

DOI: 10.11973/jxgccl202010004

电弧轨迹对 CMT 电弧增材制造 Inconel 625 合金厚壁件组织与性能的影响

徐文虎¹, 张培磊^{1,2}, 蒋旗^{1,2}, 刘志强^{1,2}, 于治水^{1,2}, 叶欣^{1,2}, 吴頔^{1,2}, 史海川^{1,2}
(上海工程技术大学 1. 材料工程学院, 2. 上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620)

摘要: 采用以冷金属过渡(CMT)电弧为热源的增材制造技术制备 Inconel 625 合金厚壁件, 对比研究了摆动与两道多层电弧轨迹下厚壁件的显微组织和性能。结果表明: 在摆动电弧轨迹增材制造过程中出现了飞溅现象, 厚壁件表面粗糙, 而在两道多层电弧轨迹增材制造过程中无明显飞溅现象, 厚壁件表面光滑平整; 厚壁件中树枝晶的生长方式均为外延生长, 树枝晶中存在二次枝晶以及三次枝晶, 且两道多层电弧轨迹下的枝晶间距小于摆动电弧轨迹下的; 两道多层电弧轨迹下厚壁件的平均抗拉强度高于摆动电弧轨迹下的; 摆动和两道多层电弧轨迹下厚壁件的抗拉强度各向异性百分比均很小, 分别为 4%, 4.5%, 厚壁件的断裂类型均为韧性断裂。

关键词: Inconel 625 合金; 冷金属过渡电弧增材制造; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号: TG444

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)10-0017-05

Effect of Arc Trajectory on Microstructure and Properties of Inconel 625 Alloy Thick-Wall Parts by CMT Arc Additive Manufacturing

XU Wenhui¹, ZHANG Peilei^{1,2}, JIANG Qi^{1,2}, LIU Zhiqiang^{1,2}, YU Zhishui^{1,2},
YE Xin^{1,2}, WU Di^{1,2}, SHI Haichuan^{1,2}

(1. School of Materials Engineering, 2. Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The thick-wall parts of Inconel 625 alloy were prepared by additive manufacturing technique using cold metal transition (CMT) arc as heat source. The microstructure and properties of the parts under oscillating and two-pass multi-layer arc trajectories were comparatively studied. The results show that spatter appeared during the additive manufacturing with oscillating arc trajectory, and the surface of the thick-wall parts was rough; no obvious spatter appeared during additive manufacturing with two-pass multi-layer arc trajectory, and the surface was smooth. The growth mode of dendritic crystals in the thick-wall parts was epitaxial growth, and there were secondary and tertiary dendrites in the dendritic crystals; the dendrite spacing under oscillating arc trajectory was smaller than that under two-pass multi-layer arc trajectory. The average tensile strength of the thick-wall parts under two-pass multi-layer arc trajectory was higher than that under oscillating arc trajectory. The anisotropy percentages of the tensile strength of thick-wall parts under oscillating and two-pass multi-layer arc trajectory were very small, which were 4% and 4.5%, respectively. The fracture type of thick-wall parts was ductile fracture.

Key words: Inconel 625 alloy; CMT arc additive manufacturing; microstructure; tensile property

收稿日期: 2019-11-22; 修订日期: 2020-09-09

基金项目: 上海市“创新行动计划”基础研究领域项目(17JC1400600, 17JC1400601, 19511106400, 19511106402); 大学生创新训练项目(201910856020)

作者简介: 徐文虎(1998—), 男, 上海人, 本科生

导师: 张培磊副教授

0 引言

近几十年来, 增材制造技术在制造行业中得到广泛的应用。与传统的减材制造成形零件相比, 增材制造成形零件具有表面精度高、生产成本低、生产效率高等优点而得到迅速发展^[1]。目前, 增材制造技

术一般以激光、电子束、电弧等为热源,其中以激光和电子束为热源的增材制造技术因制造成本高昂而难以在工业上得到大规模应用,而成本低廉、成形效率高的电弧增材制造技术得到快速发展^[2]。

镍基高温合金由于具有良好的耐腐蚀性能、拉伸性能、可焊接性和耐高温氧化性而广泛应用于航空航天、石油化工、船舶航海等领域^[3-5]。Inconel 625合金作为一种镍基高温合金,通过控制其组织内部析出相的形态与大小来达到一定的强化效果^[6-7]。目前,有关Inconel 625合金增材制造方面的研究主要集中在以激光为热源的增材制造方面^[8-9]。由于以激光为热源的增材制造技术的成本高、效率低,因此很多学者将研究方向转向效率更高、成本更低的电弧增材制造方面,而在电弧增材制造技术中研究较多的是等离子弧增材制造技术。徐富家等^[10-11]分别研究了电弧轨迹和工艺参数对等离子弧增材制造Inconel 625合金组织与性能的影响,发现采用往复堆积方式获得的合金具有较好的力学性能,并且在将热输入降低至 $18 \text{ kW} \cdot \text{min} \cdot \text{m}^{-1}$ 后,组织内部不会出现明显的转变层,进而优化零件的力学性能。冷金属过渡(CMT)技术是依靠短路过渡并由控制系统精密控制的一项新型技术,该技术以CMT电弧作为热源进行电弧增材制造,具有能量密度高、表面成形好和焊接缺陷少等优点,尤其适用于大型零件的生产。已有研究^[12-13]表明,电弧轨迹的合理规划对电弧增材制造过程的顺利进行,以及获取更高精度成形件和提高成形效率均有重要意义;而目前有关电弧轨迹对CMT电弧增材制造Inconel 625合金组织与性能方面的研究较少。因此,作者采用以CMT电弧为热源,Inconel 625合金焊丝为沉积材料的增材制造技术制备Inconel 625合金厚壁件,对比研究了摆动与两道多层2种电弧轨迹下合金厚壁件的成形性能、显微组织和力学性能。

1 试样制备与试验方法

试验用基板为316L不锈钢,基板尺寸为 $200 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,化学成分见表1,将基板表面打磨至无油脂和锈迹后,用酒精擦拭并烘干。试验用沉积材料为由SPECIAL METALS公司提供的Inconel 625合金焊丝,其化学成分见表2。

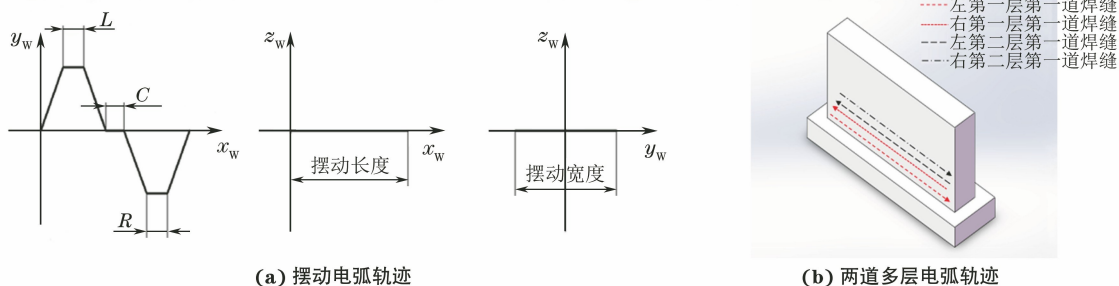
表1 316L不锈钢基板的化学成分(质量分数)

substrate (mass)								%
Mn	Mo	Cr	Ni	P	S	Si	C	Fe
1.73	2.7	17.0	13.0	≤ 0.045	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 0.03	余

表2 Inconel 625合金焊丝的化学成分(质量分数)

wire (mass)								%
Ni	Cr	Mo	Nb	Al	Fe	Ti	C	Ni
64.24	22.65	8.73	3.53	0.16	0.32	0.2	≤ 0.03	余

采用ABB IRB 4600机器人、IRBP A250变位器、IRT 501导轨一起组成的联动协同9轴运动平台,再通过device-net将伏能士CMT Advance4000焊机同机器人结合在一起,共同搭建CMT电弧增材制造快速成形系统平台,利用该平台制备Inconel 625合金厚壁件。由于在高温空气环境中Inconel 625合金表面易氧化,因此在制备过程中采取添加气罩保护的方式,该方式还可减少飞溅产生^[14]。采用摆动和两道多层2种电弧轨迹,具体路径如图1所示;在路径规划中均采用往复方式,以防止出现起弧处凸起与收弧处塌陷的现象^[15]。采用摆动电弧轨迹时焊枪机械摆动宽度为10 mm,摆动长度为3 mm,左侧停留距离 L 为0.3 mm,中间停留距离 C 为0.1 mm,右侧停留距离 R 为0.3 mm,送丝速度为 $8.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,焊接速度为 $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,平均电流为165 A,平均电压为21.3 V;采用两道多层电



(a) 摆动电弧轨迹

(b) 两道多层电弧轨迹

图1 CMT电弧增材制造过程中摆动和两道多层电弧轨迹示意

Fig.1 Diagram of oscillating (a) and two-pass multi-layer (b) arc trajectories during CMT arc additive manufacturing process

弧轨迹时,送丝速度为 $6.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,焊接速度为 $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,平均电流为 139 A,平均电压为 17.8 V。2种电弧轨迹下制备得到厚壁件试样的尺寸均为 $160 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$ 。

沿垂直于沉积方向截取金相试样,经预磨、抛光,用王水腐蚀后,采用 VHX-5000 型光学显微镜观察组织。按照 GB/T 13329—2006,沿垂直于沉积方向与平行于沉积方向采用线切割方法加工拉伸试样,分别记作垂直试样和平行试样,并在同一位置附近分别取 3 个试样,拉伸试样的取样位置与尺寸如图 2 所示。在 AG-25TA 型万能材料拉伸试验机上进行室温拉伸试验,拉伸速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,试验结束后采用 TESCAN VEGA3 型扫描电镜 (SEM) 观察断口形貌。

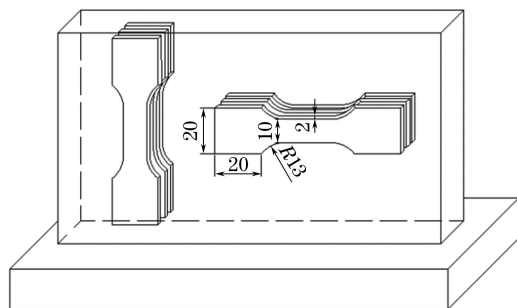


图2 拉伸试样的取样位置与尺寸

Fig. 2 Sampling location and size of tensile sample

2 试验结果与讨论

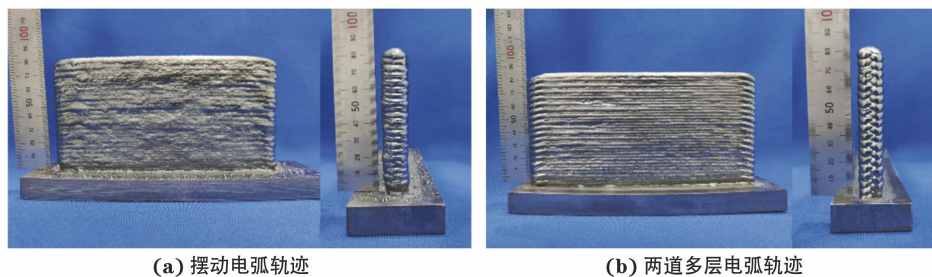
2.1 成形性能

由图 3 可以看出:在摆动电弧轨迹增材制造过程中出现了飞溅现象,这是因为在焊枪摆动过

程中电弧的挺度不足,由电弧产生的洛伦兹力发生偏移,难以维持熔滴在电弧推力下进行平稳的过渡而产生的;在无机机械摆动的两道多层电弧轨迹增材制造过程中,熔滴过渡稳定,无明显飞溅现象,在熔滴过渡过程中,电弧稳定,成形件表面光滑平整。

2.2 显微组织

由图 4 可以看出:采用不同电弧轨迹增材制造的厚壁件成形均匀,无明显气孔、夹渣等缺陷,沉积层间分层明显,且沉积层间存在明显的熔合线与重熔区;摆动电弧轨迹下重熔区在厚壁件中间部分较宽。在摆动过程中当电弧移动到边缘时停留时间较短^[16],并且当上一层金属沉积结束后,在后续冷却过程中厚壁件边缘与空气接触,导致边缘的温度较低,因此当下一层金属沉积在边缘时,在温度较低和热输入较低条件下重熔金属较少,导致该区域重熔区不明显。在每一道沉积层中都存在一个半椭圆形的区域,该区域处在电弧的中心位置,即重熔区,这是由于电弧中心区域的热流密度较大,使得电弧中心部位的熔深较大而导致的。不同电弧轨迹增材制造厚壁件的截面组织均主要为向外延生长的树枝晶,且树枝晶中存在二次枝晶以及三次枝晶,而摆动电弧轨迹下的三次枝晶较多。两道多层电弧轨迹下厚壁件重熔区的枝晶较为细小,这是因为重熔区是已经沉积的金属重新熔化而形成的,其周围已经沉积的金属温度已降低,且金属的散热速率大于空气的散热速率,导致重熔区在结晶时的温度梯度较大,因此形成的晶粒较细小。



(a) 摆动电弧轨迹

(b) 两道多层电弧轨迹

图3 摆动与两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的宏观形貌

Fig. 3 Macromorphology of additive manufactured thick-wall parts with oscillating (a) and two-pass multi-layer (b) arc trajectories

参考文献[17],焊接热输入的计算公式为

$$E = \eta \frac{UI}{v} \quad (1)$$

式中: E 为焊接热输入; η 为热效率系数,取 0.8; U 为电压; I 为电流; v 为焊接速度。

计算得到摆动和两道多层电弧轨迹下的焊接热输入分别为 $351.45, 247.42 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。可知摆动电

弧轨迹下的焊接热输入较高,结晶时间较长,结晶速率低,因此厚壁件组织中的三次枝晶较多,且枝晶间距较大;同时长时间的结晶导致枝晶间偏析出大量低熔点元素,形成低熔点共晶相,这些共晶相不耐腐蚀,因此腐蚀后枝晶间距较大。

2.3 拉伸性能

由图5可以看出:摆动电弧轨迹下厚壁件的拉伸

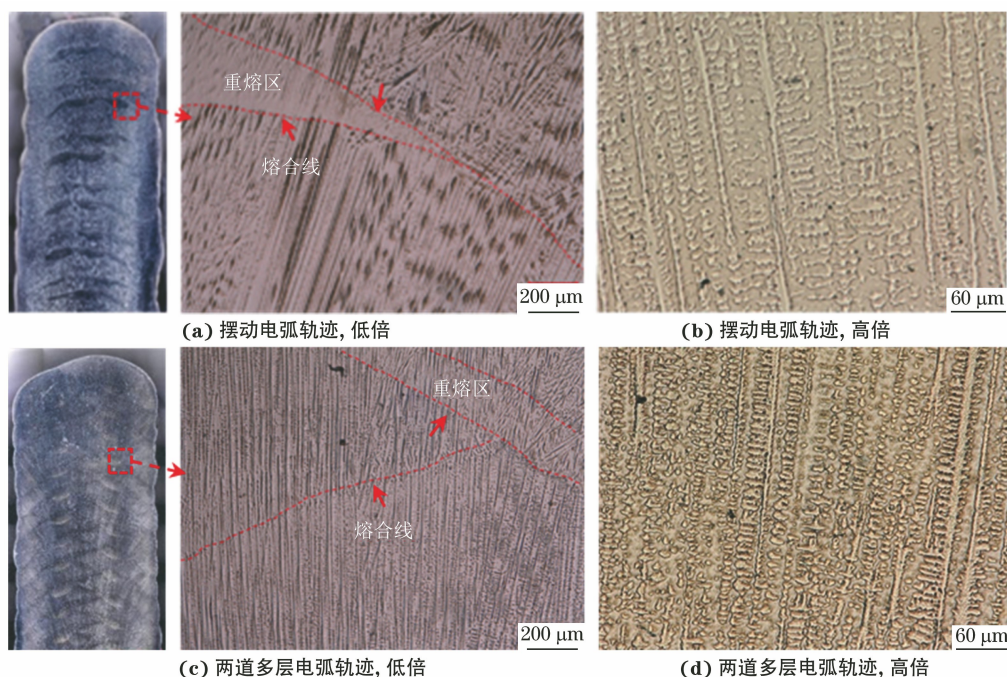


图4 摆动与两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的截面形貌

Fig. 4 Cross section morphology of additive manufactured thick-wall parts with oscillating (a-b) and two-pass multi-layer (c-d) arc trajectories: (a, c) at low magnification and (b, d) at high magnification

性能较均匀,载荷-位移曲线重合度高,这是由于在摆动电弧轨迹下,每层重熔的金属量相近,且分布较均匀导致的;在两道多层电弧轨迹下,每一道沉积层中都存在一个重熔区,且重熔区内过冷度较大,易产生元素偏析,导致重熔区组织不均匀,从而造成厚壁件出现拉伸性能不均匀的现象。

由表3可以看出:不同电弧轨迹增材制造厚壁件在垂直于沉积方向的断后伸长率都高于平行于沉积方向的,平行于沉积方向的抗拉强度均大于垂直于沉积方向的;两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的抗拉强度为716 MPa,高于摆动电弧轨迹增材制造厚壁件的(674 MPa)。

增材制造试样的抗拉强度各向异性百分比A

表3 摆动与两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of additive manufactured thick-wall parts with oscillating and two-pass multi-layer arc trajectories

电弧轨迹	断后伸长率/%		抗拉强度/MPa	
	平行试样	垂直试样	平行试样	垂直试样
摆动	49,48,49	59,60,57	674,664,668	638,640,636
两道多层	52,48,53	60,59,57	711,716,691	669,687,683

的计算公式为

$$A = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $P_{\max}$ 为试样的最大抗拉强度; $P_{\min}$ 为试样的

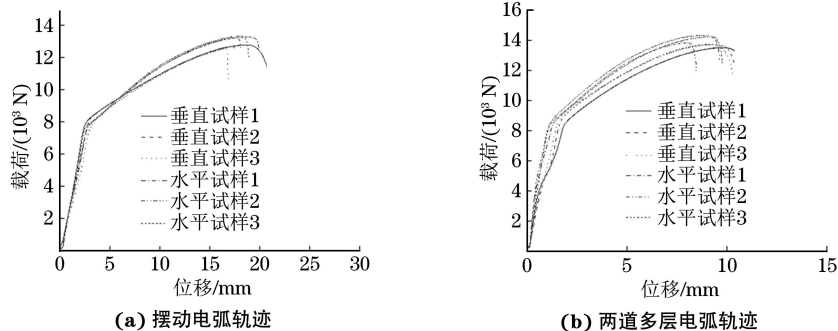


图5 摆动与两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件在拉伸过程中的载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of additive manufactured thick-wall parts with oscillating (a) and two-pass multi-layer (b) arc trajectories during tensile

最小抗拉强度。

计算得到摆动与两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的抗拉强度各向异性百分比分别为4%,4.5%。可知,这两种电弧轨迹增材制造厚壁件的垂直与水平抗拉强度的差异很小,可以忽略^[18]。

由图6可以看出:2种电弧轨迹增材制造厚壁

件的拉伸断口上均存在大量韧窝,断裂类型均为韧性断裂,并且平行于沉积方向的拉伸断口上存在凹槽。厚壁件的晶粒生长方式都是外延生长,生长方向基本一致,在拉伸时于拉伸方向上发生韧性断裂,而枝晶间的析出相与低熔点共晶相的塑性较差,易发生脆断而形成凹槽状断口。

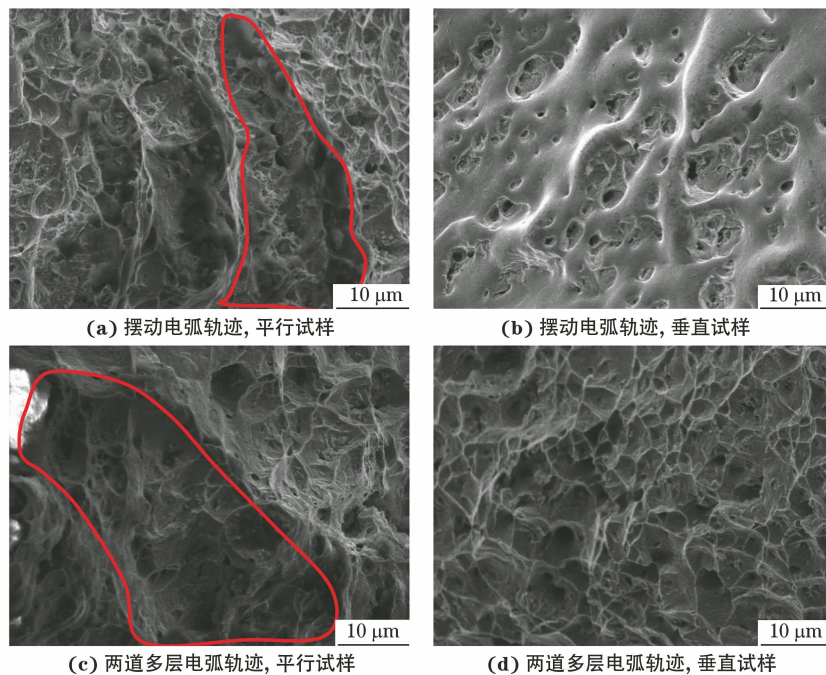


图6 摆动和两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的拉伸断口SEM形貌

Fig.6 SEM morphology of tensile fracture of additive manufactured thick-wall parts with oscillating (a-b) and two-pass multi-layer (c-d) arc trajectories: (a, c) parallel samples and (b, d) vertical samples

3 结 论

(1) 在摆动电弧轨迹增材制造过程中出现飞溅现象,厚壁件表面粗糙,而两道多层电弧轨迹增材制造过程中,无明显飞溅现象,厚壁件表面光滑平整。

(2) 摆动与两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的成形均匀,无明显气孔、夹渣等缺陷,沉积层间存在明显的熔合线与重熔区,树枝晶的生长方式均为外延生长,且树枝晶中存在二次枝晶以及三次枝晶;两道多层电弧轨迹下厚壁件的枝晶间距小于摆动电弧轨迹下的,且三次枝晶较多。

(3) 两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的平均抗拉强度为716 MPa,高于摆动电弧轨迹增材制造厚壁件的(674 MPa);摆动与两道多层电弧轨迹增材制造厚壁件的抗拉强度各向异性百分比均很小,分别为4%,4.5%;2种电弧轨迹增材制造厚壁件的拉伸断口上均存在大量韧窝,断裂类型均为韧性断裂。

参考文献:

- [1] GU J L, DING J L, WILLIAMS S W, 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.
- [2] 赵昀. CMT冷金属过渡铝合金增材制造研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [3] XU F J, LV Y, LIU Y X, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013, 29(5): 480-488.
- [4] YENI C, KOCAK M. Fracture analysis of laser beam welded superalloys Inconel 718 and 625 using the FITNET procedure [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(8): 532-539.
- [5] WANG J F, SUN Q J, WANG H, et al. Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 676: 395-405.

(下转第47页)

3 结 论

(1) 7B04 铝合金的中值裂纹形成寿命为 5 301.9 飞行小时,约为 B95 铝合金的 1.55 倍,裂纹形成寿命分散系数为 1.436 2,远低于 B95 铝合金的 (2.443 9)。

(2) 7B04 铝合金的安全寿命为 4 373.82 飞行小时,约为 B95 铝合金的 2.2 倍,总寿命分散系数为 1.502 3,亦远低于 B95 铝合金的 (2.168 9)。

(3) 7B04 铝合金的安全寿命、分散系数等主要疲劳性能指标都明显优于 B95 铝合金的,可替代 B95 铝合金用于制造飞机结构件。

参考文献:

- [1] 宁玲. 老龄飞机延寿的一些重要问题[J]. 结构强度研究, 2000(4):53-58.
- [2] 何宇廷,高潮,张腾,等. 飞机结构疲劳/耐久性安全寿命延寿方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2015,16(6):1-6.
- [3] 魏鹏,何宇廷,舒文军,等. 基于威布尔分布的综合分析法在飞机机载产品延寿中的应用[J]. 航空维修与工程,2010(1):53-55.
- [4] 黄季辉,隋福成. 引进先进战斗机延寿取得重大突破的主要技术途径——耐久性修理是重新赋予飞机生命的修理[J]. 飞机设计, 2010, 30(1):1-4.
- [5] HE Y D, LI C, ZHANG T, et al. Service fatigue life and service calendar life limits of aircraft structure: Aircraft structural life envelope[J]. Aeronautical Journal, 2016, 120 (1233):1746-1762.
- [6] 石林. 取代老龄飞机材料的高强度铝合金[J]. 航空制造工程, 1998(1):15-16.
- [7] 李秀华. 超硬铝合金板材微观组织及性能研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2006.
- [8] 蹇海根,姜锋,郑秀媛,等. 航空用高强高韧铝合金疲劳断口特征的研究[J]. 航空材料学报,2010,30(4):97-102.
- [9] 李秀华,陈立佳,张凌云. 超硬铝合金的微观组织和力学性能的研究[J]. 沈阳航空工业学院学报,2005, 22(5):15-17.
- [10] 汝继刚,伊琳娜. 7B04 铝合金疲劳断裂性能研究[J]. 轻合金加工技术,2007(10):38-40.
- [11] 陈群志,韩恩厚,洪海明,等. 某型飞机关键结构模拟件疲劳寿命研究[J]. 机械强度,2004(增刊 1):222-225.
- [12] 张腾. 飞机典型结构细节耐久性分析[D]. 西安:空军工程大学, 2012.
- [13] 高镇同. 航空金属材料疲劳性能手册[M]. 北京:北京航空材料研究所,1981: 94-142.
- [14] 娄路亮,李付国,李庆华. 一种计算疲劳裂纹萌生寿命的数值方法[J]. 机械强度, 2000(3):203-205.
- [15] 何宇廷. 飞机结构寿命控制原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2017:99-147.
- [16] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社, 1986:199-216.
- [6] 杜金辉,庄景云. GH4169 合金的低温冲击性能[J]. 钢铁研究学报,1998,10(1):31-33.
- [7] SONG K H, NAKATA K. Effect of precipitation on post-heat-treated Inconel 625 alloy after friction stir welding [J]. Materials & Design, 2010,31(6):2942-2947.
- [8] PLEASS C, JOTHI S. Influence of powder characteristics and additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricated by selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2018,24:419-431.
- [9] DINDA G P, DASGUPTA A K, MAZUMDER J. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability[J]. Materials Science and Engineering:A, 2009,509(1/2):98-104.
- [10] 徐富家,黄瑞生,雷振,等. 工艺参数对等离子弧快速成型 Inconel 625 合金组织的影响[J]. 焊接, 2016(9):43-46.
- [11] 徐富家,吕耀辉,黄瑞生,等. 沉积路径对等离子弧快速成形 Inconel625 合金组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2016(8): 75-78.
- [12] 梁少兵,王凯,丁东红,等. 电弧增材制造路径工艺规划的研究现状与发展[J]. 精密成形工程,2020(4):86-93.
- [13] BABY J, AMIRTHALING A M. Microstructural development during wire arc additive manufacturing of copper-based components[J]. Welding in the World, 2020, 64(2):1-11.
- [14] 杨东青. GTA 旁路 GMA 增材制造成形工艺及热过程研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [15] 蒋旗,张培磊,聂云鹏. 基于 RobotStudio 平台的增材制造编程方法[J]. 上海工程技术大学学报, 2018, 32(1): 39-44.
- [16] XU X F, GANGULY S, DING J L, et al. Enhancing mechanical properties of wire + arc additively manufactured INCONEL 718 superalloy through in-process thermomechanical processing[J]. Materials & Design, 2018,160:1042-1051.
- [17] 汪柏岐,李娟,钟玉,等. 焊接能量对熔敷金属组织形成的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版),2007,26(1):33-35.
- [18] ZHANG C, LI Y F, GAO M, et al. Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source[J]. Materials Science and Engineering:A, 2018,711:415-423.

(上接第 21 页)