

文章编号: 0258-7025(2010)08-2091-07

车用铝合金光纤激光搭接焊的研究

梅丽芳^{1,2} 陈根余¹ 金湘中¹ 张明军¹ 陈 明¹

(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 厦门理工学院机械工程系, 福建 厦门 361024)

摘要 针对车用 5052 铝合金进行了高功率光纤激光搭接深熔焊试验研究, 分析了光纤激光焊接的主要影响因素, 并对接头组织和力学性能进行了测试。通过对车用铝合金光纤激光焊接特性的分析得出, 传输光路的光纤芯径、板间间隙的大小、保护气体的种类和保护方式等对搭接接头形貌有着重要的影响。采用高功率光纤激光焊接时, 速度快, 熔池及热影响区(HAZ)窄。在适宜的焊接工艺参数下, 光纤激光焊接接头上、下表面焊缝形貌平整连续; 焊缝区显微硬度高于母材; 接头抗拉伸强度高于抗拉剪强度, 断口出现在搭接焊缝一侧的热影响区内, 断口以韧窝形貌为主, 属于以韧性断裂为主、脆性断裂为辅的混合断裂。

关键词 激光技术; 车用铝合金; 光纤激光器; 搭接焊; 工艺参数; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.2091

Study on Fiber Laser Overlap-Welding of Automobile Aluminum Alloy

Mei Lifang^{1,2} Chen Genyu¹ Jin Xiangzhong¹ Zhang Mingjun¹ Chen Ming¹

¹ State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

² Department of Mechanical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China

Abstract Experimental study on high power fiber laser deep-penetration welding of automobile 5052 aluminum alloy in an overlap configuration is carried out, and the main influencing factors on fiber laser welding are analyzed, and the micro-structure and the mechanical properties of the welded joints are measured. Through analyzing fiber laser welding performance of automobile aluminum alloy, the influencing factors such as fiber core diameter, gap thickness between two plates, kinds of shielding gas, and the protection way on the morphology and properties of overlap-welded joint are prominent. High welding speed and narrow weld pool and heat affected zone (HAZ) can be obtained when welding by fiber laser. Under the proper welding condition, the weld topography of top surface and bottom surface is even and continuous. Micro-hardness in fusion zone is higher than that of base material. The tensile-strength of welding joints is higher than its shear strength. The fracture is happened in HAZ and its topography is a mixture of ductile fracture as main mode and brittle fracture as subsidiary mode.

Key words laser technique; automobile aluminum alloy; fiber laser; overlap-welding; parameters; mechanical property

1 引 言

节能降耗和减轻环境污染是世界各国交通运输业面临的紧迫问题。为解决这一问题, 各种轻质合金(如铝、镁合金)越来越多地应用于交通运输工具上。其中铝合金具有十分优良的物理、机械力学性

能, 且重量轻, 在汽车制造业得到了广泛应用^[1]。采用常规的氩弧焊(TIG)和惰性气体熔化级电弧(MIG)方法焊接铝合金时, 容易产生气孔、焊接裂纹以及焊接变形大等问题, 制约了其在工业中的应用推广^[2,3]。电阻点焊在铝合金结构件的连接中遇到

收稿日期: 2009-12-23; 收到修改稿日期: 2010-01-25

基金项目: 国家 863 计划(2007AA042006)、教育部长江学者与创新团队发展计划(531105050037)和汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主研究课题(6087005)资助课题。

作者简介: 梅丽芳(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事白车身激光加工技术方面的研究。

E-mail: meilifang0804@163.com

导师简介: 陈根余(1965—), 男, 教授, 主要从事汽车车身激光加工方面的研究。E-mail: hdgychen@163.com

能耗高、电极易失效、点焊质量不稳定等困难。与常规的焊接方法相比,激光焊接速度快、焊缝窄、热应变小,搭接接缝减少,可降低重量;同时随着大功率、高性能激光加工设备的不断开发,使得铝合金激光焊接技术在汽车制造业得到了广泛应用^[4-6]。

光纤激光器是近年来激光焊接领域关注的热点之一,已经在全世界的工业加工领域得到广泛的青睐。与传统的 CO₂ 激光器和固体激光器相比,光纤激光器体积更小,效率更高,成本更低,易于系统集成,另外还有抗振和不怕灰尘污染的优点,其光束质量更是远非前者可比,其总的使用成本大约是 CO₂ 激光器的 1/2, YAG 或盘形激光器的 1/3^[7], 相对 CO₂ 激光波长更短,且光纤传输更易于实现柔性加工。因此,光纤激光焊接铝合金将成为国际汽车领域的一个研究热点。本文主要采用新型高功率光纤激光器对车用铝合金进行激光搭接焊研究,分析铝合金的光纤激光焊接特性及其主要影响因素,并对搭接接头性能进行检测,以控制和优化车身铝合金光纤激光焊接工艺质量。

2 试验条件和方法

试验材料为车用铝合金 5052, 其化学成分见表 1。板材厚度为 1.0 mm。板料尺寸为 60 mm × 30 mm。5052 铝合金的主要合金元素为镁,其具有良好的成形加工性能,抗腐蚀性好,焊接性能优越。试验用激光器为美国 IPG 公司生产的 IPG YLR-6000-ST2 光纤激光器,如图 1 所示。激光器最大输出功率为 6 kW,连续输出,波长为 1070 nm,模式为 TEM₀₀。采用 PRICIETER 焊接头,准直镜焦距为 150 mm,聚焦镜焦距为 250 mm,当光纤的芯径为 400 μm 时,聚焦光斑直径为 0.67 mm;当光纤的芯径为 200 μm 时,聚焦光斑直径为 0.33 mm。焊接过程中,由于铝合金初始表面对激光的反射率很高,为防止保护镜片和激光器受损,将焊接头倾斜 15°,



图 1 光纤激光焊接设备

Fig. 1 Fiber laser welding equipment

即激光束入射角为 15°。焊接时,分别采用两种保护方式:1)同轴保护+背面保护,以 Ar 作为焊接保护气体;2)侧吹保护+背面保护,以 He 和 Ar 的混合气体作为保护气体。分析了传输光纤芯径、板间间隙大小、保护气体等对焊缝形貌的影响。

表 1 5052 铝合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 5052 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Zn	Others	Al
0.25	0.4	0.15	2.89	0.15	0.11	0.15	Excess material

为提高焊缝质量,焊前用丙酮清洗试件以去除表面油浸污渍,用质量分数为 40% 的 NaOH 溶液碱洗后再用质量分数为 40% 的 HNO₃ 溶液酸洗的方法去除表面熔点高达 2050 °C 的氧化膜。焊后,利用体视显微镜观察焊缝的表面形貌,利用电子显微硬度仪测量焊接试件接头处的硬度分布情况,利用微机控制电子万能试验机分析焊接试件的拉伸剪切强度。采用电子扫描电镜(SEM)分析焊接试件的剪切断面形貌,分析试件的断裂机制。最后经线切割取样、打磨抛光试样及酸溶液腐蚀后制备成金相试件并于金相显微镜中观察显微组织及焊缝截面形状。

3 试验结果与分析

3.1 铝合金光纤激光焊接特点

铝合金激光加工的难点在于铝合金对激光束极高的表面初始反射率,而且铝合金激光焊易产生气孔、合金元素烧损、裂纹等问题。激光焊接铝合金时产生的气孔主要有两类^[8]:一类是激光焊缝在冷却过程中氢的溶解度下降形成的氢气孔。由于焊接过程中铝合金对氢的溶解度很大,而激光焊的冷却速度非常快,冷却过程中由于部分氢气来不及逸出就造成了氢气孔,这类气孔一般形状规则,大多为球形,且内壁光滑,如图 2(a)所示。另一类主要是焊接过程中产生的匙孔不能维持稳定而塌陷,液态金属来不及填充造成的孔洞。这一类气孔主要包括焊缝表面孔洞[如图 2(b)所示]和焊缝中的气泡,当激光能量作用在匙孔根部时,匙孔根部前壁材料的剧烈气化膨胀将对匙孔后壁对应位置产生巨大的冲击,使匙孔后壁局部向熔池内部凹陷。周围熔池液体金属在重力和表面张力作用下塌陷,导致匙孔根部瞬间失稳,并将匙孔根部的金属蒸气、焊接保护气及少量侵入匙孔的空气等卷入熔池并在焊缝中心附近形成气孔,如图 2(c)所示^[9]。除此之外,光纤激光

焊接汽车用铝合金过程中,合金元素烧损严重、热裂纹的形成等缺陷都是造成焊缝成形差、接头强度下降的主要原因。因此,本试验采用高功率光纤激光器对

车用铝合金进行快速焊接,通过对熔池区进行保护以及优化焊接工艺参数等方法来防止焊接缺陷的产生,以获得成形性好,无气孔和裂纹缺陷的焊接试件。

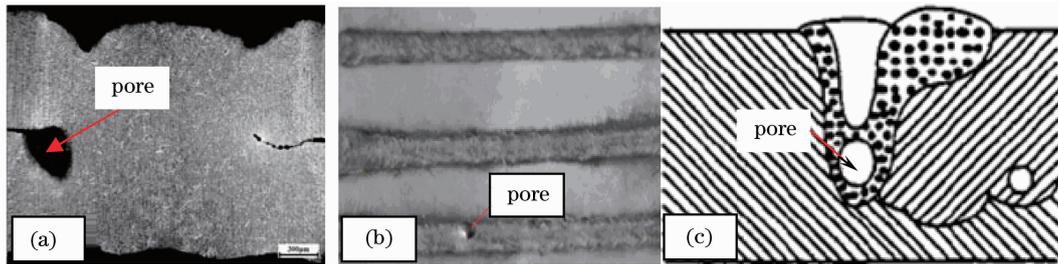


图2 焊接试件中存在的气孔缺陷

Fig. 2 Pores occurred in welding joint

3.2 光纤激光焊接工艺

试验采用 6 kW 光纤激光器对车用铝合金进行了大量的搭接焊试验,通过对激光功率、焊接速度、离焦量、保护气体类型及气体压力大小等工艺参数不断进行优化,最终得出焊接质量较好的工艺参数,即,功率 $P=4$ kW,焊接速度 $v=4.8$ m/min,离焦量 $\Delta f=-0.5$ mm,板间间隙 $\delta=0$ 。采用 20 L/min 的 He 和 10 L/min 的 Ar 的混合气体作为侧面保护气体,15 L/min 的 Ar 作为背面保护气体。图 3 为此工艺参数时从体视显微镜中观察到的焊缝表面和背面的形貌图。由图可见,焊缝上下表面均平整连续,上表面鱼鳞状波纹细密均匀,无明显的气孔、裂纹等缺陷存在。

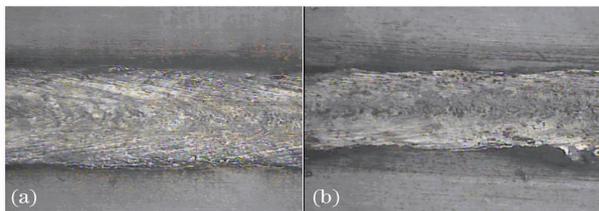


图3 体视显微镜中观察到的焊缝形貌

(a)焊缝表面;(b)焊缝背面

Fig. 3 Weld appearances observed in the stereoscope microscope. (a) face of weld; (b) back of weld

3.2.1 光纤激光传输光纤芯径对焊接接头的影响

激光束由光纤激光器输出后经传输光纤传输至焊接头,从传输光纤发出的激光束具有一定的发散角,因此需经准直系统准直扩束成平行光束,再经聚焦镜聚焦后入射到工件表面。当准直镜与聚焦镜的焦距比值一定时,光纤芯径的大小直接影响聚焦光斑大小;而当光纤芯径大小一定时,聚焦光斑的大小又受到准直镜与聚焦镜的焦距比值的影响。因此,聚焦光斑的大小不仅可以通过选择不同焦距的聚焦镜进行调节,也可以通过选择不同的准直镜与聚焦镜的组

合方式来调节,还可以通过选择不同芯径的传输光纤来实现。光纤芯径大小对焊接接头的影响可以转化为激光聚焦光斑大小对焊接接头的影响。分别采用芯径为 200 μm 和 400 μm 的传输光纤进行铝合金焊接工艺试验,焊缝横截面形状如图 4 所示。聚焦光斑直径分别为 0.33 mm 和 0.67 mm。

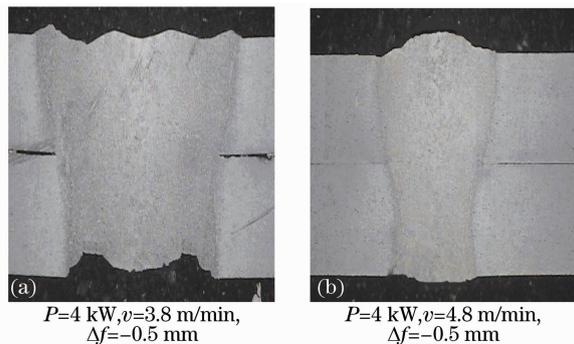


图4 分别采用 400 μm (a)和 200 μm (b)芯径的传输光纤时焊缝横截面的形状

Fig. 4 Cross section of weld under transmission optical fiber with different core diameters of 400 μm (a) and 200 μm (b)

聚焦光斑对焊缝形貌具有重要影响。当车用铝合金试样恰能焊透时,随光斑减小,缝宽变窄,热影响区的尺寸也减小。图 4(b)所示为接头横截面的宏观形貌,焊缝狭窄,深宽比大,热影响区(HAZ)窄,顶部与根部成形良好,形状呈典型的“手指”状。这是由于激光束能量密度高,焊接过程中热输入小,对材料的加热比较集中。

3.2.2 搭接处板间间隙对焊接接头的影响

激光搭接焊时,两块板之间的间隙对焊接接头的性能起着关键性的作用。对于镀层钢板,一定量的板间搭接间隙有利于抑制气孔等焊接缺陷的产生。在固定其他工艺参数不变的情况下,只改变板间间隙来研究铝合金搭接焊接头性能的变化情况。

试验结果表明,在铝合金的光纤激光焊接中,上下两板搭接处较大的间隙容易导致焊缝上表面凹陷、下表面焊缝不连续或下层板无法熔透等缺陷。主要原因是激光束辐照时,由于板间间隙较大,上层板吸收热量后不能迅速向下层板传递,上层板熔化形成小孔后,在激光束的继续作用下熔滴流入下层板并将热量迅速传递给下板,随着小孔底部下移,部分激光束作用在下板上,因此下板在吸收由熔滴传入的热量和部分激光束作用的能量后开始熔化,但还未来得及充

分熔化,激光束已停止辐照,而铝合金的热传导率高,热量迅速由熔焊区传向母材及周围物质,下板无法继续熔焊。因此在保持其他参数不变时,板间间隙较大使得试样无法焊透,如图 5 所示。其次,板间间隙太大时,上板金属熔池的重力太大,表面张力难以维持住处于焊缝中的熔池,便从焊缝中滴落或下沉,对间隙进行填充,最后致使在焊缝表面形成一定的凹陷,如图 6(a)所示。最后,由于间隙较大,焊接过程小孔的形成不稳定,使下表面焊缝不连续,如图 6(b)所示。

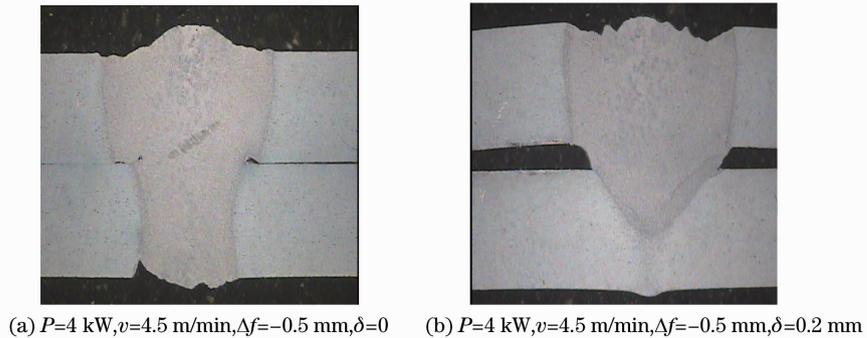


图 5 板间间隙对焊接接头的影响

Fig. 5 Influence of gap between two plates to weld joint

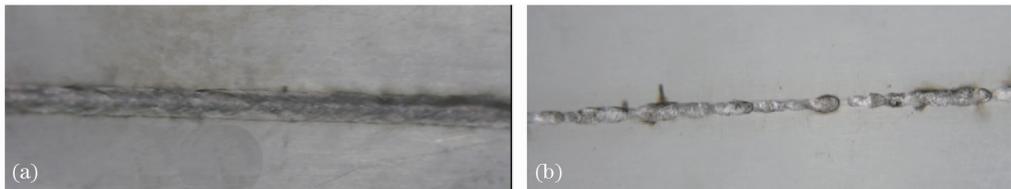


图 6 板间间隙对焊缝上(a)、下(b)表面形貌的影响

Fig. 6 Influence of gap between two plates to top (a) and bottom (b) surfaces of weld joint

3.2.3 焊接保护方式对焊接接头的影响

由于铝合金在高温下对空气中的氮、氧、氢等气体具有很强的亲和能力,因此必须在焊接区采取良好的保护措施^[10]。铝合金的焊缝表面成形和热影响区的表面色泽是焊接过程保护效果的综合反映。因此主要分析同轴保护方式与侧吹保护方式对焊接工件表面免受氧化的保护效果,并分析背面保护方式对焊缝背面成形的影响。

光纤激光焊接铝合金时,试验发现对于采取同轴保护气体方式,只要采用合理的保护气体类型和压力,可以很好保护焊接工件免受氧化,如图 7 所示。而对于采取侧吹保护气体的方式,除选用合理的保护气体类型和压力外,侧吹装置的喷嘴位置对焊接工件是否受氧化的影响很大。进行光纤激光焊接车用铝合金时,采用侧吹辅助气体由于喷嘴放置位置不合理等原因,往往使得焊缝表面受到不同程度的氧化。当侧吹喷嘴放置位置使得保护气体无法对焊缝区进行

有效保护时,焊缝和热影响区氧化严重,见图 8(a)。通过改变喷嘴位置,增加对焊缝区的保护,焊缝的氧化情况大为改观,但零件侧面的焊缝热影响区仍然存在氧化,见图 8(b)。当喷嘴放置位置对焊缝和热影响区都能进行有效保护时,可避免焊缝和热影响区被氧化,焊缝成形质量好,且焊缝熔宽窄。当背面保护气体流量较小时,焊缝背面溅射较严重,成形较差。采用适宜的保护气流时,焊缝背面无溅射、均匀连续成形较好,且背面的熔宽也变窄,见图 8(c)。因此,采



图 7 同轴保护方式对焊缝表面成形的影响

Fig. 7 Influence of coaxial protection to topography of weld joint

用光纤激光器焊接铝合金时,为了有效抑制等离子体云,获得表面成形较好且不被氧化的焊缝形貌,应采

取适宜的侧吹和背面保护方式对焊接区域进行全方位保护。

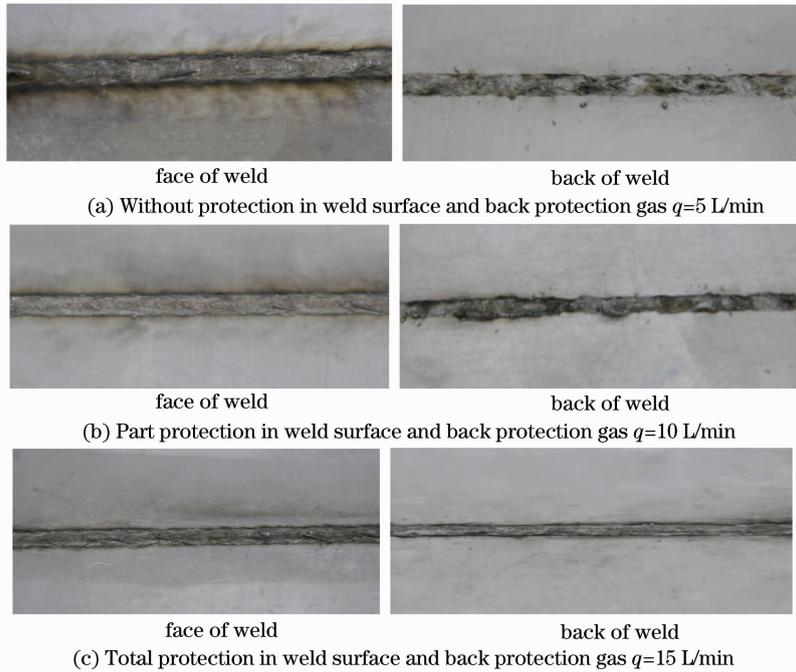


图 8 侧吹与背面保护方式对焊缝上、下表面成形的影响

Fig. 8 Influence of side blown and back protection to top and bottom surfaces of weld joint

3.3 焊接接头力学性能的检测

3.3.1 焊接接头显微硬度

利用 HXD-10007 数字式智能显微硬度计测试焊接试件接头的显微硬度。加载载荷 4.9 N, 保持时间 15 s, 从焊缝中心开始分别测量了焊缝区、热影响区、母材区各部位的显微硬度值。图 9 为焊接接头不同区域的平均显微硬度(在每个区的不同位置测量 5 个点, 然后取其平均值为该区域的硬度值)分布。从图 9 可以看出, 焊接热影响区的显微硬度为 71.4 HV, 略低于母材的显微硬度(77.2 HV), 说明热影响区在一定程度上稍有软化; 而焊缝的平均显微硬度为 82.7 HV, 略高于 5052 铝合金母材的显微硬度, 说明焊后焊缝组织略有强化。

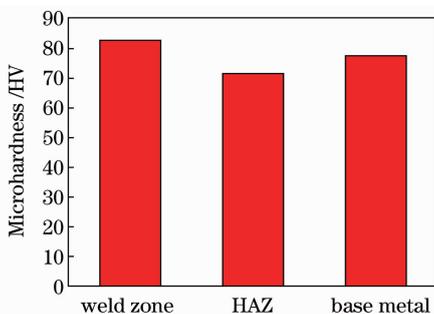


图 9 接头不同区域的显微硬度

Fig. 9 Microhardness in different zones of weld joints

3.3.2 焊接接头拉伸性能

车身中常见的铝合金板材搭接接头形式为部分搭接[图 10(a)]和双搭接[图 10(b)]. 从焊缝接头受力形式进行分析, 搭接接头主要承受两种载荷即拉剪载荷和拉伸载荷。因此本文对试样接头分别进行拉剪和拉伸试验来评定其抗拉剪强度及抗拉伸强度等。首先用电火花数控线切割机将试件制备成标准检验试样, 如图 10 所示。在 WDW-100 微机控制电子万能试验机上进行拉剪和拉伸试验, 力的加载速度为 1.0 mm/min。对承受一对拉剪载荷的搭接接头来说, 由于拉力不同轴而存在剪切的作用, 搭接区端部的应力集中情况较为严重。对搭接区接头进行拉剪和拉伸试验时, 发现在适宜的激光工艺参数下, 焊接试件的拉剪强度值为 150 MPa, 拉伸强度值为 208 MPa, 断口都出现在搭接焊缝一侧的热影响区内, 而并未断裂在接头的熔融区或搭接面上, 如图 11 所示。由此可见, 搭接接头抗拉伸能力较其抗拉剪能力高, 且试件中受热影响的区域为焊接接头中较薄弱的区域。

图 12 为光纤激光焊接试件的拉伸剪切断面形貌。由图可见, 接头的断面主要以韧窝状断口的形貌为主, 但韧窝较浅并且具有脆性断裂的痕迹, 由此可以确定接头的断裂属于以韧性断裂为主脆性断裂为辅的混合断裂。

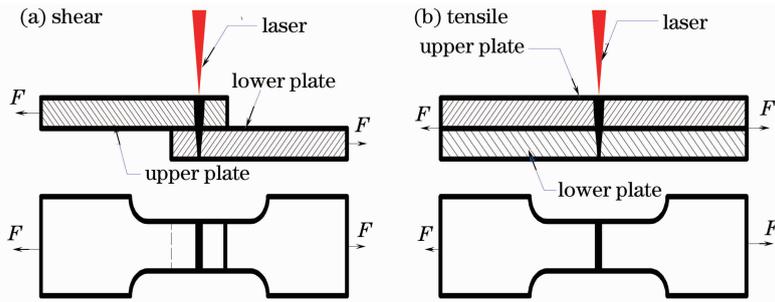


图 10 力学试验试件

Fig. 10 Mechanical test specimen

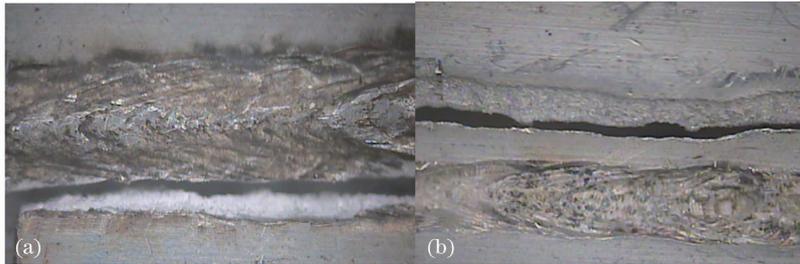


图 11 焊接试件断裂位置。(a)焊缝表面;(b)焊缝背面

Fig. 11 Break position of welding test. (a) face of weld; (b) back of weld

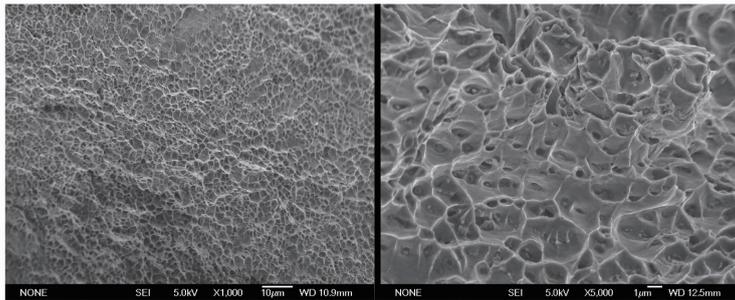


图 12 铝合金剪切试样断口扫描形貌

Fig. 12 SEM fractography of aluminum alloy shear specimen

3.3.3 焊缝金相组织特点及分析

熔池金属在经历了一系列化学冶金反应后,随着热源的远离温度迅速下降,凝固形成焊缝,并在继续冷却过程中发生固态相变。焊缝区和热影响区在焊接热源的作用下,也将发生不同的组织变化。熔池的凝固与焊缝的固态相变决定了焊缝金属的结晶结构、组织与性能。在焊接热源的继续作用下,大的冷却速度还会使焊缝的化学成分与组织出现不均匀的现象,并有可能产生焊接缺陷。因此分析焊接过程中熔池的凝固过程具有重要意义^[11]。

如图 13 所示,焊缝组织比较均匀,无气孔和裂纹等缺陷。焊缝由中心部向基体组织依次为树枝状

晶、柱状晶区,然后是基体。焊缝中心部近似为等轴树枝晶。邻近熔合线则相反,形成定向粗大枝状晶。心部细小的树枝状晶区,形成的原因主要是在焊接时焊缝心部有较大的过冷度,形核率高,结晶形核多,散热均匀。焊接接头热影响区柱状晶体的形成主要与温度梯度有关^[12],结晶时过冷度较大,同时由于基体导热能力强,基体与熔池之间较大的温度梯度,结晶时有很强的方向性而形成的。接头中存在明显的晶粒粗化的热影响区,熔合线附近晶粒过热、长大、粗细不均匀,导致这一区域的力学性能较差,热影响区成了接头强度的薄弱地带,因此导致断裂的发生。

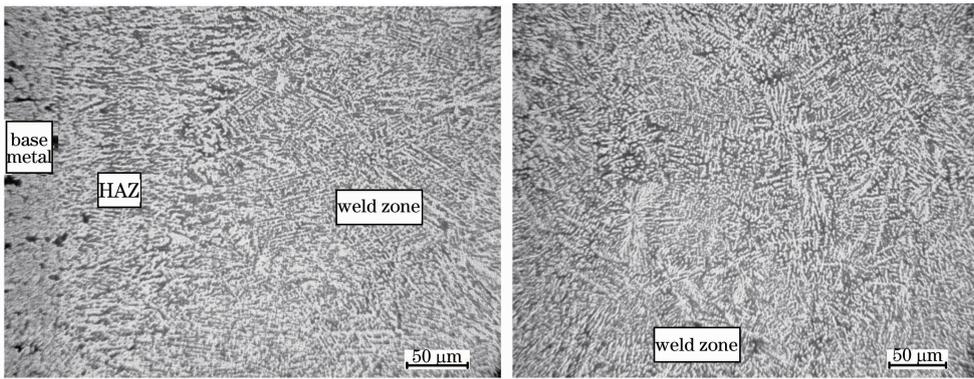


图 13 5052 铝合金光纤激光焊接接头的金相组织

Fig. 13 Microstructure of 5052 aluminum alloy welded by fiber laser

4 结 论

1) 采用高功率光纤激光器对车用铝合金的搭接接头进行焊接。在优化的工艺参数下, 试样焊接过程速度快, 焊缝成形性好、深宽比大、热影响区窄, 接头处无气孔、变形和裂纹等缺陷产生。

2) 板间间隙、保护气体的种类以及保护方式对焊缝的形貌有着重要的影响。焊接铝合金时, 间隙过大容易导致焊缝上表面凹陷、下表面焊缝不连续或下层板无法熔透等缺陷, 为获得优良的焊接接头应尽量减小板间间隙; 采用适宜的保护气体和流量时, 同轴保护较侧面保护更易避免焊缝表面被氧化。适宜的背面保护气流可获得无飞溅、均匀连续且成形较好的背面焊缝形貌。

3) 光纤激光焊接接头强度硬度高, 焊缝组织较均匀, 无微观气孔和裂纹等缺陷。由于基体导热能力强, 结晶时过冷度较大。热影响区晶粒粗大略有软化, 力学性能下降, 室温拉伸断裂在该区域。断口以韧窝状的形貌为主, 属于以韧性断裂为主脆性断裂为辅的混合断裂。

参 考 文 献

- 1 Rich Hall. Profile of Kentucky's Aluminum Industry[R]. Office of Research and Information Technology Kentucky Cabinet for Economic Development, 2005
- 2 Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1783~1788
李俐群, 陈彦宾, 陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1783~1788
- 3 Zuo Dungi, Li Fang, Hua Xueming *et al.*. New welding technology of aluminium alloy in auto industry [J]. *Electric Welding Machine*, 2007, **37**(7): 1~5
左敦桂, 李芳, 华学明. 铝合金焊接新技术在汽车制造中的应

- 用[J]. *电焊机*, 2007, **37**(7): 1~5
- 4 A. Ribolla, G. L. Damoulis, G. F. Batalha. The use of Nd:YAG laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005, **164-165**: 1120~1127
- 5 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun *et al.*. Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 456~461
许良红, 田志凌, 彭云等. 高强铝合金的激光焊接接头组织及力学性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 456~461
- 6 Chen Genyu, Mei Lifang, Zhang Mingjun *et al.*. Application and research of laser processing automobile body manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(9): 17~23
陈根余, 梅丽芳, 张明军等. 激光焊接、切割在汽车制造中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(9): 17~23
- 7 Peng Biao. All-round performance of fiber laser applying in the entire processing industry [J]. *Laser Technology & Applications*, 2008, (2): 5~7
彭彪. 光纤激光器在工业加工领域的全方位表现 [J]. *激光技术与应用*, 2008, (2): 5~7
- 8 Zuo Tiechuan. Laser Processing of High-Strength Aluminum Alloy [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008
左铁钊. 高强铝合金的激光加工 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
- 9 H. Zhan, D. R. White, T. DebRoy. Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys [J]. *Int. Mater. Rev.*, 1999, **44**(6): 238~266
- 10 Hong Lei, Wu Gang, Chen Wuzhu. Influence of shielding gas flow on welding quality for CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1571~1576
洪雷, 吴钢, 陈武柱. 保护气流对 CO₂ 激光焊接铝合金的影响 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1571~1576
- 11 Li Qiaoyan, Luo Yu, Wang Yajun *et al.*. Microstructure and mechanical properties of twin spot laser welding of 5052 aluminum [J]. *Transactions of the China Welding Stitution*, 2007, **28**(12): 105~108
李巧艳, 罗宇, 王亚军等. 5052 铝合金双光点激光焊接组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2007, **28**(12): 105~108
- 12 Sun Fujuan, Liu Hongjun, Zhang Danfeng. Technology of LY12CZ's laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 273~277
孙福娟, 刘洪军, 张丹峰. LY12CZ 铝合金激光焊接工艺 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 273~277