

TIG 增材制造 4043 铝合金薄壁零件 组织及力学性能

哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室(150001)

柏久阳 王计辉 师建行

林三宝 杨春利 范成磊

摘要 采用 TIG 增材制造的方法制造 4043 铝合金零件,并对沉积态材料的组织特征及力学性能进行研究。观察结果发现,沉积态 4043 铝合金中存在着大量的柱状树枝晶,晶粒沿着垂直于焊缝的方向定向生长,并可以穿越层间条纹区域。沉积态材料的组织中存在着两类偏析现象:枝晶偏析和层间偏析。拉伸试验结果显示,沉积态材料的平均抗拉强度为 146.7 MPa,断后伸长率为 19.11%。材料的强度稳定性较好,而塑性的稳定性较差。不同取样方向的拉伸试验结果显示,沉积态 4043 铝合金无力学性能各向异性。

关键词: 增材制造 组织特征 力学性能

中图分类号: TG444+.2

0 前言

增材制造,又称 3D 打印,是一种采用逐层熔敷方式制造立体零件的方法。常见的金属增材制造方法多以激光^[1]和电子束^[2]作为热源,而以电弧^[3]为热源的增材制造方式,具有效率高、成本低的优点,近些年来受到了广泛的关注。因其特殊的制造方法,沉积态金属呈现出许多特殊的组织与力学性能特征。比利时鲁汶大学的 B. Baufeld^[4]采用 TIG 增材制造方法制造了 TC4 金属零件,发现材料在平行于焊缝方向的强度要明显高于垂直方向。哈尔滨工业大学的姜云禄^[5]采用 CMT 方法制造了 5356 铝合金零件,也发现材料在平行于焊缝方向的抗拉强度要高于垂直于焊缝方向 40~50 MPa。哈尔滨工业大学的徐富家^[6]采用 PAW 方法进行金属增材制造,发现沉积态 Inconel625 中存在着不同程度的 Nb 元素的偏析现象。调整工艺可以改善 Nb 元素的偏析,热处理可以消除偏析。谢菲尔德大学的 T. Skiba^[7]对沉积态 308L 不锈钢进行研究,发现沉积态材料中有等距离分布的“Ω”型条纹。其抗拉强度可达 537 MPa,屈服强度 312 MPa,力学性能接近常规制造方法。

文中采用 TIG 增材制造的方法制造 4043 铝合金零件,并对沉积态 4043 铝合金的组织及力学性能特征进行研究。

1 试验

试验所用 TIG 增材制造系统如图 1 所示。焊接电源为德国 Cloos 公司的 GLW300 型 TIG 电源。采用三自由度滑台作为三维运动单元,可实现空间轨迹运动。试验所用材料为 ER4043 焊丝,焊丝成分见表 1,焊丝直径 $\phi 1.6$ mm。

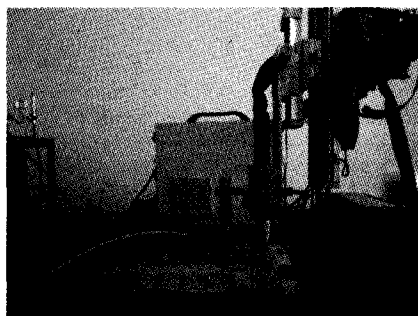


图 1 TIG 增材制造系统

表 1 ER4043 焊丝化学成分(质量分数,%)

Si	Fe	Cu	Mg	Al
5	≤0.04	≤0.05	≤0.10	余量

在尺寸为 4 mm × 15 mm × 15 mm 的基板上进行 TIG 增材制造。焊接电流为 100 A,送丝速度为 1 250 mm/min,焊接速度为 300 mm/min,弧长保持为 3 mm,气体流量 15 L/min。在制造过程中保持送丝方向不变,每熔敷一层金属后,焊枪抬高一定高度,之后进行

下一层金属的熔敷。制造的方框型零件如图 2 所示,方框的边长为 100 mm,高 70 mm。共 50 层,平均层厚 1.4 mm,平均壁厚 7.0 mm。

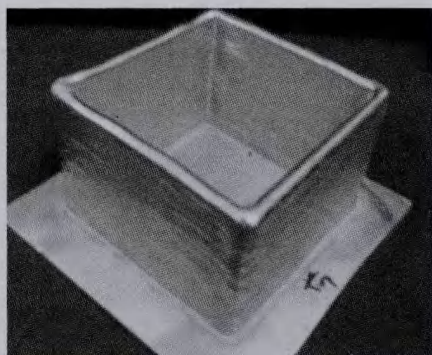


图 2 4043 铝合金零件

2 组织特征

采用 X 射线衍射 (XRD) 的方法对沉积态 4043 铝合金进行物相分析,测试结果如图 3 所示。可以发现在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内有 8 个衍射峰。分析可知,其中 5 个峰为 Al, 3 个峰为 Al-Si 共晶 ($\text{Al}_{3.21}\text{Si}_{0.47}$)。因此,沉积态 4043 铝合金由 Al 和 Al-Si 共晶两相组成。

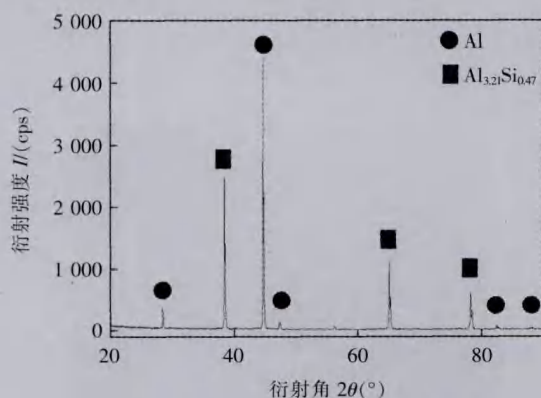
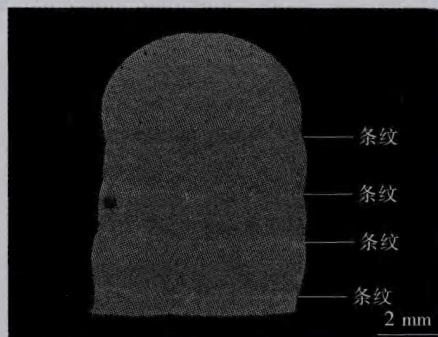


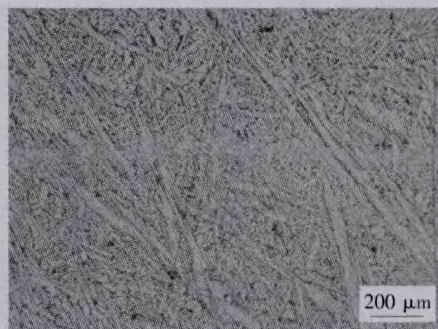
图 3 X 射线衍射分析结果

图 4a 为 TIG 增材制造零件的横截面图,经打磨抛光后采用凯勒试剂腐蚀 3 s。可以发现,在界面上有等距离分布的明亮条纹,条纹平行分布,使材料具有明显的层状特征。对条纹区域附近进行放大可以得到图 4b。可以发现,沉积态 4043 铝合金的组织中有着大量的柱状晶,柱状晶细而长,垂直穿过了条纹区域,呈现了连续生长的现象。在图 4c 中可以观察到的柱状晶的微观结构,可以发现柱状晶有着茂盛的树枝结构,枝晶间隙存在着大量的 Al-Si 共晶相。由 Al-Si 合金相图可知,共晶相中 Si 的含量为 12.6%,而焊丝材料中 Si

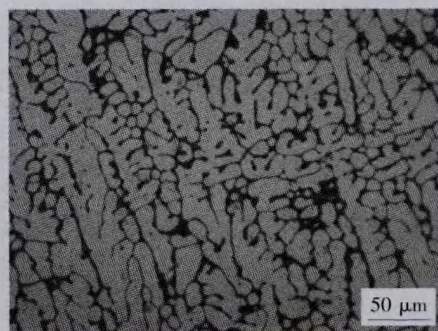
元素的平均含量仅为 5%。这是由于液态金属凝固过程中合金元素来不及扩散,先凝固的晶粒内部区域的合金元素含量较少,后凝固的枝晶间隙和晶界位置的合金元素含量较多,因此产生了枝晶偏析现象。



(a) 宏观形貌



(b) 条纹形貌



(c) 微观组织

图 4 沉积态 4043 铝合金组织特征

分析认为,材料中的明亮条纹区域是每次焊接过程中的对应熔合区 (Fusion Zone)。在焊接过程中,这一区域处于材料熔点温度附近,为半熔化状态。如图 5 所示,对沉积态 4043 铝合金中条纹区域 A 和非条纹区域 B 的进行能谱分析 (EDS),测试结果显示, A 区域中 Si 的含量分别为 7.35%, 而 B 区域中 Si 的含量为 4.34%。条纹区域中 Si 的含量要明显多于非条纹区域的含量。而与材料中 Si 的平均含量 5% 相比,条纹区

域要高于平均含量,非条纹区域要低于平均含量。因此,沉积态 4043 铝合金中存在着一种层内偏析现象。同时,由于沉积态材料的层状特征,这种层内偏析现象会重复出现,使整个材料呈现一种连续层间偏析现象。

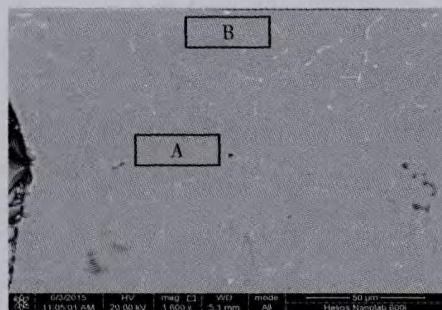


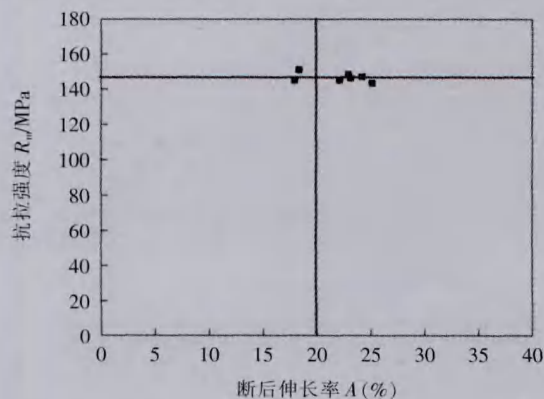
图5 能谱分析位置

3 力学性能

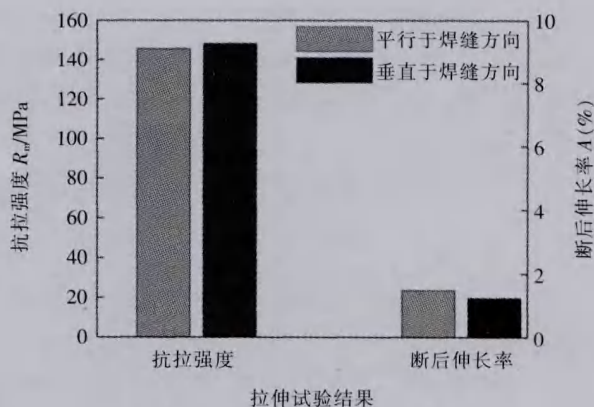
为探究沉积态 4043 铝合金力学性能,在平行于焊缝方向和垂直于焊缝方向各取 4 个拉伸试样,并用万能试验机进行拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/min。以抗拉强度来表征材料的强度,以断后伸长率来表征材料的塑性。

测试结果显示,沉积态 4043 铝合金的平均抗拉强度为 146.7 MPa,平均断后伸长率为 19.11%。力学性能的分布特征如图 6a 所示,可以发现材料的抗拉强度数据分布比较集中,而断后伸长率的数据分布则比较分散,因此可知,材料的强度性能比较稳定而塑性性能的稳定性较差。

对测试方向的对比结果如图 6b 所示。平行于焊缝方向试样的抗拉强度平均为 145.5 MPa,而垂直于焊缝方向的抗拉强度平均为 148.2 MPa,相差 2%,但考虑到试验误差的存在,可以认为这一差距不显著。平行于焊缝方向与垂直于焊缝方向材料的断后伸长率分



(a) 力学性能

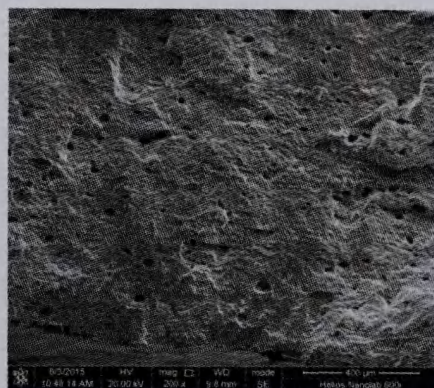


(b) 测试方向对材料力学性能的影响

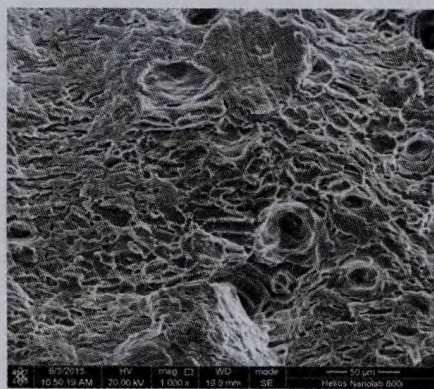
图6 拉伸测试结果

别为 23.65% 和 19.73%, 相差为 3.92%, 这一差别显著可信。因此,可以认为材料的强度性能在各方向上均匀一致,而塑性性能在各方向存在一定的差异。

对拉伸试样的断口进行观察,可以发现在平行于焊缝方向和垂直于焊缝方向具有类似的断口形貌。图 7a 为平行于焊缝方向拉伸试样的断口形貌。在放大倍



(a) 放大倍数 200 倍



(b) 放大倍数 1 000 倍

图7 断口形貌

数 200 倍下可以发现,断口中有着大量的韧窝、撕裂棱和孔隙缺陷。其中韧窝和撕裂棱是明显的韧性断裂特征。对断口进一步放大,如图 7b 所示,可以发现,孔隙缺陷多为气孔缺陷,且直径一般在 50 μm 以下。通常情况,这种尺寸的气孔对材料的力学性能的影响较小。

4 分 析

TIG 增材制造是基于 TIG 焊的增材制造方法,而采用这种方法制造的沉积态 4043 铝合金兼有两种工艺的特征。由于在 TIG 焊接过程中,液态金属的凝固速度较快,而合金元素的扩散速度相对较慢,这样先结晶的位置合金元素含量较低,而后结晶的位置合金元素含量较高,因此造成了合金元素在不同区域的分布不均匀。在晶粒的尺度,晶粒内部要先于晶界凝固,由晶核向晶界 Si 元素含量逐渐增加,因此在晶界位置形成了 Si 含量远高于平均浓度的 Al-Si 共晶。沉积态金属具有明显的分层特征,对于一个层的尺度来说,总是距离熔合线越近的区域 Si 的含量越低,而距离越远 Si 含量最高。在沉积态 4043 铝合金中,条纹是铝合金的焊接中熔合线位置。当一层金属熔敷时,熔合线便成为前一层金属的最顶端,这样 Si 元素的含量在条纹区域要高于同一层的非条纹区域。同时,沉积态材料是逐层堆积而成的,这样每层中都存在一个 Si 元素的层内偏析现象,这样在整个沉积态 4043 铝合金中便形成了连续的层间偏析现象。

铝合金的强度可来自以下几个方面,纯铝基体强度、晶界强化、位错强化、固溶强化和沉淀强化。增材制造的特征使材料无法形变,因此无位错强化。而 4043 铝合金又没有弥散分布的强化相,材料无法得到沉淀强化。因此,沉积态 4043 铝合金的强度来自于纯铝基体、晶界强化和固溶强化。其中晶界强化效果 σ 可由 Hall - Petch 公式表示:

$$\sigma = kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中, d 是平均(亚)晶粒直径; k 是表征滑过晶界难易程度的一个常数。

然而,晶界强化在合金强度中所占的比重通常较小,C. Callais^[8]的研究结果显示,在晶粒尺寸为 100 μm 时,晶界强化对铝合金的增强效果的贡献仅为 2 MPa,而当晶粒尺寸细化至 10 μm 时,增强效果也仅为 6.3 MPa。这样,沉积态 4043 铝合金的强度主要来自于纯铝基体的强度和固溶强化。而纯铝基体强度和固溶强化作用是不存在方向性的,因此材料不具有力学性能各向异性。

5 结 论

(1) 沉积态 4043 铝合金中以柱状树枝晶为主,晶粒可以穿越层间条纹区域并沿着垂直于焊缝的方向定向生长。

(2) 材料中存在两种偏析现象:枝晶偏析和连续层间偏析。

(3) 焊接过程具有快速冷却的特征,增材制造具有逐层熔敷特征,两者共同作用形成了沉积态 4043 铝合金的连续层间偏析现象。

(4) 沉积态 4043 铝合金的强度主要来自纯铝基体的强度和固溶强化作用,而两者都不具有方向性,因此材料不具备力学性能的各向异性。

参 考 文 献

- [1] Keicher D M, Smugeresky J E, Romero J A, et al. Using the laser engineered net shaping (LENS) process to produce complex components from a CAD solid model [C]. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, Orlando, USA, 1997.
- [2] 陈云霞. 扫描电子束三维成型的研究[D]. 上海:上海交通大学博士学位论文, 2010.
- [3] 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, 35(10): 1-4.
- [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, USA, 2000.
- [5] 姜云禄. 基于冷金属过渡技术的铝合金快速成形技术及工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2013.
- [6] 徐富家. Inconel625 合金等离子弧快速成形组织、控制及工艺优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文, 2013.
- [7] Skiba T, Baufeld B, Biest O. Microstructure and mechanical properties of stainless steel component manufactured by shaped metal deposition [J]. ISIJ International, 2009, 49(10): 1588-1591.
- [8] Callais C. Modelling the relationship between process parameters, microstructural evolutions and mechanical behaviour in a friction stir weld 6xxx aluminium alloy [C]. Proceedings of 5th International FSW Symposium, Metz, France, 2004.

作者简介: 柏久阳, 1987 年出生, 博士研究生。主要从事电弧增材制造研究。