

铍环电子束焊接温度场和应力场的有限元分析

董平, 陈裕泽, 邹觉生

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要:采用 ADINA/ADINAT 对铍环电子束焊接过程的温度场和应力场进行了有限元分析, 结果表明: 铍环焊接过程中焊缝外表面最高温度达 2 734 , 内表面最高温度仅 378 , 位于外止口铍环一侧; 铍环电子束焊接后, 在焊缝附近 2.0 mm 范围内焊接残余应力较大, 焊缝处于复杂的三维应力状态, 焊缝根部的残余应力达到最大; 内外止口铍环由于结构差异, 焊接残余应力分布并不完全相同。

关键词:铍; 电子束焊接; 温度场; 应力场; 有限元分析

中图分类号: TG407 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6931(2002)03-0209-05

Prediction of Temperature and Stress Fields in Beryllium Ring During Electron Beam Welding by Finite Element Analysis

DONG Ping, CHEN Yu-ze, ZOU Jue-sheng

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-71, Mianyang 621900, China)

Abstract: The temperature and stress fields in beryllium ring are analyzed by ADINA/ADINAT software during electron beam welding. The result shows that the highest temperature at the outer surface reaches 2 734 , while the highest temperature at the inner surface is only 378 , which is located at the side of out-opening of beryllium ring. After welding, residual stress is considerable large and complexity within 2.0 mm from the weld line and residual stress reaches the largest at the weld toe. For the structure difference between in-opening and out-opening beryllium ring, residual stress at the in-opening beryllium ring is not as same as that at the out-opening beryllium ring.

Key words: beryllium; electron beam welding; temperature field; stress field; finite element analysis

铍是低原子序数的结构材料, 具有较好的热物理、机械和核性能, 在核能、航天和航空等领域得到了较为广泛的应用。但铍的延性差,

从而影响了铍的焊接性。电子束焊接铍环试件时, 由于焊缝附近温度变化剧烈, 焊接后铍焊缝附近常产生较大焊接残余应力, 从而导致铍环

收稿日期: 2001-09-20; 修回日期: 2001-11-26

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术重大基金资助项目(1999Z0304)

作者简介: 董平(1970—), 男, 四川达县人, 助理研究员, 在读博士研究生, 计算力学专业

产生焊接裂纹,影响了焊接质量。为确定铍环电子束焊接过程的温度场及焊后铍环内的残余应力分布,采用大型有限元分析软件 ADINA/ADINAT 对铍环电子束焊接过程进行有限元分析。

1 有限元模型

1.1 试样及电子束焊接工艺

图 1 是研究焊接铍环的结构示意图,通过自嵌接止口对焊而成,其中,左侧止口向外,常称为外止口铍环,右侧止口向内,常称为内止口铍环。为避免焊接热裂纹,采用在焊缝间添加约 0.4 mm 厚的 AlSi12 环作为焊接钎料,以降低焊接时铍环焊缝及附近的温度。采用单道电子束焊接工艺,电子束在焊缝表面聚焦。

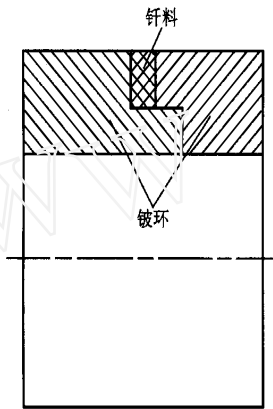


图 1 铍环结构示意图

Fig. 1 The schematic figure of beryllium ring

1.2 焊接温度场有限元分析

采用轴对称的有限元分析模型。由于铍环的内外止口结构存在差异,因此在轴向上铍环结构不作任何简化。计算时,考虑铍环内外止口的结构差异,同时也考虑 AlSi12 钎料在焊接中的作用,将整个铍环划分为 646 个节点,559 个单元。最大单元尺寸为 0.5 mm × 0.5 mm。

有限元分析需确定电子束焊接的能量分布。假设电子束沉积在铍环焊缝的能量为 Gauss 分布^[1]。采用电子束在表面聚焦条件下对钽箔打孔实验的结果,有限元分析取有效加热半径为 0.8 mm。考虑到电子束焊接在高真空环境下进行,许多元素蒸发或飞溅带走大量热能,故将电子束焊接的热效率取为 0.60。将

电子束在焊缝外表面沉积的能量作为热流边界条件,其大小与电子束有效加热半径和电子束焊接速度有关。焊接时,铍环两端必须有焊接夹具夹持,焊接夹具与铍环之间存在接触热传导。考虑这一因素,在铍环两端施加对流边界条件,在铍环内外表面施加辐射边界条件。

1.3 焊接应力场有限元分析

采用轴对称应力分析模型。单元网格划分与温度场分析完全相同。据 ADINA 软件对轴对称问题分析的要求^[2],有限元分析须在 yz 平面内进行,对称轴取为 z 轴。在焊接过程中,铍环两端使用的焊接夹具对铍环施加一定压力,对铍环的一端添加 z 方向位移为 0 的固支约束,另一端添加一较小的分布压力,本文取为 0.2 N/mm。焊接温度冷却到室温后再将此压力完全卸载,以保证得到的应力为铍环的焊接残余应力。铍环内各时间步在各节点的焊接温度由焊接温度场分析得到,ADINA 软件直接从 ADINAT 的温度场结果数据文件中读取。

焊接加热瞬间焊缝外表面的温度变化剧烈,焊缝外表面温度较高,采用完全 Lagrange 法进行求解,收敛判据选择残余力/残余力矩,收敛值取为默认值,即残余力为 0.01,残余力矩为 0.001。焊接加热阶段的时间步长取为 0.002 s。

1.4 材料性能

表 1 列出计算所取铍和 AlSi12 钎料的热物理和力学性能参数^[3]。进行温度场有限元分析时,因焊接熔池快速凝固,计算中未考虑熔池内的液体流动,采用等效热容法考虑熔化潜热的影响,采用欧拉向后积分法求解单元刚度矩阵,平衡迭代收敛的相对误差为 0.001。在电子束焊接的加热阶段,计算时间步长取为 0.001 s,降温阶段计算取为 0.1 s。进行铍环焊接应力场有限元分析时,由于焊接过程速度较快,不考虑材料蠕变,采用 Von Mises 屈服准则,不考虑材料硬化效应。铍和 AlSi12 钎料的力学性能均随温度发生变化,当焊缝温度高于材料熔点后,材料的弹性模量和屈服强度均取较小值。本文取两种材料熔化后的弹性模量为 5 GPa,屈服强度为 5 MPa。

表 1 不同温度下铍材和 AlSi12 钎料的热物理性能和力学性能

Table 1 Temperature-dependent material properties of beryllium and AlSi12

温度/		导热系统/(W mm ⁻¹ ·s ⁻¹)		比热容/(ml mm ⁻³ ·s ⁻¹)		弹性模量/GPa		泊松比		屈服强度/MPa		10 ⁶ 线膨胀系数/s ⁻¹	
铍	AlSi12	铍	AlSi12	铍	AlSi12	铍	AlSi12	铍	AlSi12	铍	AlSi12	铍	AlSi12
20	20	0.141	0.121	3.46	2.56	324	74.2	0.02	0.33	445	130	4.54	20.4
200	200	0.133	0.121	4.49	2.56	317	64.7	0.02	0.35	367	80	9.52	21.4
400	400	0.116	0.121	5.35	2.56	299	55.7	0.02	0.37	160	50	15.99	22.4
600	570	0.097	0.121	5.63	2.56	290	10.0	0.02	0.39	80	10	16.95	23.5
1 000	582	0.056	0.121	8.01	2.56	281	5.0	0.02	0.39	10	5	18.00	23.5
1 283	4 000	0.033	0.121	5.61	2.56	20	5.0	0.02	0.39	10	5	18.50	23.5
1 290		0.060		5.61		5		0.02	0.39	5		18.50	
4 000		0.060		5.61		5		0.02	0.39	5		18.50	

2 结果和讨论

2.1 焊接温度场

图 2 示出了铍环焊缝内外表面和中面温度随时间的变化。由图可见:当电子束作用在铍

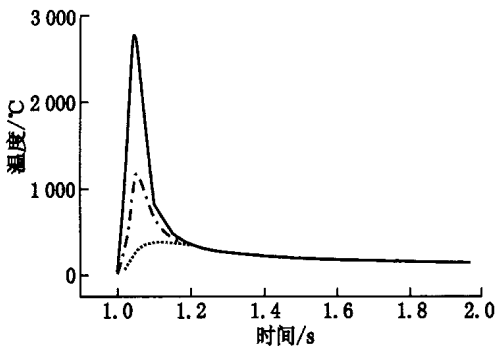


图 2 焊缝内外表面和中面温度随时间的变化

Fig.2 The temperature relation to time at the weld line

实线——外表面;点划线——中面;虚线——内表面

环焊缝外表面时,焊缝外表面温度迅速上升,最高达 2 734 ,远高于铍材熔点 1 283 ,因此,焊接时焊缝附近铍材会发生少量溶解。当焊缝外表面温度达到最高时,因热传导需一定时间,焊缝中部及内表面温度仍较低,尚未达到最高,焊缝中面为 1 218 ,内表面仅为 287 ,焊缝内、外表面温差约 2 450 。因此,当电子束热源作用在铍环焊缝瞬间,在铍环深度方向上存在巨大温度梯度,其热冲击较大。经约 0.15 s 后,内表面温度升至最高为 378 ,此时,外表面已下降为 809 。

图 3 示出铍环外表面温度达到最高时铍环内外表面和中面温度沿轴向的变化。据此可估算出焊缝表面熔化宽度约为 1.50 mm,与实际

焊接时的金相分析结果一致。内表面最高温度并未出现在正对焊缝的内表面,而是向外止口一侧偏移约 3.0 ~ 3.5 mm。这是由于铍环内外止口水平段未完全贴紧,热量通过止口接触热传导的速度比直接热传导稍慢的缘故。

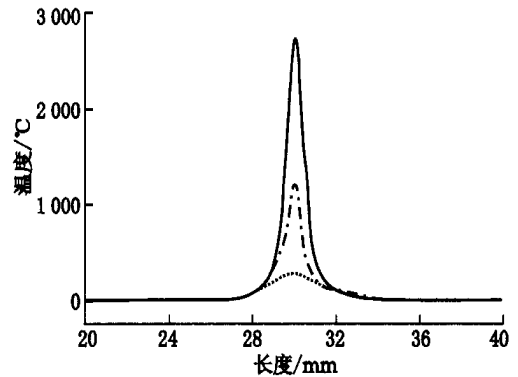


图 3 铍环内外表面和中面温度沿轴向分布

Fig.3 The temperature along axis direction at the surface

实线——外表面;点划线——中面;虚线——内表面
t = 0.16 s

2.2 焊接应力场

2.2.1 铍环内外表面的应力分布 图 4 是铍环内外表面轴向应力 σ_{zz} 沿轴向的变化。图中,长度为 30 mm 处表示焊缝中心,小于 30 mm 表示外止口铍环上的点,大于 30 mm 表示内止口铍环上的点。由图可见:在焊缝中心,铍环外表面的轴向应力 σ_{zz} 为压应力,最大压应力在外止口铍环一侧,离焊缝中心约 0.3 mm,大小为 - 356.6 MPa;离焊缝中心约 1.5 mm 处,外表面上的 σ_{zz} 上升为最大拉应力,其值为 221.8 MPa,最大拉应力位于外止口铍环一侧,内止口

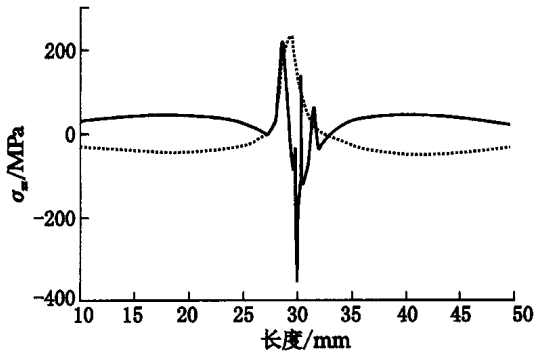


图 4 铍环内外表面残余应力 σ_{zz} 的轴向分布

Fig. 4 Stress σ_{zz} along axis direction at the surface
实线——外表面;虚线——内表面

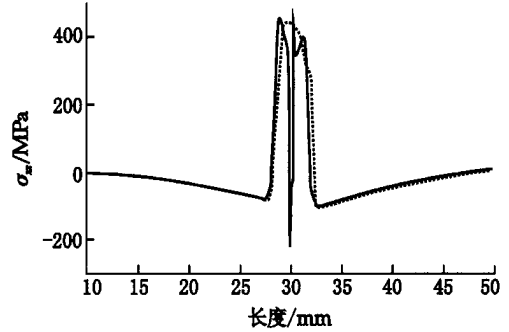


图 6 铍环内外表面残余应力 σ_{xx} 的轴向分布

Fig. 6 Stress σ_{xx} along axis direction at the surface
实线——外表面;虚线——内表面

铍环一侧拉应力较小,最大值为67 MPa;在铍环内表面上,离焊缝 2 mm 范围内, σ_{zz} 为拉应力,最大值为 238 MPa;远离焊缝,铍环内的轴向应力较小,在铍环外表面为拉应力,内表面为压应力。由该图可见:因铍环内外止口结构的差异,铍环内的应力分布并不完全相对于焊缝呈对称分布,而是存在一定差异,外止口铍环上的最大轴向应力比内止口铍环上的稍大些。图 5 是铍环内外表面径向残余应力 σ_{yy} 的分布。按照弹性力学平衡条件,内外表面上的径向应力应全为 0,但因实际所取表面为离表面很近的单元 Gauss 点,故径向应力可能存在。由图可见:在焊缝附近,外表面上的径向应力较大,最大值为 278 MPa,离焊缝中心约 2 mm 处,径向应力减小为 0;铍环内表面的径向应力为压应力,最大值为 -100 MPa。图 6 是铍环内外表面周向应力 σ_{xx} 沿轴向的分布。由图 6 可见:在

铍环焊缝中心的 AlSi12 钎料上,外表面的周向应力为压应力,最大值为 -222 MPa,在钎料和铍基体界面,周向应力迅速上升,由压应力转变为最大拉应力,铍基体上的最大拉应力为 468.2 MPa,离焊缝中心 0.6 ~ 1.3 mm 范围的铍基体内的周向应力都保持为较大应力值,在离焊缝中心 2 mm 以外的区域内,铍基体中的周向应力较小,且铍环内外表面的周向应力大小相同。在铍环内表面上,焊缝附近的周向应力 σ_{xx} 为拉应力,且应力值较大,最大拉应力为 440 MPa;离焊缝中心约 2 mm 处,内表面的周向应力减小为较小值。图 7 为铍环焊接后内外表面的等效应力 σ_e 的轴向分布。由图可见:在铍环外表面上,因 AlSi12 钎料的屈服强度较低,因而,焊缝中心的 σ_e 相对于铍材来说较低,而在铍基体上,焊缝附近的 σ_e 较大,在焊缝附近 2.0 mm 范围内,铍环上的等效应力达到了铍的屈服应力,即在该范围内,铍环发生了焊接塑性变形;在离焊缝 2.0 ~ 2.3 mm 的范围内,铍材上的等效应力急剧下降,远离焊缝,铍环内的 σ_e 较小;在铍环内表面上,焊缝附近 2.0 mm 内的 σ_e 较大,铍环在这一区域内同样发生了塑性变形,即铍环内外表面发生塑性变形的区域基本一致。

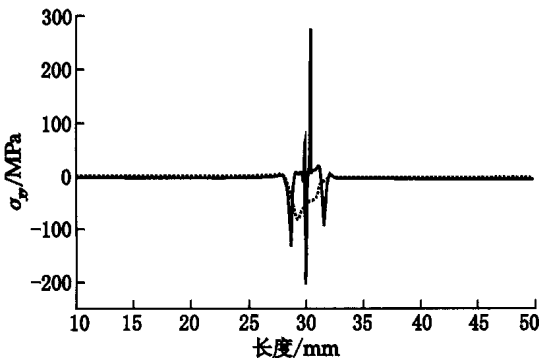


图 5 铍环内外表面残余应力 σ_{yy} 的轴向分布

Fig. 5 Stress σ_{yy} along axis direction at the surface
实线——外表面;虚线——内表面

2.2.2 铍环沿深度的应力分布 图 8 ~ 10 示出铍环电子束焊接后焊缝及内、外止口铍环在离焊缝中心 2 mm 处残余应力沿深度的分布。由图可见:铍环的不同截面沿深度的应力分布各不相同,在焊缝处,沿深度的应力变化较大,焊缝内部的应力比外表面更大,在离外表面约

1.1 mm 的焊缝根部, 残余应力达到最大值, 铍环焊缝残余应力处于复杂的三维应力状态, 各

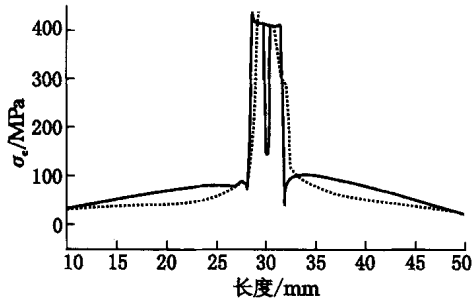


图 7 铍环内外表面残余等效应力 σ_e 的轴向分布
Fig. 7 Stress σ_e along axis direction at the surface
实线——外表面; 虚线——内表面

点受力明显不同, 应力梯度较大。因此, 焊接后在铍环焊缝附近容易产生宏观开裂, 尤其是焊缝根部经常产生焊接微裂纹。从图 9 和 10 同样可看出: 因内外止口铍环结构的差异, 在离焊缝中心 2 mm 处, 内外止口铍环上沿深度的应力分布不完全相同, 与焊缝中心的残余应力相比, 离焊缝中心 2 mm 处截面上的应力已大幅度减小, 沿深度的应力分布逐渐均匀化, 最大等效应力不到 150 MPa。

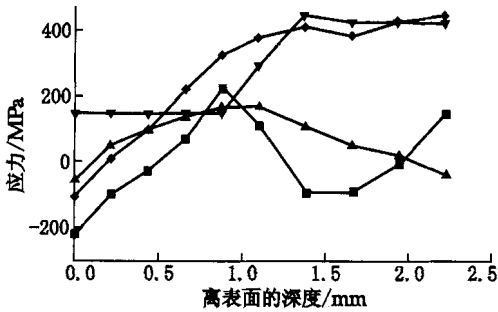


图 8 铍环焊缝处残余应力的深度分布
Fig. 8 Stress along depth direction at the weld line
—— xx' ; —— yy' ; —— zz' ; ▼ —— e

3 结论

1) 铍环电子束焊接时, 电子束热源对焊缝热冲击较大, 焊缝外表面最高温度为 2 734 , 内表面最高温度仅 378 左右, 内表面最高温度在外止口铍环一侧。

2) 由于内外止口铍环结构的差异, 焊接后铍环内的应力并不完全相对于焊缝对称, 外表

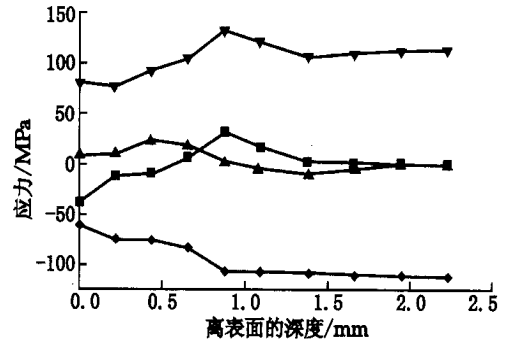


图 9 内止口铍环离焊缝 2 mm 处应力的深度分布
Fig. 9 Stress vs depth at the inner opening Be ring

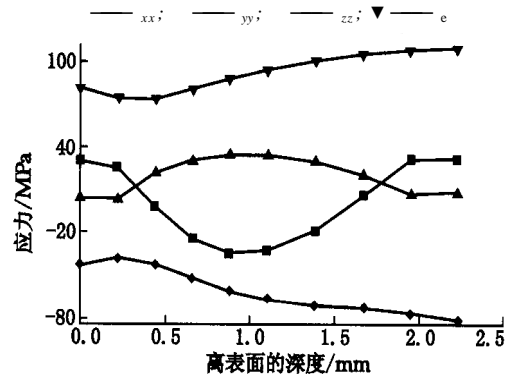


图 10 外止口铍环离焊缝 2 mm 处应力的深度分布
Fig. 10 Stress vs depth at the out-opening Be ring

面的最大焊接残余应力位于外止口铍环一侧。

3) 铍环电子束焊接后, 焊缝及附近处于复杂的三维应力状态, 表层以下的残余应力比铍环外表面的残余应力更大, 在焊缝根部, 焊接残余应力达到最大值, 从而使铍环焊缝附近易产生宏观开裂, 焊缝根部产生焊接微裂纹。

参考文献:

[1] 陈 楚. 数值分析在焊接中的应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985. 178.
[2] Bathe KJ. ADINA/ ADINAT 使用手册[M]. 赵兴华, 徐福娣译. 北京: 机械工业出版社, 1981. 62.
[3] 美国金属学会. 金属手册(第九版第二卷)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 1 025.