

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.14

5056铝合金水分配器焊接工艺仿真分析与优化

何旭^{1,2}, 胡子翔^{1,2}, 严银飞¹, 卜逸凡^{1,2}, 严文强^{1,2}, 张祥祥^{1,2}

1. 中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230088
2. 国家级工业设计中心, 安徽 合肥 230088

摘要: 针对5056铝合金水分配器电子束焊接后焊缝区域出现开裂的问题, 本研究采用Simufact.welding软件, 通过焊接过程仿真方法, 系统分析了不同结构形式与焊接工艺方案对焊接热影响区(HAZ)及焊后残余应力的影响规律。设计了五种对比方案: 原始结构(方案1)、切线收弧(方案2)、盖板增加凸台(方案3)、增加盖板厚度(方案4)及降低焊接速度(方案5)。仿真结果表明: 在盖板增加凸台(方案3)可显著减小热影响区宽度, 盖板侧与壳体侧分别降低35.67%与15.67%; 采用切线收弧(方案2)可使焊后最大残余应力降低2.56%。而增加盖板厚度(方案4)虽能减小盖板侧HAZ宽度22.82%, 但对残余应力影响甚微; 降低焊接速度(方案5)则会导致HAZ宽度增加。基于仿真结果, 综合选取“盖板增加凸台并采用切线收弧”的优化方案进行试验验证。经1.5 MPa气压测试30分钟及导电氧化处理后, 焊缝无裂纹出现, 且批量生产质量稳定。本研究通过仿真与试验相结合, 为5056铝合金水分配器的焊接工艺优化与开裂控制提供了有效依据。

关键词: 电子束焊; 5056铝合金; 热影响区; 焊后残余应力

中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)12-0100-07

Welding Process Simulation Analysis and Optimization of 5056 Aluminum Alloy Water Distributors

HE Xu^{1,2}, HU Zixiang^{1,2}, YAN Yinfei¹, BU Yifan^{1,2}, YAN Wenqiang^{1,2}, ZHANG Xiangxiang^{1,2}

1. No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China
2. National Industrial Design Center, Hefei 230088, China

Abstract: To address the cracking problem in the weld zone of a 5056 aluminum alloy water distributor after electron beam welding, this study employed Simufact.welding software to systematically analyze the effects of different structural designs and welding process parameters on the heat-affected zone (HAZ) and post-weld residual stress through welding process simulation. Five comparative schemes were designed: the original structure (Scheme 1), tangential arc closing (Scheme 2), adding a boss on the cover plate (Scheme 3), increasing the cover plate thickness (Scheme 4), and reducing the welding speed (Scheme 5). Simulation results indicated that adding a boss on the cover plate (Scheme 3) significantly reduced the HAZ width, with decreases of 35.67% on the cover side and 15.67% on the shell side, respectively. Using tangential arc closing (Scheme 2) reduced the maximum residual stress by 2.56%. While increasing the cover plate thickness (Scheme 4) reduced the HAZ width on the cover side by 22.82%, it had a negligible effect on residual stress. Reducing the welding speed (Scheme 5) increased the HAZ width. Based on the simulation results, an optimized scheme combining "adding a boss on the cover plate with tangential arc closing" was selected for experimental verification. After pressure testing at 1.5 MPa for 30 minutes and conductive oxidation treatment, no cracks were observed in the weld, and batch production demonstrated consistent quality. This study, combining simulation and experiment, provides an effective basis for welding process optimization and crack control in 5056 aluminum alloy water distributors.

Keywords: electron beam welding; 5056 aluminum alloy; heat affected zone; residual stress after welding

收稿日期: 2024-11-25 修回日期: 2025-04-02

作者简介: 何旭(1993—), 硕士, 工程师, 主要从事焊接工艺设计与仿真研究。E-mail: whutlixuehx@163.com。

引用格式:何旭,胡子翔,严银飞,等. 5056 铝合金水分配器焊接工艺仿真分析与优化[J]. 电焊机,2025,55(12):100–106.

Citation:HE Xu, HU Zixiang, YAN Yinfei, et al. Welding Process Simulation Analysis and Optimization of 5056 Aluminum Alloy Water Distributors [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 100–106.

0 引言

在现代工业制造领域,焊接作为一种连接材料的重要工艺,广泛应用于航空、航天、兵器、电子等多个行业^[1-2]。随着工业制造装备不断向复杂化、大型化发展,对装备的质量和性能提出了更高要求,焊接作为装备制造过程中的重要工艺,其焊接质量往往决定了装备的整体性能^[3],而焊接过程中的热影响区在高温、腐蚀、辐射等多重因素影响下,可能会导致构件的开裂^[4-5],而且,过大的焊后残余应力也可能导致结构的开裂及失效^[6-7]。因此,对焊接过程中热影响区和焊后残余应力的研究和控制对于确保焊接结构的安全性和可靠性至关重要^[8-9]。

本文针对 5056 铝合金水分配器电子束焊后出现的开裂问题,利用 Simufact.welding 软件采用焊接工艺仿真方法研究不同结构设计形式、焊接工艺方案对焊接过程热影响区及焊后残余应力的影响规律,得出较优的结构设计形式和焊接工艺方案,以期为水分配器的实际设计以及焊接实施提供一定指导。

1 焊接材料、设备及工艺

水分配器由上盖板、壳体、下盖板三部分组成,如图 1 所示,上下盖板与壳体通过电子束焊接连接。水分配器材质为 5056 铝合金,整体尺寸为 345 mm×65 mm×35 mm。焊接采用 ZD60–15C CV18M 型电子束焊机,电子枪的加速电压为 60 kV、焊接电流为 13 mA、聚焦电流 533 mA、扫描频率 300 Hz、X40%、Y40%。焊前对焊接表面进行酸碱洗,去除油污、脏污及氧化膜,焊接时将焊件固定在工作台上,沿着盖板与壳体的对接线进行焊接,先定位焊再正式焊接,焊后自然冷却至室温。光学显微镜观察焊缝附近发现裂纹,如图 2 所示,这可能是由于焊接热影响区或焊后残余应力过大所导致的,因此,应尽量减小热影响区大小或降低焊后残余应力。

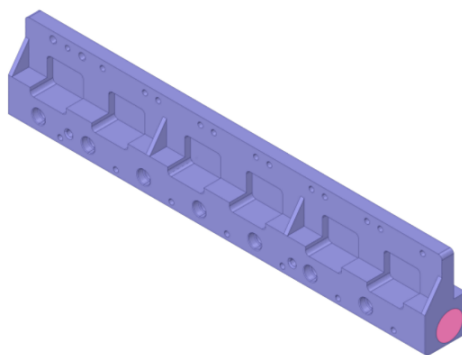


图 1 水分配器三维几何模型

Fig. 1 3D geometric model of water dispenser

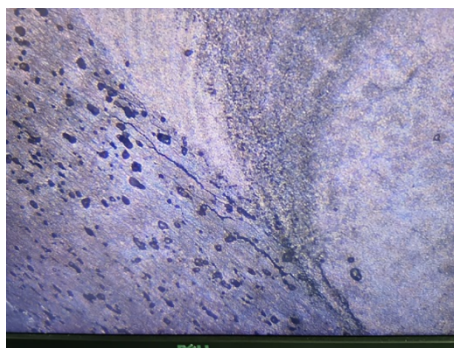


图 2 焊缝开裂照片

Fig. 2 Photo of weld cracking

2 水分配器焊接工艺仿真

水分配器焊接过程中,伴随着温度的不断变化,材料参数、金相组织等都会产生改变^[10],焊接模拟中考虑材料热物性能、力学行为和相变等非线性问题,可提高结果的计算精度。

材料热物性能的非线性:焊接过程中,材料的热导率、比热容等热物性参数随温度不断变化,导致热传导呈现非线性特性,这种温度依赖性的变化对焊接温度场分布有重要影响。

力学行为的非线性:焊接过程中,由于局部加热和冷却,导致焊接接头产生复杂应力和变形,表现出明显的非线性特征。材料的弹性模量、屈服强度等力学性能参数随温度和应变变化,使得焊接过程中的力学行为呈现非线性。

相变引起的非线性:焊接过程中,材料会发生相变(熔化、凝固等),相变过程中的潜热释放和吸收会导致温度场和应力场的非线性变化。

本文利用 Simufact.welding 软件采用焊接工艺仿真方法开展水分配器开裂分析,软件提供了对材料热物性能、力学行为、接触等非线性问题的设置,可用来探究结构设计形式及焊接工艺方案对焊接热影响区及焊后残余应力的影响,并对不同方案进行效果评估和优化。

2.1 理论基础

焊接过程中焊件受到外部热源的局部快速加热,高温短暂停留,热源离开后则快速冷却,伴随着热源的不断移动,焊件的温度在时间和空间上不断急剧变化,且在瞬时高温情况下材料的热物性参数随温度呈非线性变化^[11],因此焊接温度场的计算是典型的非线性瞬态热传导问题,其传导问题的控制方程^[12]如下:

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \end{aligned} \quad (1)$$

式中 c 为材料的比热容; ρ 为材料的密度; T 为材料瞬态温度; t 为传热时间; k_x, k_y, k_z 分别表示的是材料在 x, y, z 方向上的导热系数; x, y, z 为坐标分量; Q 为作用在工件内部的热源。

焊接过程中,由于温度变化,材料会产生热应变,热应变受到周围约束就会在材料内部产生热应力。当应力较小时,只产生弹性应变,当增大到一定程度时,将产生塑性应变。当材料发生组织的转变时,也会产生相变塑性应变。此外,材料在应力长期作用下,会产生蠕变应变。因此,各个材料点的总应变组成成分可用以下公式^[13]来表示:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{ip} + \varepsilon_{creep} \quad (2)$$

式中 $\varepsilon_e, \varepsilon_p, \varepsilon_{th}, \varepsilon_{ip}, \varepsilon_{creep}$ 分别为弹性应变、塑性应变、热应变、相变塑性应变与蠕变应变。

2.2 水分配器有限元模型

水分配器的有限元模型如图3所示。由于水分配器轴向尺寸与横向尺寸相比较较大(约为5:1),且开裂区域(焊缝附近)在两端,壳体中间区域的影响几乎可以忽略,从计算效率角度出发,对模型进行

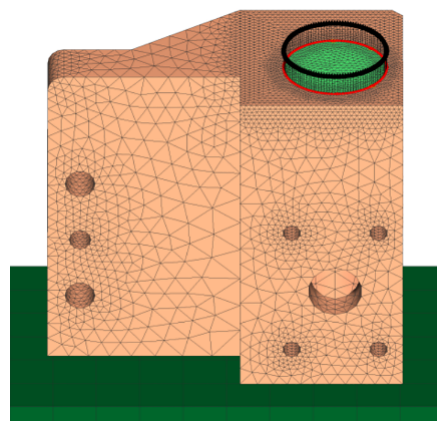


图3 水分配器有限元模型

Fig. 3 Finite element model of water dispenser

适当简化,仅截取一段模型开展焊接工艺仿真分析。在进行网格划分时,需遵循熔池的三个方向上至少有4~6层网格原则,工程上要求焊缝熔深在2.5~3 mm,焊缝熔宽在2~2.2 mm,同时考虑计算效率因素,最终取焊缝附近区域网格尺寸0.5 mm左右,其他区域网格尺寸由0.5 mm向4 mm缓慢过渡,所采用的单元类型为CTETRA。力学边界方面,由于是截取水分配器的一段作为分析模型,忽略截取面上的节点及单元位移,因此在截取面约束轴向位移;温度边界方面,设置环境温度为室温20℃,同时考虑焊件与空气热对流和热辐射的影响,设置对流换热系数为20 W/(m²·K),辐射换热系数为0.6。水分配器的上盖板、壳体、下盖板的材质均为5056铝合金,其力学及热学参数如表1所示。

2.3 分析方案

水分配器焊接采用电子束进行焊接,焊接路径为盖板与壳体的对角线,焊接方向为逆时针焊接,焊前无需预热,焊接过程中分两个阶段,阶段1:逆时针焊1圈+1/4圈,阶段2:收弧焊接,焊后进行自然冷却。综合考虑结构设计形式及焊接工艺方案,本次分析共设计5种方案,具体方案分别如表2所示。其中,方案1为对照组,方案2考虑收弧形式的影响,方案3和方案4考虑结构形式的影响,方案5考虑焊接速度的影响。5种方案所对应的仿真模型示意图如图4所示。

本次仿真5种分析方案所涉及到的热源共有4种,其对应关系如表3所示,4种热源对应参数如表4所示。

表 1 5056 铝合金力学及热学参数
Table 1 5056 Aluminum alloy mechanical and thermal properties

线膨胀系数 /(ppm·°C ⁻¹)	导热率 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度 /(kg·m ⁻³)	损耗系数	泊松比	比热容 /(J·g ⁻¹ ·k ⁻¹)	弹性模量 /GPa	固相线 /°C	熔点 /°C	熔化潜热 /(J·kg ⁻¹)
0(-110 °C)	144(20 °C)	2 660(20 °C)	0.9	0.3	0.91(20 °C)	70(20 °C)	562	633	396 000
30(-40 °C)	148(50 °C)	2 633(500 °C)	—	—	0.92(50 °C)	69(100 °C)	—	—	—
31(20 °C)	152(100 °C)	—	—	—	0.932(100 °C)	64(200 °C)	—	—	—
31(200 °C)	155(150 °C)	—	—	—	0.944(150 °C)	60(300 °C)	—	—	—
31(400 °C)	157(200 °C)	—	—	—	0.956(200 °C)	53(400 °C)	—	—	—
28(450 °C)	160(250 °C)	—	—	—	0.968(250 °C)	47(450 °C)	—	—	—
34(633 °C)	162(300 °C)	—	—	—	0.982(300 °C)	42(500 °C)	—	—	—
0(660 °C)	162.5(350 °C)	—	—	—	0.996(350 °C)	40(550 °C)	—	—	—
—	163(400 °C)	—	—	—	1.008(400 °C)	—	—	—	—
—	161(450 °C)	—	—	—	1.02(450 °C)	—	—	—	—
—	160(500 °C)	—	—	—	1.04(500 °C)	—	—	—	—

表 2 分析方案
Table 2 Analysis plans

编号	盖板结构形式	阶段 1	阶段 2	焊接速度/(mm·s ⁻¹)
1	盖板厚 2 mm	逆时针焊接 1 圈+1/4 圈	圆形收弧 1/4 圈	13
2	盖板厚 2 mm	逆时针焊接 1 圈+1/4 圈	切线收弧 1/4 圈	13
3	盖板加凸台, 盖板厚 2 mm, 凸台直径 15 mm, 高度 5 mm	逆时针焊接 1 圈+1/4 圈	圆形收弧 1/4 圈	13
4	盖板厚 3 mm	逆时针焊接 1 圈+1/4 圈	圆形收弧 1/4 圈	13
5	盖板厚 2 mm	逆时针焊接 1 圈+1/4 圈	圆形收弧 1/4 圈	6

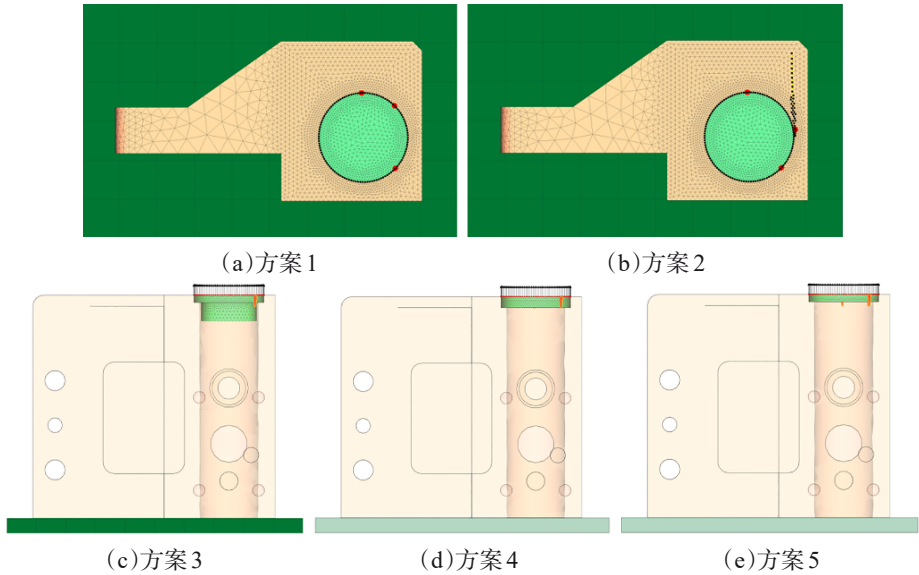


图 4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model schematic diagram

3 结果分析与验证

3.1 焊接过程热影响区结果分析

5 种分析方案仿真得到的焊接过程热影响区结果如图 5 所示。各方案所统计的热影响区结果大小

如表 5 所示。由表 5 可知,5 种方案中,盖板侧热影响区宽度最大的是方案 1,为 1.14 mm,壳体侧热影响区宽度最大的是方案 5,为 0.744 3 mm,盖板侧及壳体侧热影响区宽度最小的是方案 3,分别为 0.733 4 mm 和 0.562 8 mm。与对照组(方案 1)相比,改变

表3 工艺方案与热源对应表

Table 3 Process scheme and heat source correspondence table			
序号	方案名称	焊接阶段	热源编号
1	方案1	阶段1:焊接1圈+1/4圈	Heat1
		阶段2:圆形收弧1/4圈	Heat2
2	方案2	阶段1:焊接1圈+1/4圈	Heat1
		阶段2:切线收弧1/4圈	Heat2
3	方案3	阶段1:焊接1圈+1/4圈	Heat1
		阶段2:圆形收弧1/4圈	Heat2
4	方案4	阶段1:焊接1圈+1/4圈	Heat1
		阶段2:圆形收弧1/4圈	Heat2
5	方案5	阶段1:焊接1圈+1/4圈	Heat3
		阶段2:圆形收弧1/4圈	Heat4

收弧方式(方案2)几乎不影响热影响区宽度;在盖板上增加凸台(方案3)能够显著减小盖板侧(-35.67%)及壳体侧(-15.67%)热影响区宽度,这是由于凸台可能会作为一个局部的热量吸收点,改变了热量在结构中的分布,凸台的存在使得热量更多地被凸台吸收,从而减少了周围区域的热影响;增加盖板厚度(方案4)明显减小了盖板侧(-22.82%)

表4 热源参数表

Table 4 Heat source parameter table					
热源类型	参数类型	Heat1	Heat2	Heat3	Heat4
体积热源	速度/(mm·s ⁻¹)	13	13	6	6
	功率/W	1 000	1 000	810	810
	效率	0.95	0.95	0.95	0.95
	斜降持续时间/s	—	1	—	2.5
	斜降目标比例/%	—	0	—	0
	锥形热源上半径/mm	0.6	0.6	0.6	0.6
	锥形热源下半径/mm	0.3	0.3	0.3	0.3
	锥形热源深度/mm	3.2	3.2	3.2	3.2
	高斯参数	3	3	3	3
	体积热流分数	0.8	0.8	0.8	0.8
表面热源	圆盘半径/mm	0.6	0.6	0.6	0.6
	表面热源深度/mm	0.1	0.1	0.1	0.1
	高斯参数	3	3	3	3

热影响区宽度,这是因为厚度的增大减少了热量在材料中的传输,并且厚度的增大使得热量在材料内部的分布更加分散,因此减小了热影响区的宽度;而降低焊接速度(方案5)会使得单位长度上的能量输入增加,因此会造成壳体侧(+11.52%)热影响区

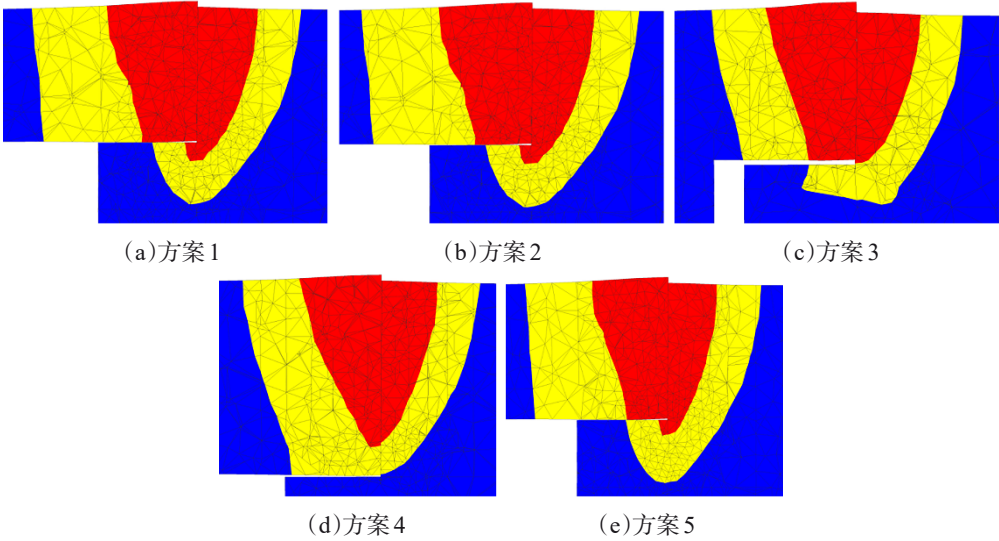


图5 热影响区结果示意

Fig. 5 Heat affected zone result diagram

表5 热影响区宽度结果统计

Table 5 Heat affected zone width result statistics				
方案名称	盖板侧热影响区宽度/mm	变化幅度(与方案1相比)	壳体侧热影响区宽度/mm	变化幅度(与方案1相比)
方案1	1.14	—	0.667 4	—
方案2	1.137	-0.26%	0.667 8	+0.06%
方案3	0.733 4	-35.67%	0.562 8	-15.67%
方案4	0.879 9	-22.82%	0.674 7	+1.09%
方案5	1.116	-2.11%	0.744 3	+11.52%

宽度的增大。

3.2 焊后残余应力结果分析

5 种分析方案仿真得到的焊后残余应力分布如图 6 所示, 各方案所得焊后残余应力结果大小如表 6 所示。由表 6 可知, 5 种方案得出的焊后残余应力分布趋势一致, 应力主要集中在左下角 1/4 段圆弧焊缝附近, 且最大应力也基本出现在此区域的同一位置。由表 6 可知, 5 种方案中, 焊后残余应力最小的是方案 2, 为 237.01 MPa, 焊后残余应力最大的是方案 3, 为 259.28 MPa。与对照组 (方案 1) 相比, 改变收弧方式 (方案 2) 可适当降低焊后最大残余应力 (-2.56%) 这是由于切线收弧未将热源加载在盖板与壳体对角线上, 一定程度上降低了结构的热应

变; 在盖板上增加凸台 (方案 3) 则导致焊后最大残余应力的增大 (+6.6%), 这是因为凸台的增加使得凸台与主结构连接处产生了几何突变, 可能产生了应力集中, 从而导致了残余应力的增大; 而增加盖板厚度 (方案 4) 和降低焊接速度 (方案 5) 对焊后最大残余应力基本无影响。

表 6 焊后残余应力大小

Table 6 Size of residual stress after welding

方案名称	最大残余应力/MPa	变化幅度 (与方案 1 相比)
方案 1	243.23	—
方案 2	237.01	-2.56%
方案 3	259.28	+6.6%
方案 4	245.25	+0.83%
方案 5	241.14	-0.86%

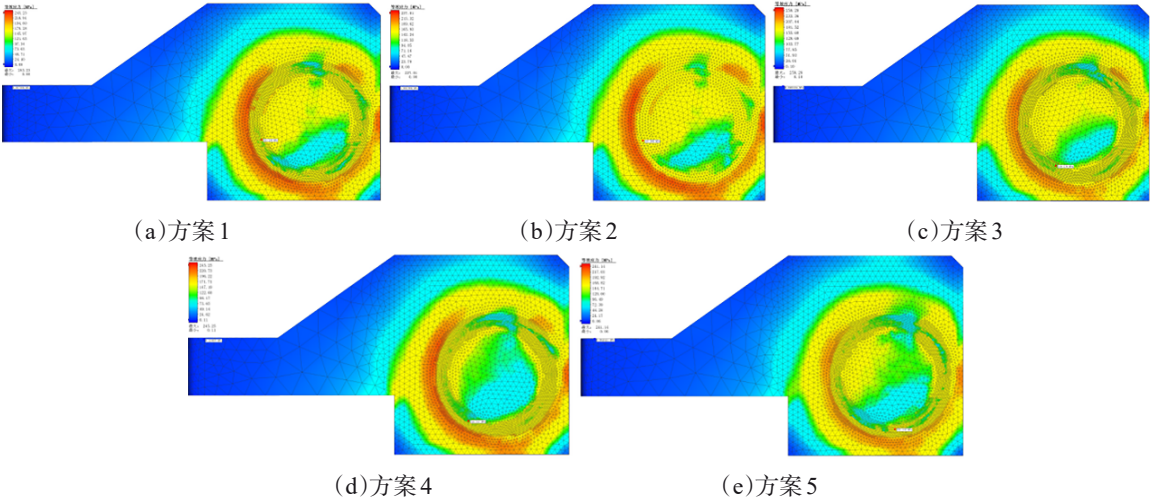


图 6 焊后残余应力分布
Fig. 6 Distribution of residual stress after welding

3.3 结果验证

由 3.1 节和 3.2 节可知, 与对照组相比, 在盖板上加凸台 (方案 3) 的方式可显著减小盖板侧 (-35.67%) 及壳体侧热影响区宽度 (-15.67%), 但焊后最大残余应力会略微增大 (+6.6%); 采用切线收弧 (方案 2) 的方式可适当降低焊后最大残余应力 (-2.56%), 但焊接热影响区基本未变化。综合考虑下, 采用在盖板上增加凸台并切线收弧的方式进行结果验证, 对水分配器试验件按此改进方案进行焊接, 焊后分别进行充气 (1.5 MPa, 30 min) 和导电氧化处理, 光学显微镜下观察未见有裂纹出现。后续采用在盖板上增加凸台并切线收弧的方式进行批量焊接, 生产出的水分配器均未见出现开裂现象,

因此认定改进的方案是有效的。

4 结论

针对 5056 铝合金水分配器电子束焊后出现的开裂问题, 探究不同结构形式、焊接工艺方案对焊接过程热影响区及焊后残余应力的影响, 设计 5 种方案开展焊接工艺过程仿真, 得到结论如下:

(1) 通过在盖板上加凸台的方式可显著减小盖板侧 (-35.67%) 及壳体侧热影响区宽度 (-15.67%); 增加盖板厚度也可显著减小盖板侧热影响区宽度 (-22.82%); 降低焊接速度则会增加壳体侧热影响区宽度 (+11.52%); 而改变收弧方式基本不影响热

影响区宽度。

(2)采用切线收弧的方式可适当降低焊后最大残余应力(-2.56%);在盖板上增加凸台会导致焊后最大残余应力增大(+6.6%);而增加盖板厚度和降低焊接速度基本不影响焊后最大残余应力。

(3)采用在盖板上增加凸台+切线收弧的方案进行验证,水分配器焊后经充气(1.5 MPa, 30 min)和导电氧化处理,光学显微镜下观察并未发现裂纹,且按此方案批产出的水分配器均未出现开裂现象,说明该改进方案是有效的。

参考文献:

- [1] 方大勇. 现代焊接技术发展的现状与展望[J]. 中国设备工程, 2019(9): 206-207.
FANG D Y. Current situation and prospect of modern welding technology development[J]. China Equipment Engineering, 2019(9): 206-207.
- [2] Mohandas T. Welding technologies in aerospace applications[J]. Aerospace Materials and Material Technologies, 2016(2): 65-83.
- [3] Liu J F, Cheng Y F, Jing X W, et al. Prediction and optimization method for welding quality of components in ship construction[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 9353.
- [4] 朱浩, 陈强, 陈剑虹. 热影响区几何尺寸对铝合金焊接结构变形及强度影响规律[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 77-81+117.
ZHU H, CHEN Q, CHEN J H. Influence rule of Heat Affected Zone geometrical dimension to aluminum alloy joint deformation and strength[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 77-81+117.
- [5] 樊亚玲, 杨宏亮, 王二建. 焊接热影响区应力腐蚀裂纹尖端力学特性分析[J]. 山西科技, 2020, 35(6): 35-37.
FAN Y L, YANG H L, WANG E J. Analysis on Mechanical Characteristics of Stress Corrosion Crack Tip in Welding Heat Affected Zone[J]. Shanxi Science and Technology, 2020, 35(6): 35-37.
- [6] James M N. Residual stress influences on structural reliability[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(8): 1909-1920.
- [7] Jie Z, Wang K, Liang S. Residual stress influence on fatigue crack propagation of CFRP strengthened welded joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 196: 107443.
- [8] Alipooramirabad H, Paradowska A, Ghomashchi R, et al. Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 28: 70-81.
- [9] Zhang Y Q, Zhao P, Tong Y Q, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Powder Metallurgy Superalloy Joints Welded by Inertia Friction Welding[J]. Materials, 2024, 17(6): 1342.
- [10] 徐斌荣, 王军, 罗震, 等. 预制槽尺寸对30CrMo板再制造残余应力的影响[J]. 焊接, 2024(8): 22-30.
XU B R, WANG J, LUO Z, et al. Influence of prefabricated slot size on residual stresses in remanufactured 30CrMo plates[J]. Welding & Joining, 2024(8): 22-30.
- [11] 赵艳丽, 张安锐, 辛勇, 等. 接头性能差异对Zr-Sn-Nb合金电子束焊接头残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2024, 45(5): 105-112.
ZHAO Y L, ZHANG A R, XIN Y, et al. Effect of joint property differences on residual stresses in Zr-Sn-Nb alloy electron beam welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(5): 105-112.
- [12] Ahmed S, Singh P, Ekkad S V. Three-Dimensional Transient Heat Conduction Equation Solution for Accurate Determination of Heat Transfer Coefficient[J]. Journal of Heat Transfer, 2020, 142(5): 051302.
- [13] 段成凯, 霍世慧, 刘永寿. 典型接头的焊接热过程数值仿真与试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(6): 38-44.
DUAN C K, HUO S H, LIU Y S. Numerical simulation and experimental study on welding thermal process of typical joints[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(6): 38-44.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>