

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0439-06

板条 CO₂ 激光焊接 7075-T6 高强铝合金

祁俊峰, 田 胜, 陈 虹, 肖荣诗, 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 利用板条 CO₂ 激光器, 针对 Al-Zn-Mg-Cu 系 7075-T6 高强铝合金 2.4 mm 厚度的板材进行了扫描和填丝焊接实验研究, 并对接头机械性能进行了评定。分析了激光功率、聚焦镜焦距、焊接速度、工作气体及焊缝背面保护对扫描焊缝成形及焊接过程稳定性的影响, 进而为 7075-T6 高强铝合金填丝焊接技术研究提供了依据。在对送丝方式、送丝角度、送丝速度及焊丝与光束相对位置等参量优化的基础上, 利用板条 CO₂ 激光器成功地实现了 7075-T6 高强铝合金的填丝对接焊缝。焊态下, 采用 AlSi₁₂ 焊丝的接头强度为 360.8 MPa; 采用 AlMg_{4.5}MnZr 焊丝的接头强度达到 414.6 MPa。焊后经热处理, 采用 AlSi₁₂ 焊丝的接头强度为 404.2 MPa, 达到母材的 75%, 采用 AlMg_{4.5}MnZr 焊丝的接头强度达到 482.6 MPa, 为母材的 88%。

关键词 激光技术; 板条 CO₂ 激光; 7075-T6 铝合金; 焊接

中图分类号 TN249; TG456.7 **文献标识码** A

Slab CO₂ Laser Welding of 7075-T6 High Strength Aluminum Alloy

QI Jun-feng, TIAN Sheng, CHEN Hong, XIAO Rong-shi, ZUO Tie-chuan

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Experimental study of slab CO₂ laser bead-on-plate welding and filling wire welding 7075-T6 high strength aluminum alloy of 2.4 mm thickness has been completed. The mechanical properties of welding joints have been analysed. Through analysis of influence of laser power, focal length, welding velocity, working gas and shielding gas on weld shaping and welding stability, filling wire welding of 7075-T6 high strength aluminum alloy is put forward. On the basis of the optimization of feeding direction, feeding angle, feeding velocity and feeding position, filling wire welding of 7075-T6 alloy is completed successfully with slab CO₂ laser. The tensile strength of as-welded welds with AlSi₁₂ is 360.8 MPa and with AlMg_{4.5}MnZr 414.6 MPa. The tensile strengths of welds after heat treatment are 404.2 MPa (75 percents of base-metal) and 482.6 MPa (88 percents of base-metal) for AlSi₁₂ and AlMg_{4.5}MnZr, respectively.

Key words laser technique; slab CO₂ laser; 7075-T6 aluminum alloy; welding

1 引 言

Al-Zn-Mg-Cu 系 7075 铝合金由于具有极高的比强度、良好的韧性、抗应力腐蚀性能和抗剥落腐蚀性能等特性, 其板材被广泛用于飞机的框架、整体壁板、起落架、蒙皮等。由于 7075 铝合金富含低熔点和低电离能元素 Zn, Mg, 焊接过程中大量合金元素的损失使得其焊接接头硬度、强度和韧性大大下降, 该合金一直不被推荐为焊接材料, 落后的机械式连接方式成为束缚其广泛应用的瓶颈。铝合金的激光焊接具有高能量密度、低热输入等特点, 焊接时效强化铝合金得到的焊缝(FZ)和热影响区(HAZ)尺寸小, 能很大程度上克服 7075 铝合金在传统焊接过程

中出现的问题^[1,2]。

本文利用板条 CO₂ 激光器, 针对 Al-Zn-Mg-Cu 系 7075-T6 高强铝合金 2.4 mm 厚度的板材进行了扫描和填丝焊接实验研究, 并对接头机械性能进行了评定。

2 实验设备及材料

实验用设备是德国 Rofin-Sinar 公司生产的扩散冷却板条 CO₂ 激光器, 采用射频(RF)激励, 输出的 CO₂ 激光光束经整形变为圆对称的光束, 由导光系统传输到加工位置, 经无氧铜抛物面反射镜聚焦。最大输出功率 P 为 3500 W, 光束模式为 TEM₀₀, 光束直径

作者简介: 祁俊峰(1979—), 男, 蒙古族, 内蒙古呼和浩特人, 北京工业大学激光工程研究院博士研究生, 主要从事轻合金及特殊材料的激光加工技术研究。E-mail: qjfcn@xinhuanet.com

$\phi=17\text{ mm}$, $K_f=3.7\text{ mm}\cdot\text{mrad}$, 光束质量参量 $K\geq 0.95$, 采用焦距 $f=300\text{ mm}$ 的铜抛物镜聚焦, 焦斑直径 $D=0.260\text{ mm}$, 光束发散角 $\theta=52.01\text{ mrad}$ (全角), 焦深 $Z_R=5.054\text{ mm}$, $M^2=1.01$ 。激光输出功率为 2000 kW 时, 采用德国 Prometec 公司 UF100 光束光斑质量诊断仪对该激光器的功率密度分布进行测量, 得到焦点位置的功率密度分布, 如图 1 所示。

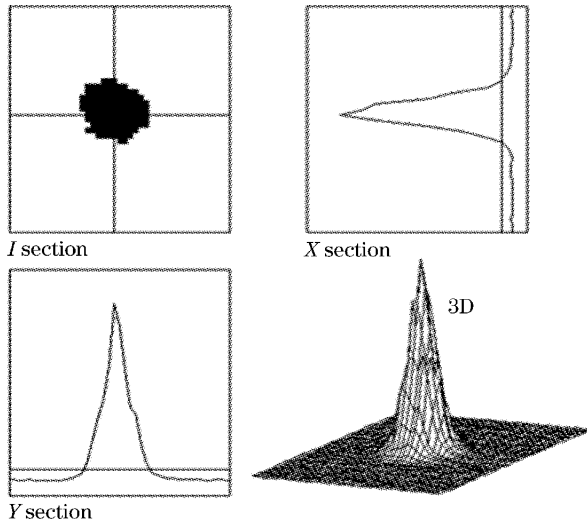


图 1 激光束焦点功率分布

Fig. 1 Distribution of focus laser power

表 1 实验材料及化学成分

Table 1 Components of experimental materials

Materials	7075	AlSi ₁₂	AlMg4.5MnZr
Si	0.4	11.0~13.0	0.25
Fe	0.5	0.80	0.40
Cu	1.2~2.0	0.30	0.05
Mn	0.3	0.15	0.7~1.1
Mg	2.1~2.9	0.10	4.5~5.2
Cr	0.18~0.28	—	—
Zn	5.1~6.1	0.20	0.25
Zr	—	—	0.05~0.25
Ti	0.2	—	0.15
Other	0.15	0.15	0.15
Al	Bal.	Bal.	Bal.

实验用材料为 7075 铝合金, 热处理状态为 T6。实验试样尺寸为 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 2.4\text{ mm}$, 实验前对试样表面进行化学处理(将试样浸泡在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的 8% 的 NaOH 溶液里 3 min 后, 在 30% 的 HNO₃ 溶液中浸泡洗去黑色直到表面恢复金属亮色, 然后用清水冲洗, 用干燥压缩空气吹干, 放入干燥皿中备用), 以去除表面氧化膜和油污。填充焊丝为 AlSi₁₂ 和 AlMg4.5MnZr, 直径为 1.2 mm 。实验材料及化

学成分如表 1 所示。

3 激光焊接参量对 7075-T6 铝合金焊缝成形的影响

3.1 聚焦镜焦距的影响

由式 $d_f=2k_f f/D$ 可知, 对于同一台激光器, 聚焦镜的焦距决定了其焦斑直径, 从而确定其功率密度 $I=P/[\pi(d_f/2)^2]$ 和焦深 $\Delta f=(d_f/2)^2/\lambda$ 。而激光作用于材料的功率密度和焦深是影响焊缝成形的两个重要因素。实验过程中选用了两种不同焦距的聚焦镜, 分别为 200 mm 和 300 mm 。在其他工艺条件相同的情况下, 得到的焊缝表面成形如图 2 所示。

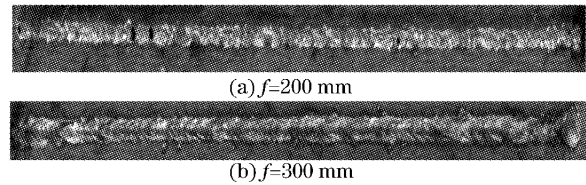


图 2 不同焦距聚焦镜对焊缝成形的影响

Fig. 2 Influence of different focal length on shaping of welds

可见, 采用焦距 $f=200\text{ mm}$ 的聚焦镜进行焊接时, 焊缝较窄, 无明显鱼鳞纹, 焊缝布满凹坑, 而且容易出现焊穿的孔洞。而当使用焦距 $f=300\text{ mm}$ 的聚焦镜焊接时, 焊缝相对较宽且均匀, 鱼鳞纹清晰, 焊接过程相对稳定。这是由于 7075 铝合金富含 Mg, Zn 等电离能低的元素, 在焊接过程中金属蒸气更容易电离, 形成的激光等离子体中的电子密度大大提高, 而 CO₂ 激光的光子能量小, 易与电子相互作用, 导致等离子体本身吸收过多的激光能量, 即等离子体“过热”, 使小孔不能连续稳定地存在^[3,4]。在小焦距聚焦情况下, 焦斑处能量密度高, 小孔上方形成的等离子体电子密度高、振动剧烈, 现有的等离子体控制措施无法对其进行有效控制; 同时, 小焦距对应着的小焦深, 无法克服由工件表面凹凸不平对焊接稳定性的不良影响^[5]。用高速摄像所拍摄到的焊接过程中的等离子体现象也证实了这一点。上述过程中使用焦距为 200 mm 和焦距为 300 mm 的聚焦镜焊接时在 0.1 s 内, 每隔 25 张取出一张共 8 张照片, 如图 3 所示。通过比较, 可以明显看出采用焦距 300 mm 的聚变镜比焦距 200 mm 的聚焦镜焊接时光致等离子体尺寸的变化有所降低, 而且等离子体的尺寸也小一些, 等离子体更稳定, 焊接过程也相对稳定。

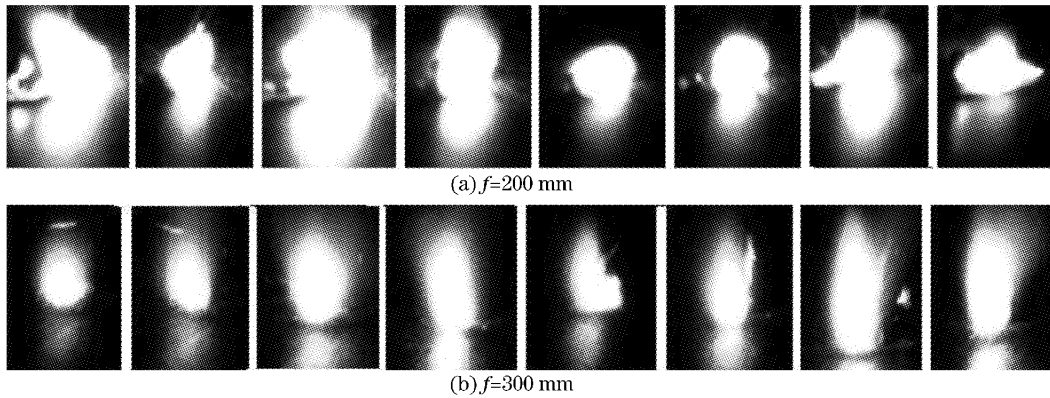


图3 聚焦镜焦距对等离子体的影响($\Delta t=0.004$ s)

Fig. 3 Influence of focal length on plasma ($\Delta t=0.004$ s)

用 UF100 光束光斑质量诊断仪测量出 $f=300$ mm 时, 聚焦光斑半径与离焦量关系如图 4 所示。可见, 由于光束质量好, 使得焦深较大, 故焊接时离焦量取 0~+4 均可。

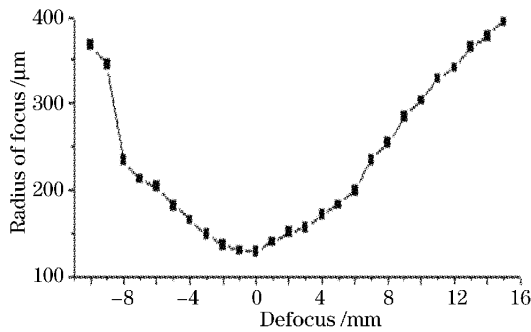


图4 $f=300$ mm 时聚焦光斑半径与离焦量的关系
Fig. 4 Relationship between focal radius and defocus of $f=300$ mm lens

3.2 激光功率和焊接速度的影响

激光功率和焊接速度决定了焊接过程中的热输入量, 对于 7075 铝合金的激光焊接而言, 这两个参

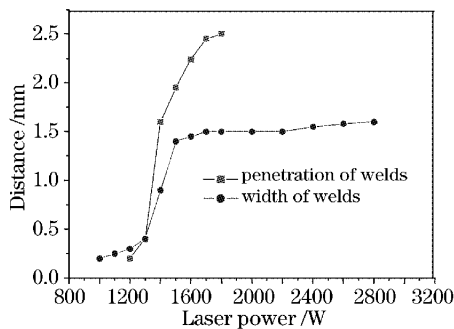


图5 激光功率对熔深和熔宽的影响
Fig. 5 Influence of laser power on penetration depth and width of weld

量具有更加重要的意义。通过实验, 得出 7075-T6 铝合金 CO₂ 激光深熔焊接激光功率与熔深和熔宽的关系曲线如图 5 所示。可以得出, 对于板条 CO₂ 激光器, 实现 7075-T6 铝合金深熔焊接的功率阈值约为 1400 W。激光功率达到阈值以上后, 可以得到稳定的深熔焊, 熔深和熔宽也随之急速增加, 熔深的增加速度大于熔宽的增加速度, 焊缝深宽比增加。当激光功率从 2000 W 增加到 3500 W 时, 焊缝没有随着功率的加大而明显变宽。这表明达到阈值后激光输出功率的增加对焊缝的宽度影响不大。

焊接速度对熔深、熔宽有显著的影响, 随着焊接速度的提高, 熔深和熔宽都呈减小趋势, 速度较小时比速度大时影响更明显, 如图 6 所示。同时实验表明, 当焊速低于 6 m/min 时, 焊接过程的稳定性严重下降。这是由于 7075 铝合金中含有的低熔点合金元素 Mg 和 Zn 在激光高能束的作用下很快达到沸点而蒸发, 形成金属蒸气。金属蒸气快速蒸发对熔池产生很大的反作用力, 使得熔池产生爆炸性飞溅。当焊接速度较低时, 单位时间内输入熔池的能量较多, 金属蒸气量较大, 蒸发时对熔池的附加压力就越大, 熔

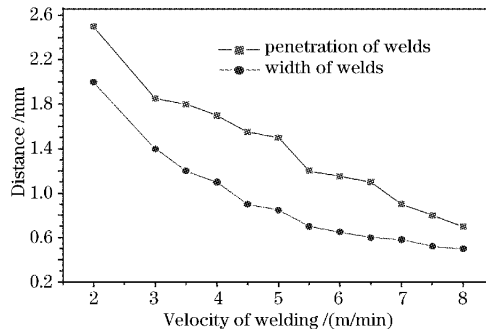


图6 焊接速度对熔深和熔宽的影响
Fig. 6 Influence of welding velocity on penetration and depth width of welds

池的飞溅也就越严重,并使焊缝成形变差。

3.3 工作气体和背保护气体的影响

实验采用的工作气体喷嘴是北京工业大学激光工程研究院研制的双层结构喷嘴,内径 4~6 mm,外径 12~14 mm,喷出气流具有一定长度(8~14 mm)的挺度,且成层流态。通过实验,采用侧吹的方式,内通 10~15 L/min He 和 1~4 L/min Ar 的混合气体,外通 10~15 L/min 的 He,可实现对激光等离子体的有效控制和对焊缝的有效保护。

7075 铝合金表面张力低,成分复杂,与氧和氮的亲和力强,激光焊接过程中熔池极不稳定,熔池的过热度大,采用自由成型时,不仅焊缝背面成形不良,而且在焊接时熔池背面吸氢容易导致气孔的产生,同时焊缝背面也容易氧化。背面加气垫强制成形是一种非常实用的方法,可以用 Ar 气也可以用 He 气,气体流量视焊缝长度和密封性能不同而改变,通常不要超过 3 L/min。焊缝背面气垫不仅改善焊缝背面成形,而且有效地保护了熔池。

4 7075-T6 铝合金的激光填丝焊接技术

在不填充焊丝情况下,可以获得较好的焊缝成形,但焊速太高导致焊接热裂纹增多、接头软化等问题,大大限制了大功率 CO₂ 激光焊接工艺在 7075 铝合金加工工业中的应用。实践证明,填充焊丝激光焊接技术是提高 7075 铝合金接头性能的一种有效方法。

4.1 送丝方式与焊丝的加热机制

由于激光束聚焦光斑直径很小(0.260 mm),大量合金成分的蒸发使得焊接熔池宽度很窄(不足 0.8 mm),熔滴不易进入熔池。对比如图 7 所示的两种送丝方式。图 7(a)为插入式送丝,焊丝以一定倾角从熔池前方送入,焊丝端部对准激光聚焦光斑,焊丝

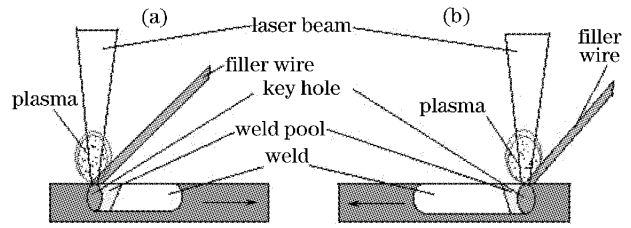
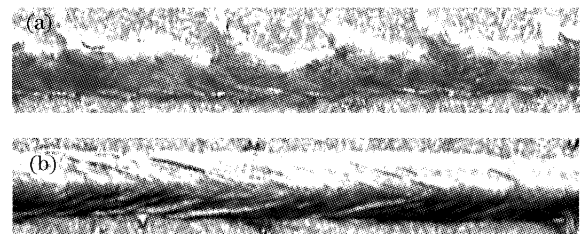


图 7 两种送丝方式。(a)插入式送丝;(b)拖动式送丝
Fig. 7 Two kinds of feeding. (a) Leading feed; (b) trailing feed

先受到光斑加热,熔化后进入蒸发沟槽;图 7(b)为拖动式送丝,焊丝以一定倾角从熔池后侧送入,指向光斑,熔化后即进入尾部熔池并迅速凝固。

从两种送丝方式下的焊接结果(图 8)来看,采用拖运式送丝方式下的焊缝成形较好。因为熔池相对焊丝直径过小,在插入式送丝方式送丝时,焊丝与工件在水平方向上相对速度较快,若焊丝出现熔化不均匀,焊丝就会被粘住而受力弯曲,容易偏向光斑的一侧,受热进一步不均匀,其形成如图 8(a)所示的连续锯齿状突起。在拖动式送丝时,焊丝与工件在水平方向上有着同向运动,即便焊丝送进受阻,工件运动对焊丝也有导向性作用,焊丝也不会偏离光斑,如图 8(b)所示。



$P=3500\text{ W}$, $\Delta f=4\text{ mm}$, $v_w=5\text{ m/min}$, the angle between beam and tuzzle: 45° , $v_s=3\text{ m/min}$

图 8 两种送丝方式下的焊缝表面。(a)插入式送丝;(b)拖动式送丝

Fig. 8 Weld appearance of two kinds of feed. (a) Leading feed; (b) trailing feed

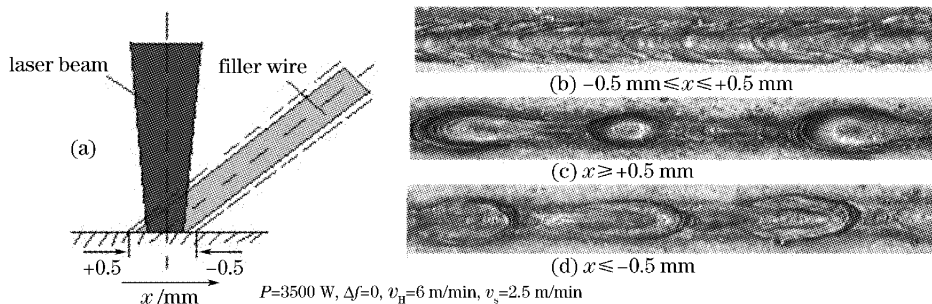


图 9 焊丝相对于激光束的位置对焊缝成形的影响

Fig. 9 Influence of relative position of wire to laser beam on shaping of welds

4.2 送丝位置、角度对焊接稳定性的影响

送丝位置和角度对焊接过程有重要的影响。图 9 为激光束与焊丝的夹角为 45° 时, 不同送丝位置对焊缝成形的影响。

当焊丝处于激光焦点正下方时[图 9(b)], 焊丝与光束的最大偏差在 ±0.5 mm 范围内, 焊丝熔化均匀, 焊缝成形良好。当焊丝正偏离激光超过 0.5 mm 时[图 9(c)], 焊丝首先进入激光束而被加热, 在焊丝末端形成熔滴并长大, 达到一定的尺寸后滴落到工件上, 随后又开始新一轮的熔滴张大滴落循环, 这种不连续的大熔滴过渡以及由此产生的半球状的焊缝间断突起, 使焊缝成形不良。当焊丝负偏离激光超过 0.5 mm 时[图 9(d)], 焊丝部分被激光加热熔化形成小熔滴, 随着焊丝的送进和工件撞击, 中间一部分继续被光束加热蒸发, 形成半环形状扁平突起, 使得焊缝成形不良。

送丝角度即激光束与焊丝之间的夹角, 是填丝激光焊接的一个重要因素。角度太大, 焊丝伸出距离较大, 容易造成抖动; 角度太小, 容易烧损喷嘴。综合考虑保护气体控制等离子体以及对熔池进行有效保护等因素, 通过实验得到送丝角度范围为 35°~60°。

4.3 送丝速度对焊缝成形的影响

其他参量确定后, 送丝速度和焊接速度的合理匹配是决定焊缝成形的关键因素。前文已提到对 7075 铝合金, 提高焊速有利于提高焊接稳定性, 确定焊接速度应达到 6 m/min 以上。当激光功率 $P=3500$ W, 离焦量 $\Delta f=4$ mm, 焊接速度为 6 m/min 时送丝速度对焊缝成形的影响如图 10 所示。

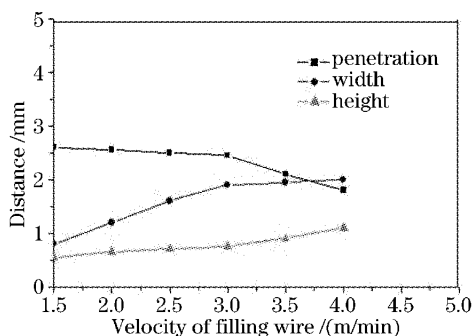


图 10 送丝速度对熔深、熔宽和余高的影响

Fig. 10 Influence of filling wire velocity on penetration depth, width and height of welds

5 7075-T6 铝合金的激光焊接接头性能

7075 铝合金主要强化机制为固溶强化和沉淀

强化, 强化相为 $MgZn_2$ 和 $MgAlCu$ 弥散分布于基体中, 而 7075 铝合金 CO₂ 激光焊缝熔合区组织为细小的胞状晶^[6]。由于合金元素烧损严重, 且激光焊速度极快, 使得强化相熔解后不能得到充分析出。拉伸实验表明, 7075 铝合金 CO₂ 激光焊接接头断口位于焊缝的熔合线附近, 熔合区的强度要低于热影响区和焊缝。熔合区成为接头的薄弱区域是由于: 1) 熔合区几乎没有强化相的析出, 使其发生软化; 2) 合金中溶质原子 Cu, Mg, Zn 沿着胞状晶边界发生偏析, 导致了低熔点共晶物的产生, 增加了开裂倾向^[7]。经过 120 °C, 24 h 的人工时效处理, 熔合区软化现象能得到部分恢复, 使接头强度有所提高。

实验结果表明, 焊态下采用 $AlSi_{12}$ 焊丝的接头强度为 360.8 MPa; 采用 $AlMg_4.5MnZr$ 焊丝的接头强度达到 414.6 MPa。焊后经热处理(固溶热处理 470 °C, 45 min, 60 °C 清水淬火, 120 °C, 24 h 人工时效处理), 采用 $AlSi_{12}$ 焊丝的接头强度为 404.2 MPa, 达到母材的 75%; 采用 $AlMg_4.5MnZr$ 焊丝的接头强度达到 482.6 MPa, 为母材的 88%。两种焊丝的差异在于: Al-Si 共晶的增多, 流动性更好, 具有“愈合”作用, 可以有效抑制裂纹。但是 Si 含量的增多带来了焊缝强度的降低。而合金元素 Zr 可以打乱晶粒的方向, 细化焊缝晶粒, 改善了低熔点共晶形态(呈较短小的蠕虫状并弥散化)和晶界特性, 提高了焊缝的抗裂性, 且由于 Zr 本身强化质点作用使焊缝的抗拉强度大大提高。焊后经过热处理, 可以使强化相得到充分析出, 进而提高强度。

6 结 论

采用双层喷嘴, He 和 Ar 混合工作气体, 激光功率为 3500 W, 焦距为 300 mm 的聚焦镜, 合理匹配焊接速度和送丝速度, 使着丝点位置落于光斑中心 ±0.5 mm 范围内, 可以获得良好的 7075 铝合金焊缝成形; 采用拖动式送丝方式, 焊接速度达到 6 m/min 以上, 有利于提高 7075 铝合金激光填丝焊接过程的稳定性; 焊态下, 采用 $AlSi_{12}$ 焊丝的接头强度为 360.8 MPa; 采用 $AlMg_4.5MnZr$ 焊丝的接头强度达到 414.6 MPa。焊后经热处理, 采用 $AlSi_{12}$ 焊丝的接头强度为 404.2 MPa, 达到母材的 75%; 采用 $AlMg_4.5MnZr$ 焊丝的接头强度达到 482.6 MPa, 为母材的 88%。

参 考 文 献

- 1 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength

- Aluminum Alloy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 103~110
- 左铁钊. 高强铝合金的激光加工 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 103~110
- 2 H. Hugel, M. Beck, J. Rapp *et al.*. Laser welding of aluminium [C]. *SPIE*, 1997, **3092**: 516~521
 - 3 Xiao Rongshi, Chen kai, Zuo Tiechuan. Development of laser beam welding of high strength aluminum alloy [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 206~208
肖荣诗, 陈 铠, 左铁钊. 高强铝合金激光焊接新进展 [J]. 应用激光, 2002, **22**(2): 206~208
 - 4 Rongshi Xiao, Kai Chen, Tiechuan Zuo *et al.*. Influence of wire addition direction in CO₂ laser welding of aluminum [C]. *SPIE*, 2002, **4915**: 128~137
 - 5 J. C. Ion. Laser beam welding of wrought aluminum alloys [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2000, **5**(5): 265~276
 - 6 Antti Salminen. The effects of filler wire feed on the efficiency of laser welding [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 263~268
 - 7 Cheng Liu, D. O. Northwood, S. D. Bhole. Tensile fracture behavior in CO₂ laser beam welds of 7075-T6 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2004, **25**(7): 573~577