

doi:10.3969/j.issn.1007-2012.2015.04.030

轻质 5052 铝合金薄壁焊接吸能管件轴向压缩大变形力学行为*

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)
乔及森 贺智锋
向阳芷 陈剑虹

摘要: 针对汽车用铝合金结构件的安全设计要求, 对不同长度的 5052H34 铝合金焊接单帽结构进行静态轴向压缩试验和有限元模拟。结果表明, 构件的长度对其所能承受的最大载荷影响较小, 而焊缝的局部性能对结构的平均载荷影响较大; 对构件进行有限元模拟发现, 其轴向压缩变形模式及叠缩周期与试验结果基本吻合, 但构件的载荷和能量吸收与试验结果相差较大。单帽结构在压缩变形过程中, 焊缝发生横向折断和纵向撕裂。其中, 纵向撕裂导致结构的承载能力迅速下降, 是影响结构整体承载能力的关键因素。

关键词: 单帽结构; 轴向压缩; 吸能性; 5052 铝合金

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2015) 04-0166-06

Study on large deformation mechanical performance of light aluminum alloy 5052 welded energy absorption thin-walled tubes under axial compressing

QIAO Ji-sen HE Zhi-feng XIANG Yang-zhi CHEN Jian-hong
(State Key Laboratory of Advanced Processing And Recycling Nonferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China)

Abstract: Aimed at the requirement of safety design of aluminum alloy components in automobiles, the static axial compression behaviors of different length of 5052H34 aluminum alloy welded top-hat were investigated. The results show that the length of components has insignificant effect on the peak loading P_{max} under axial load, but local property of welding line has great effect on the meaning force. The results of the finite element (FE) simulation have good agreement with the experimental ones about deformation modes and cyclic fold. Due to the inhomogenous mechanical property and welding defects of the welding joint, the load capacity and the energy absorption of numerical analysis have a large difference with the experimental results. During the compression deformation, the welding cracks were observed, including transversal fracture and longitudinal tearing which caused the load of structure decreased rapidly, which was a critical question of overall bearing capacity.

Key words: top-hat; axial compression; energy absorption; 5052 aluminum alloy

引言

铝合金以其较高的比强度和良好的延展性, 在汽车制造中逐渐被采用以代替传统钢种, 有利于减

少车辆自重, 从而节约能耗^[1-3]。薄壁单帽结构作为汽车基本单元件, 在汽车碰撞中主要起吸能作用, 被广泛应用于移动装置中, 如可以作为车体底盘的部件, 也可以使用在门立柱结构中^[4]。薄壁单帽结构在汽车碰撞中承受轴向载荷, 发生失效是其一种常见的破坏形式, 因此要求此类薄壁结构不仅结构质量应尽可能轻, 而且在承受轴向载荷时应具有良好的塑性变形能力和吸能特性^[5]。本文针对 3 种不同长度的薄壁单帽结构, 采用轴向压缩试验和有限元方法研究了单帽结构在承受轴向载荷时的抗弯能力、吸能特性以及焊缝失效形式, 为工程应用提供参考。

* 甘肃省国际科技合作专项资助项目 (144WCGA164);
国家自然科学基金资助项目 (51065016)。

乔及森 E-mail: qiaojisen@lut.cn

作者简介: 乔及森, 男, 1973 年生, 教授, 博士, 研究方向为焊接结构优化与设计

收稿日期: 2014-11-26; 修订日期: 2014-12-19

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料选择 1.5 mm 厚的 5052H34 铝合金薄板，其化学成分如表 1 所示。薄壁结构在承受轴向载荷而发生失稳时对于结构的初始构形比较敏感，为了保证试验数据的集中，试验前对试件的几何尺寸进行控制。单帽结构壁厚差 $\Delta\delta$ 定义为^[6]：

$$\Delta\delta = |\delta - \bar{\delta}| / \bar{\delta} < 5\% \quad (1)$$

式中 $\Delta\delta$ ——壁厚相对偏差
 δ ——管壁测定壁厚/mm
 $\bar{\delta}$ ——管壁平均壁厚/mm

表 1 5052H34 铝合金化学成分/wt%

Tab 1 Composition of 5052H34 aluminum alloy in wt%

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Al
0.10	0.25	0.40	0.10	2.20~2.80	0.10	0.15~0.35	余量

1.2 焊接方法及试验过程

1.2.1 焊接方法

将厚 1.5mm 的 3 种不同尺寸的铝合金薄板用弯板机弯曲成帽形，采用 3200CMT 进行焊接，可有效控制焊接热输入，实现无飞溅过渡。焊前必须对接头 20mm 范围内进行打磨、化学清理以去除表面氧化膜，防止焊接接头中产生大量气孔。单帽横截面形状及尺寸如图 1 所示，结构长度分别为 150 mm、200 mm 和 300 mm，焊接工艺参数如表 2 所示。

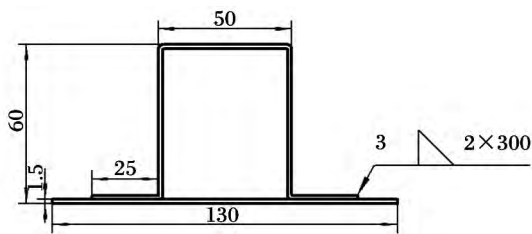


图 1 单帽结构截面/mm

Fig 1 Section dimension of top-hat in mm

表 2 CMT 焊接工艺参数

Tab 2 Welding procedure

焊丝型号及直径, Φ /mm	氩气流, $q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	焊接电, I/A	焊接电, U/V	焊接速度, $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	送丝速度, $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
4043(1.2)	25	82	19.6	6.0	4.0

1.2.2 试验过程

静态轴向压缩试验在 SHIMADZUAG 万能材料

试验机上进行，如图 2 所示。在室温条件下将单帽结构放在试验工作台上，上下截面分别添加约束垫板，沿单帽轴向进行压缩试验，压头下压速度 $V = 1 \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。加载过程中压头在竖直方向上的位移和载荷值由试验机数据采集系统自动采集，构件试验前后的变形过程用数码相机拍摄。

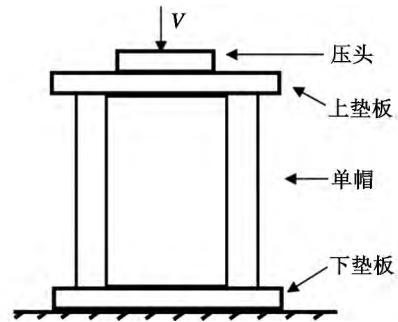


图 2 单帽结构轴向压缩示意图

Fig 2 Static experiment on axial compression of top-hat

2 试验结果及分析

2.1 静态压缩载荷-位移曲线及单帽变形

静态压缩试验所得载荷-位移曲线如图 3 所示，单帽结构的长度对结构的峰值载荷无明显影响。在初始阶段，曲线近似为一条斜直线，将此定义为单帽的“弹性阶段”。在“弹性阶段”，单帽发生了一定的塑性变形，此时单帽两侧向外凸出；当压头继续向下行进，单帽发生塑性变形，所能承受的载荷逐渐减小，单帽开始向内侧凹。在压缩过程中，单帽结构外凸和内凹交替进行，每完成一次叠缩，其载荷-位移曲线对应一个波峰-波谷。轴向压缩试验

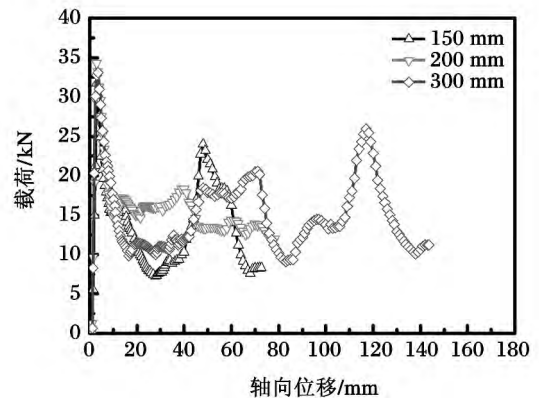


图 3 轴向压缩载荷-位移曲线

Fig 3 Loading-displacement curve of axial compression

中管件的屈曲是一个随机性很大的承压失稳过程^[7], 如图 4 所示。图 4a 为长度 $l_0 = 150\text{mm}$ 的单帽结构轴向压缩过程, 单帽的叠缩变形从上端开始, 初起时为对称变形, 随后为非对称变形; 图 4b 和图 4c 分别对应长度 $l_0 = 200\text{mm}$ 和 300mm 的单帽结构轴向压缩过程, 其叠缩变形从下端开始, 为非对称变形。这是由于焊缝及其热影响区的性能和母材各不相同, 以及两条焊缝所经历的焊接热循环也不相同, 所以导致整个单帽结构力学性能不均匀, 因此在整个压缩过程中变形不对称。

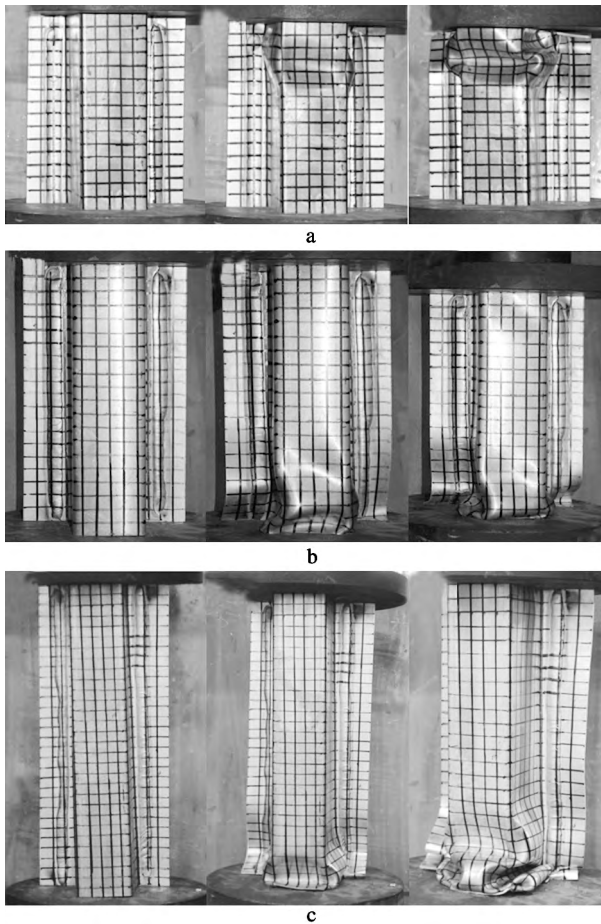


图 4 不同长度单帽结构轴向压缩变形图
a) 150 mm; b) 200 mm; c) 300 mm

Fig 4 Deformation patterns of axial compression

单帽结构在静态条件下轴向压缩试验所得的力学性能计算结果如表 3 所示, 其中单帽结构的理论平均压溃载荷 $P_{\text{the-avg}}$ 可由式 (2) 计算得出^[8], 试验平均载荷 $P_{\text{exp-avg}}$ 可由式 (3) 计算得出^[9]:

$$P_{\text{the-avg}} = 8.22\sigma_0 t^{\frac{5}{3}} L^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$P_{\text{exp-avg}} = \frac{\int_0^{\delta} f(l) d\delta}{\delta} \quad (3)$$

式中 σ_0 ——材料流变应力
 t ——壁厚/mm
 L ——截面周长/mm
 $f(l)$ ——轴向力/kN
 l ——轴向塑性变形量/mm
 δ_l ——永久轴向位移/mm

表 3 单帽结构轴向压缩试验力学性能计算结果

Tab 3 The results of mechanical property on axial compression of top-hat

试样长度, l_0/mm	最大载荷, P_{max}/kN	最大载荷处位移/mm	试验平均载荷, $P_{\text{exp-avg}}/\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$	理论平均载荷, $P_{\text{the-avg}}/\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$	吸能量, E_a/kJ	轴向位移, δ_l/mm
150	31.4	3.247	13.43	17.67	0.967	72
200	34.5	2.949	15.38		1.2	78
300	33.7	3.041	15.28		2.186	150

由式 (2) 可知, 不同长度的单帽结构其理论平均压溃载荷与材料的流变应力 σ_0 、壁厚 t 以及截面周长 L 有关, 而与单帽结构本身的长度 l_0 无关。经计算长度 l 分别为 150mm、200mm 和 300mm 的单帽结构其理论平均压溃载荷均为 17.67kN。单帽结构在承受轴向载荷时, 可用最大峰值载荷表征构件发生溃缩的难易程度, 其越小越有利^[10]。试验中不同长度的单帽结构在进行轴向压缩时, 其所能承受的最大载荷值较接近, 在弹性变形阶段的斜率也基本一致。对比试验平均载荷值和理论平均载荷值发现, 理论平均载荷值分别大于试验平均载荷值 31.57%、14.89% 和 15.64%, 这是因为在理论平均压溃载荷的计算过程中, 焊缝采用点焊并简化为刚性体, 而试验中焊缝为连续焊缝, 对整个构件的承载能力有一定的减弱作用。对不同长度的单帽结构进行轴向压缩, 平均载荷越大, 其吸收能量的能力越强。因此, 当所设计的车体吸能构件的本身长度受到限制时, 可以通过提高构件的平均载荷增加吸能性^[10]。

3 有限元分析

3.1 几何建模及边界条件设定

根据构件几何尺寸和试验加载条件建立有限元分析模型。采用壳单元对构件进行建模, 采用 Simpson 积分方法, 沿厚度方向设置 5 个积分点。根据焊接接头金相实验的观察结果确定结构中焊峰区域的大小, 在模型中划分出焊缝区域。构件上压头采用离散刚体, 在压头刚体中心设定质量参考点,

赋予和试验中盖板等同的质量，同时在该参考点施加向下的载荷。焊缝区域力学梯度较大，故其网格尺寸为 2 mm，母材区域网格尺寸为 3 mm，采用减缩积分单元 S4R 对几何模型进行网格离散。底板与单帽、压头与单帽均为面面接触，单帽叠缩时自身的接触为自接触，摩擦系数为 0.3。

3.2 材料属性定义

由于焊后构件不同区域材料的性能发生变化，因此在有限元分析中需要对构件进行分区并赋予各个区域不同的材料属性。为简化模型并减少计算量将构件分为焊缝和母材两个区域，通过静态拉伸分别获得母材和焊缝的应力-应变曲线如图 5 所示，然后应用于有限元模型的各项区域。

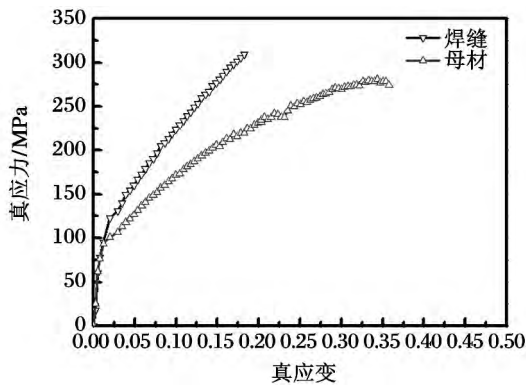


图 5 母材和焊缝的真应力-真应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curves of base metal and weld metal

3.3 模拟结果与分析

采用有限元 ABAQUS/Explicit 显示分析求解器进行计算，图 6 为试验和模拟的单帽结构轴向压缩位移-载荷曲线，由图可见，有限元模拟中对单帽结构的叠缩周期的预测与试验基本吻合，但也存在一些差异，如在弹性阶段，模拟所得曲线斜率均大于试验所得曲线斜率，即模拟的结构刚度大于试验结果，模拟峰值载荷明显大于试验值。这主要是由于试验的单帽结构焊缝处残余应力较大，残余压应力使结构的有效承载面减小，导致轴向载荷降低，而模拟中未考虑残余应力的影响，因此预测刚度及峰值载荷都偏大，另外试验中系统柔度也会引起测试误差；在弹性阶段以后，试验所得位移-载荷曲线相比模拟所得下降的较快，这是因为试验中焊缝处产生裂纹，焊缝发生横向折断或者纵向撕裂，从而导致结构承载能力迅速下降，而在模拟中未考虑结构中的损伤。

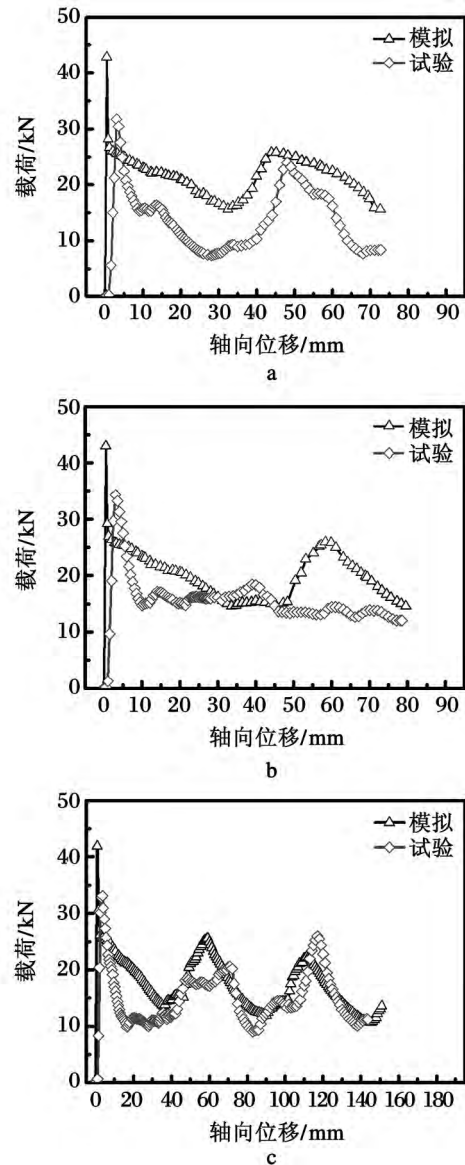


图 6 试验和模拟的单帽结构轴向压缩位移-载荷

a) 150 mm; b) 200 mm; c) 300 mm

Fig. 6 Displacement-loading curves of axial compression of experiment and simulation

图 7 为 3 种不同长度的单帽结构轴向压缩 Mises 应力云图。图 7a 为长度为 150 mm 单帽结构，变形从上端开始，与试验所得结果相符合，但呈现轴对称变形；图 7b 和图 7c 分别为长度 200 mm 和 300 mm 单帽结构，变形均从下端开始，与试验所得结果相符，但均呈现轴对称变形，与试验结果不符。在有限元模型中，单帽两侧的材料属性关于中心轴对称，而试验中单帽结构两侧的材料属性由于焊接热循环的影响存在一定差异，因此在变形过程中呈现不对称变形。

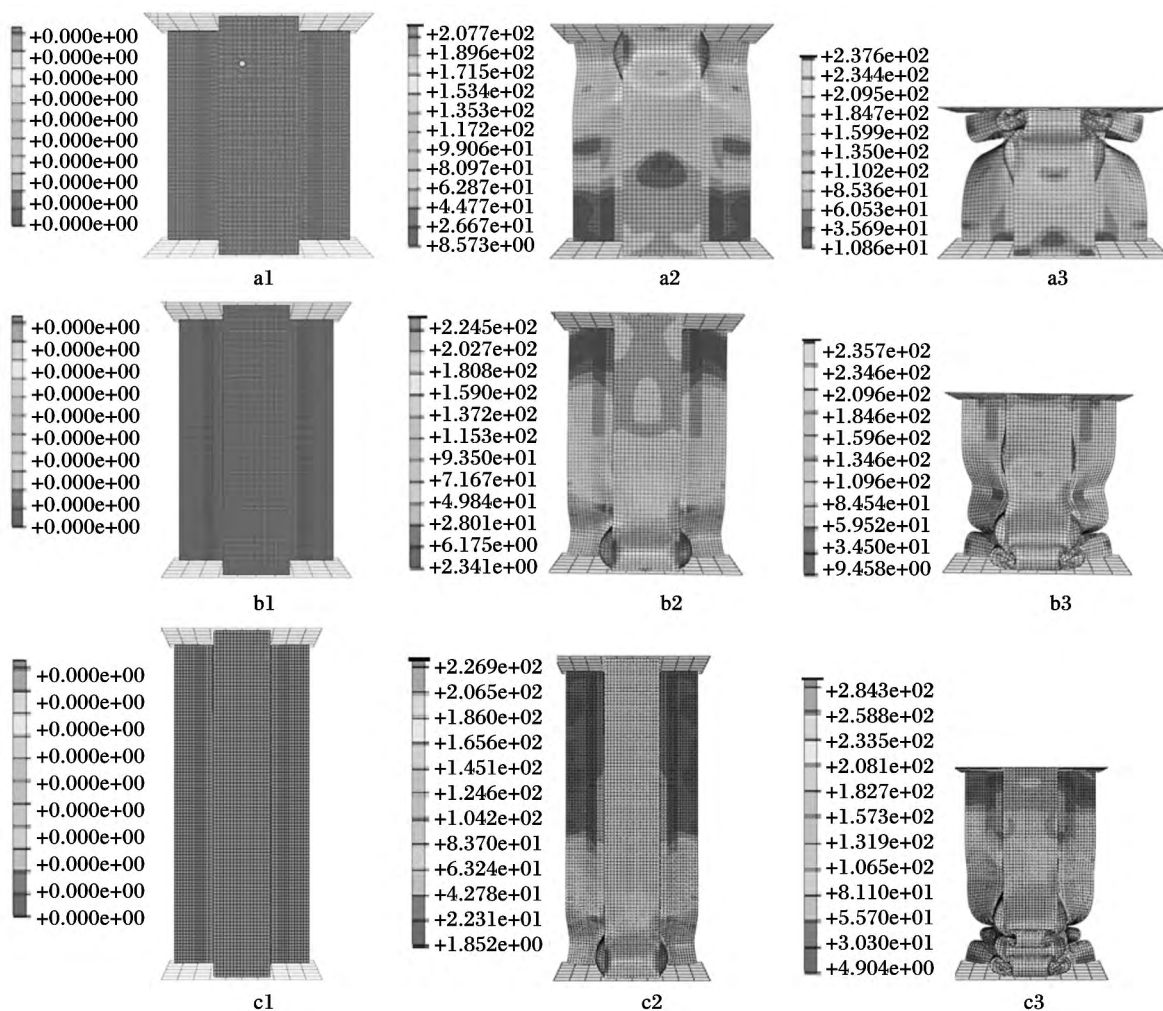


图 7 不同长度单帽结构轴向压缩 Mises 应力云图

a) 150 mm; b) 200 mm; c) 300 mm

Fig. 7 Mises cloud picture of axial compression of top-hat

4 讨论

模拟和试验所得单帽结构的峰值载荷 P_{max} 和平均载荷 P_m 对比如图 8 所示。长度分别为 150 mm、200 mm 和 300 mm 单帽结构的峰值载荷模拟值大于试验值 36.31%、24.64% 和 24.33%，对于平均载荷，模拟值大于试验值 34.92%、21.61% 和 8.9%。分别由模拟和试验测定的单帽结构的能量吸收如图 9 所示，长度分别为 150 mm、200 mm 和 300 mm 的单帽结构的能量吸收模拟值大于试验值 50.9%、28.3%、19.1%，由此可知，在结构的叠缩变形过程中，焊缝性能对结构的承载能力和能量吸收影响很大。

由于单帽结构的焊缝的韧性相对母材较差，3 种不同长度的单帽结构在承受轴向载荷发生叠缩变形时，均在焊缝处产生裂纹并迅速扩展，从而导致

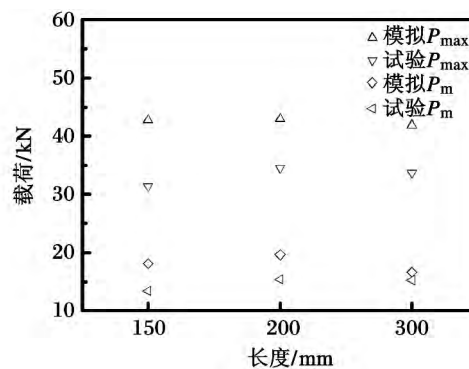


图 8 模拟和试验所得单帽结构的 P_{max} 和 P_m

Fig. 8 The values of P_{max} and P_m of top-hat of simulation and experiment

结构失效。其失效行为有，在结构发生叠缩变形时，垂直焊缝发生折断；在叠缩变形时，沿着焊缝纵向撕裂，如图 10 所示。当焊缝发生纵向撕裂时，结构的承载能力迅速下降，而焊缝的横向折断则对其影

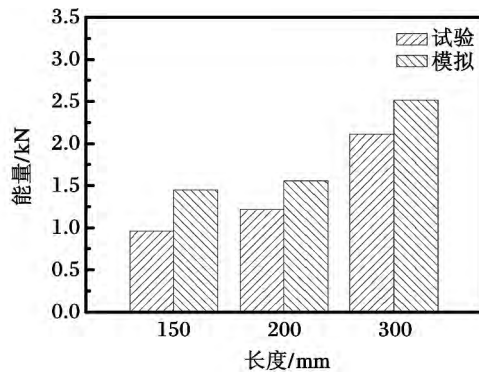


图 9 单帽结构轴向压缩能量吸收

Fig. 9 Energy absorption of axial compression of top-hat

响较小。图 11 所示为焊缝发生断裂后的断口形貌。图 11a 中晶粒粗大，断口有较大的气孔，导致焊缝的塑韧性较低；图 11b 中有晶界析出相，为典型的沿晶断裂。

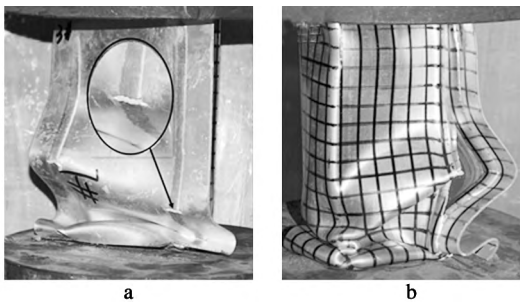


图 10 焊接裂纹

a) 横向折断；b) 纵向撕裂

Fig. 10 Welding crack

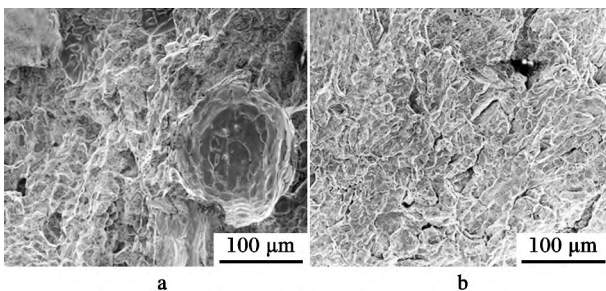


图 11 焊缝断口形貌

a) 焊缝气孔；b) 晶界析出相

Fig. 11 Fracture morphology of weld metal

5 结 论

1) 采用 CMT 焊接方法制备了不同长度的单帽结构，并对其进行了轴向压缩试验，获得了位移-载荷曲线，发现结构的长度对其峰值载荷没有影响。通过比较不同长度结构的理论平均载荷和试验平均

载荷，发现焊缝对结构的平均载荷影响很大，分别降低了 31.57%、14.89% 和 15.64%。

2) 单帽结构轴向压缩叠缩周期有限元模拟结果与试验结果基本吻合，但由于试验中焊接接头力学性能的不均匀性和焊接缺陷，模拟预测的结构的承载能力和能量吸收与试验结果相差较大。

3) 结构在承受轴向载荷时，焊缝处应力梯度变化较大，压缩过程中产生裂纹并扩展，导致焊缝横向折断或纵向撕裂。其中纵向撕裂导致结构的承载能力迅速下降，断口形貌为典型的沿晶断裂。

参考文献

[1] Society of Automotive Engineers of China. Tracking research on development of world automotive technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006

[2] Maggi S, Federici C. The use of high strength steels/ ultra high strength steels in the automotive industry [C]. Proceedings of the international conference on new developments on metallurgy and applications of high strength steels, 2008

[3] Han L, Thornton M, Shergold M. A comparison of the mechanical behavior of self-piercing riveted and resistance spot welded aluminium sheets for the automotive industry[J]. Materials and Design, 2010, 31(3): 1457-1467

[4] White M D, Jones N. Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, 41(2): 179-208

[5] Kitagawa Y. Development of a collapse mode control method for side members in vehicle collisions[C]. Society of Automotive Engineers paper. American Society of Mechanical Engineers, 2007

[6] 乔及森, 车洪艳, 陈剑虹. 6063 铝合金薄壁方管耐轴向冲击性能研究[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(2): 14-17

[7] 乔及森. 车用铝合金焊接接头及基本单元件的大变形力学行为研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007

[8] 王猛, 王军杰. 单帽截面薄壁梁的平均静态压溃[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(4): 59-63

[9] 乔及森, 许雪梅, 苟宁年等. 薄壁方管吸能构件准静态条件下轴向压缩及三点弯曲大变形力学性能[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(4): 6-10

[10] 万鑫铭, 徐小飞, 徐中明. 汽车用铝合金吸能盒结构优化设计[J]. 汽车工程学报, 2013, 3(1): 15-21