



2219 铝合金薄壁曲面拉伸件的变形与强化规律

安立辉^{1,2}, 苑世剑¹

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘 要: 为了研究拉伸成形 2219 铝合金薄壁曲面件的变形与强度分布规律, 通过网格应变法和单向拉伸试验对曲面件各个区域的应变与力学性能进行测试, 得到全域范围内的变形与强度分布规律。结果表明: 等效应变分布在 1%~15% 范围, 但瓜瓣曲面件有效区域的等效应变在 7%~12%, 变形较为均匀; 屈服强度为 312.8~346.9 MPa, 抗拉强度为 421~442.2 MPa; 强度与变形量之间成正比例关系, 抗拉强度和硬度皆随变形量增加而增大。所有测试数据表明拉伸成形的 2219 铝合金薄壁曲面件满足火箭燃料贮箱箱底的力学性能要求。

关键词: 2219 铝合金; 拉伸成形; 瓜瓣状曲面件; 变形; 强度

文章编号: 1004-0609(2020)-02-0283-08

中图分类号: TG389

文献标志码: A

近年来, 深空探测已成为一个国家综合实力和创新能力的重要标志, 对促进空间相关的基础科学研究、推动空间技术的可持续发展具有重要意义^[1]。因此, 对重型运载火箭的制造能力提出了更高的要求^[2]。运载火箭的推进剂贮箱, 尤其箱底是箭体结构中的关键部件, 其轻量化制造能力与成形后的力学性能直接决定了运载火箭的可靠性^[3]。贮箱箱底通常为球形或椭球型薄壁构件, 主要采用整体成形^[4]和拼焊成形^[5]两种方式。对于直径较大的贮箱箱底, 目前主要采用拼焊成形的方式。因此, 首先要成形出尺寸和性能满足要求的瓜瓣状薄壁曲面件。目前, 用于尺寸较大贮箱箱底的瓜瓣状曲面件主要采用拉伸成形工艺进行成形^[6]。拉伸成形时通过两侧夹钳对板材施加拉力, 使板材与模具完全贴合, 成形为所需形状, 主要适用于大尺寸、小曲率零件的成形, 具有回弹小、精度高等优点^[7]。

瓜瓣状曲面件材料主要采用高强铝合金, 第一代以 5A06 铝合金为代表的铝镁合金, 第二代为以 2A12、2219 铝合金为代表的铝铜合金^[8]。国内目前新一代运载火箭主要采用 2219 铝合金^[9]。

在 2219 铝合金瓜瓣状薄壁曲面件拉伸成形过程中, 不仅要提高曲面件的成形精度、改善变形均匀性,

而且要与热处理相结合, 达到控制组织、提高整体性能的目的。为此, 国内外研究者对变形量和热处理对 2219 铝合金组织和性能的影响进行了大量研究^[10-11]。LU 等^[12]研究了预压缩量对 2219 铝合金时效处理过程组织和力学性能的影响, 发现预压缩变形增加基体中位错密度, 从而生成稠密细小的 θ' 沉淀相, 显著提高其屈服和抗拉强度。通过实验研究预压缩变形及时效处理对 2219 铝合金锻件硬化行为和微观组织的影响, 结果显示时效前对 2219 铝合金进行预变形, 可改善其微观组织、提高其硬度与强度, 且预变形量为 3% 时效效果最为明显, 抗拉强度和屈服强度分别提高 11.9% 和 26.2%^[13]。此外, 发现在固溶处理前对 2219 铝合金进行室温预压缩变形可以使更多的粗大 Al_2Cu 第二相在固溶时溶解在基体中, 最终使时效后锻件的力学性能进一步提高^[14]。针对 2219 铝合金板材的拉伸成形, 已对预变形对其微观组织和力学性能的影响进行了初步研究^[15], 发现固溶处理之前进行预变形 2% 时, 最终得到的屈服与抗拉强度最高。综上所述, 对于 2219 铝合金, 在固溶处理前或固溶与时效之间进行一定的变形可提高其最终力学性能。

因此, 拉伸成形贮箱箱底用 2219 铝合金薄壁曲面件时, 常采用两种工艺路线: 一种工艺为固溶→拉

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0306304); 国家自然科学基金资助项目(U1637209)

收稿日期: 2019-01-25; **修订日期:** 2019-11-26

通信作者: 苑世剑, 教授, 博士; 电话: 0451-86413911; E-mail: syuan@hit.edu.cn

形→时效(或拉形→固溶→时效); 另一种为预拉形→固溶→终拉形→时效。然而, 由于曲面件为非对称结构, 且是逐渐贴模的, 拉伸成形结束后曲面件全域范围内的变形是不均匀的, 不同的变形量也可能导致曲面件的强度分布不均匀。因此, 系统掌握 2219 铝合金薄壁曲面件拉伸成形后全域内的变形与强度分布规律就显得尤为重要。本文主要采用实验方法, 将曲面件切割分区后, 通过网格应变法和单向拉伸试验对全域范围内的应变与力学性能进行测试, 获得变形与强度分布规律, 从而为进一步提高我国航天领域贮箱制造水平提供理论与技术支持。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用材料为退火态 2219 铝合金板材, 其名义壁厚为 6 mm, 化学成分(质量分数)为 Cu(5.8%~6.8%)、Mn(0.20%~0.40%)、Si($\leq 0.2\%$)、Zr(0.10%~0.25%)、Fe($\leq 0.3\%$)、Mg($\leq 0.02\%$)、Zn(0.10%)、V(0.05%~0.15%)、Ti(0.02%~0.10%)、Al(余量)。沿与板材轧制方向成 0°、45°和 90°方向分别切取拉伸试样, 然后在电子万能材料试验机上进行单向拉伸测试, 测试前对试样标距范围内 3 个位置的实际宽度与厚度进行测量, 并将其平均宽度和厚度值输入测试软件, 得到的 3 个方向的工程应力-应变曲线如图 1 所示。表 1 给出了单向拉伸得到的 2219 铝合金板材 3 个方向上的屈服强度、抗拉强度与伸长率。由图 1 和表 1 可以看出, 2219 铝合金板材存在一定各向异性, 轧制方向(0°)抗拉强度最高, 横向(90°)最低。

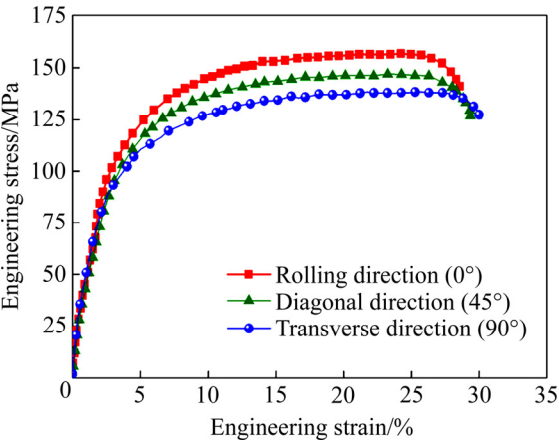


图 1 2219 铝合金管材不同方向工程应力-应变曲线
Fig. 1 Engineering stress-strain curves of 2219 aluminum alloy sheet along different directions

表 1 2219 铝合金板材不同方向力学性能参数
Table 1 Mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet along different directions

Direction	Yield strength, σ_s /MPa	Ultimate tensile strength, σ_b /MPa	Total elongation, $\delta/\%$
0°	92.6	155.5	28.5
45°	95.9	146.1	30.0
90°	95.8	141.8	30.1

1.2 拉伸成形实验装置

图 2 所示为用于 2219 铝合金板材拉伸成形的数控薄板拉伸成形装置, 是法国阿尔斯通-ACB 集团生产的 FET-1500 型拉伸成形机, 可提供连续的拉伸成形动作。该拉伸成形设备主要包括 3 个模块: 夹持运动装置、模具以及板坯。夹持运动装置由钳口以及四个可伸缩的液压缸组成, 其中钳口用于固定板坯, 而液压缸的组合运动则可实现板坯按照预定轨迹进行拉伸成形。该装置垂直拉伸时的最大垂直拉伸力为 15000 kN, 两侧钳口的最大拉伸力均为 7500 kN。利用该装置可成形板材的幅面宽度最大为 4000 mm, 长度最大为 6000 mm。

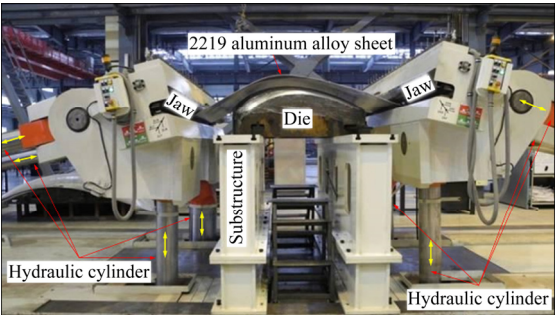


图 2 数控薄板拉伸成形实验装置
Fig. 2 CNC sheet stretch forming equipment

1.3 试件及工艺过程

以 3 m 级火箭贮箱箱底瓜瓣状曲面件为研究对象, 贮箱箱底整体为扁椭球面(椭球的理论长轴半径为 1669 mm, 短轴半径为 1024 mm, 轴长比为 1.6), 由 8 瓣相同形状的瓜瓣(双曲率)曲面件拼焊而成, 如图 3 所示。其中瓜瓣曲面件小端所在圆周的直径为 1380 mm, 大端的直径为 3350 mm。

利用 2219 铝合金板材拉伸成形图 3(b)中瓜瓣状曲面件的主要工艺路线为: 下料→预拉形→固溶淬火→终拉形→去余量→人工时效→化铣。原始板坯的尺

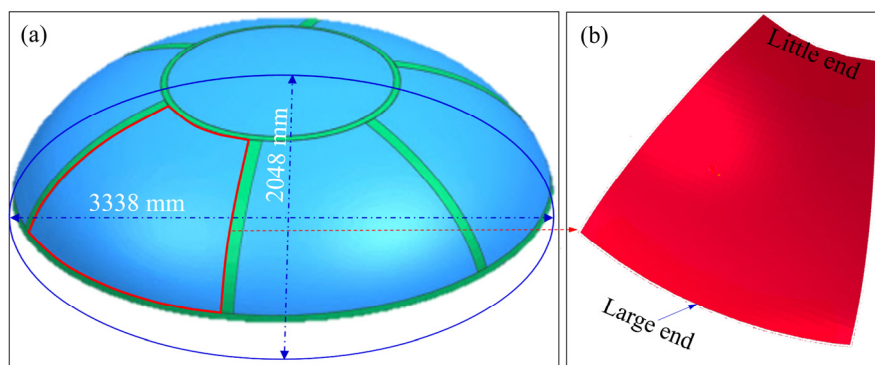


图 3 3 m 级火箭贮箱箱底与瓜瓣状曲面件示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of dome and petal parts for 3 m rocket tank: (a) Dome; (b) Petal part

寸为 $3000\text{ mm} \times 1700\text{ mm}$, 长度方向两端分别有 100 mm 装夹在左右钳口内, 拉形的变形范围为 $2800\text{ mm} \times 1700\text{ mm}$ 。然后对板坯进行预拉形, 其变形量控制在 2% 以内。预拉形结束后将试件从拉形装置上取下来后在空气循环淬火炉中进行固溶淬火处理, 其固溶处理制度为: 固溶温度 $545\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 50 min , 水淬。将经固溶淬火处理后的预拉形件重新装夹在拉形机上, 进行终拉形, 终拉形后得到最终形状的曲面件。最后利用超高压水切割机将二次拉形件的余量进行去除, 继续进行人工时效处理与化学铣削, 得到最终的瓜瓣曲面件。

1.4 变形与强度测试方案

为了准确测量瓜瓣状曲面件各个位置的应变与强度分布规律, 拉伸成形前在 2219 铝合金板材表面划分出 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的方形区域, 共划分出 42 个区域(长度方向两侧的 12 个区域未测量), 并在每个区域内印制方形网格; 拉伸成形后将曲面件按照原划分区域进行切割, 如图 4 所示。在每个区域内(见图 4 中红色虚线框内), 按照图 5 所示, 在 9 个位置分别选取 $3 \times 3=9$ 组网格, 每组至少包含 9 个网格, 利用 ASAME 应变分析测试系统中网格应变法测量拉伸成形后曲面件上的应变分布。42 个区域总共可测量得到 $9 \times 42=378$ 组应变数据。最后, 利用 378 组应变数据在 Matlab 软件中可以绘制出整个瓜瓣曲面件上的应变分布云图。

对于上述拉伸成形得到的 3 m 级贮箱箱底瓜瓣曲面件, 在上述测量应变的每个分割块的中心位置利用线切割沿板材轧制方向切取单向拉伸试样, 具体取样方式及试样尺寸如图 6 所示。虽然拉伸成形后 2219 铝合金板材产生弯曲变形, 导致切取的单拉试样存在

一定弯曲, 但由于瓜瓣曲面件的曲率半径很大, 试样的弯曲程度非常小, 对单向拉伸试验结果影响很小, 可将其直接夹持在试验机上进行力学性能测试。对于所有试样, 在相同条件下使用 Instron 5569 万能材料试验机进行室温单向拉伸试验, 其中拉伸速度为 2 mm/min 。最后, 将测试得到的力学性能数据, 沿其在板料上的不同位置相应地绘制成分布云图。

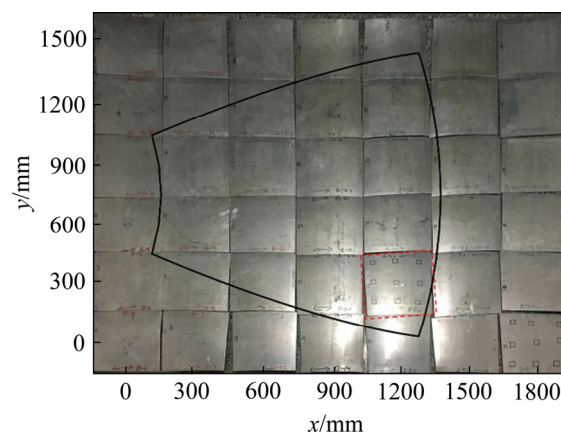


图 4 瓜瓣状曲面件划分切割方案

Fig. 4 Partition scheme for petal parts

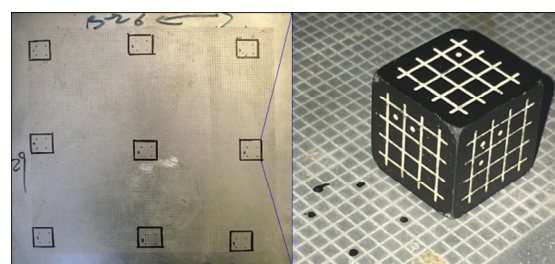


图 5 瓜瓣状曲面件应变分布测量方法

Fig. 5 Strain distribution measurement method for petal parts

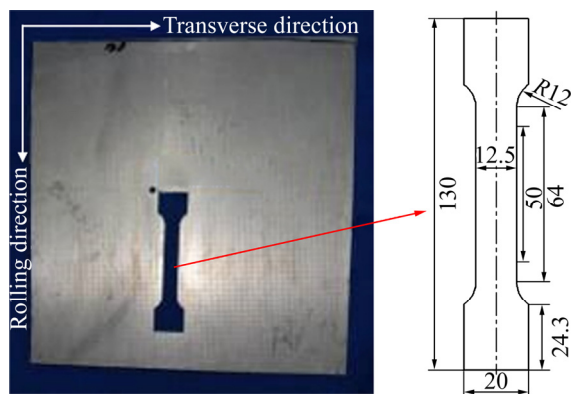


图6 瓜瓣状曲面件力学性能测量试件

Fig. 6 Specimen for measuring mechanical properties distribution of petal parts (Unit: mm)

2 结果与讨论

2.1 曲面件成形过程

图7所示为2219铝合金板材薄壁曲面件成形过程。在预拉形过程中，预拉形变形量一般控制在2%以内，以防止板坏在后续固溶处理过程中发生表面粗糙现象，其得到的预拉形试件如图7(a)所示。将预拉形后的试件在铝合金空气循环淬火炉中进行固溶淬火处理，如图7(b)所示，淬火炉可同时进行1~4件瓜瓣曲面件的淬火处理。淬火过程中将预拉形件利用专用夹具固定在专用工装上，以尽可能减小其淬火变形，

淬火后通过四轴滚床对预拉形件钳口夹持位置进行校形，以使其能够顺利被装夹在拉形机上进行终拉形。将经固溶淬火处理后的预拉形试件重新装夹在拉形机上，进行终拉形，终拉形得到最终形状的曲面件，如图7(c)所示。最后，利用超高压水切割机将二次拉形后试件的余量进行去除，得到最终的2219铝合金瓜瓣状曲面件如图7(d)所示。

为进一步提高图7(d)瓜瓣状曲面件的强度，需将其在合适的温度与时间条件下进行人工时效处理，然后再进行化学铣削，从而获得强度和表面质量满足要求的瓜瓣状曲面件。

2.2 应变分布规律

图8所示为测量获得的3m级贮箱箱底2219铝合金瓜瓣状曲面件上的面内主应变分布云图。图8中中心区域黑色线框内为瓜瓣状曲面件的有效区域。拉伸成形过程中拉伸方向的应变为第一主应变 ε_1 ，垂直于拉伸方向的应变为第二主应变 ε_2 。由图8可以看出，面内第一主应变分布非常不均匀，其最大值位于测量区域右侧，最大可达13%，最小值分布于测量区域上下两侧，仅为1%左右，但最大值区域位于模具右侧悬空区域，瓜瓣曲面件有效区域的应变分布较为均匀。因为第二主应变的方向不是主要变形方向，所以其分布较为均匀，且其应变分布范围约为-2.5%~5%。这主要是由于拉形过程右钳口的运动距离比左钳口大，导致右侧变形量整体高于左侧。此外，拉形凸模为非对称结构，拉形过程中凸模右侧首先与板材发生接触，

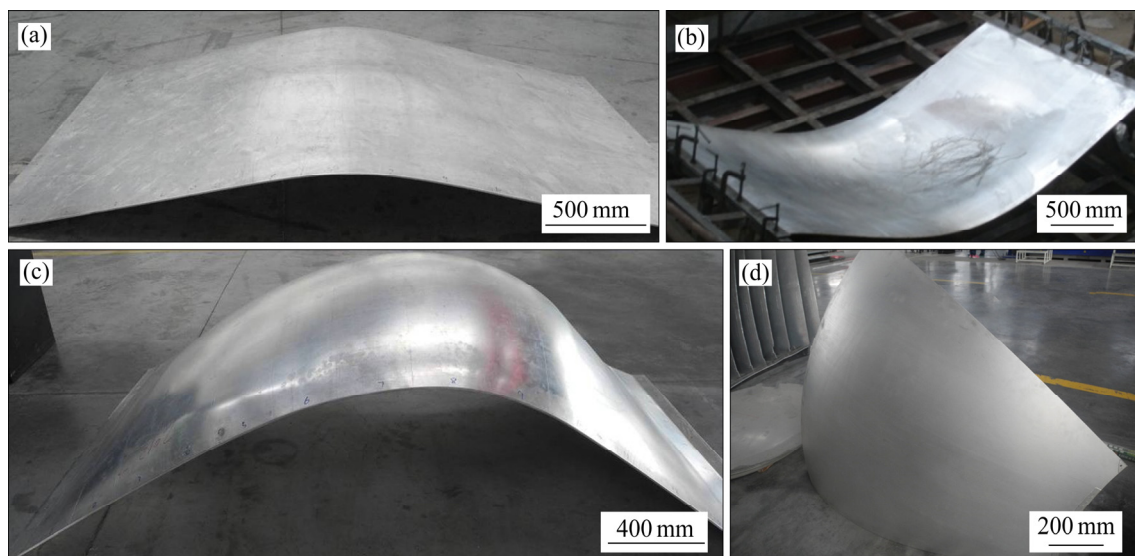


图7 2219铝合金板材薄壁曲面件成形过程(1:1比例)

Fig. 7 Forming process of 2219 aluminum alloy gore (1:1 ratio): (a) Pre-stretch forming; (b) Solution and quenching; (c) Final-stretch forming; (d) Completed petal part

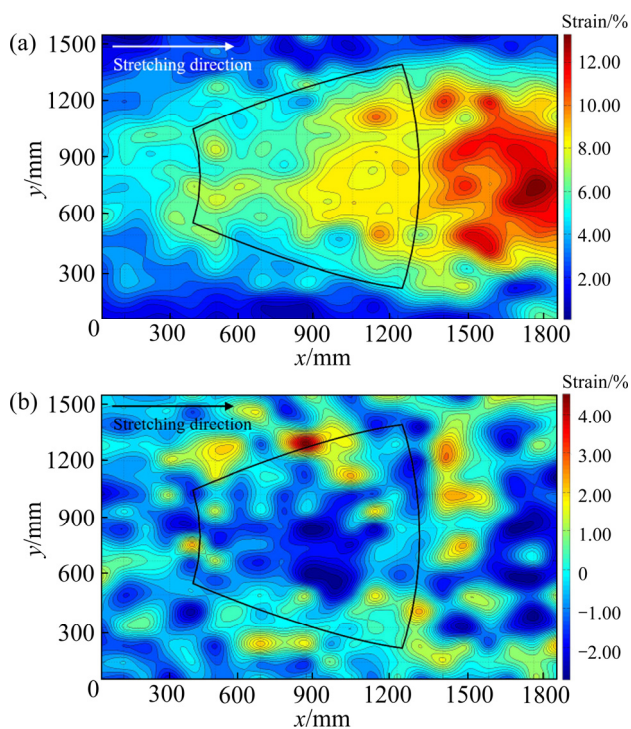


图8 2219 铝合金瓜瓣状曲面件面内主应变分布

Fig. 8 In-plane principal strain of 2219 aluminum alloy petal part: (a) First principal strain ε_1 ; (b) Second principal strain ε_2

随着拉形的进行, 板材与拉形凸模的接触不断由右向左、由中间向两侧扩展, 使得第一主应变从右向左逐渐发生降低。

此外, 结合体积不变条件和等效应变公式, 可以计算得到厚向应变 ε_3 与等效应变 ε_f , 如式(1)和(2)所示:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2)$$

根据图8测量得到的面内主应变分布, 由上述式(1)和(2)计算得到的厚向应变分布和等效应变分布如图9所示。由图9(a)可见, 拉形结束后壁厚减薄最严重的位置主要位于右侧的悬空区域, 最大减薄率可达到12%, 其他区域的减薄率基本都在8%以下, 上下两侧的减薄率最小。

由图9(b)可以看出, 右侧部位处2219铝合金板材变形最大, 累计最大变形为15%, 拉形结束后整个区域内发生的等效应变处于1%~15%范围。然后, 需要注意的是, 变形最大的位置位于模具右侧的悬空区, 并非瓜瓣状曲面件的有效区域。曲面件有效区域的厚向应变约为5%~10%, 其等效应变约为7%~12%。此

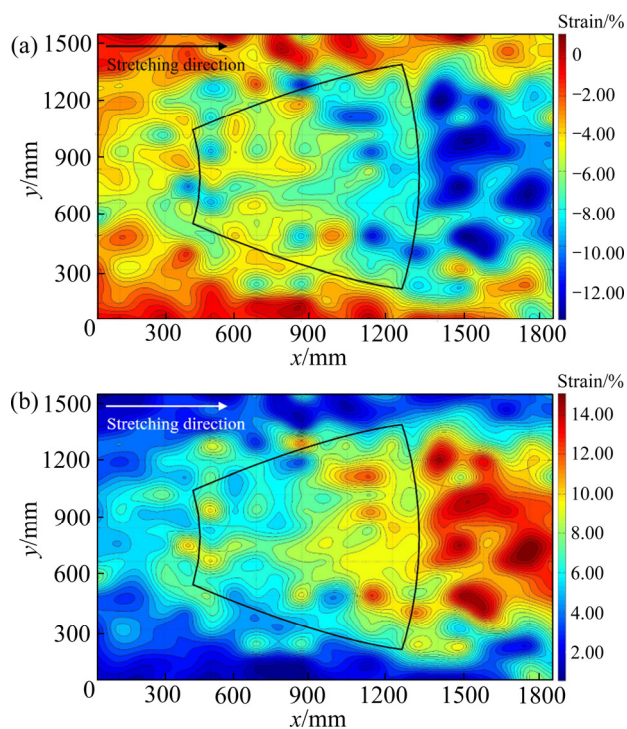


图9 2219 铝合金瓜瓣状曲面件厚向应变与等效应变分布

Fig. 9 Normal strain and equivalent strain distribution of 2219 aluminum alloy petal part: (a) Normal strain; (b) Equivalent strain

外, 瓜瓣曲面件的等效应变分布规律与面内第一主应变分布规律基本一致。

2.3 强度分布规律

图10所示为3 m级贮箱箱底用瓜瓣状曲面件拉伸成形后的屈服强度和抗拉强度分布云图, 强度均沿2219 铝合金板材的轧制方向进行测量。由图10(a)可以看出, 曲面件上沿板材轧制方向的屈服强度最小值为312.8 MPa, 最大值为346.9 MPa, 屈服强度的平均值约为330 MPa, 整体来看, 图中曲面件右侧的屈服强度高于左侧, 约高出10 MPa, 而沿曲面件的两个侧边(即图10中的上下两边), 其屈服强度较低。

由图10(b)可以看出, 曲面件上板材轧制方向的抗拉强度均达到421 MPa以上, 最高抗拉强度可高达442.2 MPa, 最大值分布在右上角和右下角区域, 而最小值位于左侧偏下位置, 整体来看, 曲面件右侧的抗拉强度较左侧要高, 平均约高出10 MPa。

2.4 变形与强度对应关系

为了直观反映拉伸成形后曲面件上每一区域的强

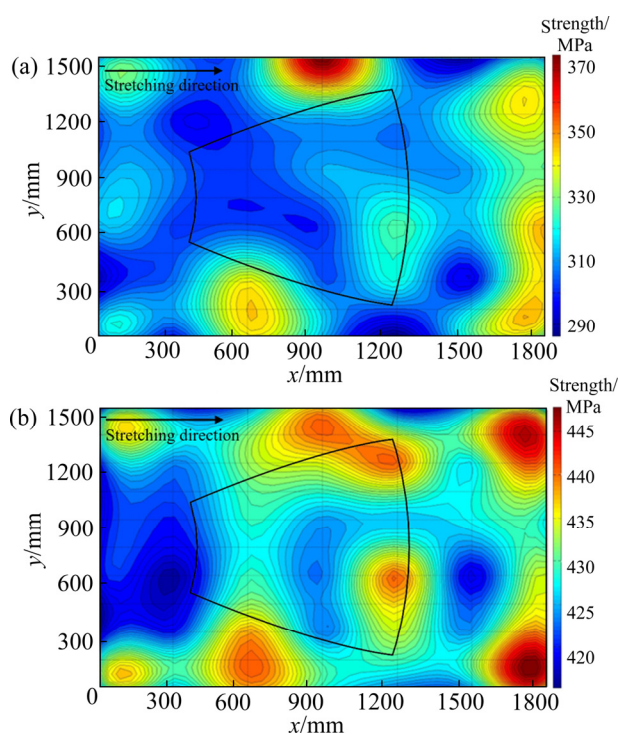


图 10 2219 铝合金瓜瓣状曲面件的强度分布

Fig. 10 Strength distribution of 2219 aluminum alloy petal parts: (a) Yielding strength; (b) Tensile strength

度与变形的对应关系, 将 3 m 级贮箱箱底用曲面件上对应区域的等效应变与抗拉强度进行一一对应, 绘制成抗拉强度-等效应变散点图, 即可得到曲面件上最终强度与变形量的对应关系, 如图 11 所示。由图 11 可以发现, 2219 铝合金拉形曲面件上抗拉强度与变形量的对应关系分散在一个条带状范围内, 而且可以看出, 在一定应变范围内, 2219 铝合金板材经拉形后其曲面件上抗拉强度与等效应变(变形量)成正比例关系。等效应变为 2%、4%、6%、8%、10%、12% 和 14% 时, 对应的平均抗拉强度分别为 428.5 MPa、430 MPa、431 MPa、432 MPa、433.5 MPa、434.8 MPa 和 436 MPa。

此外, 利用 HVS-1000A 型维氏硬度测试仪对曲面件上各个区域的硬度进行了测量。然后, 将 2219 拉形曲面件上各个区域的硬度与变形量一一对应, 即可得到硬度-等效应变散点分布图, 如图 12 所示。由图可以发现, 硬度-变形关系类似于抗拉强度-变形关系, 在一定的应变范围内, 硬度与变形量成正比关系, 瓜瓣曲面件上硬度的范围为 123~132 HV。综上所述, 2219 铝合金板材经拉形成形为曲面件后, 其抗拉强度和硬度皆随变形量的增加而增加, 表现出良好的变形强化效果。

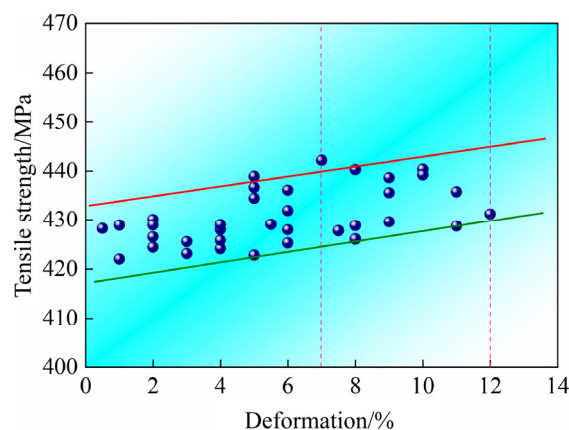


图 11 抗拉强度与变形量对应关系

Fig. 11 Relationship between tensile strength and deformation in stretch forming process

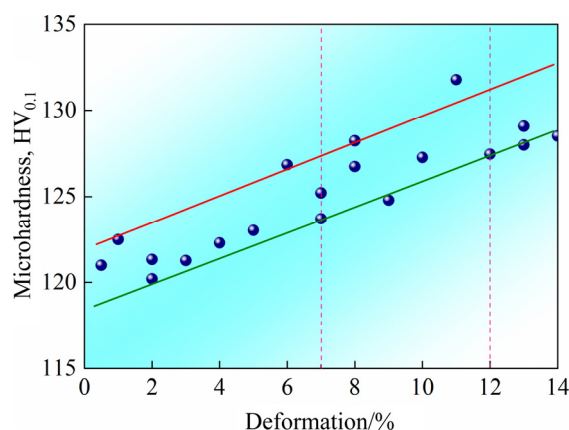


图 12 硬度与变形量对应关系

Fig. 12 Relationship between hardness and deformation in stretch forming process

3 结论

1) 利用网格应变法测量了 2219 铝合金瓜瓣状薄壁曲面件全域范围内的变形分布规律, 曲面件右侧变形量高于左侧, 等效应变分布在 1%~15%, 瓜瓣曲面件有效区域的等效应变在 7%~12%, 变形较为均匀。

2) 曲面件右侧的屈服与抗拉强度均高于左侧, 均高出 10 MPa 左右。瓜瓣曲面件屈服强度为 312.8~346.9 MPa, 抗拉强度为 421~442.2 MPa, 硬度范围为 123~132 HV。

3) 曲面件上抗拉强度与变形量的对应关系分散在一个条带状范围内, 从整体趋势看, 抗拉强度与变形量(等效应变)成正比例关系。硬度-变形关系类似于抗拉强度-变形关系。抗拉强度和硬度皆随变形量增加而增加。

REFERENCES

- [1] 叶培建, 邹乐洋, 王大珩, 彭 兢, 张 熹. 中国深空探测领域发展及展望[J]. 国际太空, 2018, 10: 4–10.
YE Pei-jian, ZHOU Le-yang, WANG Da-yi, PENG Jing, ZHANG He. Development and prospect of Chinese deep space exploration[J]. Space International, 2018, 10: 4–10.
- [2] 周亚强, 姜路亮, 牟 宇. 国内外典型火箭运载能力变化分析[J]. 载人航天, 2017, 23(6): 737–742.
ZHOU Ya-qiang, LOU Lu-liang, MOU Yu. Lift capacity evolution of typical launch vehicles in China and abroad[J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(6): 737–742.
- [3] 姚君山, 蔡益飞, 李程刚. 运载火箭箭体结构制造技术发展与应用[J]. 航空制造技术, 2007, 10: 36–40.
YAO Jun-shan, CAI Yi-fei, LI Cheng-gang. Development and application of manufacturing technology of launch vehicle structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 10: 36–40.
- [4] 曾元松. 先进航空板材成形技术应用现状与发展趋势[J]. 航空科学技术, 2012, 1: 1–4.
ZENG Yuan-song. Application and development trend of advanced sheet metal forming technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012, 1: 1–4.
- [5] 华凯旋, 余小鲁, 王柯智. 大型压力容器厚壁封头成形工艺及质量控制研究现状分析[J]. 锻压技术, 2015, 40(2): 8–14.
HUA Kai-xuan, YU Xiao-lu, WANG Ke-zhi. Analysis of research status on forming processes and quality control of heavy pressure vessel thick-wall sealing head [J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(2): 8–14.
- [6] VOLZ M P, CHEN P S, GORTI S, SALVAIL P. Development of aluminum-lithium 2195 gores by the stretch forming process[C]// National Space and Missile Materials Symposium, Huntsville, AL, 2014: 23–26.
- [7] BLUNCK R D, KRANTZ D E. Room temperature stretch forming of scale space shuttle external tank dome gores. Volume 1: Technical[R]. San Diego: General Dynamics/Convair, 1974.
- [8] 姚君山, 周万盛, 王国庆, 孟凡新. 航天贮箱结构材料及其焊接技术的发展[J]. 航天制造技术, 2002, 5: 17–22.
YAO Jun-shan, ZHOU Wan-sheng, WANG Guo-qing, MENG Fan-xin. Development of structural materials and welding technology for space storage tank [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2002, 5: 17–22.
- [9] 王祝堂. 长征五号火箭燃料箱铝合金打造[J]. 有色金属加工, 2017, 46(2): 6–9.
WANG Zhu-tang. Aluminum alloy fuel tank of Long March-5 rocket[J]. Nonferrous Metals Processing, 2017, 46(2): 6–9.
- [10] 周蓉蓉, 贺爱国, 方华婵, 王 博, 罗丰华. 预变形量对 2219 铝合金的力学性能及显微组织影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(4): 45–49.
ZHOU Rong-rong, HE Ai-guo, FANG Hua-chan, WANG Bo, LUO Feng-hua. Effects of pre-deformation on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(4): 45–49.
- [11] 黄元春, 王也君, 肖政兵, 任贤魏, 许天成, 李 音. 再时效处理对 2219-T6 铝合金叉形环显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1365–1371.
HUANG Yuan-chun, WANG Ye-jun, XIAO Zheng-bing, REN Xian-wei, XU Tian-cheng, LI Yin. Effect of reaging on microstructures and mechanical properties of 2219-T6 alloy fork-like ring[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1365–1371.
- [12] LU Y, WANG J, LI X, CHEN Y, ZHOU D, ZHOU G, XU W. Effect of pre-deformation on the microstructures and properties of 2219 aluminum alloy during aging treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 699: 1140–1145.
- [13] WANG H, YI Y, HUANG S. Influence of pre-deformation and subsequent ageing on the hardening behavior and microstructure of 2219 aluminum alloy forgings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 685: 941–948.
- [14] HE H, YI Y, HUANG S, ZHANG Y. Effects of cold predeformation on dissolution of second-phase Al_2Cu particles during solution treatment of 2219 Al-Cu alloy forgings[J]. Materials Characterization, 2018, 135: 18–24.
- [15] AN Li-hui, CAI Yang, LIU Wei, YUAN Shi-jian, ZHU Shi-qiang, MENG Fan-cheng. Effect of pre-deformation on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet by thermomechanical treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S1): s370–s375.

Deformation and strength distribution of stretch formed 2219 aluminum alloy thin-walled curved parts

AN Li-hui^{1,2}, YUAN Shi-jian¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to investigate the deformation and strength distribution of thin-walled 2219 aluminum alloy curved parts in stretch forming, grid strain analysis and uniaxial tensile tests were used to test the strain and mechanical properties of the curved part in every sub-region. Then the deformation and strength distribution in the whole area were obtained. The results show that the equivalent strain ranges from 1% to 15% in the whole area, but the equivalent strain in the effective central zone of the curved part ranges from 7% to 12%, which is relatively uniform deformation. Moreover, the yield strength in the effective central zone ranges from 312.8 to 346.9 MPa, while the tensile strength ranges from 421 to 442.2 MPa. The strength is directly proportional to the amount of deformation, and both the tensile strength and hardness increase with the increase of deformation. All the testing data of the gore show greater than expected mechanical properties of the stretch formed 2219 aluminum alloy curved parts used for dome of rocket tank.

Key words: 2219 aluminum alloy; stretch forming; petal parts; deformation; strength

Foundation item: Project(2017YFB0306304) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(U1637209) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2019-01-25; **Accepted date:** 2019-11-26

Corresponding author: YUAN Shi-jian; Tel: +86-451-86413911; E-mail: syuan@hit.edu.cn

(编辑 龙怀中)