

基于热场的铝合金电子束焊缝余高数值模拟

刘成财, 马丽翠, 何景山

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要:文中基于熔池凝固收缩和补缩理论开发了临界固相率与 Niyama 判据相结合的余高判据式程序,并采用它对 20 mm 厚 2219 高强铝合金未熔透电子束焊缝余高产生原因进行了模拟探索和试验验证。结果表明,焊缝的中上部区域存在有大量凝固阶段未收缩的疏松间隙,这些间隙体积的存在导致了焊缝表面余高的形成。通过计算和与试验件对比可知,模拟得到的余高尺寸和焊缝体积膨胀率误差分别在 11% 和 23.67% 左右,可见采用余高判据式程序能够对焊缝余高的产生进行合理地数值预测。

关键词:余高判据式; 未熔透电子束焊; 凝固收缩; 数值预测

中图分类号: TG 456.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)02-0111-04

0 序 言

随着现代工业尤其是高精尖技术领域的飞速发展,对工程材料的焊接质量提出了越来越高的要求。电子束焊接工艺作为高能束焊接技术的一种,凭借其自身优势展现了极为广阔的应用前景^[1]。

在实际生产中发现,未熔透电子束焊件都会有焊缝余高产生,这种现象是普遍存在的,在铝合金焊接中表现得尤为明显。由于电子束焊接时一般不采用填丝方式^[2-4],同时还存在有大量合金元素的蒸发和烧损^[5],因此可推断余高的产生主要来自焊缝金属的体积膨胀。由于体积膨胀与焊缝组织疏松状态和内部缺陷直接相关,因此电子束焊缝的余高能够直接反映焊缝内部的成形质量。由此可见,掌握电子束焊焊缝余高的形成机制对提高其焊接接头力学性能是十分重要的。另一方面,热场数值模拟技术在电子束焊接领域的应用还主要集中在温度场和应力场^[6,7],针对焊缝余高形成情况进行数值模拟方面的研究则未见报道。

文中以 ANSYS 有限元软件为平台,数值研究了 20 mm 厚的 2219 高强铝合金板的未熔透条件下的电子束焊接温度场,并结合枝晶间液态金属收缩和补缩理论^[8],建立计算焊缝余高的判据式,并基于该判据式对余高进行了数值计算,从熔池凝固收缩角度对余高产生原因进行描述。对有效控制电子束焊缝表面成形具有重要的指导意义;最后文中通过试验对预测判据加以验证。

1 有限元模型的建立

1.1 2219 铝合金热物理性能参数

温度场数值模拟所需的带有内热源的纯导热微分方程为

$$\rho \left(c - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; c 为比热容; L 为潜热; f_s 为固相率; λ 为热导率。由此可见,2219 铝合金电子束焊热分析中需要热导率、比热、密度以及热焓等参数。通过查阅手册以及应用 procast 模拟软件相关热物性参数数据库进行计算,较为准确地给出了不同温度下的材料热物性参数值,如表 1 所示。

表 1 铝合金热物理性能参数

Table 1 Aluminum alloy thermophysical parameters

温度 $T/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/$ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	热传导 $\lambda/$ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	比热容 $c/$ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	焓 $h/$ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$
20 ~ 643	2 700	202	871	0
> 643	2 400	300	1 060	387 000

1.2 有限元网格划分

文中基于 ANSYS 有限元软件平台,建立了尺寸为 100 mm × 30 mm × 20 mm 的几何模型。考虑到模型的对称性,取其一半进行建模并进行网格划分,如图 1 所示。划分单元类型选用 solid70 3-D 实体热单元和 surf152 3-D 表面热效应单元,以实现后续对模型边界条件和热源载荷的同时加载。模型最终划分

的单元总数为 226 800 个,节点总数为 231 732 个。



图 1 三维有限元模型

Fig. 1 Three dimensional finite element model

1.3 热源模型

铝合金未熔透电子束深熔焊的焊缝形貌具有明显的大深宽比的钉形特征. 对此,文中采用高斯面热源与拟合抛物线体热源相叠加的组合热源模型,其组合形式如图 2 所示。

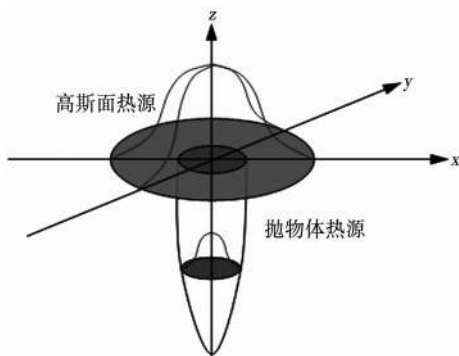


图 2 组合热源模型

Fig. 2 Combined heat source model

其中,高斯面热源的功率密度分布为

$$q_s = \frac{3\eta_1\gamma_s Q}{\pi R_s^2} \cdot \exp\left(-\frac{3r_1^2}{R_s^2}\right) \quad (2)$$

旋转抛物体热源模型的功率密度分布为

$$q_v = \frac{6\eta_2\gamma_v Q(z_e - z_i)e^3}{\pi(e^3 - 1)H^2 r_e^2} \exp\left(-\frac{3r_2^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

式中: q_s 为高斯面热源的功率密度; η_1 为高斯面热源的热效率; R_s 为高斯面热源有效半径; r_1 为高斯面热源上任意一点到热源中心的距离; q_v 为旋转抛物体热源上任意点的功率密度; η_2 为旋转抛物体热源的热效率; z_e 为抛物体热源最大纵向坐标; z_i 为抛物体热源最小纵向坐标; H 为抛物热源的高度; r_e 为抛物热源的开口半径; r_0 为抛物热源任意半径,等于

$r_e(z - z_i)^{0.5}(z_e - z_i)^{-0.5}$; r_2 为抛物体热源任意截面上一点到其中心的距离; Q 为电子束输入的总功率,等于 UI ; U 是电子束加速电压; I 是电子束流; γ_s 是表面热源的功率分配系数; γ_v 抛物体热源的功率分配系数。

1.4 焊缝余高判据式的建立

液态金属凝固后期枝晶间的流动可视作在多孔介质中的流动,故使用达西定律来描述压力损失 Δp 和流速 u 之间的关系,略去重力因素,表达式为

$$\Delta p = \frac{\mu(1 - g_s)}{K} u = \frac{\mu \Delta x}{\gamma(1 - g_s)} u \quad (4)$$

式中: μ 为动力粘度; g_s 为体积固相率; Δx 为路径长度; K 为渗透率; γ 为系数; u 为流速. 由式(4)可知,随着固相率的增加,相同流速下的压力损失将会急剧增加,故存在一个临界固相率 f_{sc} ,当凝固熔池单元的实际固相率大于该临界值时,合金的体积收缩将无法得到液态金属的补充. 文中取 $f_{sc} = 0.6$ 作为可流动补缩单元的判据。

根据树枝晶形成判据式^[8]以及合金相图,可得 Niyama 判据的计算公式为

$$G/\sqrt{R} < \gamma \varepsilon \sqrt{k \cdot \Delta T / D_L} \quad (5)$$

式中: G 为温度梯度; R 为凝固速度; γ 为枝晶骨架的修正系数; ε 为枝晶生长形态修正系数; k 为溶质的平衡分配系数; ΔT 为固液相线温度差; D_L 为液相中溶质扩散系数. 当单元在某个凝固过程中同时满足这两个判据式时,就会出现未补缩缺陷,表现为熔池体积的膨胀及焊缝余高的生成。

2 数值模拟与试验验证

焊接工艺参数如表 2 所示. 聚焦电流的影响通过调整组合热源的体热源高度和热源功率分配系数来实现. 文中采用 $\gamma = 0.3$, $r_e = 0.5$ mm, $r_s = 2.5$ mm,体热源高度 $H = 12$ mm 来模拟表面聚焦。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

加速电压 U/kV	电子束流 I_b/mA	聚焦电流 I_f/mA	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
60	60	730	10

2.1 温度场数值模拟与试验验证

电子束焊接过程的温度分布直接关系凝固阶段熔池的收缩情况以及余高形成. 图 3 给出了 5 s 时刻焊件的温度场和熔池的形貌对比. 其中,图 3a 为焊件上表面(上侧)和纵深方向(下侧)的温度分布,

熔池区域图中标出(温度高于 643 °C)。由图 3 可知,熔池具有明显的深熔特征和钉形形貌,沿焊速方向呈明显的卵形拖尾,前沿等温线/面分布密集而后沿稀疏,后下方密集而后上方稀疏。后沿等温线/面这样的分布主要是由于熔池下部钉身区域比上部钉帽区域要窄,热量散失更快,因此冷却速度越快,温度梯度就会越大,所以等温线就会越密集。此外,由图 3b 深度方向观测点的热循环曲线分布可知,距离焊件顶面越近,峰值温度就会越高,高温停留时间就会越长,降温速度就会相对越慢;最后,由图 3c 模拟得到的熔池形貌与实际焊缝的形貌对比可知,熔深的误差为 11.5%;熔宽的误差为 4.35%。

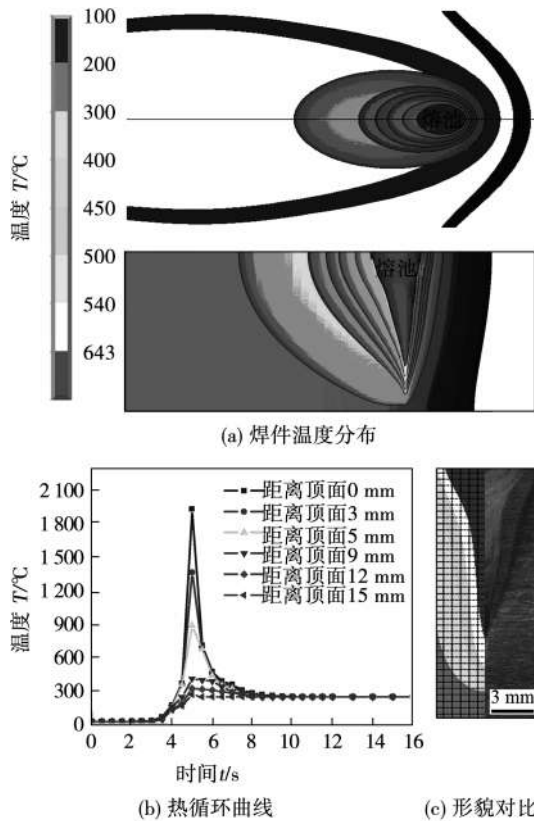


图3 温度分布和形貌对比

Fig. 3 Temperature distribution and shape comparison

通过上述分析可知,采用组合热源模型进行数值模拟能够得到合理的温度分布。

2.2 焊缝余高数值模拟与试验验证

图 4 所示为实际试验得到的电子束焊缝不同深度处的微观组织分布。其中,焊缝上部区域为粗大的树枝晶,中部区域为细小的等轴晶,而下部区域为更加细小的等轴晶。由此可知,焊缝的中上部区域的冷却速度要比其下部区域慢得多,因此该区域的晶粒会相对地充分长大并发生体积膨胀,进而导致最终焊缝余高的形成;此外,焊缝中上部的树枝晶分

布也验证了余高判据式程序所基于的树枝晶凝固补缩理论的合理性。

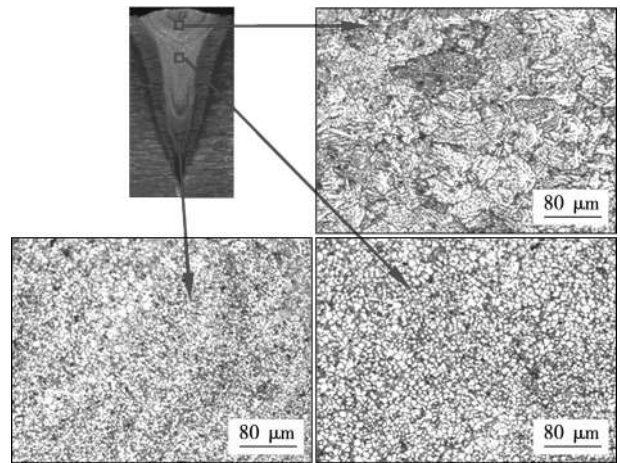


图4 焊缝深度方向不同位置微观组织

Fig. 4 Microstructures at different position in depth

图 5 显示了计算得到的熔池冷却凝固过程中未能实现补缩的单元分布情况。其中,整个区域范围代表熔池,以及未补缩的单元都已在图中标出。由图 5 可知,这些未补缩单元主要分布于焊缝的中上部区域,只有少量位于焊缝的钉尖区域。造成未补缩单元这样分布的原因如下:由于焊缝中上部区域的等温线/面比较稀疏(图 3a),因此在冷却过程中的温度梯度比较小,这使得 G/\sqrt{R} 的值比较小,当其小于临界值 $\gamma \varepsilon \sqrt{k \cdot \Delta T / D_L}$ 时就会出现未补缩间隙。另外,由图 3b 的热循环曲线可知,焊缝下部钉尖处单元具有更高的冷却速度,这也造成了 G/\sqrt{R} 值的减小,然而该区域的温度梯度较大,故只有少数的未收缩单元存在。

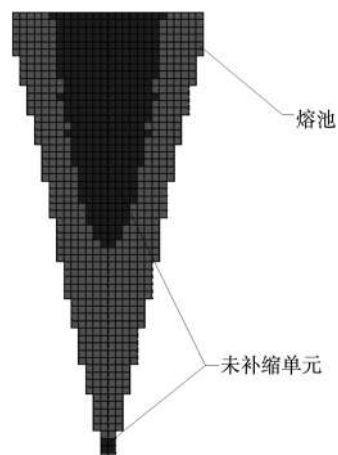


图5 凝固过程中的未补缩单元分布

Fig. 5 Distribution of non-feeding elements during solidification process

图 6 给出了基于判据程序模拟得到的余高结果,并且将其与实际焊缝余高进行对比.可见,二者吻合较好.此外,为了进一步估算体积膨胀和余高的误差,将它们的计算和实际结果转化为焊缝横截面积来进行对比,如表 3 所示.

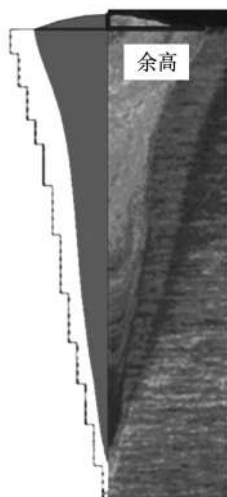


图 6 焊缝余高对比

Fig. 6 Comparison between weld reinforcement

表 3 模拟结果与实际结果对比

Table 3 Comparison between simulated and actual results

结果	焊缝面积 $S_w/10^{-6} \text{ m}^2$	体积膨胀率 $\alpha_v (\%)$	余高面积 $S_h/10^{-6} \text{ m}^2$
模拟	35.34	5.48	1.94
实际	30.37	7.18	2.18

由表 3 可知,余高尺寸误差在 11%,熔池体积膨胀率误差在 23.67%,可见采用余高判据式能够得到合理的模拟余高.

3 结 论

(1) 模拟得到的深熔焊熔池形貌呈显著钉形特征,熔深误差 11.5%,熔宽误差 4.35%,与实际焊缝形貌吻合良好,可见采用组合热源模型能够得到合理的温度分布.

(2) 焊缝深度方向微观组织分布验证了开发的余高判据式程序所基于的树枝晶凝固补缩理论合

理性.

(3) 采用余高判据式程序成功实现对未收缩单元体积膨胀率和余高的计算,计算误差分别为 11% 和 23.67%.

参考文献:

- [1] 范 玲. 平板对接接头电子束焊接残余应力研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [2] Bach F W, Szelagowski A, Verseemann R, *et al.* Non vacuum electron beam welding of light sheet metals and steel sheets[J]. *Welding in the World*, 2003, 47(34): 3-4.
- [3] Elmer J W, Giedt W H, Egar T W. The transition from shallow to deep penetration during electron beam welding[J]. *Welding Research*, 1990, 76(5): 167-176.
- [4] 吴庆生. 高强铝合金电子束焊接焊缝成形质量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [5] 汪兴均, 黄文荣, 魏齐龙, 等. 电子束焊接 5A06 铝合金接头 Mg 元素蒸发烧损行为分析[J]. *焊接学报*, 2006, 27(11): 61-64.
Wang Xingjun, Huang Wenrong, Wei Qilong, *et al.* Evaporation loss of Mg element in 5A06 aluminium alloy electron beam welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(11): 61-64.
- [6] 陈芙蓉, 霍立兴, 张玉凤, 等. BT20 钛合金电子束焊接残余应力三维有限元数值模拟[J]. *焊接学报*, 2004, 25(1): 61-64.
Chen Furong, Huo Lixing, Zhang Yufeng, *et al.* Finite element calculation of residual stresses on electron beam welded BT20 plates[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(1): 61-64.
- [7] 付 玮, 黄国刚, 杨新华, 等. 焊缝形貌对电子束焊接残余应力分布的影响[J]. *焊接学报*, 2011, 32(6): 53-60.
Fu Wei, Huang Guogang, Yang Xinhua, *et al.* Effects of weld profile on electron beam welding residual stress distribution[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(6): 53-60.
- [8] 张承甫, 肖理明, 刘瑞祥, 等. 二元合金单向凝固从胞状晶向树枝晶过渡的判据[J]. *金属学报*, 1986, 22(4): 194-195.
Zhang Chengfu, Xiao Liming, Liu Ruixiang, *et al.* A criterion of cell-dendrite transition in unidirectional solidification of binary alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1986, 22(4): 194-195.

作者简介: 刘成财,男,1983 年出生,博士研究生. 主要从事电子束焊接成形控制及数值仿真相关研究工作. 发表论文 4 篇.
Email: liuchengcai1983@163.com