

车用高强钢激光填充热丝对接焊间隙裕度研究

张 屹 谭力鹏 张成磊

(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)

摘要 对接装配精度是制约车身零件激光对接焊技术应用的重要因素之一。采用激光填充热丝焊,对 1.2 mm 厚车用高强钢 DP800 在不同对接间隙条件下进行了对接间隙裕度的研究。通过优化焊接参数,在间隙达到母材厚度的 100%(1.2 mm)时得到表面成形良好的焊缝。焊后对焊缝的成分分布、金相组织及力学性能进行了分析。焊接结果表明,对接间隙变化对焊缝成分分布及金相组织无明显影响;焊缝的拉伸强度在对接间隙不大于母材厚度的 83%(1.0 mm)时大于母材,在间隙为母材厚度的 100%(1.2 mm)时达到母材强度的 89.9%。采用激光填充热丝焊能显著降低激光对接焊车身零件对装配间隙的要求。

关键词 激光技术; 激光焊接; 对接间隙裕度; 热丝; 高强钢

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0703003

Research on Gap Margin in Laser Butt Welding of High-Strength Automobile Steel with Hot Wire Filler

Zhang Yi Tan Lipeng Zhang Chenglei

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract The fit up precision is one of the facts that restrict the applications of the laser welding of the vehicle body components in a butt joint. An experimental study on gap margin in laser butt welding of 1.2 mm thick high-strength automobile steel DP800 is performed with hot wire filler under various butt gaps. Sound weld beads are obtained by optimizing welding parameters when the butt gap is not more than 100% of the steel sheet thickness (1.2 mm). The chemical composition distributions, metallographic phase and mechanical property of the weld are analyzed after welding. The result shows that the butt gaps have little influence on the chemical composition distributions and metallographic phase of the weld; the tensile strength of the weld is higher than that of the base metal when the butt gap is not more than 83% of the steel sheet thickness (1.0 mm), while it reaches 89.9% of the tensile strength of the base metal when the butt gap is 100% of the steel sheet thickness (1.2 mm). The requirement of high fit up precision of butt joint can be loosened dramatically using laser welding with hot wire.

Key words laser technique; laser welding; butt joint gap margin; hot-wire; high-strength steel

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3850

1 引 言

随着环境问题和能源危机的日益突出,节能减排成为人们关注的焦点之一。汽车制造商纷纷采用强度更高、更利于车身轻量化的先进高强钢来实现节能减排的目的^[1-2]。作为汽车生产过程中的重要环节,车身焊接在技术和设备上发生了较大变化。激光焊接凭借其能量密度高、焊接速度快、易于实现自动化以及焊缝成形好、热影响区小等优点而在车

身焊接上得到越来越广泛的应用,并逐渐取代传统的电阻点焊生产线^[3]。相比传统焊接技术,应用激光焊接车用高强钢,能在很大程度上提高车身强度、车身安全性、美观性以及实现车身的轻量化^[4]。车身零件焊接时,对接接头代替搭接接头是实现车身轻量化的重要措施之一。同时,因为激光束的聚焦直径小,对零件的加工精度和装夹精度要求较高,增加了加工成本,限制了激光焊接的推广应用。研究

收稿日期: 2013-01-31; 收到修改稿日期: 2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(51175162)和湖南省自然科学基金重点项目(12JJ2032)资助课题。

作者简介: 张 屹(1976—),男,博士,教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: zy@hnu.edu.cn

指出,当被焊零件采用对接接头时,最大对接间隙一般要求不大于板厚的 10%~15%^[5]。

而采用激光填丝焊接技术能在一定程度上降低对零件装配精度的要求^[6]。但激光填丝焊过程中,部分激光能量用来熔化母材,另一部分用来熔化焊丝,对激光功率要求较高,同时也限制了焊接速度的提高^[7]。采用电流对焊丝进行预热,能减小焊丝熔化对激光能量的依赖,同时采用激光热丝焊能提高焊接过程的稳定性。Sun 等^[8]指出,采用填充热丝焊能增加激光吸收率,加快焊丝熔化速度,提高焊接稳定性。李俐群等^[9]分别采用双光束普通填丝焊和双光束填充热丝焊对 16 mm 厚高强钢进行焊接,指出采用填充热丝的方法能更有效地改善未熔合缺陷。Mathieu 等^[10]研究了分别填充热丝和冷丝对钢铝进行激光角接焊,实验结果显示,填充热丝的试件抗拉强度高于填充冷丝的试件,并指出可能原因是热丝比冷丝能更好地与试件结合。以上研究表

表 1 DP800 和高强钢焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of DP800 and filler wire (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Mo	Ti
DP800	0.13	0.17	1.96	0.012	<0.005	0.050	—	—	—
Filler wire	0.028	0.493	1.48	0.0094	0.0090	—	2.36	0.239	0.118

图 1 为激光热丝焊装置示意图。采用 IPG YLR 4000 型光纤激光器作为焊接热源,最大输出功率为 4.0 kW,模式为 TEM₀₀,连续输出,波长为 1070 nm,采用芯径为 0.3 mm 的光纤传输。焊接头型号为 Precitec YW50,配有同轴吹气保护装置,其准直聚焦系统由焦距为 150 mm 的准直镜和焦距为 200 mm 的聚焦镜组成,激光焦斑处光斑直径为 0.4 mm。热丝设备为 Fronius 公司生产的型号为 TransPuls Synergic 2700 的热丝机,热丝电源正极通过送丝头与焊丝接触,负极与试件接触,焊丝加热电流 I 范围为 0~270 A,送丝速度 V_f 调节范围为 0.5~22 m/min。焊接头与送丝头固定在 ABB IRB 2400 型焊接机器人

明,在提高焊丝流动性、提高焊接效率及改善焊接接头性能方面,激光热丝焊体现出较大的优势。将激光热丝焊应用于车用高强钢的焊接,在保证效率的同时,将有助于降低激光焊接对接接头的装配间隙的要求。本文将采用激光热丝焊对车用高强钢在不同对接间隙的情况下进行焊接实验,得出合适的工艺参数。并通过焊缝微观组织及宏观力学性能进行分析,得出能满足强度的最大对接间隙值,为对接连接方式更广泛地应用于车身零件焊接提供参考。

2 实验方法及步骤

2.1 实验材料及实验装置

实验材料为车用高强钢 DP800,双面镀锌,抗拉强度 $R_m \geq 800$,屈服强度 $R_{p0.2} \geq 450$,试件尺寸为 60 mm×35 mm×1.2 mm。填充焊丝为专用高强钢焊丝,直径为 1.0 mm,DP800 和高强钢焊丝的化学成分如表 1 所示。

上,通过机器人控制器分别输送信号给激光器和热丝机来控制激光发射、送丝速度 V_f 及焊丝加热。

2.2 激光热丝焊焊接参数

工件采用对接连接方式焊接,试验前将工件的边缘打磨平整,保证对接间隙均匀,并用丙酮清洗工件表面。分别在对接间隙为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.3、1.4 mm 的情况下进行试验。试验过程中,保持焊丝前端与工件接触,且焊丝的加热长度恒定。激光光斑照在焊丝与工件接触处。激光离焦量的大小影响激光光斑的大小和功率密度,以及焊接过程的稳定性。当离焦量为 0 时,容易出现焊丝未熔化的情况,导致焊接过程不稳定。这是由于激光光斑较小,对送丝精度要求较高,焊丝稍有偏离中心位置,则激光作用不到焊丝上。增大离焦量,能提高焊接过程的稳定性。但离焦量越大,激光光斑越大,激光功率密度则越小,需要的激光功率越高。综合考虑,当焦点位于工件表面上方 8 mm 处,此时光斑直径为 1.2 mm,略大于焊丝直径,有利于焊接过程稳定,得到良好的焊缝成形。利用同轴吹送氩气进行焊缝表面保护,气体流量为 15 L/min。焊接速度为 1.2 m/min。采用前置送丝,送丝角度 θ (焊丝与激光束的夹角)为 60°,送丝速度可以根据需填充的

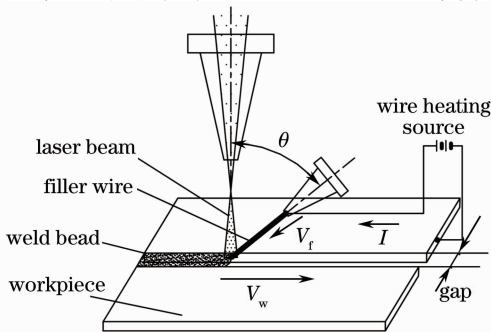


图 1 激光热丝焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hot wire laser welding

间隙和焊接速度来确定。试验中,焊丝均用来填充间隙,因此可依据增量体积需求得到以下关系式^[11]

$$kV_w d\delta = V_f \frac{\pi\phi^2}{4}, \quad (1)$$

式中 V_w 为焊接速度; d 为板材厚度; δ 为对接间隙; V_f 为送丝速度; ϕ 为焊丝直径; k 为成形系数,由余高的要求确定,可取为 1.1~1.2。在焊接速度保持不变的情况下,送丝速度完全由间隙来确定。

激光热丝焊过程中,激光功率和焊丝温度的匹配是一个关键因素。激光功率和焊丝加热电流决定了焊接过程中的热输入总量,而激光功率仍在焊接过程中起主导作用。激光能量一部分被焊丝吸收,一部分进入熔池,还有一部分被焊丝反射^[12]。焊丝

在激光能量和电流作用下熔化,并将热量传递给母材,使母材熔化,从而达到熔合的目的。在一定的激光功率下,控制好电流对激光能量的吸收率及焊接过程的稳定性有重要影响。电流过小,则焊丝在激光的作用下不能完全熔化,从而无法实现焊缝的完全融合,如图 2(a) 所示,可以看出焊缝背面未完全熔合;电流适当时,焊丝在激光的作用下完全熔化并能及时送入熔池,且将热量传递给熔池,实现表面成形良好的焊缝,如图 2(b) 所示;电流过大,焊丝在激光作用下过早地熔化,与熔池形成断续连接,导致预热电流大的波动,且熔化的焊丝容易形成大的熔滴堆积在焊缝上,形成不连续焊缝,如图 2(c) 所示。

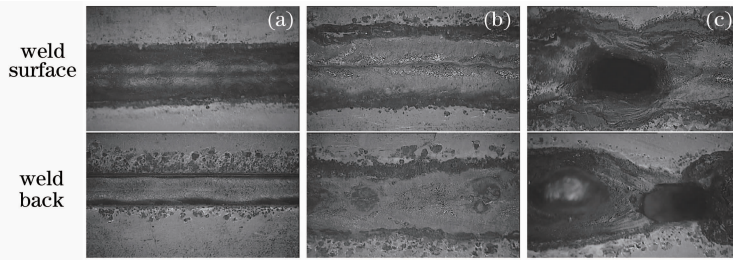


图 2 不同焊丝加热电流下的焊缝形貌($\delta=1.0$ mm, $P=1600$ W, $V_w=1.2$ m/min, $V_f=2.0$ m/min)。

(a) $I=60$ A; (b) $I=90$ A; (c) $I=120$ A

Fig. 2 Weld topography under different wire currents with $\delta=1.0$ mm, $P=1600$ W, $V_w=1.2$ m/min, $V_f=2.0$ m/min.

(a) $I=60$ A; (b) $I=90$ A; (c) $I=120$ A

通过试验,在不同对接间隙时,得到表面成形良好的焊缝。焊接参数如表 2 所示。

表 2 激光热丝焊焊接工艺参数

Table 2 Laser welding parameters with hot wire

δ /mm	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.3
P /kW	1210	1360	1510	1600	1800	1950
I /A	65	75	80	90	100	105
V_f / (m/min)	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.6
V_w / (m/min)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

2.3 焊接质量评估

对不同对接间隙的焊缝进行了表面宏观评估;将焊缝截面制成金相试样,在金相显微镜下观察了焊缝的金相组织;利用能谱分析仪(EDS)通过在焊缝截面垂直方向和水平方向取点的方法,分析了焊缝中焊丝成分分布;将试件做成比例拉伸试样,在拉伸试验机上分析了焊缝拉伸强度;并在扫描电子显微镜下对焊缝断裂在不同位置的断口进行了观察,分析断裂的形成原因。以此得出不同间隙下,高强度激光热丝焊的焊接性能。

3 试验结果及讨论

3.1 焊缝表面及截面形貌

采用激光填丝对接焊接大间隙板件的过程中,

大部分的激光能量首先照射于焊丝,然后熔化的焊丝将吸收的能量传递给母材,从而使母材与焊丝熔合并形成焊缝。普通激光填丝焊焊接过程中,激光光斑必须保证精确地照射在焊丝上。若激光光斑存在少许偏离焊丝或者焊丝稍有抖动,则一方面焊丝不能及时完全熔化,另一方面部分激光能量未能作用于材料,导致该部分激光从对接间隙处遗漏损失。此时,焊接过程将变为不稳定。而采用激光填充热丝焊接,通过电阻预热的焊丝,焊丝温度升高,减少了焊丝熔化对激光能量的依赖;且预热的焊丝对激光的吸收率也将增大。当激光光斑存在少许偏离焊丝或者焊丝稍有抖动时,焊丝也能在部分激光的照射条件下完全熔化。熔化的焊丝填充间隙,实现材

料对激光能量的充分吸收和利用。激光填充热丝焊接过程中,大部分激光通过熔化的焊丝将能量传递给母材,从而实现母材和焊丝的熔合,形成焊缝。

图3为不同对接间隙时的焊缝表面形貌。从图中可以看出,在对接间隙为0.4~1.2 mm时,均能得到无裂纹和气孔、焊缝宽度和余高均匀连续、且表面成形良好的焊缝;当间隙增大到1.3 mm时,则出现焊缝两侧母材未完全熔合现象。激光热丝焊过程中,首先预热焊丝在激光的辐照作用下形成熔滴,焊丝通过熔滴将热能传递给熔池。母材在部分激光能量辐照作用下与焊丝熔滴相互熔合,形成焊缝。试验中所用焊丝的直径为1.0 mm,而焊丝熔化后产生的熔滴比焊丝直径略大。在试件对接间隙为0.4~1.2 mm时,熔滴能良好地接触到两对接工件的

端面,并将能量传递到工件,实现良好熔合;当对接间隙增大到1.3 mm时,熔滴直径小于对接间隙,以至于熔滴不能良好地接触到两对接工件的端面,从而使焊缝无法完全熔合,出现熔池偏向焊缝一侧。图4为不同对接间隙时的焊缝截面图,可看出焊缝在不同间隙时都具有一定的余高,这跟普通激光焊有较大不同。普通激光焊的焊缝截面会随着间隙的增大而表现出焊缝中间凹陷的情况^[13]。图5为焊缝接头界面处的扫描电子显微镜(SEM)照片,焊缝与基体之间界面为非平直界面,这主要是由于在焊接过程受晶粒取向差异,导致各微区的熔化程度有所不同。界面结合区没发现有裂纹、孔隙等缺陷,实现了良好的冶金结合。

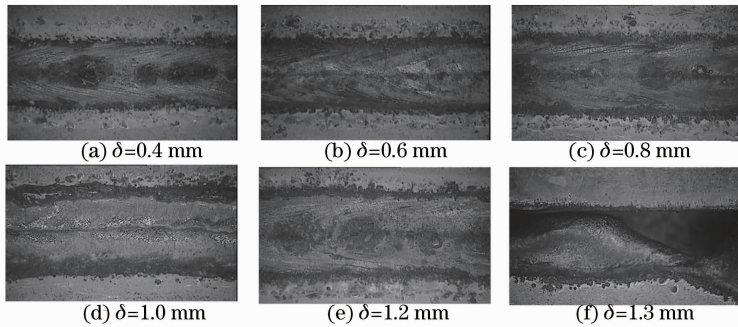


图3 不同对接间隙的焊缝表面形貌

Fig. 3 Weld surface topographies of different butt joint gaps

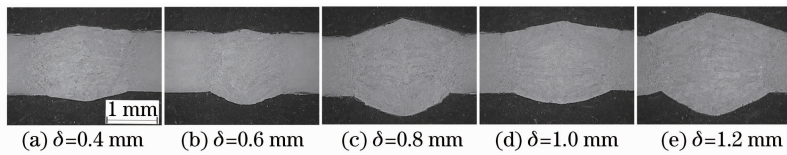


图4 不同对接间隙的焊缝截面形貌

Fig. 4 Weld cross section topographies of different butt joint gaps

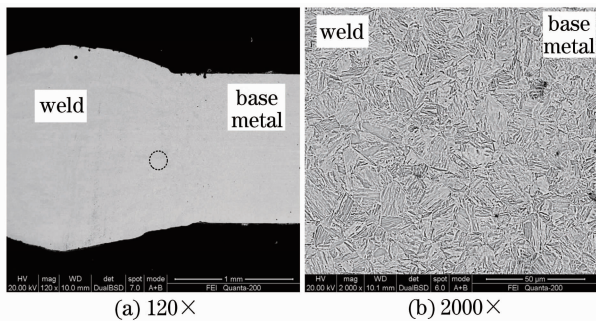


图5 焊缝截面电镜扫描图($\delta=1.0$ mm)

Fig. 5 SEM images of weld cross section ($\delta=1.0$ mm)

3.2 焊缝成分及微观组织

激光热丝焊中,焊丝与母材的充分均匀熔合是保证焊接质量的一个重要因素。通过对不同间隙的

焊缝进行了能谱分析(EDS),分析焊丝成分在焊缝中是否均匀分布,能确定焊丝与母材是否充分熔合。选定母材中不含而焊丝中含量较高的镍元素作为示踪元素,对其在焊缝的垂直方向和水平方向分布分别进行了测定。图6为实验中选定的镍含量测试点位置。图7、图8为不同对接间隙时,镍元素在焊缝中的沿不同方向分布的测定结果。从图中可以看出,同一对接间隙的焊缝中,沿焊缝垂直方向和水平方向,镍元素的分布较为均匀;不同对接间隙的焊缝中镍元素含量存在差异,对接间隙越大,镍元素含量越多。因为间隙越大,送丝速度越大,焊丝填充量越多,焊丝在焊缝中所占的质量比也越高,从而镍元素的含量也越高。因此,激光热丝焊可以实现焊丝在

焊缝中的均匀分布,且与母材充分熔合。

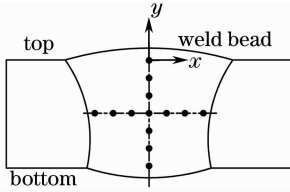


图 6 能谱分析中的测试点
Fig. 6 Testing point for EDS

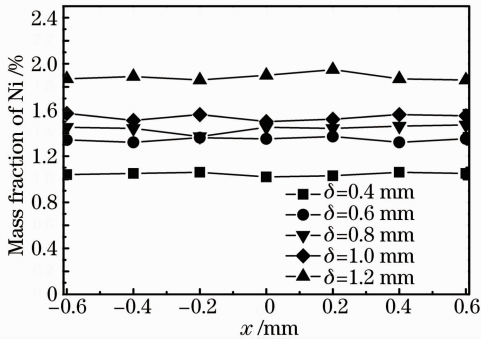


图 7 焊缝水平方向(x轴)镍含量分布
Fig. 7 Contents of Ni in weld along horizontal direction (x axis)

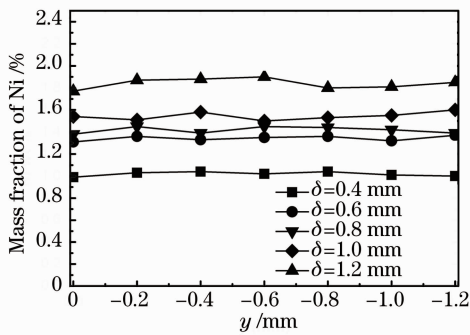


图 8 焊缝竖直方向(y轴)镍含量分布
Fig. 8 Contents of Ni in weld along vertical direction (y axis)

焊缝的金相组织对焊缝性能有较大影响。利用金相显微镜对焊缝的微观组织进行了分析,图 9 为观察到的焊缝微观形貌。图 9 中 a 为焊缝区、b 为粗晶区、c 为细晶区、d 为母材区。图 10 为图 9 对应各区域的金相组织图。从图 10 中可以看出,母材区为铁素体和马氏体组织,铁素体成粒状和条状分布,马氏体均匀地分布在铁素体之间,母材组织呈纤维状分布,这是经过冷轧的结果。焊缝区的组织主要为马氏体以及少量贝氏体和残留奥氏体。马氏体组织呈板条状存在,板条束由多个板条晶构成,板条晶之间呈小角度相交,板条束之间则呈大角度相交,这有利于阻止裂纹的扩张,提高焊缝的韧性;对于激光焊接,由于冷却速度较快,部分奥氏体来不及转化成

马氏体,所以看到马氏体板条之间有少量残留奥氏体;由于焊缝中心区域冷却速度较边缘慢,少量奥氏体转变成贝氏体,贝氏体的存在也有利于提高焊缝韧性。粗晶区的组织与焊缝区相似,但由于焊接过程中,粗晶区的温度相对焊缝区较低,晶粒也较焊缝区细;细晶区的组织与母材相似,晶粒较母材更细,这是细晶区晶粒经过了纯化和重结晶的结果。

不同间隙对接激光热丝焊的焊接各区域的组织差异不大,仅焊缝及热影响区的大小存在差异。间隙越大,焊缝越宽,焊缝热输入总量也越大,因此热影响区越大。

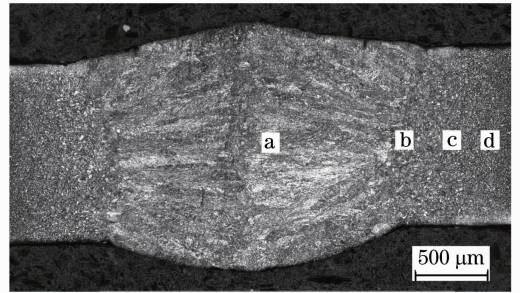


图 9 焊缝微观形貌($\delta=1.0$ mm; $P=1600$ W; $I=90$ A; $V_w=1.2$ m/min; $V_f=2.0$ m/min)

Fig. 9 Microstructure of weld ($\delta=1.0$ mm; $P=1600$ W; $I=90$ A; $V_w=1.2$ m/min; $V_f=2.0$ m/min)

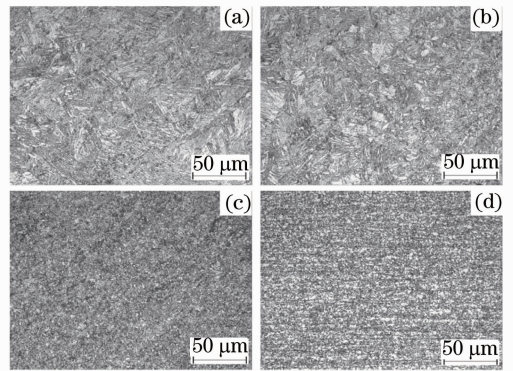


图 10 焊缝各区域的金相组织

Fig. 10 Metallographic structures of different zones of weld

3.3 焊缝拉伸强度

焊缝的拉伸强度是衡量焊接质量的一个重要指标,对保证车身的整体强度具有重要作用。将焊件制作成比例试样,在拉伸试验机上进行了拉伸试验,设定力的加载速度为 1.0 mm/min,试验结果通过计算机输出。图 11 为不同对接间隙试件的拉伸断裂图,图 12 为不同对接间隙试件的抗拉强度与屈服强度值。在对接间隙小于或等于 1.0 mm 时,试件断裂在母材区,焊缝的拉伸强度大于母材的拉伸强度;当对接间隙为 1.2 mm 时,试件断裂在熔池区,

抗拉强度为 718.9 MPa, 达到母材强度的 89.9%。通过扫描电子显微镜 (SEM) 对断裂在焊缝处的断口和断裂在母材处的断口进行观察分析。图 13 为观察到的焊缝断裂在母材和焊缝区断口的主要特征形貌。断裂在母材区的断口呈现出韧窝状, 大的韧

窝包裹小韧窝, 且韧窝大而深, 为明显的韧性断裂; 相比而言, 对接间隙为 1.2 mm 时断裂在焊缝区的断口, 韧窝尺寸更小, 相同面积下, 韧窝数量更多, 且断面较平, 韧性明显不如母材。断裂在焊缝区的原因可能是焊缝内部存在局部的未熔合。

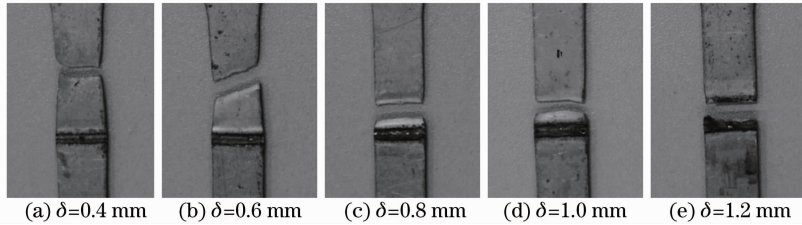


图 11 不同对接间隙的焊缝拉伸断裂图

Fig. 11 Weld tensile fractures of different butt joint gaps

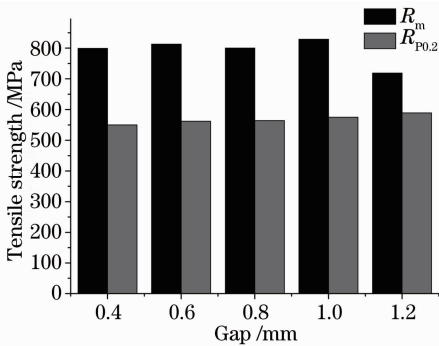


图 12 不同对接间隙的焊缝拉伸强度值

Fig. 12 Weld tensile strength values of different butt joint gaps

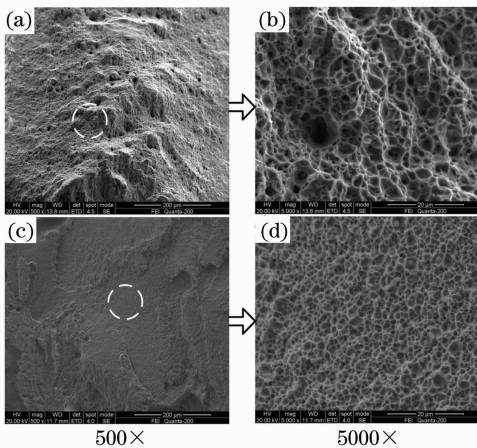


图 13 不同断面扫描电镜形貌。(a)、(b)断裂在母材; (c)、(d)断裂在焊缝

Fig. 13 SEM micrographs of the fracture surface. (a), (b) Fractured at base metal; (c), (d) fractured at weld

4 结 论

1) 采用激光热丝焊对 1.2 mm 厚车用高强钢 DP800 在不同对接间隙情况下进行了焊接实验, 在

合适的工艺参数下, 得到了稳定的激光热丝焊过程。在对接间隙小于或等于母材厚度 100% (1.2 mm) 的情况下, 得到了表面成形良好的焊缝。

2) 对焊缝的元素分布及金相组织进行了分析, 焊丝与母材熔合均匀, 焊缝区组织主要为板条状马氏体以及少量贝氏体和奥氏体, 晶粒较细, 组织分布均匀。对接间隙变化对焊缝成分分布及金相组织无明显影响。

3) 拉伸试验表明, 在间隙小于或等于母材厚度的 83% (1.0 mm) 的情况下, 焊接接头拉伸强度高于母材, 间隙为母材厚度的 100% (1.2 mm) 时, 焊接接头拉伸强度能达到母材强度的 89%。相比普通激光焊接, 激光热丝焊对接间隙裕度得到了显著的提高。

参 考 文 献

- Li Yang, Liu Hanwu, Du Yunhui, *et al.*. Applications and developments of AHSS in automobile industry [J]. *Materials Review*, 2011, 25(7): 101-104, 109.
- 李 扬, 刘汉武, 杜云慧, 等. 汽车用先进高强钢的应用现状和发展方向[J]. *材料导报*, 2011, 25(7): 101-104, 109.
- Kang Yonglin. Lightweight vehicle, advanced high strength steel and energy-saving and emission reduction [J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(6): 1-7.
- 康永林. 汽车轻量化先进高强钢与节能减排[J]. *钢铁*, 2008, 43(6): 1-7.
- Li Xiaona, Xu Xianguo, Bian Meihua. Application of laser welding in automobile industry [J]. *Electric Welding Machine*, 2006, 36(4): 47-49.
- 李晓娜, 许先果, 边美华. 激光焊接在汽车工业中的应用[J]. *电焊机*, 2006, 36(4): 47-49.
- Kong Shuhua, Jia Lei, Yuan Zongjie, *et al.*. Applications of BIW laser welding in FAW-VW [J]. *Electric Welding Machine*, 2010, 40(5): 19-26.
- 孔淑华, 贾 磊, 袁宗杰, 等. 激光焊接技术在一汽-大众白车身焊接中的应用[J]. *电焊机*, 2010, 40(5): 19-26.
- U Dilthey, D Fuest, W Scheller. Laser welding with filler wire [J]. *Opt and Quantum Electron*, 1995, 27: 1181-1191.

- 6 Z Sun, M Kuo. Bridging the joint gap with wire feed laser welding [J]. J Materials Processing Technology, 1999, 87(1-3): 213-222.
- 7 Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji, *et al.*. Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103004.
温鹏, 郑世卿, 荻崎贤二, 等. 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1103004.
- 8 Z Sun, A S Salminen. Current status of laser welding with wire feed [J]. Materials and Manufacturing Processes, 1997, 12(5): 759-777.
- 9 Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling laser multilayer welding of high strength steel thick plate[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1251-1255.
李俐群, 陶汪, 朱先亮. 厚板高强钢激光填充丝多层焊工艺[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1251-1255.
- 10 Alexandre Mathieu, Sebastien Pontevecchi, Jean-claude Viala, *et al.*. Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si) [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 435-436: 19-28.
- 11 Du Hanbin, Hu Lunji, Hu Xiyuan. Technology of laser filler wire welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 11: 60-63.
杜汉斌, 胡伦骥, 胡席远. 激光填充丝焊技术[J]. 航空制造技术, 2002, 11: 60-63.
- 12 A S Salminen, V P Kujanpaa. Effect of wire feed position on laser welding with filler wire[J]. J Laser Appl, 2003, 15(1): 2-10.
- 13 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.
陈根余, 陈飞, 张屹, 等. 对接间隙对车用高强钢光纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.

栏目编辑: 宋梅梅