

6063 铝合金 TIG 焊接头的变形行为及等效模型

朱 浩^{1,2}, 郭 柱^{1,2}, 崔少朋^{1,2}, 齐芳娟³

(1. 河北省交通工程材料重点实验室, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050043;
3. 苏州科技学院 机械工程学院, 苏州 215009)

摘 要: 用有限元软件 ABAQUS 对平板对接 6063 铝合金 TIG 焊接头进行拉伸模拟, 研究了 HAZ 宽度及板厚对焊接接头变形的影响规律, 进而建立 TIG 焊接头有限元等效模型, 并用带焊缝的 6063 铝合金薄壁方管的压缩模拟来验证等效模型的精确性。结果表明, 与母材相比, 力学性能不均匀的焊接接头中应力状态较为复杂, 三向应力度在母材与 HAZ 交界处和焊缝与 HAZ 交界处存在突变, 三向应力度最大值的位置从母材与 HAZ 交界处转变为焊缝与 HAZ 的交界处; 力学性能不均匀的焊接接头中的三向应力度不仅取决于试样的厚度, 还取决于接头的几何尺寸; 铝合金 TIG 焊接头有限元等效模型宽度为 20 mm; 带焊缝铝合金薄壁方管的精细模型和等效模型的载荷-位移曲线吻合较好。

关键词: 铝合金 TIG 焊接头; 变形; 有限元分析; 等效模型

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2014)07-0067-05

0 序 言

高速列车制造中大量采用铝合金, TIG 焊是铝合金材料常用的连接手段之一。而用 TIG 焊接铝合金时, 接头常常出现三个问题: 气孔, 热裂纹, 热影响区 (HAZ) 软化^[1-3]。气孔和热裂纹可以通过改变不同的焊接工艺参数和焊接材料加以防止, 而 HAZ 的软化则无法避免。HAZ 软化使得接头成为力学性能不均匀体, 这种接头对整个接头变形及断裂行为产生非常不利的影响^[4-6]。另外, 铝合金焊接接头大变形行为是一个复杂的过程, 既受到不同微区内材料流变性能的影响也和接头几何尺寸有关系^[7,8]。在进行焊接构件或整个车体高应变率碰撞有限元模拟时, 焊接接头要作为一个特殊的分析区域被引入计算模型中, 这种情况下接头的精细模型是不适合问题求解。为此, 文中提出建立焊接接头有限元等效模型。关于有限元等效模型国内外研究报道甚少, 文献^[9,10]分别运用等效模型对复杂截面铝合金薄壁管挤压工艺和飞行器控制面板进行有限元计算, 该等效模型大大缩短计算时间, 减少计算成本。文中用有限元软件 ABAQUS 对不同平板对接 6063

铝合金 TIG 焊接头进行拉伸模拟, 研究 HAZ 宽度及板厚对焊接接头变形的影响规律, 进而建立 TIG 焊接头有限元等效模型, 并用带焊缝的铝合金薄壁方管的压缩模拟来验证等效模型的精确性。

1 有限元计算模型

1.1 HAZ 软化焊接接头有限元精细模型

用于有限元分析的精细模型是 6063 铝合金 TIG 焊对接接头平板拉伸试样。假设焊缝与母材等强, 热影响区与母材具有不同的屈服应力, 忽略接头上焊接残余应力的存在。 L_w 表示焊缝的长度, L_h 表示 HAZ 的宽度, L_b 表示标距内母材的宽度, L 表示平板拉伸试样标距内长度, T 表示试样的厚度。有限元分析时, 通过改变不同 L_h, L_b, L, T 的值来研究不同几何尺寸对整个接头变形的影响规律。几何尺寸变化值如表 1 所示。

表 1 接头几何尺寸变化

Table 1 Geometrical dimension of joint

厚度	焊缝宽度	HAZ 宽度	母材宽度
T/mm	L_w/mm	L_h/mm	L_b/mm
2/4/6	4	0.5	22.5
2/4/6	4	1.0	22.0
2/4/6	4	2.0	21.0
2/4/6	4	4.0	19.0
2/4/6	4	6.0	17.0
2/4/6	4	8.0	15.0

收稿日期: 2013-02-28

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (2012210001); 河北省教育厅基金资助项目 (2010204); 河北省高等学校科学技术研究重点项目 (ZD2010209); 教育部科学技术研究重点项目 (211022); 河北省高校重点学科建设资助项目

1.2 HAZ 软化焊接接头有限元等效模型

对不同平板对接 6063 铝合金 TIG 焊接头的精细模型进行拉伸模拟, 研究出 HAZ 宽度及板厚对焊接接头变形的影响规律, 进而建立 TIG 焊接头有限元等效模型, 示意图如图 1 所示。对于该等效模型, 应具有以下特点: (1) 具有一定几何尺寸区域; (2) 区域内是均质的材料模型; (3) 网格划分时, 该区域单元的尺寸可以和车体尺寸相匹配。



图 1 焊接接头的精细模型与等效模型

Fig. 1 Fine model and equivalent model of welded joint

用有限元软件 ABAQUS/Standard 计算不同几何尺寸 6063 铝合金 TIG 焊接头的平板拉伸试样。单元类型采用三维 8 节点减积分应变单元 (C3D8R), 最小单元尺寸: 0.16 mm。焊缝、热影响区及母材具有相同的弹性模量和泊松比, 弹性模量 $E = 70\ 000$ MPa, $\mu = 0.3$ 。焊缝和母材等强, 焊缝的屈服应力为 211.33 MPa, 加工硬化指数 $n = 0.07$; HAZ 屈服应力为 165.5 MPa, 加工硬化指数 $n = 0.1$ 。焊缝、HAZ 及母材屈服后塑性变形符合幂指数关系, 根据式 (1) 可以确定焊缝、HAZ 及母材屈服后的流变行为 [4]。

$$\sigma = R_{eL} (1 + \varepsilon_p / \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

式中: σ 是流变应力; ε_p 是等效塑性应变; R_{eL} 是屈服强度; ε_0 是屈服应变; n 是材料的加工硬化指数。

2 有限元计算结果及讨论

2.1 不同 HAZ 宽度接头拉伸试样计算结果及讨论

试样中的应力状态用三向应力度 (T_r) 来表示, 其表达式如式 (2) 所示。

$$T_r = \frac{\sigma_m}{\sigma_d} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (2)$$

式中: σ_m 为平均应力, 又称静水压力, 它是正应力的概念; σ_d 为等效应力, 又称 Mises 应力, 它是剪应力的概念 [4, 13]。三向应力度物理意义是正应力对剪应力的比值。计算出不同 HAZ 宽度焊接接头沿着试样长度方向上的三向应力度分布曲线如图 2 所示。

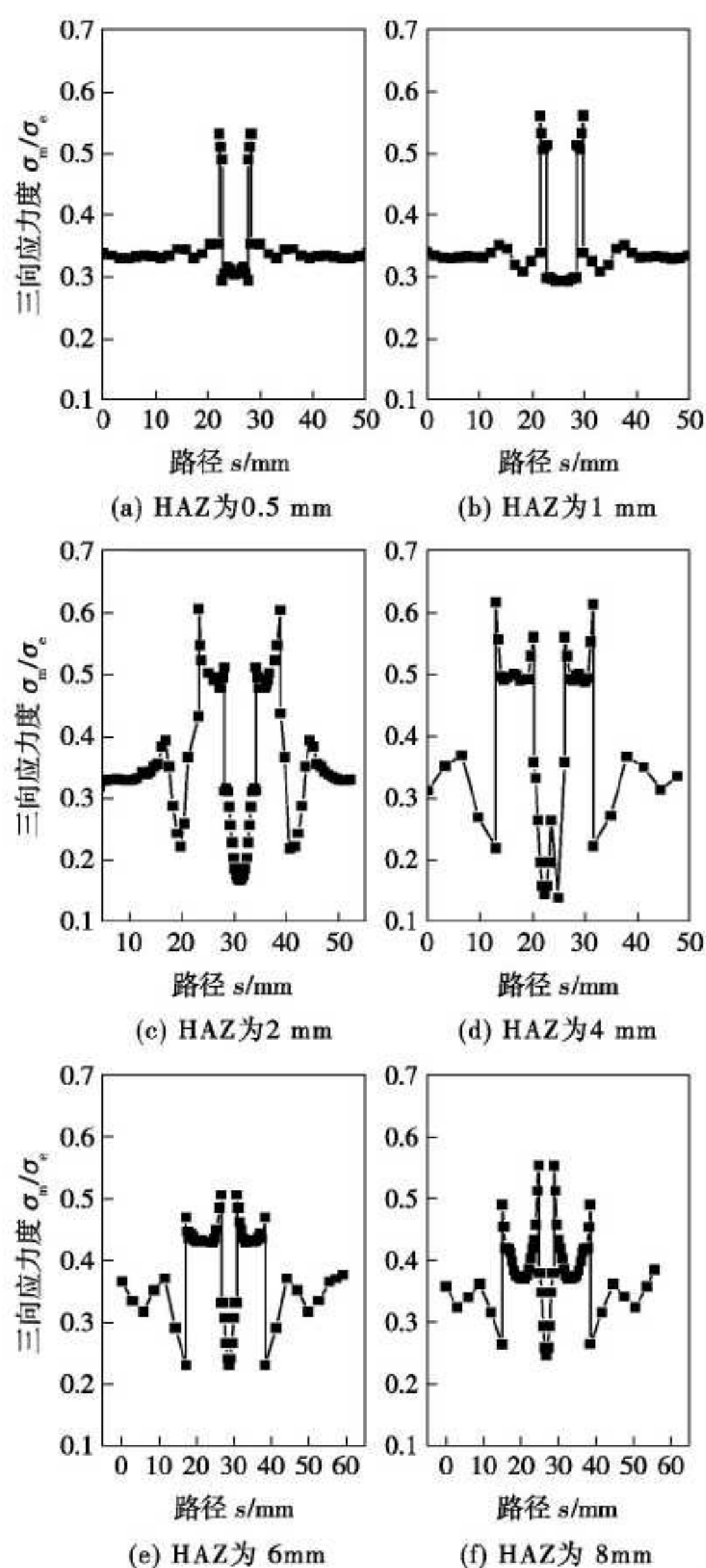


图 2 厚度 2 mm 不同 HAZ 宽度接头试样三向应力度分布

Fig. 2 Curves of stress triaxiality for 2 mm specimen with different HAZ width

从图 2 可以看出, (1) 三向应力度在母材与 HAZ 交界处和焊缝与 HAZ 交界处存在突变; (2) 厚度为 2 mm 不同 HAZ 宽度三向应力度最大值不同, 随着 HAZ 宽度的增大, 三向应力度最大值基本上先增大后减小; (3) 出现三向应力度最大值的位置发生改变: HAZ 宽度小于 4 mm 时, 三向应力度最大值出现在母材与 HAZ 的交界处, 此时若材料发生失效破坏, 则出现的位置是在母材与 HAZ 的交界处; HAZ 宽度大于 4 mm 时, 三向应力度最大值出现在焊缝与 HAZ 的交界处, 即熔合区。熔合区在接头是最薄弱环节, 大量的缺陷产生于此, 加之三向应力度最大值出现在这个部位, 所以熔合区在负载条件下将首先发生失效而破坏; (4) 三向应力度最

小值基本上出现在焊缝区的中心位置,而且随着 HAZ 宽度的增大,三向应力度度的最小值基本上逐渐降低。原因是整个焊接接头在外载下开始发生变形,在加载初期,当外加应力小于 165.5 MPa 时,整个接头只发生弹性变形,由于焊缝和 HAZ 的弹性模量相同,所以整个接头处于单向应力状态,即此时三向应力度等于 0.33;当外加应力大于 165.5 MPa 小于 211.33 MPa 时,HAZ 开始发生塑性变形,由于受到相邻焊缝与母材的限制,所以接头中的应力状态发生改变,即三向应力度在母材与 HAZ 交界处和焊缝与 HAZ 交界处发生突变;当外加应力大于 211.33 MPa 时,焊缝与母材均开始发生塑性变形,其塑性变形能力小于 HAZ 的塑性变形能力,使得焊缝和母材对 HAZ 限制作用越来越大,所以其三向应力度度的最大值逐渐增大。当 HAZ 宽度增大到一定尺寸时,这种限制作用减弱,使得接头中三向应力度度的最大值开始减小。

HAZ 刚开始发生塑性变形时,HAZ 两侧的母材对其塑性变形限制作用增强,所以当 $HAZ \leq 4$ mm 时,三向应力度度的最大值出现在母材与 HAZ 的交界处;随着 HAZ 宽度不断增大,其塑性变形能力持续增强,从而引起 HAZ 在加载方向上的位移增量不断增大,此时中间焊缝区的位移增量相对减小,所以使得最大三向应力度度的值出现的位置从母材与 HAZ 交界处变成焊缝与 HAZ 的交界处。

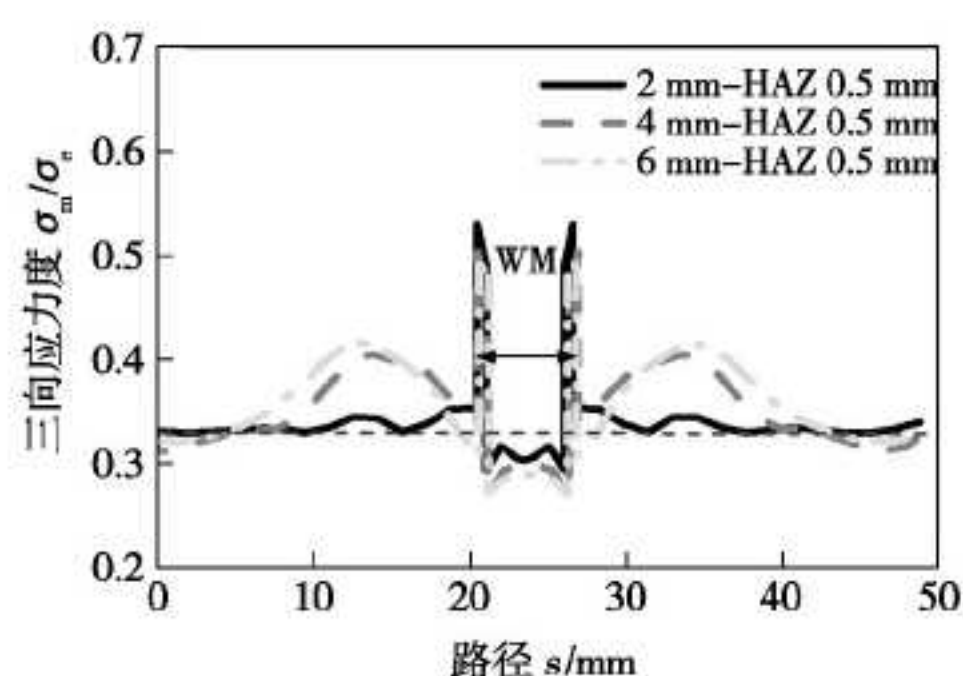
2.2 不同厚度接头拉伸计算结果及讨论

试样厚度分别取 2 mm、4 mm 和 6 mm,计算焊接接头沿着试样长度方向上的三向应力度分布曲线如图 3 所示。

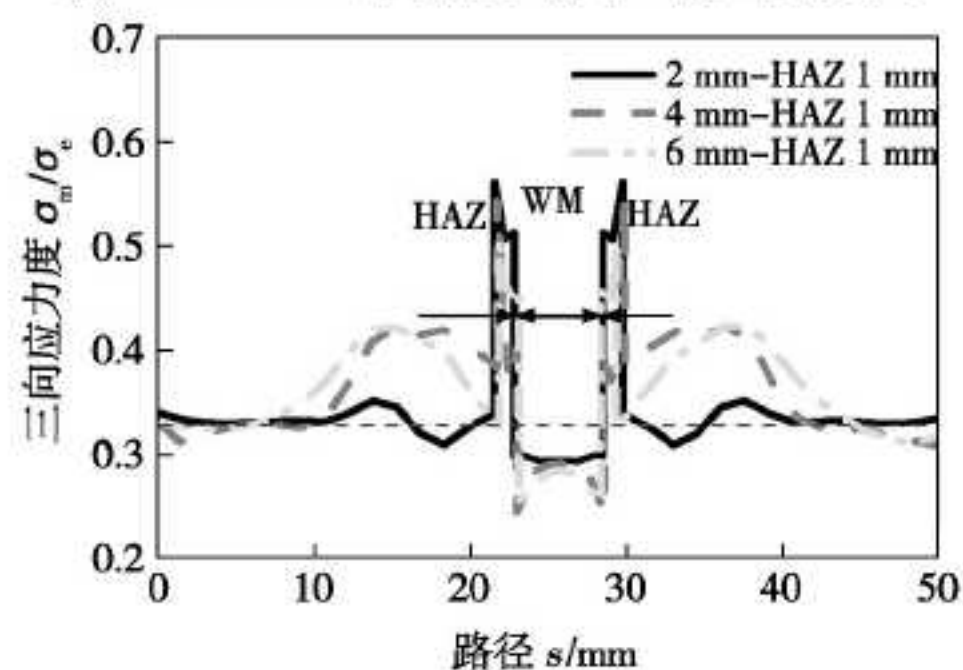
从图 3 可以看出:(1)对于 $HAZ = 0.5$ mm 和 1 mm 的接头,在焊缝及 HAZ 范围内,随着接头厚度的增加,三向应力度降低的,这与常识刚好相反,这主要由于 HAZ 的软化行为导致,在 HAZ 两侧母材区域,随着试样厚度的增加,三向应力度是逐渐增大的。(2) $HAZ = 4$ mm 和 6 mm,接头厚度为 4 mm 时,在焊缝和 HAZ 范围内,三向应力度是最大的;接头厚度为 6 mm 时,在焊缝和 HAZ 范围内,三向应力度是最小的。所以,对于力学性能不均匀的焊接接头,接头中的三向应力度不仅仅取决于试样的厚度,而且还决定于接头中焊缝区和 HAZ 的几何尺寸。

2.3 焊接接头有限元等效模型计算结果及讨论

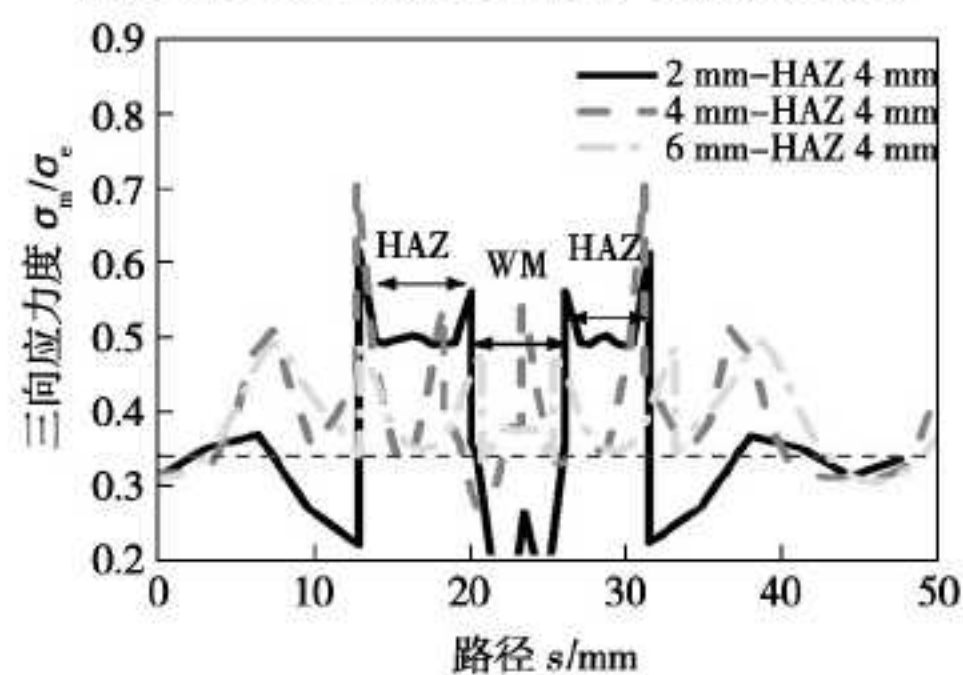
通过图 2 和图 3 不同 HAZ 宽度,不同试样厚度沿着试样长度方向上的三向应力度分布可以看出,在焊接接头上中间近 20 mm 区域内,三向应力度变化大,而在 20 mm 以外的区域三向应力度几乎不发生变化。所以,把中间近 20 mm 区域定义为“等效



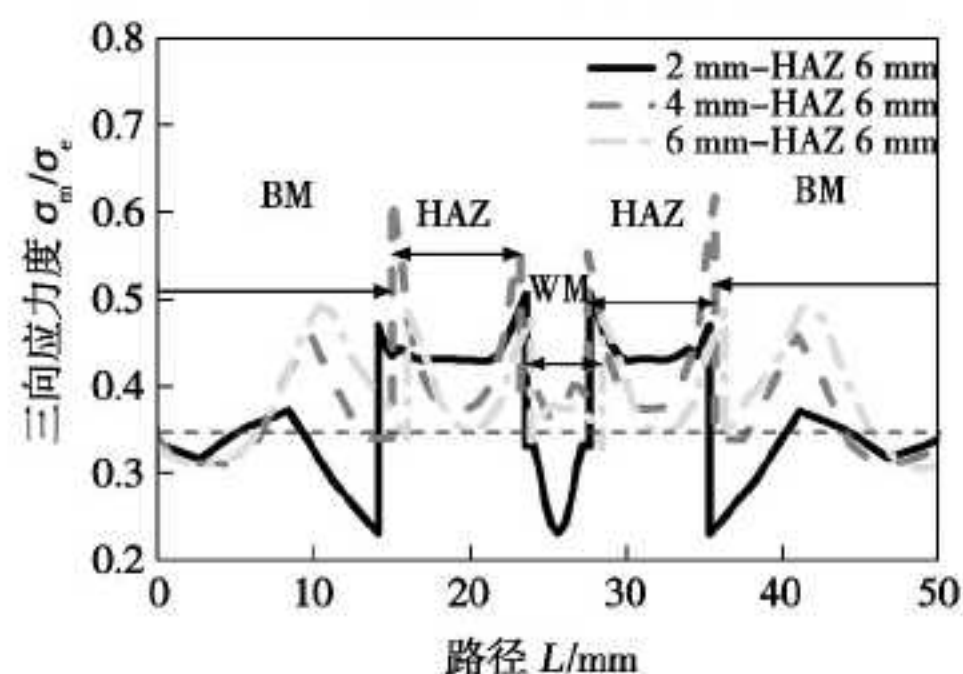
(a) HAZ 0.5 mm 不同厚度试样的三向应力度分布



(b) HAZ 1 mm 不同厚度试样的三向应力度分布



(c) HAZ 4 mm 不同厚度试样的三向应力度分布



(d) HAZ 6 mm 不同厚度试样的三向应力度分布

图 3 不同厚度试样的三向应力度变化

Fig. 3 Stress triaxiality of different thickness specimens

区域”,其宽度大约 20 mm。在进行铝合金焊接构件有限元模拟时,用此等效模型代替接头的精细模型。

假设等效区域内材料是均质弹塑性材料,它的流变行为可以通过精细模型的有限元计算获得,即在精细模型中离焊缝中心轴线 10 mm 的位置设置两个点,计算这两点间的工程应力-工程应变曲线,工程应力-工程应变曲线上应力最大值为接头的抗

拉强度,屈服强度用引起 0.2% 塑性变形的工程应力来确定.把接头上从屈服强度到抗拉强度的工程应力-工程应变曲线利用式(3)就获得了等效区域内材料的流变行为.母材、HAZ 以及等效区域的材料的流变行为如图 4 所示.

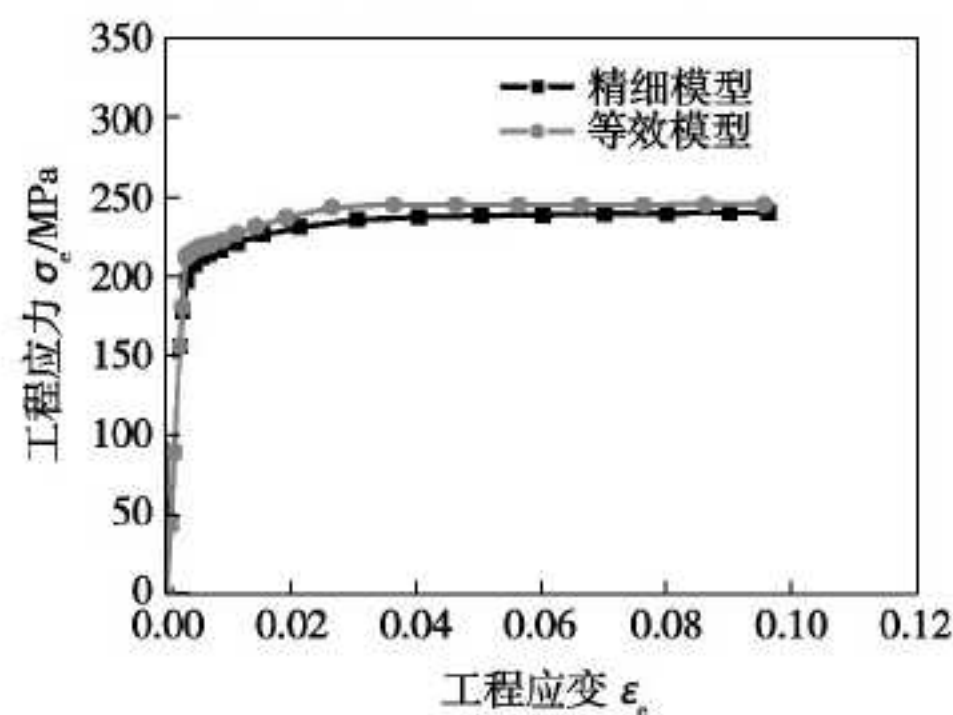
$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_e (\varepsilon_e + 1) \\ \varepsilon &= \ln(\varepsilon_e + 1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: σ 是流变应力,又称真应力; ε 是真应变; σ_e 是工程应力; ε_e 是工程应变.

把上述的等效区域内材料的流变行为输入有限元软件 ABAQUS 进行计算.精细模型与等效模型计算出焊接接头平板拉伸的工程应力-工程应变曲线及 Mises 云图如图 4 所示.



(a) 精细模型与等效模型的 Mises 应力云图



(b) 精细模型与等效模型的工程应力-工程应变曲线

图 4 精细模型与等效模型的 Mises 云图和工程应力-工程应变曲线

Fig. 4 Mises and engineering stress-engineering strain curves of fine model and equivalent model

从图 4a 可以看出,接头平板拉伸精细模型的内部 Mises 应力分布与等效模型相比,差别较大.从图 4b 可以看出,等效模型的工程应力-工程应变曲线略高于精细模型的工程应力-工程应变曲线,但二者相差几乎可以忽略不计.所以,在进行铝合金焊接构件或整车碰撞有限元模拟时,整体结构的力学响应是重点,内部不同区域的应力是次要的.所以,用等效模型代替接头的精细模型用于有限元计算是可行的.

为了进一步验证焊接接头等效模型的精确性,用带两条直焊缝的 6063 铝合金薄壁方管的压缩模拟来加以验证.铝合金薄壁方管的精细模型与等效

模型如图 5 所示.

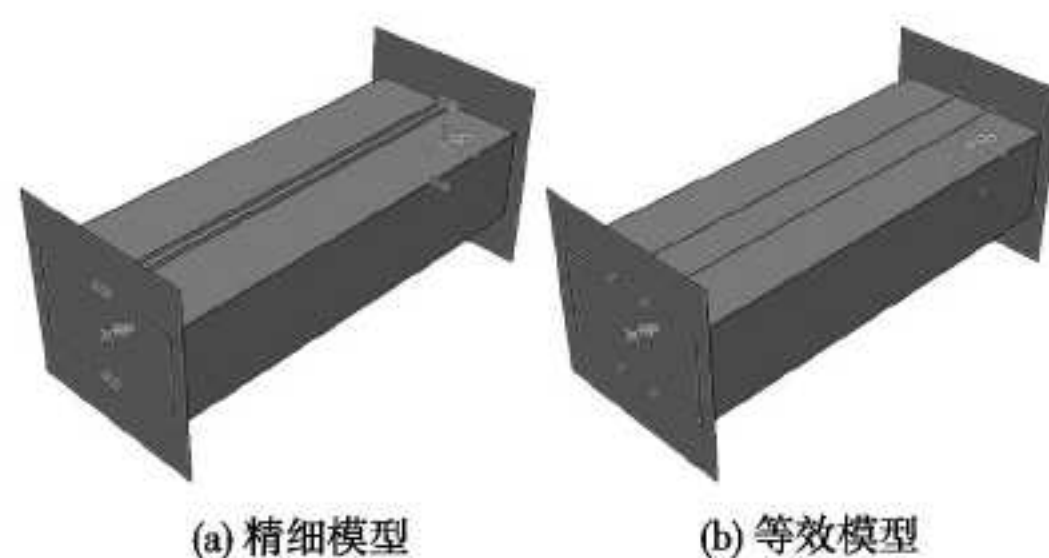


图 5 薄壁方管挤压的精细模型与等效模型

Fig. 5 Fine model and equivalent model of thin-walled square tube

铝合金薄壁方管几何尺寸为 76 mm × 44 mm × 200 mm,厚度 2 mm,采用壳单元 (S4R) 划分网格.精细模型的最小网格尺寸:0.1 mm,单元总数为 16 248;等效模型的最小网格尺寸 2 mm,单元总数 4 862.薄壁方管挤压的精细模型与等效模型计算的载荷-位移曲线如图 6 所示.

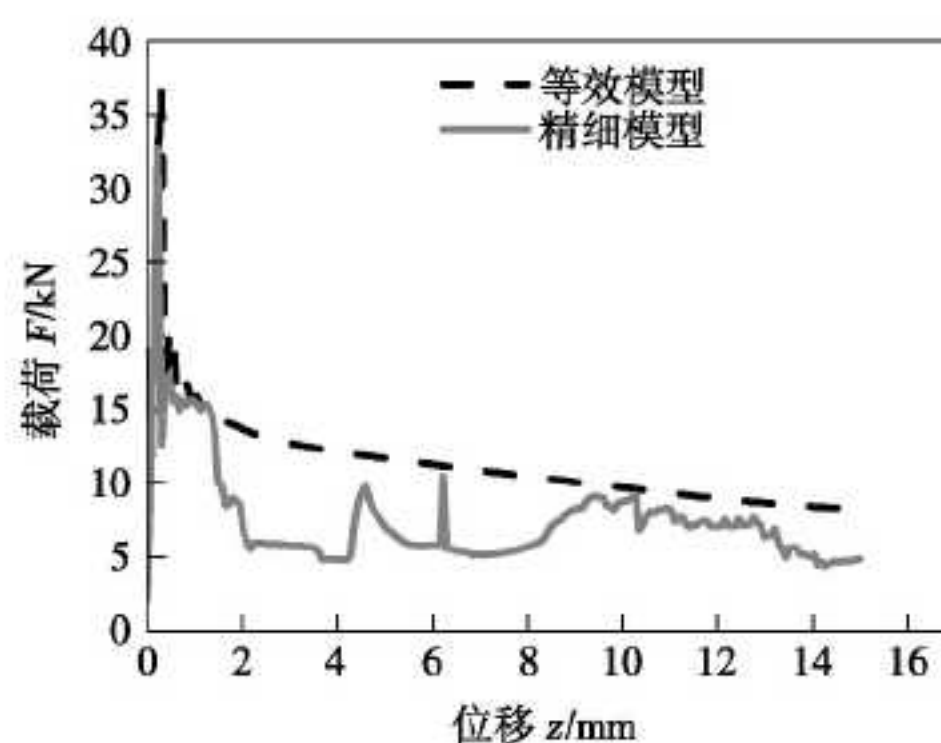


图 6 薄壁方管挤压的精细模型与等效模型的载荷-位移曲线

Fig. 6 Curves of loading-displacement of fine model and equivalent model for thin-walled square tube

从图 6 可以看出,薄壁方管的精细模型计算的峰值载荷为 33 kN,等效模型计算的峰值载荷为 37 kN,二者仅仅相差 4 kN.挤压位移 2 mm 之前,除了峰值载荷之外,精细模型与等效模型的载荷-位移曲线吻合很好,2 mm 之后等效模型的载荷略高于精细模型.总体来说,用等效模型代替接头的精细模型用于有限元计算是可行的,精度也较高.

在计算时间上,铝合金薄壁方管精细模型的计算时间比等效模型的计算时间长,两者分别为 2 分 15 秒和 36 秒,由此可以看出,用等效模型代替精细模型可缩短 52% 的计算时间,从而减少了计算

成本。

3 结 论

(1) 与母材相比,力学性能不均匀的焊接接头中应力状态较为复杂,三向应力度在母材与 HAZ 交界处和焊缝与 HAZ 交界处存在突变。

(2) 随着 HAZ 宽度的增加,三向应力度最大值先增大后减小,三向应力度最大值的位置从母材与 HAZ 交界处转变为焊缝与 HAZ 的交界处。

(3) 对于力学性能不均匀的焊接接头而言,接头中的三向应力度不仅仅取决于试样的厚度,而且还决定于接头中焊缝区和 HAZ 的几何尺寸。

(4) 厚度 2 mm 铝合金 TIG 焊接头有限元等效模型宽度为 20 mm。

(5) 等效模型,应具有以下特点:具有一定几何尺寸区域;区域内是均质的材料模型;网格划分时,该区域单元的尺寸可以和车体尺寸相匹配。

(6) 用等效模型代替焊接接头的精细模型用于有限元计算是可行的,可缩短的计算时间,减少计算成本。

参考文献:

- [1] Pikett A K, Pyttel T, Payen F. Failure prediction for advanced crashworthiness of transportation vehicles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30: 853-872.
- [2] 路浩,邢立伟,吕任远,等. 高速列车制造焊接技术应用展望 [J] // 第十五次全国焊接学术会议论文集, 2010.
- Lu H, Xing L W, Lv R Y, et al. Applied prospect of welding technique in the field of manufacturing high-speed train [C] // Proceeding of the 15th Nationally Welding Conference, 2010.
- [3] 刘会杰. 焊接冶金与焊接性 [M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [4] 方洪渊. 焊接结构学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [5] 张建勋,史耀武. 焊接力学性能不均匀性对材料延性断裂影

响的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(4): 80-85.

Zhang J X, Shi Y W. The study on the ductile fracture of weldment with mechanical heterogeneity [J]. Journal of Xi An Jiaotong university, 1994, 28(4): 80-85.

- [6] 张建勋,宋旭,董丽娜. 钛合金激光焊接接头塑性损伤行为分析 [J]. 焊接学报, 2011, 32(5): 1-4.

Zhang J X, Song X, Dong L N. Analysis on plastic damage of titanium alloy laser welding joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(5): 1-4.

- [7] 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 H, Chen Q, Chen J H. Investigation of the influence law of HAZ geometrical dimension to aluminum alloy joint' deformation and strength [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 77-81.

- [8] 朱亮,陈剑虹. 热影响区软化焊接接头应力分布特征及强度预测 [J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 48-51.

Zhu L, Chen J H. Characteristics of stress distribution and prediction of strength in softened zone affected with heat of welded joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 48-51.

- [9] Lof J, Blokhuis Y. FEM simulations of the extrusion of complex thin-walled aluminum sections [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122: 344-354.

- [10] Yan Y, Wan M, Wang H B, et al. Optimization of press bend forming path of aircraft integral panel [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010, 20: 294-301.

- [11] 庄茁. ABAQUS/Standard 有限元软件入门指南 [M]. 北京:清华大学出版社, 1998.

- [12] Agarwal H, Gokhale A M, Graham S, et al. Void growth in AA6061-aluminum alloy under traxiality stress state [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 341: 35-42.

- [13] Zhu H, Zhu L, Chen J. H. Investigation of fracture mechanism of 6063 Al alloy under different stress states [J]. International Journal of Fracture, 2007, 146(3): 159-172.

作者简介:朱浩,男,1975 年出生,博士,副教授,主要从事焊接结构的变形断裂方面的科研和教学工作,发表论文 30 余篇. Email: zhuhaohao@stdu.edu.cn

Key words: Double wire pulsed welding; probability density distribution; welding stability; quantitative evaluation

Electrostatic probe analysis of current-carrying region in constricting TIG arc with insulating sheet LI Yuanbo^{1,2}, ZHU Liang¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Material Processing Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China). pp 55 - 58

Abstract: The shape and current density of current-carrying region in constricting TIG arc with insulating sheet were analyzed by the low disturbance electrostatic probe. The floating potential and ion saturation current of probe were obtained separately in sections at different location along arc axial direction. The results show that the insulating sheet is over the arc root to make the arc not be constricted; with the constriction of insulating sheet, the current-carrying region pinches in the direction of constriction and potential gradient increase. When the constriction effect on arc root is intensified, both of the current density and temperature of current-carrying region are enhanced, and the heat is much more concentrated near the center of current-carrying region section.

Key words: constricting TIG arc with insulating sheet; electrostatic probe; diagnostic of plasma

Effect of sintering time on microstructure and mechanical properties of self-fluxing filler metal LI Xiupeng, LONG Weimin, SHEN Yuanxun, PEI Yinyin, DING Tianran, ZHANG Guanxing

(State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals & Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, China). pp 59 - 62

Abstract: Al88Si self-fluxing filler metal ring was prepared by hot pressed sintering. Microstructures of self-fluxing filler metal at different sintering time were analyzed. And the microstructure and mechanical properties of brazed joint with self-fluxing filler metal at different sintering time were also studied. It was suggested that microstructure of self-fluxing filler metal is composed of matrix phase AlSi, block primary crystal silicium and granular KAlF₄. The activity of flux decreases with the increase of sintering time. The microstructure of 3003 Al alloy brazed joint is composed of α -Al solid solution and acicular eutectic silicium. The wettability of self-fluxing filler metal gets worse and the amount of the crack, solid inclusion, incompletely filling, and voids increase with the increase of sintering time, which decreased the tensile strength of aluminum alloy joint.

Key words: self-fluxing filler metal; aluminum and aluminum alloy; AlSi filler metal; sintering time

Analysis of motion accuracy reliability for arc welding robot based on ADAMS/View LI Chang, WANG Bingchen, HA Xing, YU Xiaoguang

(School of Mechanical Engineering & Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051). pp 63 - 66

Abstract: The inner transmission accuracies of the arc welding robots would cause cumulative errors on the motion paths of welding gun, and which inevitably causes low welding quality. Therefore, it was a key problem how to control the transmission accuracies and different random errors of the welding robots in improving the original design qualities of welding robot. A motion accuracy reliability analysis method was introduced for the arc welding robot with ADAMS/View software. A Monte Carlo parametric virtue prototype of the robot was built and its different error distributions were simulated by the pseudo-random number sub-function program by using multiplicative congruential method, and then a large sample data in the dynamic welding process were obtained. The robot motion reliabilities can be calculated based on these data. It showed that the advantages of this method include simplicity (no need to solve complex dynamic mathematical models), high accuracy, and efficiency.

Key words: arc welding robot; motion reliability; random error analysis; virtual prototype

Deformation behaviors and equivalent model of TIG welded joint of 6063 aluminum alloy ZHU Hao^{1,2}, GUO Zhu^{1,2}, CUI Shaopeng^{1,2}, WANG Yanhong^{1,2}, QI Fangjuan³

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Traffic Engineering Materials, Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang TIEDAO University, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China). pp 67 - 71

Abstract: The FEM were founded to simulate the tensile behavior for butt joint of 6063 aluminum alloy by TIG welding based on the software of ABAQUS. The effects of HAZ width and thickness on deformation of joint were studied. And then the equivalent model of aluminum alloy TIG welded joint was established, which was validated by the thin-walled tube with weld seam. The results indicate that the stress states of welded joints with uneven mechanical properties are complicated compared to the base material. There is sudden change of the triaxial stress between the base material and HAZ and between the weld metal and HAZ. At the same time, the position of the maximum triaxial stress is transferred from the boundary between the base material and HAZ to the boundary between the weld metal and HAZ with the increase of the width of HAZ. The triaxial stress of the welded joint depends on both the thickness of specimen and the geometrical dimension of welded joint. The equivalent model of aluminum alloy welded joint is 20mm in width. The fine model and the equivalent model for aluminum alloy thin-walled tube with welding line are in good agreement.

Key words: aluminum alloy TIG welded joint; deformation; FEM analysis; equivalent model

Tandem automatic welding technology for oil and gas pipelines ZHANG Feng¹, WANG Changjiang¹, ZHAO Yongqiang², MA Zhifeng¹, LI You³, GUO Qichao¹

(1. China Petroleum Bureau Science Research Institute, Langfang 065000,