

激光熔覆修复 5A06 铝合金组织及力学性能

张可召^{1,2*}, 何超威¹, 林雨杨¹, 严春妍¹, 杨可¹, 包晔峰¹

¹河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022;

²哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 利用激光熔覆修复方法修复了预置有通槽的 5A06 铝合金试样,通过金相显微镜和扫描电子显微镜等对修复试样的显微组织和拉伸性能进行了分析。热影响区中的 β 相在修复过程中受到热作用,尺寸增大,当线能量达到 166.7 J/mm 时, β 相尺寸增大到 1 μm 以上。修复区的显微组织由 α 相、晶粒内部析出的 β 相及沿 α 相晶界分布的 Al-Si 共晶组织构成。当激光功率为 1400 W 时,未熔合缺陷得到有效抑制,气孔缺陷导致修复区强度和延伸率低于母材。

关键词 激光技术; 激光熔覆修复; 5A06 合金; 组织性能

中图分类号 TG146.2 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.231409

Microstructures and Mechanical Properties of Laser Cladding Repaired 5A06 Alloys

Zhang Kezhao^{1,2*}, He Chaowei¹, Lin Yuyang¹, Yan Chunyan¹, Yang Ke¹, Bao Yefeng¹

¹College of Mechanical and Electronic Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;

²State Key Lab of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The 5A06 Al alloy samples with preset grooves are repaired by using laser cladding. The microstructures and tensile properties of these repaired samples are investigated by using metallurgical microscopy and scanning electron microscopy. The β phase in the heat affected zone during repair grows as a result of heat input. When the line energy reaches 166.7 J/mm, the β phase size increases to larger than 1 μm . The microstructure of repaired zone is composed of α phase, β phase within α grains, and Al-Si eutectic phase along α phase grain boundary. The lack-of-fusion defects are effectively suppressed when laser power is 1400 W and the pore defects result in the tensile strength and elongation of the repaired zone lower than those of base metal.

Key words laser technique; laser cladding repairing; 5A06 alloy; microstructure and property

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 350.5030; 350.3390

1 引言

铝合金是汽车工业、航空航天领域和电子产品制造过程中应用最为广泛的金属材料之一。不同牌号的铝合金在成分、组织和性能方面区别很大。5A06 铝合金具有优异的比强度和耐腐蚀性能等,常被应用于高速列车、远洋船舶和航空航天器的零部

件制造中^[1-4]。在实际应用中,零部件受到冲击和磨损,往往会出现局部破损,从而整个零部件失效而废弃,生产制造成本增加。采用合适的技术对零部件进行修复,使其能够恢复初始的外观和功能,能够在一定程度上降低生产成本,提高经济效益。激光熔覆修复工艺以高能量密度的激光束作为热源,以粉末或焊丝作为填充材料,通过合适的修复参数重新

收稿日期: 2020-06-02; **修回日期:** 2020-06-06; **录用日期:** 2020-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(51804097,51879089)、中央高校基本科研业务费专项资金(B200202219)、常州市科技计划(CJ20190049)、先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金(AWJ-19M16)

* **E-mail:** zhangk@hhu.edu.cn

填充破损的局部区域,填充材料和基体材料之间形成良好的冶金结合,使被修复的零部件恢复初始外观,并能够满足使用要求而继续服役^[5-10]。相较于焊丝,采用粉末作为填充材料的工艺灵活性大,加工精度高。目前,激光修复技术采用的主要材料为合金粉末,其技术机理和激光熔覆技术较为类似。由于铝合金本身导热性强,冷却速度快,气孔不易出现,同时铝合金对激光具有较高的反射率,激光热源高能量密度的特点导致低沸点合金元素容易蒸发,铝合金在激光焊接、熔覆和增材制造时容易出现缺陷。铝合金激光熔覆方面的相关研究已较为充分^[11-12]。根据实际工程应用需要,铝合金表面激光熔覆层的种类有 WC 熔覆层^[13]、TiC 熔覆层^[14]和 Ti 基合金熔覆层^[15]等。利用激光熔覆工艺实现铝合金结构件修复的研究鲜有报道,关于激光熔覆工艺的研究主要集中于工艺探索和组织性能分析等方面。钦兰云等^[16]通过激光熔覆技术修复了 ZL114A 合金,阐明了修复区域显微组织的演变规律。其研究表明,和初始的铸态组织相比,修复区域的强度基本相当,延伸率得到显著提高。徐力栋^[17]实现了 A7N01P 铝合金的激光熔覆修复,最大修复深度为 15 mm,修复区存在一定数量的气孔和夹渣缺陷。Shi 等^[18]采用激光熔覆技术在 5083 铝合金表面制备了高熵合金熔覆层,并对熔覆层的显微组织、耐腐蚀性能以及硬度进行了分析。和母材相比,AlCrFeNiCuCo 熔覆层主要由柱状晶和等轴晶构成,具有更高的硬度和耐腐蚀性能。Quazi 等^[19]系统性地研究了铝合金激光表面改性、表面合金化以及熔覆工艺,结果表明,熔覆层的显微组织表现出铸造组织的特征,熔覆过程中的粉末类型和工艺参数等对熔覆层的组织演变有显著影响。

目前,已有大量关于 5A06 铝合金激光焊接的研究^[20-21],但基于激光熔覆的修复研究鲜有报道。本文对 5A06 铝合金激光熔覆修复的热影响区和修复区的显微组织演变进行了研究,并对修复后的力学性能进行了测试。研究结果为 5A06 铝合金结构

件的激光熔覆修复提供了数据支持。

2 试验方法和材料

试验系统由 5 kW 光纤激光器、刮板式送粉器、同轴送粉头和气体保护系统构成。在试验过程中,为了防止铝合金反射对试验系统和人员造成伤害,同轴送粉头偏转 10°。激光熔覆修复过程的示意图如图 1(a)所示。预先将基体母材开出 V 型通槽,单边角度为 45°。拉伸试验的取样位置和拉伸样品的具体尺寸如图 1(b)所示,拉伸样品厚度为 2 mm,和通槽的深度一致。激光熔覆修复工艺的参数如表 1 所示。激光熔覆修复试验采用多道多层往复扫描的方法,扫描方向沿通槽长度方向。在本试验条件下,共需要 6~8 次扫描才能填满整个通槽,为了提高修复效率,修复过程中激光热源及同轴送粉头根据预设程序往复运动。

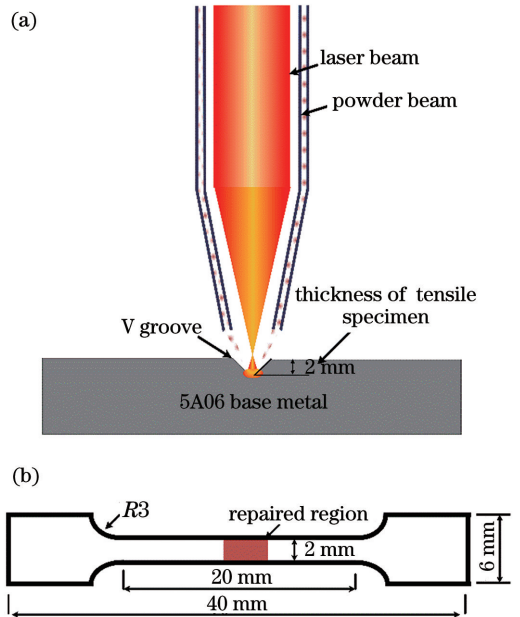


图 1 激光熔覆修复过程及拉伸样品取样位置示意图。
(a) 激光熔覆修复过程;(b) 拉伸样品取样位置
Fig. 1 Schematic of laser cladding repairing process and sampling position of tensile specimen. (a) Laser cladding repairing process; (b) sampling position of tensile specimen

表 1 激光熔覆修复工艺的参数

Table 1 Parameters used in laser cladding repairing process

| Parameter combination No. | Laser power /W | Scanning speed / (mm·s ⁻¹) | Gas flow rate / (L·min ⁻¹) | Powder feeding speed / (g·min ⁻¹) |
|---------------------------|----------------|--|--|---|
| P ₁ | 600 | 6 | 10 | 2.5 |
| P ₂ | 1000 | 6 | 10 | 4.9 |
| P ₃ | 1400 | 16 | 10 | 4.9 |

试验所用母材为 10 mm 厚的 5A06 铝合金,其显微组织如图 2 所示。母材的显微组织主要由基体 α 相、尺寸较大且数量较少的强化相以及弥散分布的细小强化相构成,如图 2(a) 所示。能谱分析仪(EDS)结果显示,尺寸较大的强化相中含有较多 Fe、Mn 元素,故其为 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 相,如图 2(b) 所示。Mn 元素可以提高铝合金的耐蚀性,Fe 元素可以细化晶粒,二者与 Al 元素形成的 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 相脆性较大,其数量过多时会严重降低铝合金的加工性能和力学性能。另一种强化相尺寸细小,呈弥散分布,为铝合金中常见的 β 相(Mg_2Al_3 或 Mg_5Al_8),其特点是室温下较脆,含量过高时会降低铝合金的塑性。

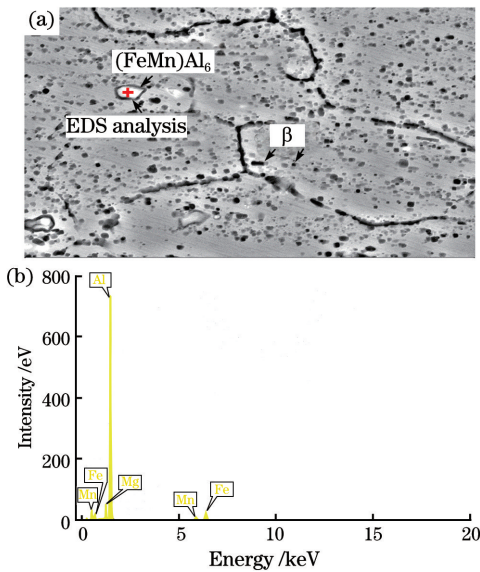


图 2 母材的显微组织。(a)显微组织特征;(b)强化相能谱
Fig. 2 Microstructure of base metal. (a) Microstructural characteristics; (b) EDS analysis of strengthening phase

熔覆所用粉末为 AlSi10Mg 球形粉末,粉末采用旋转电极雾化法制备,直径为 40~100 μm ,满足刮板式送粉器对粉末的输送要求,其具体形貌如图 3 所示。

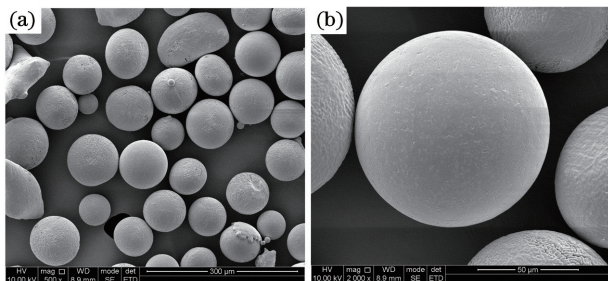


图 3 AlSi10Mg 粉末形貌。(a)总体形貌;(b)放大后的形貌
Fig. 3 Morphology of AlSi10Mg powder. (a) Overall morphology; (b) magnified morphology

5A06 母材和 AlSi10Mg 粉末成分的能谱分析结果如表 2 所示。

表 2 母材和粉末的成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of base metal and filler powder(mass fraction,%)

| Material | Al | Si | Mg | Fe | Ti | Zn | Mn |
|----------|------|-------|------|-----|------|------|------|
| 5A06 | Bal. | - | 6.2 | 0.2 | 0.1 | - | 0.6 |
| AlSi10Mg | Bal. | 10.06 | 1.93 | - | 0.41 | 1.71 | 0.54 |

试验前先将母材放在氢氧化钠水溶液中进行清洗,去除表面氧化膜,随后采用硝酸水溶液进行中和,清水冲洗后放入烘干炉中,充分干燥。由于铝合金在空气中容易氧化,清洗干燥后的样品在 12 h 内完成修复试验,粉末取用后需密封保存,防止进一步氧化。在垂直于扫描方向上线切割金相试样和拉伸试样。金相试样采用酚醛树脂镶嵌,经砂纸打磨和机械抛光后采用氢氟酸、硝酸和盐酸的水溶液进行腐蚀,腐蚀时间约为 15 s。利用光学显微镜和扫描电镜观察母材、热影响区以及修复区的显微组织特征;对修复区物相的元素构成和分布规律进行能谱分析和面扫描分析。采用电子万能拉伸试验机测试母材和修复区的力学性能,利用扫描电镜观察拉伸断口。

3 分析与讨论

3.1 激光熔覆修复 5A06 组织分析

热影响区的显微组织特征如图 4 所示。母材的原始显微组织如图 4(a) 所示, β 相的尺寸细小,平均

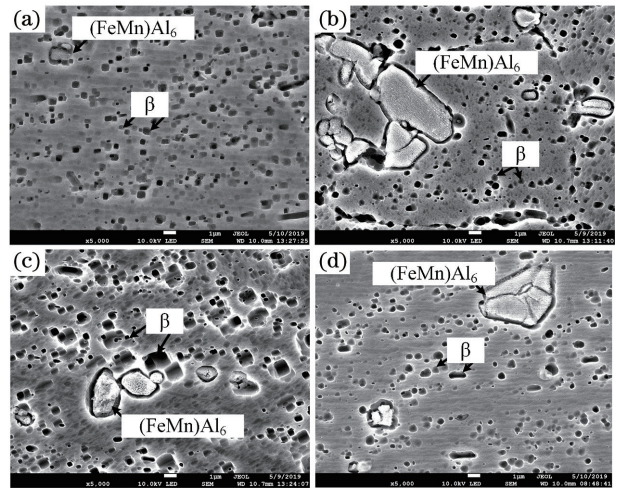


图 4 工艺参数对热影响区显微组织的影响。

(a)母材;(b) P_1 ;(c) P_2 ;(d) P_3

Fig. 4 Influence of parameters on microstructures of heat affected zone. (a) Base metal; (b) P_1 ; (c) P_2 ; (d) P_3

尺寸在 $1\ \mu\text{m}$ 以下。不同参数下热影响区的显微组织形貌如图 4(b)~(d) 所示。 P_1 、 P_2 和 P_3 所对应的线能量分别为 100.0, 166.7, 87.5 J/mm。修复过程所采用的三种工艺参数中, P_2 参数下的热输入最高, β 相的尺寸最大, 超过 $1\ \mu\text{m}$, 如图 4(c) 所示。研究表明, 5 系铝合金在退火过程中会析出 β 相, 同时母材中的初始 β 相会长大^[22]。在激光熔覆修复过程中, 激光热源的往复运动造成热积累, 相当于对母材的初始组织进行了退火处理, 造成 β 相析出和长大, 而且热输入越大, 热影响区受到的热作用越明显, β 相长大的现象也越显著, 因此在 P_2 参数下, β 相的尺寸最大。

修复区的金相显微组织如图 5 所示。图 5(a) 是熔合线附近的宏观组织形貌。可以看出, 熔合

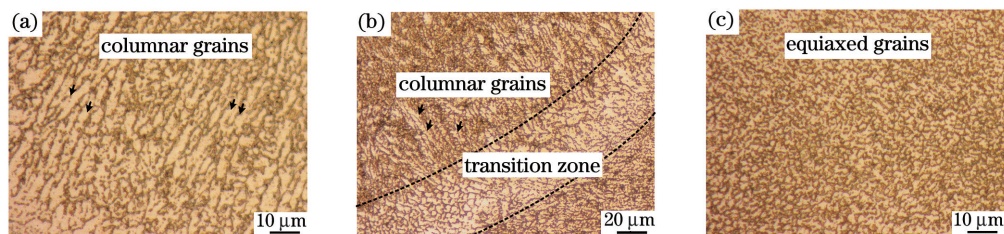


图 5 修复区的晶粒形貌。(a) 靠近热影响区; (b) 过渡区内; (c) 熔覆层内

Fig. 5 Grain morphology in repaired zone. (a) Near heat affected zone; (b) within transition zone; (c) within cladding layer

工艺参数对修复区显微组织的影响如图 6 所示, 修复区主要由 α 相晶粒、内部的 β 相和沿晶界分布的 Al-Si 共晶组织构成。从图 6 中还可以看出, 工艺参数对 Al-Si 共晶组织的数量有显著的影响。在 P_2 参数组合下, 扫描速度慢 (6 mm/s), 送粉速度快 (4.9 g/min), 因此修复区中的成分更接近粉末的成分, Si 含量较高, 修复区成分更加接近 Al-Si 共晶点处的成分, 因此 Al-Si 共晶组织的数量

线附近的晶粒形态主要为柱状晶。这是由于熔合线附近的液态熔池直接和母材接触, 散热速度最快, 因此晶粒沿着散热最快的方向即熔合线的法线方向生长成柱状晶。图 5(b)、(c) 是熔覆层之间的过渡层及熔覆层内部的晶粒形貌, 可以看出, 在过渡层附近晶粒形态以柱状晶为主, 而熔覆层内部的晶粒形态则主要为等轴晶, 其尺寸相对较小。过渡层附近晶粒的生长方式和熔合线附近晶粒的生长方式类似, 液态的熔池和固态的母材或熔覆层直接接触, 散热相对较快, 因而晶粒容易生长成柱状晶。而熔覆层内部则由于无法和固态的母材或熔覆层直接接触, 熔池的散热速度相对较慢, 在各方向的散热速度较为一致, 因而晶粒容易生长成等轴晶。

最多。而在 P_3 参数组合下, 扫描速度最快 (16 mm/s), 修复区中的 Al-Si 共晶组织的数量最少。在 α 相晶粒内部也存在一定数量的尺寸细小的 β 相。修复区 β 相的数量也和修复过程中的线能量大小有关。在 P_2 参数组合下, 线能量最高, 热输入最大, 晶粒内部生成的 β 相数量也最多, 如图 6(b) 所示, 这一现象和热影响区的组织演变规律类似。

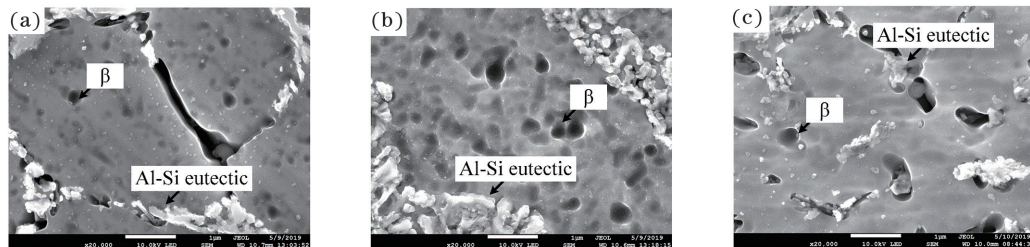


图 6 不同参数组合下修复区的显微组织。(a) P_1 ; (b) P_2 ; (c) P_3

Fig. 6 Microstructures of repaired zones under different parameter combinations. (a) P_1 ; (b) P_2 ; (c) P_3

面扫描分析结果如图 7 所示, Al 元素在晶界处的含量低于其在晶粒内部的含量, 而 Si 元素在晶界处的含量远高于其在晶粒内部的含量, 结合文献中的研究结果^[23-24], 进一步确定晶界处的物相为 Al-Si 共晶组织。其形成原因和修复过程中采用的 AlSi10Mg

粉末有关。能谱分析结果表明, AlSi10Mg 粉末中 Si 元素的质量分数约为 10%, 从 Al-Si 二元相图^[25]上看, Si 在共晶点处的质量分数为 12.5%, 由于在修复过程中, 母材也要发生部分熔化, 熔池中的 Si 含量会进一步被稀释, 成分处于亚共晶范围。如图 8 所示,

凝固时首先从液态熔池中析出 α 相,随着 α 相的不断析出, α 相晶粒开始生长,熔池中的 Si 含量不断提高,

当液态熔池的温度进一步降低至 577 °C 时,Al-Si 共晶组织开始析出,析出相主要分布在 α 相晶粒周围。

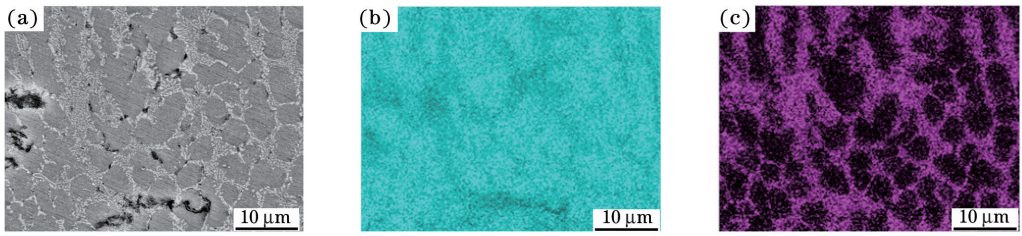


图 7 修复区 Al-Si 元素的分布。(a)修复区形貌;(b)Al 元素分布;(c)Si 元素分布

Fig. 7 Distributions of Al and Si elements in repaired zone. (a) Morphology of repaired zone; (b) distribution of Al element; (c) distribution of Si element

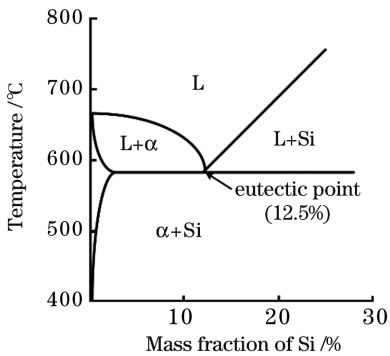


图 8 Al-Si 二元相图^[25]

Fig. 8 Al-Si binary phase diagram^[25]

3.2 激光熔覆修复 5A06 的性能分析

室温条件下分别测试母材试样和激光熔覆修复试样的力学性能,其结果如表 3 所示。修复后的试样的断裂位置位于修复区。可以看出,修复后试样的强度、延伸率均远低于母材。在三个修复参数组合中, P_3 参数组合下修复区的力学性能最优。如图 9 所示,在 P_1 和 P_2 参数组合下,激光功率较小(分别为 600 W 和 1000 W),粉末难以完全熔化,容易在母材侧壁以及熔覆层之间出现未熔合缺陷,因

而强度较低。采用 P_3 参数组合时,激光功率大(1400 W),粉末熔化效率较高,未熔合缺陷可以得到有效抑制,因而力学性能有明显提升。与母材组织相比,修复区的强度和延伸率仍较低。造成这种现象的原因主要是由于母材本身为变形铝合金, α 相呈现出纤维组织的特征,与此同时弥散分布的细小 β 相有较好的强化作用,因而母材的显微组织和力学性能较为理想。在 P_1 、 P_2 参数组合下,修复区存在未熔合缺陷,这严重降低了修复区的性能;虽然在 P_3 参数组合下未熔合缺陷得到了较好的抑制,但修复区内部仍存在较多气孔缺陷,导致其性能仍低于母材。

表 3 5A06 母材及修复试样在室温下的拉伸性能
Table 3 Tensile properties of 5A06 base metal and repaired samples at room temperature

| Condition | Strength /MPa | Elongation /% |
|------------|---------------|---------------|
| Base metal | 334.6 | 20.3 |
| P_1 | 99.4 | 1.8 |
| P_2 | 76.9 | 1.3 |
| P_3 | 212.6 | 2.8 |

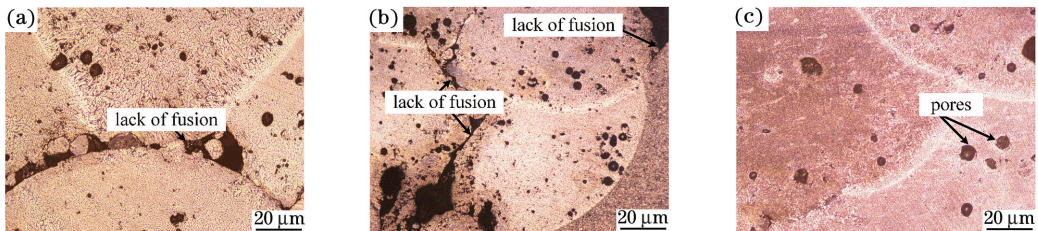


图 9 不同参数组合下修复区的缺陷。(a) P_1 ;(b) P_2 ;(c) P_3

Fig. 9 Defects in repaired zones under different parameter combinations. (a) P_1 ; (b) P_2 ; (c) P_3

母材的断口如图 10(a)所示。母材断口由大量的韧窝构成,表现出典型的韧性断裂特征。根据韧窝的尺寸和形成原因,可以将其分为两类:尺寸在 1 μm 左右的韧窝,其形成原因和 β 相的强化作用有关。位

错运动被 β 相阻碍,在 β 相周围形成了应力集中,裂纹沿 α/β 相界萌生和扩展,并围绕 β 相形成韧窝,而尺寸较大的韧窝则由 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 相形成。修复后的试样断口如图 10(b)~(d)所示。在 P_1 和 P_2 参数组

合下,由于激光功率较小,在断口表面可以观察到未熔化的粉末颗粒。采用 P_3 参数组合时,断口表面没有发现未熔化的粉末颗粒,但观察到较多气孔;在 P_3

参数组合下,试样的断裂方式和母材的断裂方式类似,在断口表面也可以观察到韧窝,其尺寸较小,形成原因也和修复过程中析出的 β 相有关。

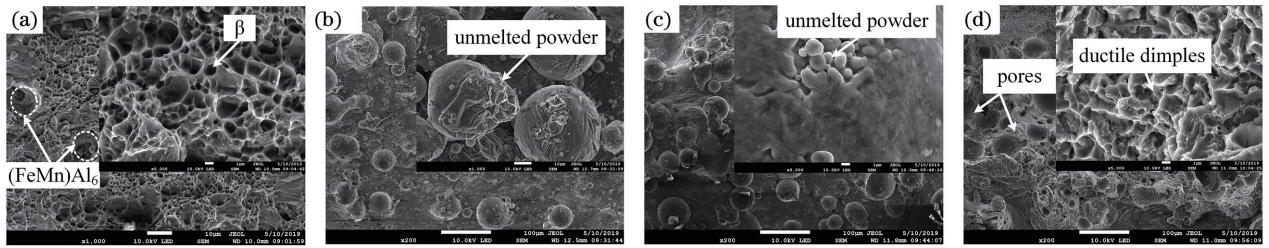


图 10 母材及不同参数组合下修复试样的拉伸断口形貌。(a)母材;(b) P_1 ;(c) P_2 ;(d) P_3

Fig. 10 Morphologies of base metal and tensile fracture repaired samples under different parameter combinations.

(a) Base metal; (b) P_1 ; (c) P_2 ; (d) P_3

4 结 论

采用激光熔覆修复技术对 5A06 铝合金进行了修复,并对修复区的组织和性能进行了研究,得到以下结论。

1) 热影响区中的 β 相晶粒在修复过程中受到热作用后尺寸增大,热输入越大, β 相尺寸增大得越明显;线能量为 166.7 J/mm 时, β 相尺寸增大到 $1 \mu\text{m}$ 以上。

2) 修复区熔合线附近及过渡层内的晶粒形态为柱状晶,而熔覆层内的晶粒形态为等轴晶。修复区物相由 α 相、 β 相和 Al-Si 共晶组织构成。Al-Si 共晶组织分布不均匀,主要集中在 α 相晶界处,而 β 相主要存在于 α 相晶粒内部。

3) 修复区的强度及塑性均低于母材。主要原因是修复区存在气孔缺陷,降低了修复区的性能。

参 考 文 献

- [1] Yu Y C, Wang C M, Yu S F. Microstructures and property of butt laser joints of aluminium alloy 5A06 sheets with filler[J]. Laser Technology, 2010, 34(1): 34-36.
余阳春,王春明,余圣甫. 5A06 铝合金的激光填丝焊接接头组织与性能[J]. 激光技术, 2010, 34(1): 34-36.
- [2] He Y Z, Wang D P, Wang Y, et al. Correction of buckling distortion by ultrasonic shot peening treatment for 5A06 aluminum alloy welded structure [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(6): 1531-1537.
- [3] Li Y J, Qin F M, Liu C R, et al. Flow law, microstructure and corrosion behavior of friction stir welded 5A06 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(8): 2353-2359.
- [4] Qin Z H, Xu B T, Li B Y, et al. Research on high temperature gas bulging forming of aluminum alloy 5A06 for thin wall spherical head [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(1): 7-11, 31.
秦中环,徐柄桐,李保永,等. 5A06 铝合金薄壁球形封头高温气胀成形工艺研究[J]. 航天制造技术, 2019(1): 7-11, 31.
- [5] Wang J S, Shu L S. Laser cladding remanufacturing and repair of agricultural tractor spindle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071404.
王家胜,舒林森. 农业拖拉机主轴激光熔覆再制造修复研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071404.
- [6] Ren Z H, Wu M P, Cui C, et al. Effects of temperature field and $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ on material phase transition in laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0802006.
任仲贺,武美萍,崔宸,等. 激光熔覆温度场和 $\text{CeO}_2/\text{TiO}_2$ 对材料相变的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0802006.
- [7] Lai J, Lu Y Y, Zhang H, et al. Liquation cracks in superalloys repaired by low-heat input pulsed laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0402011.
赖境,路媛媛,张航,等. 低热输入脉冲激光修复高温合金液化裂纹研究[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0402011.
- [8] Li Y D, Dong G, Yao J H. Microstructure evolution of heat-affected zones of 28CrMoNiV steel repaired by lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0802009.
李允东,董刚,姚建华. 激光修复 28CrMoNiV 钢热影响区的组织演变[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802009.
- [9] Liu F G, Lin X, Song K, et al. Microstructure and

- mechanical properties of laser forming repaired 300M steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(3): 325-334.
- 刘丰刚, 林鑫, 宋衍, 等. 激光修复 300M 钢的组织及力学性能研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(3): 325-334.
- [10] Qi H B, Xu Q G, Zhao Y Q, et al. Study on realization method of automatic repair wear rail by laser cladding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(22): 160-165.
- 齐海波, 徐全盖, 赵衍庆, 等. 无缝线路磨损钢轨激光熔覆自动修复方式的研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(22): 160-165.
- [11] He L, Wang X L, Tan H, et al. Research status in microstructure and property of laser cladding coatings on aluminum alloys surface [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(2): 28-33.
- 何龙, 王小龙, 谭华, 等. 铝合金表面激光熔覆强化涂层组织与性能研究现状[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(2): 28-33.
- [12] Zhang X L, Zhang K M, Ma J X, et al. Research status of ceramic composite coating on aluminium alloy surface by laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(20): 23-26, 30.
- 张晓琳, 张可敏, 马金鑫, 等. 铝合金表面激光熔覆陶瓷复合涂层研究现状[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(20): 23-26, 30.
- [13] Fernández M R, García A, Cuetos J M, et al. Effect of actual WC content on the reciprocating wear of a laser cladding NiCrBSi alloy reinforced with WC[J]. *Wear*, 2015, 324/325: 80-89.
- [14] Sušnik J, Grum J, Šturm R. Effect of pulse laser energy density on TiC cladding of aluminium substrate[J]. *Tehnički vjesnik*, 2015, 22(6): 1553-1560.
- [15] Li Y X, Zhang P F, Bai P K, et al. Microstructure and properties of Ti/TiBCN coating on 7075 aluminum alloy by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 334: 142-149.
- [16] Qin L Y, Pang S, Yang G, et al. Microstructure and mechanical property analysis of ZL114A aluminum alloy repaired by laser deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202009.
- 钦兰云, 庞爽, 杨光, 等. 激光沉积修复 ZL114A 铝合金组织和力学性能分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202009.
- [17] Xu L D. Study on microstructure and properties of welding joint of laser repair of high-strength aluminum alloy [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- 徐力栋. 高强度铝合金焊接结构激光修复接头组织与性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [18] Shi Y, Ni C, Liu J, et al. Microstructure and properties of laser clad high-entropy alloy coating on aluminium [J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34(10): 1239-1245.
- [19] Quazi M M, Fazal M A, Haseeb A S M A, et al. Laser-based surface modifications of aluminum and its alloys [J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2016, 41(2): 106-131.
- [20] Xu F, Li X Y, Yang J, et al. Laser welding process of 5A06 aluminum alloy with filler wire[J]. *Welding & Joining*, 2008(8): 26-28, 70.
- 许飞, 李晓延, 杨璟, 等. 5A06 铝合金激光填丝焊接工艺研究[J]. *焊接*, 2008(8): 26-28, 70.
- [21] Xu F, Chen L, Gong S L, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welding 5A06 aluminum with filling wire[J]. *Applied Laser*, 2009, 29(2): 83-86.
- 许飞, 陈俐, 巩水利, 等. 5A06 铝合金激光填丝焊接接头组织性能分析[J]. *应用激光*, 2009, 29(2): 83-86.
- [22] Katsas S, Nikolaou J, Papadimitriou G. Microstructural changes accompanying repair welding in 5xxx aluminium alloys and their effect on the mechanical properties [J]. *Materials & Design*, 2006, 27(10): 968-975.
- [23] Wu J, Wang X Q, Wang W, et al. Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg [J]. *Acta Materialia*, 2016, 117: 311-320.
- [24] Li W, Li S, Liu J, et al. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 663: 116-125.
- [25] Brandl E, Heckenberger U, Holzinger V, et al. Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior[J]. *Materials & Design*, 2012, 34: 159-169.