. Structural characterization of C-Mn steel laser beam welded joints with powder filler metal[J]. *Welding Journal*, 2000, 79(11): 317-323.
- [13] Braun R. Nd: YAG laser butt welding of AA6013 using silicon and magnesium containing filler powders[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 426(1/2): 250-262.
- [14] 张盛海, 陈铠, 肖荣诗, 等. 填充粉末对铝合金高功率 CO₂ 激光焊接的影响[J]. *中国激光*, 2005, 32(6): 086004.
Zhang S H, Chen K, Xiao R S, et al. Influence of metal powder on high power CO₂ laser welding of aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(6): 086004.
- [15] 张盛海, 陈铠, 肖荣诗, 等. 铝合金高功率 CO₂ 激光粉末焊接[J]. *中国激光*, 2006, 33(5): 714-718.
Zhang S H, Chen K, Xiao R S, et al. High power CO₂ laser powder welding of aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(5): 714-718.
- [16] 陈铠, 杨武雄, 肖荣诗, 等. 几种高强铝合金的激光填粉焊接[J]. *应用激光*, 2005, 25(4): 222-226.
Chen K, Yang W X, Xiao R S, et al. Laser welding of some aluminum alloys with powder[J]. *Applied Laser*, 2005, 25(4): 222-226.
- [17] Zhang Y, Guo G L, Li F N, et al. The interface control of butt joints in laser braze welding of aluminium-steel with coaxial powder feeding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 246: 313-320.
- [18] Wang Y Y, Yang X N, Shi S Y, et al. Laser welding 6061 aluminum alloy with laser cladding powder[J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33(2): 022006.
- [19] Errico V, Campanelli S L, Angelastro A, et al. On the feasibility of AISI 304 stainless steel laser welding with metal powder[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 96-105.