

丝材电弧增材制造常用材料及其缺陷研究进展

任学磊, 袁涛

北京工业大学汽车零部件先进制造技术工程研究中心 北京 100124

摘要: 丝材电弧增材制造技术已经适用于多种材料制造, 但是丝材电弧增材制造过程十分复杂, 容易产生各种缺陷, 这给丝材电弧增材制造构件的广泛应用带来了限制。因此, 需要讨论各种材料在丝材电弧增材制造中的应用情况和材料加工方面的挑战, 包括高残余应力、裂纹等缺陷。总结了当前用来改善构件缺陷的常用手段, 提出了未来该工艺可能的完善方向。

关键词: 电弧增材制造; 丝材; 缺陷; 改善方法

1 序言

增材制造技术是通过CAD设计数据, 采用材料逐层累加的方法制造实体构件的技术^[1]。与传统制造技术相比, 增材制造技术应用计算机软件构建相应的三维模型, 规划路径后直接生产, 可以快速而精确地制造出各种复杂零件, 大大减少了生产周期, 降低了制造成本, 减少了人力物力, 且通常对环境友好^[2]。当前增材制造技术适用于各种材料, 例如金属、聚合物、陶瓷和混凝土等。尤其是金属增材制造, 作为增材制造领域的研究重点, 广泛应用于航空航天、汽车及生物学等各个领域^[3, 4]。因此, 开展金属增材制造的研究不仅具有十分重要的理论意义和实用价值, 还具有重要的战略意义^[5]。

金属增材制造一般按照热源的差别分为三大类: 电子束增材制造 (Electron Beam Additive Manufacturing, EBAM)、激光增材制造 (Laser Additive Manufacturing, LAM) 和丝材电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)。与LAM和EBAM相比, WAAM使用金属丝作为原料, 成本较低, 提高了材料沉积效率, 避免了外围粉末回收的过程, 有益于身体健康和安全^[6], 且与EBAM相比, WAAM不需要在真空环境下即可工作, 大大减少了运行成本, 工作环境不受限制, 可适用于大体积的构件制造。与LAM相比, 能源利用率和制造效率都有很大的改善。由于WAAM相比于

其他金属增材制造技术, 具有制造效率高、设备成本低、制造形式灵活等特点^[7], 因此WAAM在金属增材制造中具有广阔的发展前景。

但是, 由于WAAM技术是一个多参数耦合作用的复杂过程, 焊接过程中易受各种因素影响, 导致缺陷累积, 因此使得其应用受到了限制。本文调研了各种适用于WAAM的金属的组织性能, 主要包括: 钛合金、铝合金和钢等, 分析了目前所遇到的缺陷和挑战, 介绍了当前应用的WAAM系统, 总结了用于制造过程中和制造后质量改进的主要方法, 最后提出了未来的研究方向和建议。

2 WAAM系统及材料应用

(1) WAAM系统 WAAM工艺的起源可以追溯到1925年, 发展至今, WAAM已成为一种有潜力的制造工艺, 并且适用于各种金属材料, 如: 钛合金、铝合金及钢等。

WAAM技术的热源包括: 熔化极气体保护焊 (Gas Metal Arc Welding, GMAW)、钨极气体保护焊 (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)、等离子弧焊 (Plasma Arc Welding, PAW)。WAAM技术采用电弧作为热源将金属丝材熔化, 在设备的操控下, 设备内部送丝系统送出的金属丝会与电弧作用区域重合, 按照给定的CAD模型, 规划运动路径和焊接参数, 以实现具有高几何精度的无缺陷制造^[8]。另外, 基于制造零件的特定材料属性和焊接沉积模型, 编程软件提供了自动路径规划和工艺

优化,以避免潜在工艺引起的缺陷^[9]。在制造过程中,机械手和外轴为焊枪提供了精确的运动,从而可以逐层构建组件直至成形金属件。图1为WAAM系统结构示意图。

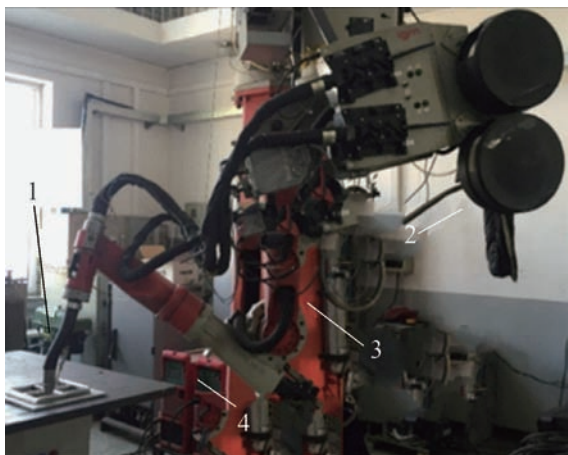


图1 WAAM系统结构示意图

1.双丝焊枪 2.双送丝系统 3.igm机器人 4.双焊机

(2) 常用材料 由于WAAM工艺可适用于各种商用金属焊丝,制造出各种可靠零件,因此需要了解各种材料的工艺参数,并对各种常见缺陷的产生原因及强化措施有所了解,下面将重点介绍WAAM中常用金属的组织性能。

1) 钛合金由于其较高的比强度和优异的力学性能,广泛应用于航空航天和生物医学的增材制造领域。Yefei Zhou^[10]通过对WAAM的Ti-6Al-4V不同沉积方式的成形、力学性能进行了探究,发现抗拉强度在一定区间变化,主要取决于拉伸方向和热输入,抗拉强度最高可达到948MPa,伸长率达到了14%。垂直方向的伸长率略高而强度略低。Bintao Wu^[11]通过对Ti-6Al-4V的GTAM构件进行了耐腐蚀性、组织和相组成的探究,因为冷却速度的不同在垂直方向上发现了大的层状 α 晶粒,水平方向上发现了较小的 α' 晶粒,因此导致其腐蚀行为的各向异性。E.Brandl^[12]等人对WAAM的Ti-6Al-4V钛合金进行了组织性能的探究,发现其抗拉强度最高可以达到960MPa,屈服强度最高达到了890MPa,并且经过热处理后抗拉强度和屈服极限分别可达到981MPa和915MPa,其力学性能完全满足ASTM锻造与铸造的最低标准。

2) 铝合金由于其较高的性价比,同样是增材制造中被广泛研究的金属之一。蒋旗^[13]对比了不

同工艺下增材制造4043铝合金,抗拉强度可以达到172MPa,而且没有明显的各向异性。孙红叶^[14]对Al-6.3Cu铝合金电弧增材制造进行了组织性能研究,发现其抗拉强度可以达到261MPa,屈服强度可以达到123MPa,低于ASTM锻造的最低标准,但是在经过热处理后,其抗拉强度和屈服强度分别可达到440MPa和350MPa,完全满足ASTM锻造的最低标准。

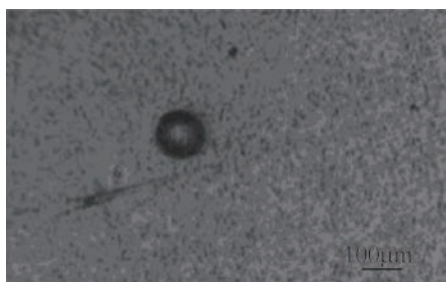
3) 还有其他金属,如:钢、镍、镁等合金都在增材制造中有着广泛应用。由于镍基高温合金在550℃以上的温度时具有出色的强度和抗氧化性,因此广泛应用于航空航天、石化和海洋工业。迄今为止,相关科研人员已经研究了各种镍基高温合金以及各种不锈钢。这些合金不仅可以用于一般用途,而且还可以用于高强度和高硬度条件,例如工具或其他成形应用^[15]。与传统生产的钢相比,增材制造的钢表现出不同的微观结构和析出相,这可能导致力学性能的变化^[16],所以需要关注并避免缺陷的产生。

3 工艺缺陷

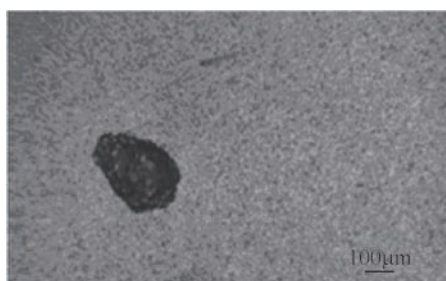
尽管WAAM的优点有很多,但是WAAM制造仍然有一些缺陷需要关注并解决。这些缺陷包括高孔隙率、高残余应力与变形、开裂和各向异性的力学性能等。这些是WAAM广泛应用所面临的挑战。下面将简要介绍一些常见缺陷。

(1) 气孔 气孔是增材制造中一个常见的缺陷,严重影响构件的力学性能,因此需要着重注意。气孔的增加不仅会大幅降低构件力学性能和疲劳强度,更严重的还会导致各向异性和裂纹等缺陷。通常这类缺陷主要是由原材料(焊丝和基板)或者加工过程引起的。

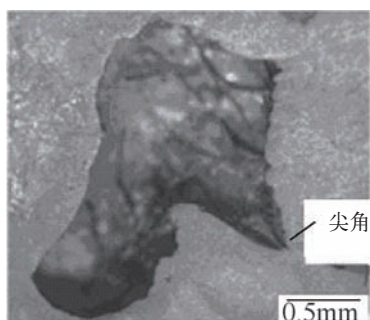
首先,增材制造的原材料表面通常会有一定的表面污染,例如:水分、油脂或者其他一些碳氢化合物。这些污染物在增材过程中很容易进入到熔池中去,并在凝固后产生气孔。在增材制造常用材料中,铝合金尤其容易产生这一缺陷,这主要是由于氢在熔融和固态铝合金中溶解度差异巨大导致的^[17],由此产生的缺陷通常为球形气孔,如图2a所示。其次在加工过程中,因增材工艺而导致熔合不充分等造成的气孔一般是非球形的,如图2b、c所示。



a) 球形



b) 非球形



c) 非球形

图2 焊缝气孔形貌^[18]

(2) 残余应力与应变 残余应力与应变是WAAM工艺固有的缺陷，像其他增材制造工艺一样，是无法避免的。主要是增材制造过程当中温度的骤变，由此产生热应变和残余应力，而残余应力会导致构件变形、尺寸精度下降，而且会致使构件的疲劳性能和抗断裂性能降低^[19]。因此，对残余应力变化的监测与控制是增材制造领域中的重要挑战。

残余应力产生的主要原因一方面是因为在热源加热过程中，局部加热和冷却引起的空间温度梯度。另一方面是在这种加热和冷却过程中，导致的材料膨胀和收缩。而且很多工艺参数都对残余应力和变形有影响，如：环境温度、约束条件、熔覆速度及焊接电流等。目前，已经有可以有效减轻残余应力和变形的的方法，这些方法将在后文有所介绍。

(3) 裂纹 WAAM中的裂纹主要分为凝固裂纹和液化裂纹。前者主要取决于材料属性，通常是由于沉积层在凝固过程中受到了阻碍或者是由熔池中的高应变引起的，后者主要分布在糊状区或部分熔化区，在构件凝固过程中部分熔化区由于沉积层的收缩会受到收缩力的影响，由此可能会产生液化裂纹。尤其是在WAAM的异种金属制造中，由于材料属性的不同，更容易产生裂纹。

4 优化处理研究现状

如前所述，WAAM中还存在着其他许多缺陷，因此WAAM结构件通常需要采取一定的后处理或者辅助工艺来改善构件性能，减小甚至消除缺陷。目前，已经有众多学者对这一领域进行了研究，下面将重点阐述一些工艺手段。

(1) 脉冲电流 施加脉冲电流是一种广泛应用于改善增材构件组织性能的一种手段，脉冲电流一方面基于振荡效果促进了熔池流动，这可能导致熔池糊状区发生枝晶破碎，使部分熔化区发生晶粒脱落，从而促进了晶粒细化，改善了构件组织性能。另一方面在脉冲高电流阶段控制熔滴分离，低电流阶段维持电弧稳定^[20]，热输入减少，加快冷却速度，也优化了组织性能。脉冲电流基本适用于各种金属增材制造。M.Balasubramanian^[21]探究了不同脉冲电流对钛合金显微组织与力学性能的影响，发现脉冲电流促进了钛合金针状马氏体的形成，增加了等轴晶的形成，使钛合金的硬度达到了490HV。Mingxuan Yang^[22]等人探究了高频电流对Ti-6Al-4V焊接过程中电弧行为的影响，发现高脉冲电流产生了电弧收缩，使能量更加集中，增大了电弧力，促进了晶粒细化，使其力学性能得到了很大的提升。

(2) 热处理 热处理是WAAM中广泛应用的另一种强化手段，热处理可以有效减小残余应力，增强构件力学性能。然而对于不同的材料或增材工艺有着不同的热处理工艺，而不同的热处理工艺会大大改变内部的组织特征及析出相，从而显著影响组织性能。Jianglong Gu^[23]探究了T6热处理对铝合金的增材结构件的组织性能影响，发现热处理后，铝合金的力学性能得到了大幅提高，晶粒直径更加均匀，各向异性明显减轻，抗拉强度和屈服强度分别达到了450MPa和305MPa，而且探究发现，其主

要的强化机制是沉积强化。X. Fang^[24]等人通过对比A357铝合金薄壁有无热处理的影响,发现热处理后,构件内的气孔数量明显减少,强度和伸长率在各方向上近似同性,显著提升了显微硬度和强度。使之达到了铸件的最低要求。但是该技术也有一定的弊端,会导致晶粒变得粗大,不仅增大气孔还会导致少数材料被破坏,因此,在使用热处理工艺时,需要考虑具体的材料属性与应用。

(3) 层间轧制 已有研究表明,层间冷轧不仅可以降低残余应力、变形^[25],还可以明显改善构件的各向异性。层间轧制(设备见图3)不仅可以有效地细化晶粒,它可以有效降低钛合金、铝合金、钢等增材构件的各向异性和残余应力。Jianglong Gu探究了不同载荷下(15kN、30kN和45kN)的层间轧制对铝合金组织性能的影响,发现在45kN的载荷下,抗拉强度提高了20%,屈服强度提高了87%,并且发现主要的强化机理是层间轧制增加了高密度位错,并且能破碎粗大的柱状晶组织,显著提高了构件硬度和强度。但是层间轧制工艺的使用仅适用于直壁等简单形状构件,不适用曲面或更复杂、不规则的构件,且效率较低,有一定的局限性。



图3 层间轧制设备

1.基板 2.轧制轮 3.水泵 4.CMT焊枪

5 结束语

由于金属电弧增材制造的飞速发展,工艺的稳

定性,缺陷的控制、消除,以及生产具有高质量的力学性能构件已成为这一领域的关键研究重点,因此对材料性质的探究,制造过程中的监测控制和后处理变得至关重要。通过对WAAM工艺的技术发展进行部分回顾,重点阐述了材料性能、工艺缺陷和改善方法。虽然这些研究克服了WAAM中的一些挑战,但还有很大的改进空间,由此可以得出一些对未来高质量、无缺陷构件制造技术的展望。

1) 材料成分与微观组织决定了构件的性能,对制造过程中微观结构的演变、推测与控制十分重要,但由于WAAM工艺的复杂性,难以对其过程进行详细观测,因此有限元分析的方法变得十分重要。通过计算机仿真来对制造过程进行预测,建立“材料属性-制造工艺-微观组织-力学性能”的一般规律。

2) 进一步优化WAAM设备(如焊接机器人、数控系统等),提高构件尺寸精度,结合仿真模拟确定最优参数,以制造性能最佳的零件。还应建立功能更加强大与完善的WAAM系统,做到“制造-加工”一体化,在制造过程中即进行零件加工,减少甚至无需后处理,节约时间,增大原材料的成品工件转换率。

参考文献:

- [1] 卢秉恒. 我国增材制造技术的应用方向及未来发展趋势[J]. 表面工程与再制造, 2019, 19 (1): 11-13.
- [2] Amit Bandyopadhyay, Yanning Zhang, Susmita Bose. Recent developments in metal additive manufacturing[J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2020, 28: 96-104.
- [3] C.J. Smith, S. Tammis-Williams, P.S. Mahoney, et al. 3D printing a jet engine: An undergraduate project to exploit additive manufacturing now and in the future[J]. Materials Today Communications, 2018, 16: 22-25.
- [4] S.A.M, Tofail. E.P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities[J]. Materials Today. 2018, 21 (1): 22-37.
- [5] 冯毅, 张鹏贤, 贾金龙. 近两年丝材+电弧增材制造研究进展[J]. 热加工工艺. 2018, 47 (21): 23-26.
- [6] H. P. Tang, M. Qian, N. Liu, et al. Effect of Powder

- Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting[J]. JOM, 2015, 67 (3) : 555-563.
- [7] 何建斌, 许燕, 周建平, 等. 金属增材制造技术的研究进展[J]. 机床与液压. 2020, 48 (2) : 171-175.
- [8] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, et al. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation[J]. Journal of Cleaner Production. 2016, 133: 942-952.
- [9] D. Ding, C. Shen, Z. Pan, et al. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part[J]. Computer-Aided Design, 2016, 73: 66-75.
- [10] Y. Zhou, G. Qin, L. Li, et al. Formability, microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V deposited by wire and arc additive manufacturing with different deposition paths[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772: 138654.
- [11] B. Wu, Z. Pan, S. Li, et al. The anisotropic corrosion behaviour of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2018, 137: 176-183.
- [12] E. Brandl, B. Baufeld, C. Leyens, et al. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 595-606.
- [13] 蒋旗, 张培磊, 刘志强, 等. 冷金属过渡加脉冲电弧增材制造4043铝合金薄壁件的组织与拉伸性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44 (1) : 57-61.
- [14] 孙红叶, 从保强, 苏勇, 等. Al-6.3Cu铝合金电弧填丝增材制造成形与组织性能[J]. 航空制造技术, 2017 (14) : 72-76.
- [15] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 172-196.
- [16] J. Yan, M. Chen, W. Quach, et al. Mechanical properties and cross-sectional behavior of additively manufactured high strength steel tubular sections[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106158.
- [17] E. M. Ryan, T. J. Sabin, J. F. Watts, et al. The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 577-584.
- [18] 黎硕, 王军, 杨上陆, 等. 铝合金激光-MIG复合焊接气孔缺陷研究[J]. 应用激光, 2013, 33 (6) : 595-600.
- [19] P. Mercelis, J. P. Kruth. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12 (5) : 254-265.
- [20] C. R. Cunningham, J. M. Flynn, A. Shokrani, et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018: 22, 672-686.
- [21] M. Balasubramanian, V. Jayabalan, V. Balasubramanian. Effect of microstructure on impact toughness of pulsed current GTA welded $\alpha-\beta$ titanium alloy[J]. Materials Letters, 2008, 62 (6-7) : 1102-1106.
- [22] M. Yang, H. Zheng, B. Qi, et al. Effect of arc behavior on Ti-6Al-4V welds during high frequency pulsed arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 9-15.
- [23] J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, et al. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 18-26.
- [24] X. Fang, H. Li, X. Li, et al. Effect of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of wire-arc additively manufactured A357 alloy components[J]. Materials Letters, 2020, 269: 127674.
- [25] T. Wen, S. Liu, S. Chen, et al. Influence of high frequency vibration on microstructure and mechanical properties of TIG welding joints of AZ31 magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (2) : 397-404.