

2219 铝合金 TIG 填丝堆焊成形薄壁试样组织特征

柏久阳¹, 范成磊¹, 杨雨晨², 徐艳利², 李 瑞², 林三宝¹, 王计辉¹

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 北京航天新风机械设备有限公司 北京 100074)

摘 要: 进行了 2219 铝合金多层单道 TIG 填丝堆焊成形试验, 并观察了堆焊成形试样的宏观形貌与微观组织特征. 结果表明, 堆焊成形试样整体冶金结合良好、无明显的未熔合现象. 在试样的中下部区域有平行条纹出现, 条纹间距大约相等, 并且条纹区域与层间位置大致重合. 顶部区域组织呈树枝状, 且 Cu 元素偏析严重. 中下部区域组织形态多样, 包括条纹组织、等轴组织、柱状组织和平面组织, 各类组织依次循环出现, 同时 Cu 元素偏析明显改善. 堆焊试样中存在一定量的孔隙缺陷—气孔和缩孔, 两者尺寸介于 10 ~ 80 μm 之间, 集中出现在层间位置(条纹).

关键词: 堆焊成形; 2219 铝合金; 组织特征

中图分类号: TG 444^{+.2} **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)06-0124-05

0 序 言

堆焊成形属于增材制造(又称 3D 打印)的范畴. 常见的金属结构增材制造工艺多以高能束作为热源, 如激光和电子束成形工艺, 但高能束热源效率低、成本高的特点限制了其在大型零件成形上的应用. 以电弧为热源的增材制造方式—电弧堆焊成形, 具有效率高、成本低廉的优点, 近些年来受到了广泛的关注. 对于这项新兴的材料成形工艺, 国内外的研究热点主要集中于钛合金、镍合金和各类钢^[1-3], 而对铝合金的研究和报道却相对较少. 已有的公开报道包括, 美国南卫理公会大学的 R. Kovacevic 课题组的研究人员组采用 VP-TIG 方法, 开展了针对 5356 铝合金的堆焊成形的研究, 发现成形试样底部以柱状晶为主, 随高度增加逐渐转变为等轴晶. 随后该课题组又进行了针对 4043 铝合金的成形研究^[4]. 2012 年, 天津大学杜乃成、刘望兰等研究人员采用 P-MIG 方法开展了针对 5183 铝合金的研究, 提出了一种复合过渡的成形方法, 该方法既能保证成形质量又能提高成形速度. 随后该课题组又开展了 5356 铝合金 TIG 填丝堆焊成形的研究^[5,6]. 2013 年, 哈尔滨工业大学的刘一博开展了基于 CMT 方法的 5356 铝合金堆焊成形, 并进一步研究了焊后热处理对堆焊试样性能的影响^[7].

无论是 4xxx 还是 5xxx 铝合金, 其强度都相对较低(大多 300 MPa 以下), 而 2xxx 铝合金则强度较高(大多 400 MPa 以上), 采用堆焊成形工艺制造的优势更为明显. 文中, 作者基于课题前期研究成果^[8,9], 采用钨极惰性气体保护焊(TIG)填丝堆焊成形工艺制造 2219 铝合金薄壁试样, 成形试样由于受到多次电弧热的作用, 其组织特征与传统的铸造、锻造成形金属有着很大差异, 因此文中对试样的组织特征及形成机理进行了研究.

1 试验方法

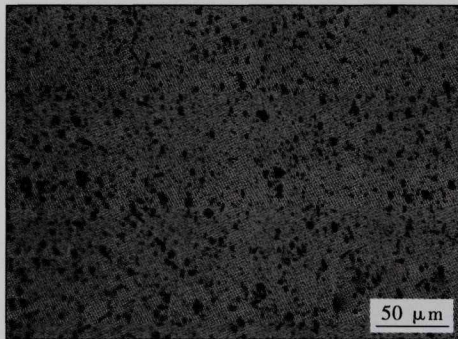
试验所用焊接电源为德国 Cloos 公司的 GLW300 型交、直流两用 TIG 电源. 采用三维滑台 + 变位机的组合作为运动单元, 采用步进电机作为驱动单元, 采用数控面板作为控制单元. 焊丝牌号为 ER2319, 直径 1.2 mm, 该型号焊丝是专为焊接 2219 铝合金而设计的, 两者成分种类相同, 但 ER2319 中钛的含量比 2219 略高, 成分如表 1 所示, 以弥补在成形过程中的合金元素烧损. 图 1 为 ER2319 焊丝的微观组织, 可以看到在 α -Al 固溶体中分布大量的颗粒状和块状组织, 结合文献和 EDS 分析可知两者成分都为 θ 相, 成分为 CuAl_2 . 在 TIG 填丝堆焊成形中, 虽然成形参数会对试样的组织造成影响, 但不同参数铝合金堆焊试样的组织特征是类似的, 因此文中没有采用多组参数对比的手段, 而仅针对一组成

形参数下的 20 层单道多层薄壁试样组织特征进行研究. 成形参数如表 2 所示. 试样经打磨抛光后采

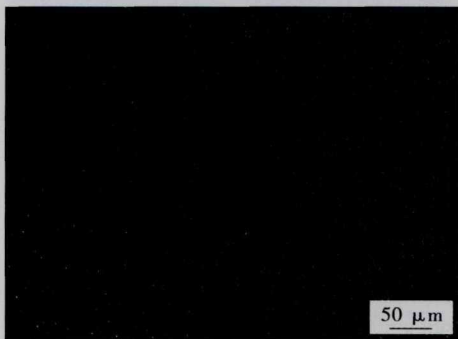
用 Keller 试剂腐蚀. 采用光学显微镜和扫描电子显微镜对宏观形貌和微观组织进行分析.

表 1 ER2319 焊丝化学成分 (质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of ER2319 wire

Cu	Mn	Fe	Ti	V	Zn	Zr	Si	Mg	Al
5.8 ~ 6.8	0.20 ~ 0.40	0.30	0.10 ~ 0.20	0.05 ~ 0.15	0.10	0.10 ~ 0.25	0.20	0.20	余量



(a) 金相图



(b) SEM图

图 1 ER2319 焊丝微观组织形态
Fig. 1 Microstructures of ER2319 wire

表 2 成形焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

焊接电流 I/A	焊接速度 v/(mm·min ⁻¹)	送丝速 度 v _s / (mm·min ⁻¹)	基板预 热温度 T _c / ℃	层间温 度 T/℃	气体流 量 q/ (L·min ⁻¹)	电弧高 度 h/ mm	极性
150	600	2000	100	100	10	3.5 ~ 4.5	AC

2 宏观特征

薄壁试样具有成形容易、结构简单和特征鲜明等优点. 图 2 为堆焊成形薄壁试样的截面图, 可以看到堆焊试样层间冶金结合良好, 没有明显的未熔合现象. 其顶部呈圆弧形, 高度相当于 3 ~ 4 个堆焊层, 这是最后一层金属熔敷时液态金属受表面张力作用的结果; 试样中部区域垂直度良好, 层与层之

间的外表面略呈圆弧形, 这是层间堆积残留的痕迹; 试样下部熔宽逐渐变窄, 直到与基板结合.



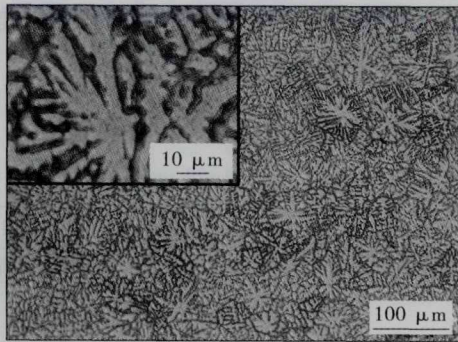
图 2 堆焊试样截面图
Fig. 2 Cross-section of specimen

薄壁试样呈现出两个宏观特征明显不同的区域: 顶部区域和中下部区域. 顶部区域颜色较浅. 中下部区域颜色较深, 分布着多条浅色平行条纹, 条纹位于层间位置, 且条纹间距大约相等. 其他学者在钛合金、镍合金和钢中也有类似发现, 因此可以认为平行条纹是堆焊成形薄壁试样的典型特征. 但与铝合金略有不同, 在其他金属的堆焊试样中条纹并非都是平行直线.

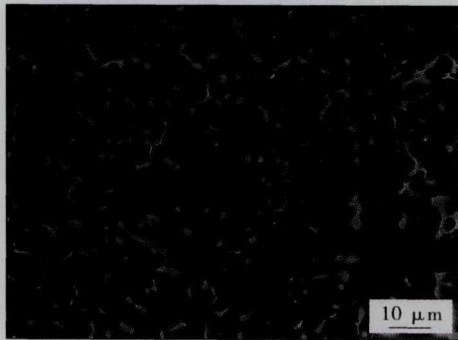
3 微观组织

3.1 顶部区域

通过显微观察可以发现顶部区域组织呈树枝状, 如图 3a 所示. 通过图 3b 的 SEM 图片可以发现, 在 α -Al 固溶体基体上有棒状和颗粒状两种组织, 两者均分布在枝晶间隙中. 通过 EDS 分析得知棒状组织和点状组织中 Cu 元素的质量分数分别为 31.25%, 26.78%, 接近共晶组织 (α -Al + CuAl₂) 的成分点.



(a) 金相图片



(b) SEM图片

图 3 顶部区域微观组织

Fig. 3 Microstructures in top zone

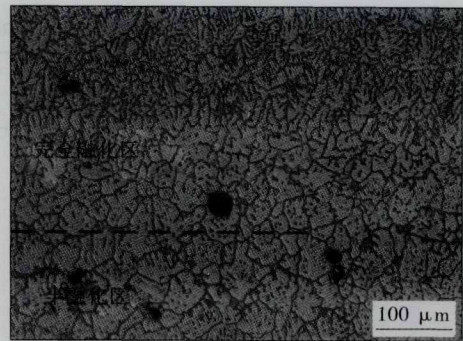
顶部区域是最后一层堆焊时金属熔化后凝固的形态特征. 当液态金属冷却到 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 初晶相 $\alpha\text{-Al}$ 首先析出并开始固溶相中的 Cu 元素, 当温度下降到 $548\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时液相中开始析出共晶组织 ($\alpha\text{-Al} + \text{CuAl}_2$). 在 2219 铝合金的 Cu 元素的含量为 6.3% 左右, 该成分点距离共晶组织成分点 (33%) 较远, 这样初晶相 $\alpha\text{-Al}$ 数量较多, 而共晶相 $\alpha\text{-Al} + \text{CuAl}_2$ 数量相对较少, 共晶相中 $\alpha\text{-Al}$ 依附着初晶相生长要比重新形核容易的多, 这样使 CuAl_2 单独分布于枝晶间隙和晶界处, 形成了晶界处颗粒状和棒状的 CuAl_2 .

晶粒的形核和长大需要一个过程, 堆焊过程的热积累效应又使这个过程逐渐变长. 在晶粒成长的过程中, 中心部分先凝固, Cu 元素含量较低; 在枝与枝之间的部分最后凝固, Cu 元素富集, 这样 Cu 元素在单个晶粒范围内产生了成分的不均匀性, Cu 元素含量的不同造成了色泽的差异, 因此顶部区域树枝状组织轮廓清晰.

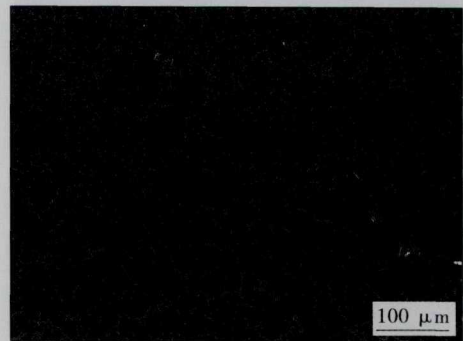
3.2 顶部与中部交界区域

如图 4a 所示, 在交界区域树枝状形态消失, 组织变成了等轴组织形态, 同时有颗粒状组织 (CuAl_2) 在晶粒内部析出. 根据组织形态的差异, 交界区域可再细分为两个区: 完全熔化区和半熔化区. 通过图 4b 的 SEM 图可以清楚的区别, 在完全熔化

区中共晶组织呈断续分布、尺寸较小且数量较少. 在半熔化区中共晶组织呈网格状, 尺寸明显增大, 数量明显增加.



(a) 金相图片



(b) SEM图片

图 4 顶部与中部交界区域微观组织

Fig. 4 Microstructures in junction between top and middle regions

交界区域在最后一层熔敷金属时温度处于金属的液相线温度附近. 其中, 完全熔化区晶粒已经完全熔化, 而半熔化区晶粒只发生了局部熔化. 对于完全熔化区来说, 由于在首先结晶的过程中晶粒前端有大量的液相存在, 结晶速度很快, Cu 元素的偏析程度较小, 因此没有出现树枝状. 对于半熔化区来说, 发生了 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶末端的少量熔化, 而共晶组织的熔点为 $548\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此时已经完全熔化. 这样在共晶液相重新凝固的过程中便在这些枝晶边界处汇集, 形成了共晶组织的连续分布.

再热作用使半熔化区内 Cu 元素加速扩散, 枝晶偏析有所改善, 因此树枝状轮廓消失, 组织呈现出等轴形状. 当温度下降时, 会有部分 Cu 元素在晶粒内部析出, 形成了半熔化区晶粒内部的颗粒状 CuAl_2 .

3.3 中下部区域

中下部区域内组织形态多样, 且循环出现, 图 2 中可以观察到多条平行条纹, 每两个条纹间的为一个组织形态循环, 其中一个循环又包含 4 个层 (高

度增加时,变为3层循环),包括:条纹组织层、等轴组织层、柱状组织层和平面组织层(随高度增加,该层变得模糊),各层次序关系顺序如图5a和5b所示。4个组织层的宽度不是相等的,其中条纹组织层和等轴组织层范围较大,柱状组织层和平面组织层范围较小。同时随着高度增加,等轴组织层的范围继续扩大,而平面组织层和柱状组织层的范围不断缩小,在一定高度后平面组织层甚至消失。

条纹组织层中A点局部放大如图5c所示,其特征为晶界错综复杂,且有宽大晶界出现。进一步与宏观特征(图2)对比可以发现,这一层为宏观特征中平行条纹的位置。因此可以推断,造成宏观平行条纹的微观组织特征为晶界错综复杂,且有宽大晶界出现。图5d为等轴组织层中B点局部放大图,层内组织呈等轴形态,晶界宽度明显减小。图5e为柱状组织层中C点的局部放大图,该层面积较小,可以看到组织不再呈等轴形态,而是呈现柱状形态,晶粒沿堆焊高度方向生长,直至与等轴组织相遇。平面组织层中D点组织形貌如图5f所示,该层出现

一种组织轮廓不清晰,晶界数量稀少的现象。

中下部区域都经历了至少一次的再热作用,再热作用改善了Cu元素偏析,使组织由非平衡态向平衡态转变,因此中下部区域中见不到明显的树枝状形态。4种不同形态组织的生成需要进一步结合金属凝固过程来解释。平面组织层位于重熔过程中的完全熔化区附近,固液界面凝固速度很快,杂质很少,偏析程度较小,亚晶界不明显。但随着层数增加,凝固速度变慢,平面组织便逐渐模糊甚至消失。柱状组织是薄壁结构散热作用的结果,在熔池凝固初期,与散热方向一致的晶粒将优先生长,与散热方向不一致的晶粒将受到压抑,因此在最初凝固的区域内有柱状晶层。随着凝固的继续进行,合金元素逐渐积累,凝固速度逐渐变慢,等轴组织逐渐成为了主导。而条纹区域中,晶界错综复杂,且晶界尺寸宽大则是半熔化的作用,再此不做深入探讨。

除了再热作用和散热条件,堆焊成形技术的逐层熔敷特征,三者共同作用造就了组织中层状分布与每个层内多种组织形态循环出现的结果。

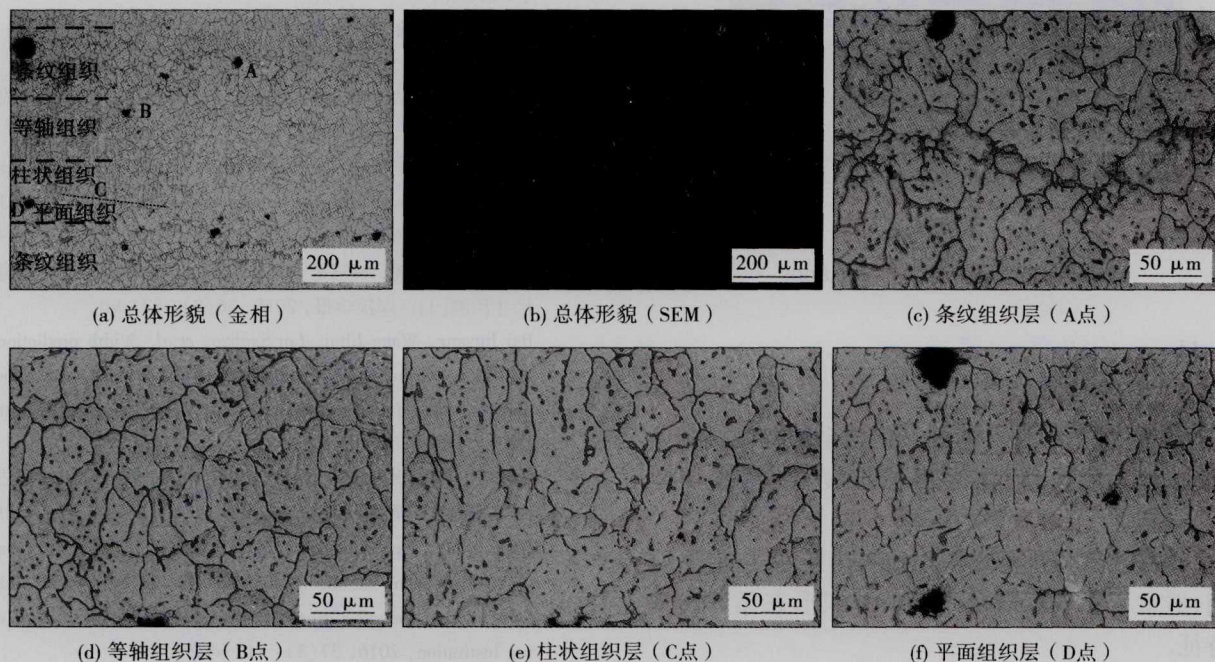


图5 中下部区域微观组织

Fig. 5 Microstructures in middle zone and bottom zone

3.4 孔隙缺陷

堆焊试样中存在气孔和缩孔两类孔隙缺陷,而两者对于堆焊结构来说都是一种有害的缺陷。一般来说气孔比较圆,缩孔形状不规则且出现在多晶交界位置。从图6中可以发现堆焊层中存在尺寸在10~80 μm不等的圆形和不规则形貌的孔隙缺陷,

但圆形缺陷较多,因此可以认为气孔缺陷占主导地位。同时可以发现,两类缺陷大多分布在层间位置,而由前文可知层间位置又与条纹位置重合。因此,可以认为层间条纹位置是材料的薄弱环节。

铝合金中的气孔大多判定为氢气孔,H元素在液态铝中溶解度要远远大于固态铝中,在快速凝固

的过程中, H 元素无法溢出, 因而形成气孔. 堆焊成形是一个连续的过程, 无法对每一层表面进行必要的打磨和清理, 高温铝合金直接暴露在空气中必然造成严重的氧化现象. 阴极清理作用能够将氧化膜打碎, 但是破碎的氧化膜也提供了气孔异质形核的条件, 因此层间位置气孔的形核概率要远远大于其它位置. 另外, 层间位置液态金属凝固速度最快, 气孔形成后来不及溢出, 造成了在层间位置的气孔聚集.

而缩孔的形成也与层间位置的重熔现象密切相关. 在半熔化区枝晶末端发生熔化. 在冷却过程中, 由于液相收缩、固液转变收缩和固相收缩的不均匀性, 造成孔隙的产生. 同时, 由于破碎枝晶的交错, 造成液态金属回填不足, 晶界处产生缩孔. 因此缩孔往往处于多个晶粒交界位置, 且形状不规则.

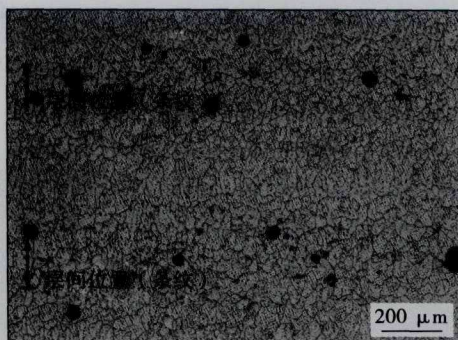


图6 气孔与缩孔

Fig. 6 Porosities and shrinkages

4 结 论

(1) 平行条纹是堆焊成形铝合金薄壁试样的典型特征, 其组织特征是晶界错综复杂、晶界尺寸宽大.

(2) 逐层熔敷、再热作用和散热条件, 三者共同作用, 造就了中下部区域内多种组织形态循环出现的特征.

(3) Cu 元素的偏析造成了顶部区域的枝晶状形态. 再热作用改善了中下部区域中 Cu 元素的偏析, 因此树枝状形态消失, 多样组织形态出现.

(4) 堆焊成形 2219 铝合金中存在气孔和缩孔两类孔隙缺陷, 且两者都容易在层间位置(条纹)出现.

参考文献:

- [1] Baufeld B, Van der Biest O. Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2009(10): 1536-1542.
- [2] Tabernero I, Lamikiz A, Martínez S, *et al.* Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(6): 465-470.
- [3] Skiba T, Baufeld B, Van der Biest O. Shaped metal deposition of 300 M steel[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, 225(6): 831-839.
- [4] Wang H, Kovacevic R. Variable polarity GTAW in rapid prototyping of aluminum parts[C]//*Proceedings of the 11th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX. 2000: 369-376.
- [5] 杜乃成. 弧焊机器人金属快速成形研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [6] 刘望兰. 铝合金 TIG 电弧快速成形工艺的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [7] 刘一搏, 孙清洁, 姜云禄, 等. 基于冷金属过渡技术快速成形工艺[J]. *焊接学报*, 2014, 35(7): 1-4.
Liu Yibao, Sun Qingjie, Jiang Yunlu, *et al.* Rapid prototyping process based on cold metal transfer arc welding technology[J]. *Transactions of China Welding Institution*, 2014, 35(7): 1-4.
- [8] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测[J]. *焊接学报*, 2015, 36(9): 87-90.
Bai Jiuyang, Wang Jihui, Lin Sanbao, *et al.* Width prediction of deposited aluminium alloy manufactured by shaped metal deposition with TIG[J]. *Transactions of the China Welding Institution* 2015, 36(9): 87-90.
- [9] 柏久阳, 范成磊, 林三宝, 等. 基板散热作用对电弧堆焊成形中熔宽调控的影响[J]. *焊接学报*, 2016, 37(3): 115-119.
Bai Jiuyang, Fan Chenglei, Lin Sanbao, *et al.* Effects of base-plate's heat sink on the control strategies of weld width during GTA-additive manufacturing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(3): 115-119.

作者简介: 柏久阳,男,1987年出生,博士研究生. 主要从事电弧堆焊成形方面的研究. 发表论文5篇. Email: baijiuyang-123@163.com