

# 考虑铝合金接头软化的焊接变形及残余应力预测方法

梁伟，郭科峰，龚毅，卞功文

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

**摘要：**针对铝合金焊接接头的软化问题, 通过采用合理材料模型对该问题进行了描述, 并在此基础上开发了相应的热-弹-塑性有限元计算方法来预测铝合金薄板的焊接变形和残余应力。以TIG重熔铝合金薄板为例, 模拟分析了焊接过程中的温度场、残余应力和焊接变形。同时, 采用试验方法测量了焊件的挠曲变形。结果表明, 考虑软化现象的有限元数值计算结果与试验测量结果更吻合, 验证了提出材料模型和所开发的有限元计算方法的有效性; 对于接头软化较为明显的铝合金材料, 进行焊接残余应力的数值模拟时有必要建立反映接头软化的材料模型。

**关键词：**接头软化; 铝合金; 残余应力; 焊接变形; 数值模拟

中图分类号: TG 404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2017)05-0058-05

## 0 序言

提高焊接残余应力及变形预测的准确性一直是焊接工作者关注的焦点问题之一。前期研究表明, 热-弹-塑性有限元数值计算方法能忠实地跟踪焊接的加热和冷却过程, 在焊接接头的焊接变形及残余应力预测中被广泛采用<sup>[1]</sup>。为了提高该方法预测焊接变形和残余应力的精度, 若干重要问题得到了较好的解决, 比如(1)反映焊接特征的热源模型得到了丰富<sup>[2,3]</sup>; (2)考虑材料冶金相变影响的材料模型得到了开发<sup>[4]</sup>; (3)“生死单元”技术被用于模拟焊缝的熔敷金属填充<sup>[5]</sup>; (4)焊接热分析考虑熔池内部液态金属的流动<sup>[6]</sup>。

铝合金在热物理性能和力学性能上有明显的特性, 比如: 线膨胀系数大、热传导率高、弹性模量小、高温屈服强度低, 正是这些材料特性的不同使得铝合金焊接变形比碳钢更加明显。随着铝合金结构材料的使用越来越普及, 采用热-弹-塑性有限元方法预测铝合金接头焊接变形及应力的研究也在逐步展开<sup>[7-11]</sup>。然而, 对铝合金焊接接头而言, 一个突出的现象是: 由于晶粒内组织结构发生转变, 导致接头力学性能(特别是硬度和屈服强度)在焊缝和热影响区发生较大变化, 软化现象在某些铝合金中体现得尤为明显<sup>[12,13]</sup>。目前已有学者开始关注铝合金接头软化对焊接变形中面内收缩的影响<sup>[14]</sup>。

为了更精确地反映接头软化对铝合金薄板残余应力及焊接变形的影响, 对考虑软化的材料模型进行了研究, 同时开发了综合考虑包括接头软化在内的材料非线性、几何非线性的有限元数值计算方法来模拟铝合金薄板的残余应力和焊接变形。以6061铝合金薄板TIG重熔为例, 比较模型与试验结果, 验证了软化模型的有效性, 并定量地分析铝合金接头软化对残余应力和焊接变形的影响。

## 1 试验方法

采用TIG焊对Al-Mg-Si系6061铝合金薄板进行了单道重熔试验。选择6061铝合金进行焊接试验主要基于以下两点考虑: 其一, 在国内, 6061铝合金的研究较为成熟, 由于是热处理强化铝合金, 焊接性能优异, 在汽车、轨道车辆的车体结构件制造中得到广泛使用; 其二, 该合金在焊后接头的软化现象非常明显。

试板尺寸为300 mm × 200 mm × 3 mm。焊接起始端和收弧端离试件两端的距离都为50 mm, 部分焊(焊缝长度小于板长)的焊缝长度为200 mm, 焊接过程中, 焊件处于自由状态, 不受任何外在拘束。焊接电流I为180 A, 电压U为15 V, 焊接速度v为15 mm/s。为了确认试验对变形的再现程度, 采用相同的焊接工艺参数完成了两组试验。

试件焊后的形貌如图1所示。可以看出, 3 mm铝合金薄板在焊后发生了明显的面外变形, 呈现较为明显的“凸-凹型”分布(焊接方向为“凸”型, 垂直于焊缝方向为“凹”型)。为了测量铝板的翘曲变形,

焊后将试件变形后的边缘轮廓形状画在白纸上, 以靠近焊接起点的端点为原点, 每隔 25 mm 测量了薄板挠曲变形.

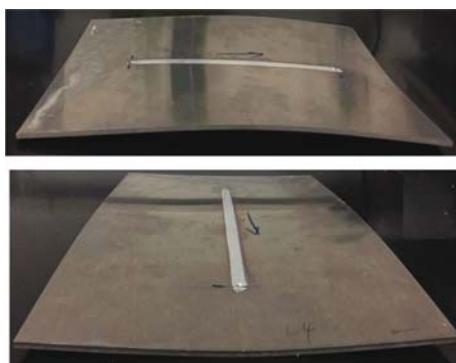


图 1 焊接接头及焊后形态

Fig. 1 Weld joint and its deformation

## 2 热-弹-塑性有限元数值模拟

为节省计算时间, 有限元模型简化为取一半宽度的半板模型, 如图 2 所示. 在靠近焊缝区, 由于温度梯度大, 应力、应变变化大, 采用相对密集的网格划分, 远离焊缝部分则划分为相对稀疏的网格, 整个模型由 15 580 个节点和 12 000 个单元组成.

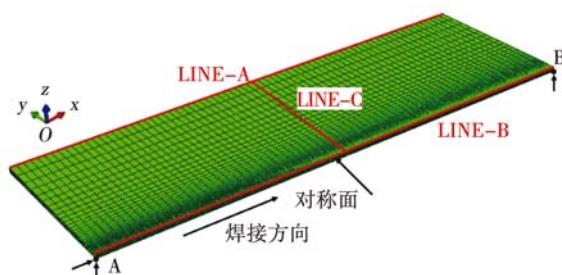


图 2 有限元模型

Fig. 2 FEM model

采用 ABAQUS/Standard 求解器提供的热-力间接耦合有限元算法结合用户子程序 DFLUX 实现焊接过程的数值模拟.

热传导理论和热-弹-塑性理论用于模拟焊接过程的加热和冷却已经较为成熟<sup>[9]</sup>, 文中不再重复叙述. 值得一提的是: 在算例中, 温度场求解采用 8 节点 6 面体单元 DC3D8, 计算应力变形场时采用与温度场对应的 C3D8I 单元, 数值计算时考虑了 6061 铝合金随温度的变化的物理性能和力学性能变化<sup>[9]</sup>; 同时, 由于铝合金薄板本身刚性小, 经过热循环过程后极易产生变形, 在变形计算时增加了对几

何非线性的考虑. 为了与试验时未施加外部拘束一致, 在如图 2 所示有限元模型的下底面上的 A 点施加 x 方向和 z 方向的位移约束, B 点施加 z 方向的位移约束, 对称面上施加对称约束.

为了比较软化模型对于焊接变形及残余应力的影响, 设定不考虑软化和考虑软化两组算例, 并分别定义为 CASE-1 和 CASE-2, 两组算例的计算结果及比较后述.

### 2.1 软化区域宽度的选择

文献[13]指出, 只有在焊接热循环过程中峰值温度在“特定温度”之上的铝合金材料才会出现软化现象, 该“特定温度”值可以通过试验确定, 且不同类型的铝合金材料的特定温度值不一样. 对于文中使用的 6061 铝合金的“特定温度”值为 230 °C.

确定软化区域宽度的方法如下: 在完成温度场的计算后, 回看焊接温度场的动态模拟全过程, 选择焊接进入稳态后的任意一个时间增量步暂停, 在此时刻的温度云图上测量焊件上表面温度超过“特定温度”区域的最大宽度, 所测最大宽度即为焊接接头软化区域宽度.

### 2.2 软化模型的建立

材料硬度与屈服强度存在一定的关系<sup>[15]</sup>, 故可通过在不同区域设定与硬度相对应的材料屈服强度的方法来体现焊接接头的软化现象. 文中设定软化区内材料焊后 400 °C 以下的屈服强度为母材屈服强度的 70%. 母材与软化区域的高温屈服强度如图 3<sup>[16]</sup> 所示.

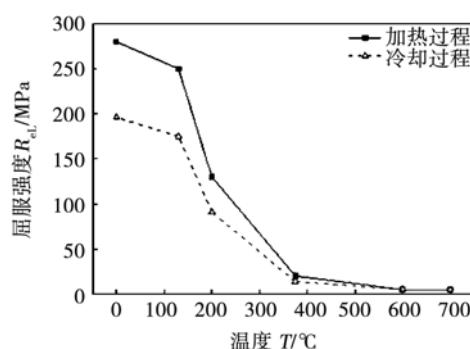


图 3 软化区域材料屈服强度  
Fig. 3 Yield strength of softening material

## 3 预测结果与分析

图 4 是焊件在加热过程中的温度场分布云图, 将该温度场的结果以热载荷的形式加载到应力变形模型中, 计算得到图 5 所示的残余应力分布.

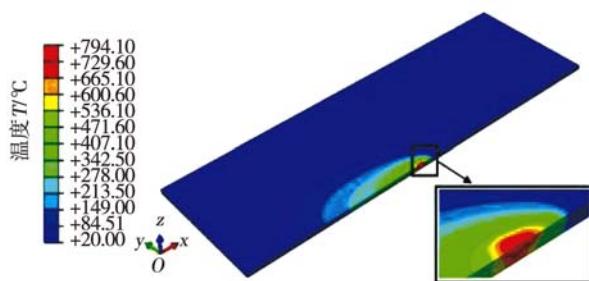


图4 温度场云图

Fig. 4 Contours of temperature field

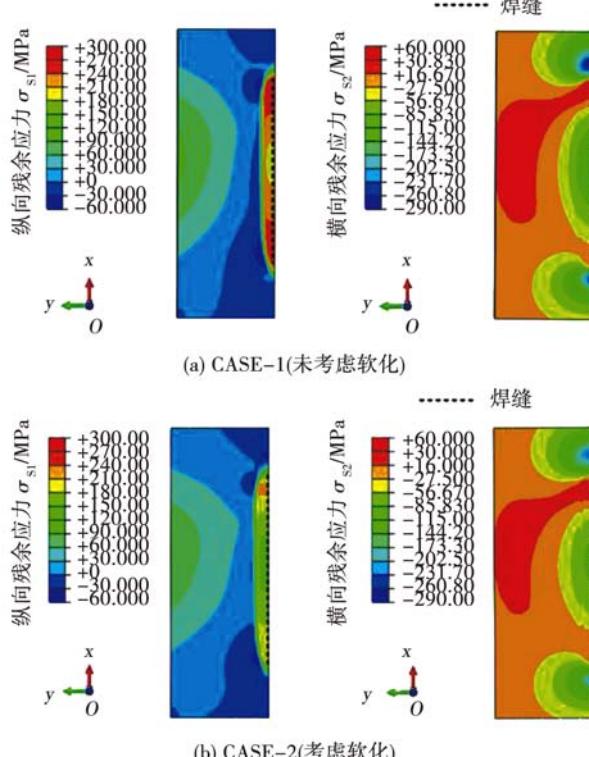


图5 应力分布云图

Fig. 5 Contours of stress distribution

比较 CASE-1 及 CASE-2 应力云图可知,无论是纵向残余应力还是横向残余应力,两组算例计算得到的分布趋势一致:残余应力主要集中在焊缝附近区域,且越靠近焊缝残余应力值越大;在焊接起、止点位置附近存在较大的残余应力,由起、止点向焊缝中心靠拢的过程中,残余应力值总体上呈现降低的趋势;考虑软化现象后,计算得到的残余应力减小,而且纵向残余应力的减小幅度较横向残余应力更显著。

为深入比较两组计算结果的差异,在模型上设定三条特征线(见图2),图6a,b 比较的是两组算例的横向残余应力沿 LINE-B(焊缝)和 LINE-C(中央断面)靠近焊缝的 30 mm 范围内的分布情况。

从图6中可以看到,沿 LINE-B,在焊接起点前 20 mm 和焊接终点后方 30 mm 范围内,两组算例横向残余应力差异较大,最大差异接近 50 MPa,其它区域差异较小;沿 LINE-C,两组算例的  $\sigma_{s2}$  之间的差异非常均匀,尤其在热影响区和焊缝区,差值基本都维持在 15 MPa 左右。图 6c,d 比较的是纵向残余应力沿 LINE-B 和 LINE-C 靠近焊缝的 30 mm 范围内的分布情况,由图 6 可知,沿着这两条特征线,两组算例计算得到的纵向残余应力分布趋势基本一致。两者的差异表现在:考虑软化后纵向残余应力减小,在焊缝及热影响区减小幅度较大,最大接近 70 MPa。比较

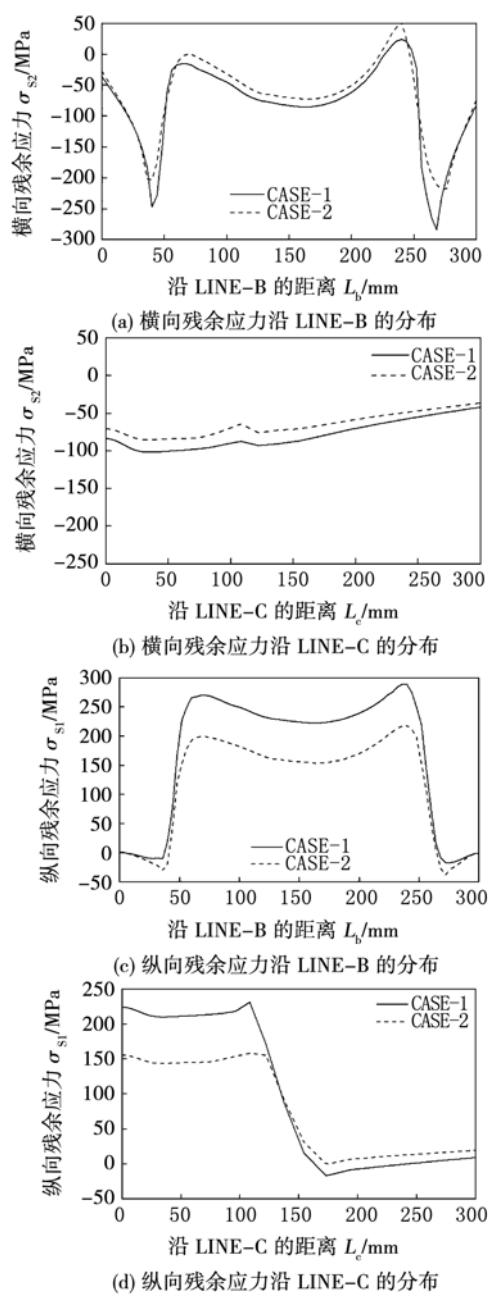


图6 沿 LINE 的残余应力比较

Fig. 6 Comparison of residual stress along characteristic lines

图6可以发现,考虑软化现象后,对纵向残余应力 $\sigma_{s1}$ 的影响比对横向残余应力 $\sigma_{s2}$ 的影响大得多。

考虑软化后计算得到的位移分布云图(镜像处理后)见图7,可知焊后试件呈“反马鞍”形,即在纵向为“凸”变形,在横向为“凹”变形,与图1所示试验焊件变形分布趋势一致。

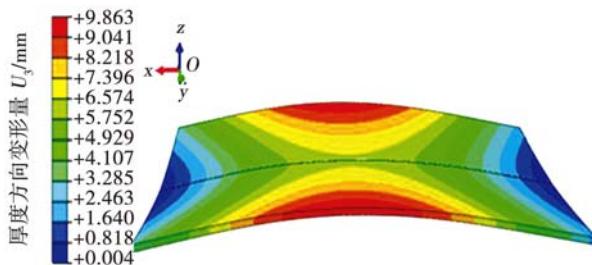


图7 位移分布云图(放大2倍)

Fig. 7 Contours of displacement distribution (Magnified 2 times)

比较两组计算沿LINE-A的横向收缩量如图8

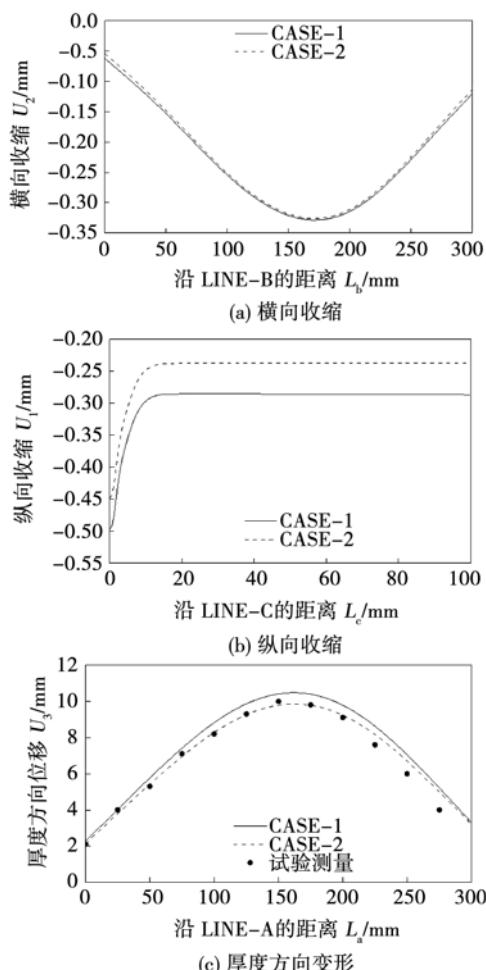


图8 沿LINE的变形比较

Fig. 8 Comparison of deformation distribution along lines

所示,CASE-1和CASE-2的横向收缩量差异极其微小;但是,考虑软化现象后,沿LINE-C的纵向收缩量减小,且减小幅度比横向收缩的减小幅度大。从焊件沿LINE-A的z向位移看,考虑软化后,计算得到的面外变形值更小且更接近于用实心圆表示的试验测量值。

从软化效果来看,由于焊接方向的拘束大,纵向残余应力往往达到和超过屈服强度。当考虑软化时,焊接过程中材料的屈服强度降低,相应地纵向残余应力也会下降。另一方面,对横向残余应力而言,屈服强度并不是其主要支配因素,因此,在算例中,横向残余应力对软化效果不敏感。

对于变形而言,影响变形量的主要因素是材料的塑性应变,而非屈服强度,所以,即使在数值模拟中考虑了软化,挠曲变形的值减小的幅度不是很大。

## 4 结 论

(1) 考虑软化现象的热-弹-塑性有限元计算结果与试验测得的面外变形吻合更好,该结果表明文中提出的考虑接头软化的材料模型正确有效。

(2) 软化使得铝合金薄板在焊后产生的纵向收缩、横向收缩以及面外变形均有所减小。但从总体变化量来说,接头软化对焊接变形的影响不大。

(3) 铝合金焊接接头的软化对铝合金残余应力分布产生较大影响,其中对纵向应力的影响比对横向应力的影响更为明显。

(4) 对于接头软化较为明显的铝合金材料而言,进行焊接残余应力的数值模拟时有必要建立反映接头软化的材料模型。

## 参考文献:

- [1] Ueda Y, Murakawa H, Ma L. Welding Deformation and Residual Stress Prevention [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [2] 王煜,赵海燕,吴甦,等.电子束焊接数值模拟中分段移动双椭球热源模型的建立[J].机械工程学报,2004,40(2):165-169.  
Wang Yu, Zhao Haiyan, Wu Su, et al. Establishment of segmented moving double ellipsoid heat source model in electron beam welding numerical simulation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(2): 165 - 169.
- [3] 刘黎明,迟鸣声,宋刚,等.镁合金激光-TIG复合热源焊接热源模型的建立及其数值模拟[J].机械工程学报,2006,42(2):82-86.  
Liu Liming, Chi Mingsheng, Song Gang, et al. Numerical simulation of AZ31B magnesium alloy laser-TIG hybrid welding with new heat source model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engi-

- neering, 2006, 42(2) : 82 - 86.
- [4] Deng D, Murakawa H. Prediction of welding residual stress in multi-pass butt-welded modified 9Cr-1Mo steel pipe considering phase transformation effects [J]. Computational Materials Science, 2006(37) : 209 - 219.
- [5] 胥国祥, 杜宝帅, 董再胜, 等. 厚板多层多道焊温度场的有限元分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(5) : 87 - 90, 117.  
Xu Guoxiang, Du Baoshuai, Dong Zaisheng, et al. Finite element analysis of temperature field in multi-pass welding of thick steel plate [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5) : 87 - 89, 117.
- [6] Sun J S, Wu C S. The effect of welding heat input on the weld pool behavior in MIG welding [J]. Science in China (Series E), 2002, 45(3) : 292 - 299.
- [7] 张增磊, 史清宇, 刘园, 等. 焊接数值模拟材料新模型的建立及应用[J]. 焊接学报, 2009, 30(2) : 45 - 48.  
Zhang Zenglei, Shi Qingyu, Liu Yuan, et al. Establishment and application of material models for numerical simulation of welding process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2) : 45 - 48.
- [8] 张建强, 张国栋, 赵海燕, 等. 铝合金薄板焊接应力三维有限元模拟[J]. 焊接学报, 2007, 28(6) : 5 - 9.  
Zhang Jianqiang, Zhang Guodong, Zhao Haiyan, et al. 3D-FEM numerical simulation of welding stress in thin aluminum alloy plate [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(6) : 5 - 9.
- [9] 叶延洪, 何静, 蔡建鹏, 等. 6061-T651铝合金薄板接头的焊接变形[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(10) : 2435 - 2442.  
Ye Yanhong, He Jing, Cai Jianpeng, et al. Welding deformation of 6061-T651 AL alloy thin-plate joints [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(10) : 2435 - 2442.
- [10] 岳红杰, 赵海燕, 蔡志鹏, 等. 薄壁铝合金结构焊接应力变形数值模拟[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2) : 223 - 227.  
Yue Hongjie, Zhao Haiyan, Cai Zhipeng, et al. Welding residual stress and distortion simulation of thin aluminum structures [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2) : 223 - 227.
- [11] 鄢东洋, 史清宇, 吴爱萍, 等. 焊接数值模拟中以温度为控制变量的高效算法[J]. 焊接学报, 2009, 30(8) : 77 - 80.  
Yan Dongyang, Shi Qingyu, Wu Aiping, et al. A high-efficient welding simulation method based on welding temperature [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8) : 77 - 80.
- [12] 朱浩, 陈强, 陈剑虹. 热影响区几何尺寸对铝合金焊接接头变形及强度影响规律[J]. 焊接学报, 2012, 33(5) : 77 - 81.  
Zhu Hao, Chen Qiang, Chen Jianhong. Influence rule of HAZ geometrical dimension to aluminum alloy joint deformation and strength [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5) : 77 - 81.
- [13] 吕晓春, 雷振, 张健, 等. 高速列车6005A-T6铝合金焊接接头软化分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(8) : 25 - 29.  
Lv Xiaochun, Lei Zhen, Zhang Jian, et al. Study on the softening of 6005A-T6 aluminum alloy welding joints for high-speed train [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8) : 25 - 29.
- [14] 王宗茂, 王建平, 吴飞. 6061铝合金焊接变形的数值分析[J]. 山东机械, 2004(6) : 36 - 38.  
Wang Zongmao, Wang Jianping, Wu Fei. Numerical analysis on welding deformation of 6061 aluminum alloy [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2004(6) : 36 - 38.
- [15] 朱亮, 陈剑虹. 力学性能不均匀焊接接头的强度预测[J]. 焊接学报, 2005, 26(5) : 13 - 16.  
Zhu Liang, Chen Jianhong. Prediction of tensile properties of welded joint with mechanical heterogeneity [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(5) : 13 - 16.
- [16] Zuo X K, Chao Y J. Effects of temperature-dependent material properties on welding [J]. Computers and Structures, 2002, 80(11) : 967 - 976.

**作者简介:** 梁伟,女,1968年生,博士,教授。主要从事计算焊接力学和金属材料强度评价方面的研究。Email: wliangspace@163.com