

增材制造 7xxx 系铝合金材料研究现状

张 鑫 陈大辉 洪晓露 张 将 吴良玉 朱金玉

(中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103)

摘 要 7xxx 系铝合金作为一种可热处理强化的超高强铝合金, 广泛应用于航空、航天、兵器等领域。新兴的增材制造为 7xxx 系铝合金的应用提供了全新的可能, 近几年需求越来越大。然而, 7xxx 铝合金的凝固区间大、易产生热裂纹、增材制造难度较大, 成分调控是改善增材制造 7xxx 系铝合金组织及力学性能的可行方法。总结了近些年来国内外增材制造 7xxx 铝合金的研究现状, 通过对合金成分及组织性能的分析, 得出增材制造用 7xxx 系铝合金成分设计原则, 即在传统熔焊方法下焊接性好且不含 Cu 元素的 Al-Zn-Mg 系铝合金的基础上, 添加 Sc、Zr 等微量元素或 TiC、TiB₂ 等微纳陶瓷颗粒, 或添加 Si 等共晶形成元素, 为增材制造用高性能 7xxx 系铝合金的开发提供了思路。

关键词 7xxx 系铝合金; 增材制造; 冶金缺陷; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG444

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240528

Research Status on 7xxx Aluminum Alloy Materials by Additive Manufacturing

ZHANG Xin, CHEN Dahui, HONG Xiaolu, ZHANG Jiang, WU Liangyu, ZHU Jinyu

(The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103)

Abstract: As a heat treatable ultra-high strength aluminum alloy, 7xxx aluminum alloy is widely used in aviation, aerospace, weapons and other fields. Novel additive manufacturing process provides new possibilities for application of 7xxx series aluminum alloys with sharp demand in recent years. However, large solidification range of 7xxx aluminum alloy leads to hot cracks, enhancing the difficulty in additive manufacturing. Composition regulation is a feasible method to improve the microstructure and mechanical properties of 7xxx aluminum alloys in additive manufacturing. Recent research progress in 7xxx aluminum alloy materials for additive manufacturing was reviewed at home and abroad, and the composition design principles for 7xxx series aluminum alloys for additive manufacturing were obtained through analysis of alloy composition and properties, which was adding trace elements such as Sc and Zr, micro-nano ceramic particles such as TiC and TiB₂, or eutectic forming elements such as Si on the basis of Cu-free Al-Zn-Mg alloy with satisfied weldability in conventional fusion welding processes, providing ideas for the development of high-performance 7xxx aluminum alloy materials for additive manufacturing.

Key Words: 7xxx Aluminum Alloy, Additive Manufacturing, Metallurgical Defects, Mechanical Properties

增材制造 (Additive manufacturing, AM), 又称 3D 打印, 是一种采用三维化的数字模型为基础, 借助专业的设备, 将材料逐层累加制造实体零件的技术^[1]。增材制造按照热源可分为激光增材制造、电弧增材制造和搅拌摩擦焊增材制造等^[2]。不同于传统的减材制造, 增材制造技术在节省材料、缩短工时及成形复杂构件等方面存在显著优势, 已在诸多领域得到广泛应用^[3]。

7xxx 系铝合金是以 Zn、Mg 为主要强化元素的一类铝合金, 可时效强化, 具有密度小、比强度高及耐腐蚀性强等特点, 是航空航天、国防军工等领域广泛应用的轻量化结构材料, 在应急修复、复杂异性构件成形等方

面需求迫切。但 7xxx 系铝合金因合金元素含量高、凝固温度区间宽、焊接性能差, 在增材制造中易产生周期性热裂纹和粗大柱状晶, 导致增材制造构件性能偏低。目前尚无成熟的专门适用于增材制造的 7xxx 系铝合金材料, 而现有 7xxx 系铝合金增材制造主要针对 7075、7050 铝合金等成熟牌号, 其在增材制造过程中易产生大量的裂纹和气孔缺陷, 有必要通过成分调控解决。本研究通过分析国内外增材制造用 7xxx 系铝合金的化学成分、组织与性能, 给出增材制造用 7xxx 系铝合金的成分设计原则, 为增材制造用高性能 7xxx 系铝合金的开发提供参考。

收稿日期: 2024-12-16; 修订日期: 2025-06-03

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2025M784431); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2025QN05019)

第一作者: 张鑫, 男, 2001 年出生, 硕士研究生, E-mail: 2546117533@qq.com

引用格式: 张鑫, 陈大辉, 洪晓露, 等. 增材制造 7xxx 系铝合金材料研究现状[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(7): 1 022-1 027.

ZHANG X, CHEN D H, HONG X L, et al. Research status on 7xxx aluminum alloy materials by additive manufacturing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 1 022-1 027.

1 7xxx 系铝合金增材制造工艺

1.1 激光增材制造

激光增材制造技术是利用金属粉末在激光束的热作用下快速熔化并凝固的一种技术。根据材料沉积时的状态可分为激光定向能量沉积(Direct energy deposit, DED)和激光粉末床熔融(Laser powder bed fusion, LPBF)两类,激光粉末床熔融技术又可称为激光选区熔化技术(Selective laser melting, SLM)^[4],其原理图见图1。激光增材已被证明适用于铝合金,但主要局限于铸造性良好的 Al-Si 系合金。7xxx 系铝合金因激光吸收率低,热导率高,易氧化、易烧损,有很强的热裂倾向,激光增材制造难度极大。KAUFMANN N 等^[5]通过 SLM 直接成形 7075 铝合金,发现试样内部均有热裂纹产生,且大多数裂纹沿沉积方向,裂纹形貌见图2。因此,研发更加适用于激光增材制造的 7xxx 系铝合金改性粉末成为发展方向。

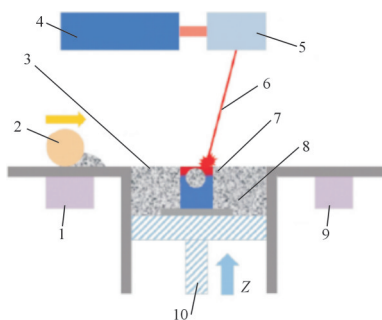


图1 激光粉末床熔融技术原理图^[4]

Fig.1 Mechanism diagram of laser powder bed fusion^[4]

1.粉末传送系统 2.滚轴 3.粉末床 4.激光 5.X-Y扫描系统 6.激光束 7.打印件 8.基体 9.粉末收纳盒 10.制造活塞

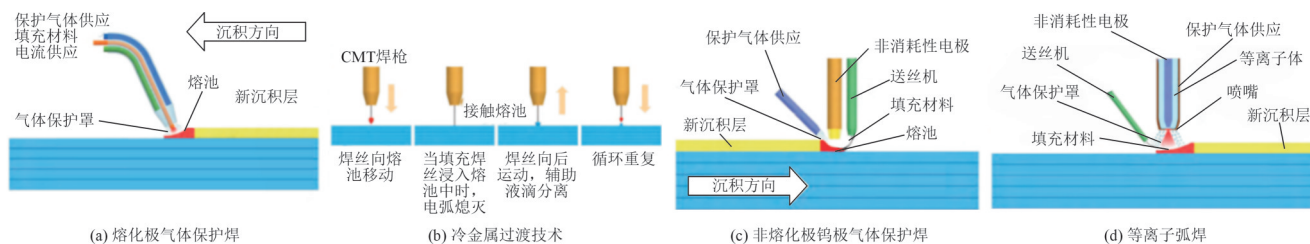


图3 电弧增材制造工艺分类^[6]

Fig.3 Classification of WAAM process^[6]

1.3 其他增材方式

除激光增材和电弧增材,还有一些其他的可用于铝合金增材的工艺,包括但不限于:①搅拌摩擦增材^[7],搅拌摩擦增材是利用材料与板材之间摩擦产生的摩擦热以及金属剧烈塑性变形产生的黏塑性沉积层逐层堆积实现的。这种增材方式,省去熔化和凝固过程,从根

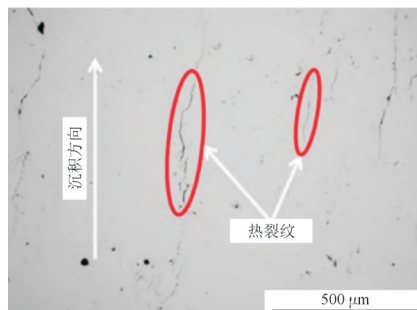


图2 SLM制备7075铝合金试样中的热裂纹形貌^[5]

Fig.2 Hot cracks of SLMed 7075 aluminum alloy specimens

1.2 电弧增材制造

电弧增材制造(Wire arc additive manufacturing, WAAM)是通过电弧热源熔化焊丝,通过焊缝的一层层堆叠完成零件制造的材料成形方法,其熔覆效率和材料利用率高、生产周期短,且相较于激光增材技术,不需要考虑铝合金自身的高反光率。但电弧增材制造零件精度不高,表面粗糙度大,需要经过后续加工才能使用。根据热源不同,可分为^[6]:熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)、冷金属过渡技术(Cold metal transfer, CMT)、非熔化极钨极气体保护焊(Gas tungsten arc welding, GTAW)和等离子弧焊(Plasma arc welding, PAW),其原理图见图3。电弧增材制造技术的电弧热输入较大,温度梯度较小,能够减少裂纹的产生,适用于高强度铝合金的成形,是实现 7xxx 系铝合金构件高效高质量成形最具潜力的方法。电弧增材制造 7xxx 系铝合金结构件的关键在于如何解决堆积金属的气孔缺陷。除通过优化增材制备工艺外,降低焊丝的氢含量也是减少气孔缺陷的有效办法。

源上避免了热裂纹、合金元素挥发和气孔等问题,但对构件进行 T6 热处理时更容易发生晶粒的异常长大,因为金属经强烈塑性变形后位错增殖,加热过程中容易发生回复再结晶。②复合增材^[8],为了弥补各类增材制造的不足,研究者开发了复合增材制造工艺,按照外加不同辅助加工方式又可以分为3大类:一类是与切削加工相结合的增减材复合制造技术,将增材制造与切削

加工相结合,既可以发挥增材制造效率高、材料利用率高等特点,还可以配合切削加工表面精度高的特点直接成形;二是与轧制、锻造等工艺相结合的增材制造技术,通过在增材过程中或后处理阶段引入轧制、锻造等工艺,使构件产生较大的塑性变形,内部组织更加致密、晶粒更加细化,进而获得良好的性能;三是与电磁、超声等能量场相结合的复合制造技术,通过超声波、电磁等作用于熔池,改善熔池流动、结晶形核等,进而改善晶粒结构、微观组织等。

2 增材制造 7xxx 系铝合金成分

合金成分对其组织、性能及内部缺陷的影响极为关键,且由于增材制造成形方式的特殊性,难以通过工艺调控及后续处理来改善合金内部组织及缺陷。表 1 为目前国内外增材制造用 7xxx 系铝合金的化学成分。可以看出,激光增材用铝合金有 7075 铝合金和不含 Cu 元素的 Al-6Zn-2Mg 铝合金,电弧增材用 7xxx 系铝合金包括 7050 铝合金、7A55 铝合金以及不含 Cu 元素的 Al-4Zn-6Mg、Al-5Zn-3Mg 铝合金。在成分改性上,合金添加了微量的 Sc、Zr、Ti 等元素或微量的 TiN、TiB₂、SiC 等微纳颗粒或 4%~5% (质量分数,下同) 的 Si 元素。综合分析,增材制造用 7xxx 系铝合金成分设计主要可分为 4 类:①调控 7xxx 系铝合金中主要强化元素

的组成及含量。常规含 Cu 的 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金(如 7075、7050 等)因合金元素含量高、热裂倾向大,传统熔焊方法的焊接性较差,并不适合直接用于激光增材或电弧增材。相比而言,不含 Cu 的 Al-Zn-Mg 铝合金(见表 1)的合金元素含量适中,热裂倾向低,传统熔焊方法的焊接性较好,是理想的增材制造铝合金。在选择增材制造用 7xxx 系铝合金时,优先选择传统熔焊方法下焊接性好的 7xxx 系铝合金材料,如 7005 (Al-4.5Zn-1.5Mg)、7A52 (Al-4.5Zn-2.5Mg) 铝合金等,激光增材和电弧增材其本质也是一种熔焊工艺。②添加微量细化元素,如 Sc、Zr、Ti 等,尤其是 Sc、Zr 两种元素复合添加能起到较佳的晶粒细化效果,避免热裂纹的产生。③添加微量的微纳颗粒,如 TiN、TiB₂ 等。微纳陶瓷颗粒作为异质形核的质点促进晶粒细化,降低热裂纹的产生倾向,尤其在激光增材工艺下,将微量的陶瓷颗粒与 7xxx 系铝合金粉末混合均匀,能起到较好的细化晶粒效果。④添加共晶组织形成元素,如 Si 元素。通过差热分析显示,质量分数为 4% 的 Si 可使熔点降低 17 ℃,Si 元素能够与 7xxx 系铝合金中的 Mg 元素生成低熔点 Mg₂Si 和 Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 共晶相,提高了流动性,增强了液相补缩从而减少热裂纹的产生^[9]。Si 元素的结晶潜热是 Al 的 4 倍,热膨胀系数也远小于 Al,这也有助于减少体积收缩,降低热应力,从而减少热裂纹。

表 1 增材制造用 7xxx 系铝合金的化学成分^[10-20]

Tab.1 Chemical composition of 7xxx aluminum alloys for additive manufacturing^[10-20]

合金	制备工艺	$w_B/\%$									是否开裂
		Zn	Mg	Cu	Mn	Si	Fe	Sc	Zr	Al	
7075	LPBF	5.40	2.60	1.50	0.30	0.40	0.50	—	—	余量	是
7075+Ti	LPBF	5.60	2.20	1.20	—	—	—	—	—	余量	否
7075+Si	LPBF	6.52	2.48	1.64	0.05	4.73	0.19	—	—	余量	否
Al-6Zn-2Mg+Sc+Zr	LPBF	6.04	1.87	—	—	—	—	0.81	0.23	余量	否
Al-5Zn-3Mg-1Cu+Si+TiB ₂	LPBF	5.43	2.65	1.40	0.05	4.19	0.22	—	—	余量	否
Al-4Zn-2Mg-1Cu+SiC+TiB ₂	LPBF	3.79	2.21	1.40	—	2.79	—	—	—	余量	否
7050+TiN	GMAW	6.65	2.49	2.42	0.10	0.12	—	—	—	余量	否
7A55+Sc	CMT	7.33	2.08	1.65	0.34	0.03	0.07	0.23	0.18	余量	否
Al-4Zn-6Mg	CMT	3.60	5.90	0.30	0.50	0.10	0.10	—	0.10	余量	否
Al-5Zn-3Mg	CMT	5.28	2.70	—	0.005	0.005	0.079	—	—	余量	否

3 增材制造 7xxx 系铝合金组织及力学性能

表 2 为国内外部分增材制造 7xxx 系铝合金的力学性能。可以看出,在激光增材工艺下,7075 铝合金或 7050 铝合金的强度和伸长率极低,其主要原因在于组织内部存在裂纹,而通过添加合金元素和微纳颗粒后铝合金力学性能明显改善。在 7075 铝合金的基础上,添加(质量分数,下同)5% 的 Si(以 Si 粉形式加入)时抗

拉强度、屈服强度和伸长率分别达到了 537 MPa、360 MPa 和 9.7%,Si 元素的添加一方面减少了热裂纹的产生,另一方面细化了组织,见图 4。同时添加 4% 的 Si 和 2% 的 TiB₂ 颗粒时合金抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到了 541 MPa、445 MPa 和 5.3%,相比添加 5% 合金的 Si 屈服强度增加,伸长率降低,这是由于 TiB₂ 颗粒的弥散强化作用所引起的。在 7050 铝合金的基础上,添加 1.82% 的 Ti(以 Ti 粉形式加入)时,抗拉强度和伸长率分别达到了 427 MPa 和 3.9%;添加 4%

表 2 增材制造 7xxx 系铝合金的力学性能^[12-16, 19, 21-24]

Tab.2 Mechanical properties of additive manufactured 7xxx aluminum alloys^[12-16, 19, 21-24]

合金	额外元素	制备工艺	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
7075	—	LPBF	206	—	0.5
7075	5% 的 Si	LPBF	537	360	9.7
7075	4% 的 Si+2% 的 TiB ₂	LPBF	541	445	5.3
7050	—	LPBF	75	—	0.6
7050	1.82% 的 Ti	LPBF	427	—	3.9
7050	4% (Ti+TiN)	LPBF	613	—	8.8
Al-6Zn-2Mg	0.81% 的 Sc+0.23% 的 Zr	LPBF	435	418	11.1
Al-5.5Zn-2.3Mg-1.4Cu	1.5% 的 Nb	LPBF	505	—	12.3
Al-5.7Zn-2.3Mg-1.4Cu	2% 的 SiC+2% 的 TiB ₂	LPBF	492	—	7.2
7050	TiN	GMAW	503	—	13.4
Al-3.4Zn-5.3Mg	0.5% 的 Mn	CMT	477	339	7.9
7B55	0.23% 的 Sc+0.16% 的 Zr	CMT	618	542	5.7

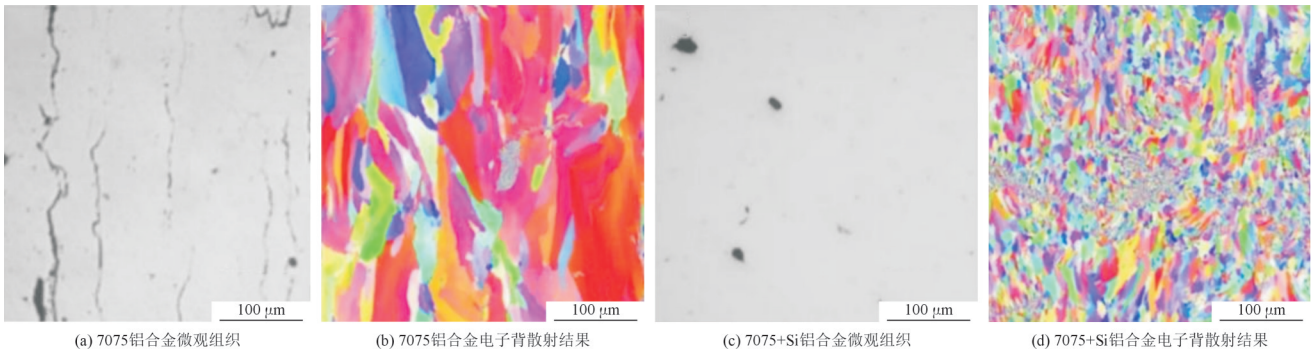


图 4 7075+Si 铝合金 LPBF 试样的微观组织及电子背散射结果^[18]

Fig.4 Microstructure and EBSD images of LPBFed 7075+Si aluminum alloy specimens^[18]

的微米级 Ti 粉和纳米级 TiN 颗粒的混合粉末,抗拉强度和伸长率进一步提升,达到了 613 MPa 和 8.8%,达到激光增材 7xxx 系铝合金的最佳水平。强度和塑性的提升归功于 Ti 和 TiN 的晶粒细化作用及铝基体中均匀分布的纳米颗粒,平均晶粒尺寸由 90 μm(7050 铝合金)减至 2.3 μm(7050+1.82% 的 Ti)、0.775 μm(7050+2% 的 Ti/TiN)^[22]。此外,在激光增材工艺下,在 7xxx 系铝合金中添加 0.81% 的 Sc+0.23% 的 Zr、1.5% 的 Nb、2% 的 SiC+2% 的 TiB₂,其抗拉强度达到了 435~505 MPa,伸长率达到了 7.2%~12.3%,其强化原理与添加 Ti 和 TiN 混合粉末的强化原理相同。

REN X L 等^[16]在 7050 铝合金的基础上添加微量的 TiN 颗粒,抗拉强度和伸长率分别达 503 MPa 和 12.3%,添加 TiN 颗粒后平均晶粒尺寸由 692.6 μm 降至 79.1 μm,晶粒尺寸显著降低,见图 5。GUO X P 等^[24]在 7B55 铝合金的基础上复合添加 Sc、Zr 两种元素,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到了 618 MPa、542 MPa 和 5.7%,此性能是目前电弧增材 7xxx 系铝合金的最佳水平。Sc、Zr 元素具有极佳的晶粒细化效果,可将晶粒尺寸细化至 6 μm 左右,还可能生成 Al₃Sc_{1-x}Zr_x 纳米共格粒子,提升铝合金的力学性能。MORIAS P J 等^[20]制备的 Al-3.4Zn-5.3Mg-0.5Mn 铝合金电弧增材试

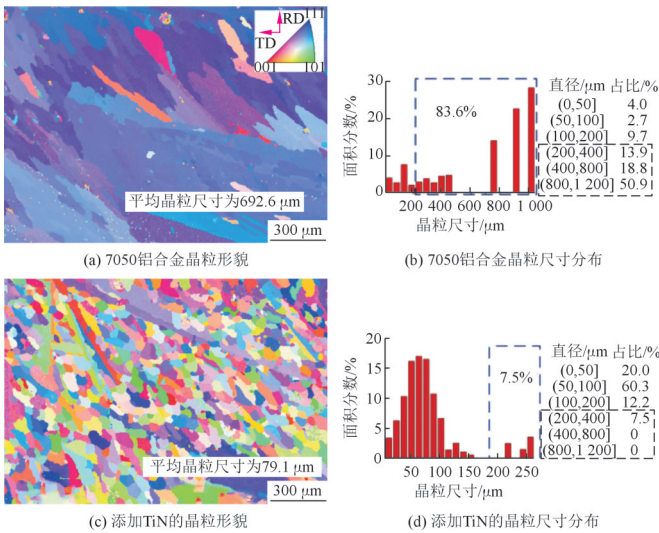


图 5 电弧增材 7050+TiN 铝合金电子背散射结果^[16]

Fig.5 Electron backscatter diffraction results of arc additive manufactured 7050+TiN aluminum alloy

样的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 477 MPa、339 MPa 和 7.9%,在未添加昂贵的 Sc 元素和微纳颗粒的前提下,强度和塑性匹配较好,是一种比较经济的增材制造用 7xxx 系铝合金材料。增材制造工艺存在气孔缺陷、微区组织和性能的不均匀性,因此在选择增材制造用 7xxx 系铝合金时,不应过度追求强度,而应当选择强度

与伸长率能够良好匹配的7xxx系铝合金。

4 增材制造7xxx系铝合金的缺陷控制

4.1 热裂纹的控制措施

合金的组织直接决定合金的性能,当合金内部存在裂纹时会显著降低其力学性能。7xxx系铝合金尤其是Al-Zn-Mg-Cu系铝合金由于其凝固温度区间较宽,极易在凝固过程中产生热裂纹从而降低增材制造7xxx系铝合金的强度,限制其使用。通过对比不同合金的性能发现,目前增材制造用7xxx系铝合金主要为7075或7050铝合金,其伸长率普遍不高,但Cu含量较低或不含Cu的7xxx系铝合金伸长率较7075等含Cu量较高的不可焊铝合金有较大提高。同时,Cu元素的添加会增大7xxx系铝合金的凝固区间,增大合金的热裂倾向,因此Al-Zn-Mg系可焊铝合金或许是增材制造用7xxx系铝合金更优的选择。其次,可以向合金中添加Sc、Zr等合金化元素或添加微纳陶瓷颗粒来促进晶粒细化,减少热裂纹的产生。

4.2 气孔的控制措施

气孔是7xxx系铝合金增材制造中所要面临的另一个问题,主要分为工艺气孔和氢气孔,其中激光增材过程中产生的气孔主要有两种途径,一是由于粉末是提前制备的,存在易吸潮问题,使得H、O含量提高,一方面会导致润湿性产生差异;另一方面会导致氢气孔的敏感性提高,两方面都将增大气孔产生的可能性。二是由于铝合金高的气化温度和激光反射率,使得铝合金难以气化以提供足够的蒸汽压来维持匙孔的稳定,导致气孔的产生。在电弧增材过程中,熔滴进入熔池时会对熔池产生冲击,液态金属会产生翻卷将气体裹挟进熔池,形成工艺气孔。氢气孔则是来自金属丝表面的水分、油脂和烃类污染物挥发出来的H,且由于H元素在铝熔体中的溶解度较大,在凝固后析出形成气孔。因此,想要减少气孔对激光增材构件的影响,一方面是减少增材过程中气孔的产生,即对粉末进行良好的储存,避免粉末吸潮,或通过提高功率密度来维持匙孔的稳定以减少气孔的产生;另一方面则是对增材构件进行后续处理,如通过热等静压来消除部分气孔,但该方法无法完全消除气孔。电弧增材构件想要减少气孔,一方面可通过降低热输入减小熔滴对熔池的冲击,从而减少工艺气孔的产生;另一方面则是控制氢气孔的产生,可以通过优化合金焊丝的成分如添加稀土元素,利用稀土元素对氢较强的吸附作用来减少氢气孔的产生,其次保证丝材表面的清洁及光洁度,若焊丝表

面的平整性较差,会导致有机物更容易附着在其表面并在高温下形成氢分子进入熔池,因此在进行增材制造前可对丝材进行刮丝处理。

5 结语与展望

(1)对于7xxx系铝合金而言,采用激光增材需要将原材料加工成粉末,而铝合金的抗氧化性较差,在制粉过程中极易被氧化,且增材过程需要在保护气氛中进行,设备复杂、操作繁琐,但增材构件的表面精度高,通常无需进行后续的机械加工即可使用。电弧增材通常不需要考虑铝合金氧化的问题,且能够生产大尺寸的零部件,效率较激光增材更高,但电弧增材成形的构件表面精度低,通常需要进行机械加工才能使用。两种增材制造技术各有优劣,因此需根据所具有的条件及要求来选择合适的增材制造方式。

(2)目前增材制造7xxx系铝合金主要以现有牌号铝合金为基础。在选择增材制造用7xxx系铝合金时,优先选择传统熔焊方法下焊接性好的不含Cu元素的Al-Zn-Mg铝合金材料,如Al-6Zn-2Mg、Al-4Zn-6Mg、Al-5Zn-3Mg等铝合金。

(3)增材制造7xxx系铝合金需要在现有7xxx铝合金的基础上添加合金化元素和微纳颗粒进行改性,以细化晶粒和降低热裂倾向。一种是添加微量的Ti、Zr、Sc等元素,一种是添加微量的TiC、TiN、TiB₂等微纳颗粒。此外,还可添加共晶相形成元素如Si等。在选择改性方案时,需对制造成本综合考量。

(4)增材制造7xxx系铝合金的抗拉强度最大可达618 MPa左右,伸长率为5.7%。选择增材制造用7xxx系铝合金时,不应过度追求强度,而应当选择强度与伸长率能够良好匹配的7xxx系铝合金材料。

参 考 文 献

- [1] 周成候,李蝉,吴王平,等.金属材料增材制造技术[J].金属加工(冷加工),2016(S1):879-883.
- [2] 党晓玲,王婧.增材制造技术国内外研究现状与展望[J].航空精密制造技术,2020,56(2):35-38.
- [3] THOMPSON S M, BIAN L K, SHAMSAEI N M, et al. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing: Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics [J]. Additive Manufacturing, 2015, 8:36-62.
- [4] 胡美娟,吉玲康,马秋荣,等.激光增材制造技术及现状研究[J].石油管材与仪器,2019,5(5):1-6.
- [5] KAUFMANN N, IMRAN M, WISCHEROPP T M, et al. Influence of process parameters on the quality of aluminium alloy EN AW 7075 using selective laser melting (SLM) [J]. Physics Procedia, 2016, 83:918-926.
- [6] 王树文,陈树君,赵骥跃,等.高强铝合金电弧增材制造的研究进

- 展[J]. 材料工程, 2024, 52(7):1-14.
- [7] LIU P, LIU F C, WANG Y D, et al. Additive manufacturing of commercial Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys with mechanical properties comparable to extruded counterparts[J]. Materials Science and Engineering, 2024, A899:146-441.
- [8] 熊晓晨, 秦训鹏, 华林, 等. 复合式增材制造技术研究现状及发展[J]. 中国机械工程, 2022, 33(17):2 087-2 097.
- [9] DIXIT S, LIU S Y. Laser additive manufacturing of high-strength aluminum alloys: Challenges and strategies[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2022, 6(6): 156.
- [10] SUN S Y, LIU P, HU J Y, et al. Effect of solid solution plus double aging on microstructural characterization of 7075 Al alloys fabricated by selective laser melting (SLM) [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 114:158-163.
- [11] TAN Q Y, FAN Z Q, TANG X Q, et al. A novel strategy to additively manufacture 7075 aluminium alloy with selective laser melting [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A821: 141-638.
- [12] OTANI Y, SASAKI S. Effects of the addition of silicon to 7075 aluminum alloy on microstructure, mechanical properties, and selective laser melting processability[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A777:139-079.
- [13] ZHOU L, PAN H, HYER H, et al. Microstructure and tensile property of a novel AlZnMgScZr alloy additively manufactured by gas atomization and laser powder bed fusion[J]. Scripta Materialia, 2019, 158:24-28.
- [14] ZHOU S Y, SU Y, WANG H, et al. Selective laser melting additive manufacturing of 7xxx series Al-Zn-Mg-Cu alloy: Cracking elimination by co-incorporation of Si and TiB₂ [J]. Additive Manufacturing, 2020, 36:101-458.
- [15] LI N, WANG T, ZHANG L X, et al. Coupling effects of SiC and TiB₂ particles on crack inhibition in Al-Zn-Mg-Cu alloy produced by laser powder bed fusion [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 164:37-51.
- [16] REN X L, JIANG X Q, YUAN T, et al. Microstructure and properties research of Al-Zn-Mg-Cu alloy with high strength and high elongation fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 307:117-665.
- [17] GUO X P, LI H J, PAN Z X, et al. Microstructure and mechanical properties of ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu-Sc aluminum alloy fabricated by wire+ arc additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79:576-586.
- [18] KLEIN T, SCHNALL M, GOMES B, et al. Wire-arc additive manufacturing of a novel high-performance Al-Zn-Mg-Cu alloy: Processing, characterization and feasibility demonstration[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37:101-663.
- [19] FANG X W, CHEN G P, YANG J N, et al. Wire and arc additive manufacturing of high-strength Al-Zn-Mg aluminum alloy[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8:656-429.
- [20] MORIAS P J, GOMES B, SANTOS P, et al. Characterisation of a high-performance Al-Zn-Mg-Cu alloy designed for wire arc additive manufacturing[J]. Materials, 2020, 13(7):1 610.
- [21] MARIA L. M S, RAYA M, BEY V, et al. Changing the alloy composition of Al7075 for better processability by selective laser melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 437-445.
- [22] LI X W, LI G, ZHANG M X, et al. Novel approach to additively manufacture high-strength Al alloys by laser powder bed fusion through addition of hybrid grain refiners[J]. Additive Manufacturing, 2021, 48:102-400.
- [23] XIAO F, WANG S B, WANG Y X, et al. Niobium nanoparticle-enabled grain refinement of a crack-free high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy manufactured by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 900: 163-427.
- [24] GUO X P, LI H J, XUE P, et al. Microstructure and mechanical properties of 600 MPa grade ultra-high strength aluminum alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 149: 56-66.

(编辑:陈志辉)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦11楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

