

## 2219 铝合金差厚球壳梯度超低温拉深成形规律

凡晓波<sup>1</sup>, 刘 洋<sup>1</sup>, 邬方兴<sup>1</sup>, 苑世剑<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对铝合金差厚球壳薄厚过渡区易集中变形而导致开裂的难题, 利用超低温条件下铝合金伸长率与硬化指数显著提高的双增效应, 提出铝合金差厚球壳梯度超低温拉深成形新方法; 通过超低温拉深成形工艺装置, 在梯度超低温条件下试制了直径为  $\Phi 200$  mm 的 2219 铝合金差厚球壳型曲面件; 结合数值模拟, 分析了差厚球壳梯度超低温拉深成形规律, 揭示了薄厚过渡区的变形协调机制。结果表明: 超低温下高硬化能力可转移薄厚过渡区的集中变形, 并且具有足够的塑性变形能力来承受由厚区约束导致的薄区变形增大; 在梯度超低温下, 厚薄比为 2.0 的差厚板的成形性能显著提高, 相对常温提高 76.4%。梯度超低温成形差厚球壳具有巨大潜力, 可为大型差厚薄壁曲面件成形提供新路径。

**关键词:** 铝合金; 差厚板; 梯度超低温拉深成形; 成形性能; 变形均匀性

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.021

**中图分类号:** TG386      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0155-07

## Gradient ultra-low temperature deep drawing law of 2219 aluminum alloy spherical shell with differential thickness

Fan Xiaobo<sup>1</sup>, Liu Yang<sup>1</sup>, Wu Fangxing<sup>1</sup>, Yuan Shijian<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** For the problem of cracking due to concentrated deformation in the thin-thickness transition zone of aluminum alloy spherical shell with differential thickness, a novel method of gradient ultra-low temperature deep drawing for aluminum alloy spherical shell with differential thickness was proposed by utilizing the double-increase effect of the significant increase in the elongation and hardening index of aluminum alloy under ultra-low temperature condition, and the 2219 aluminum alloy spherical curved surface parts with differential thickness and the diameter of  $\Phi 200$  mm under the gradient ultra-low temperature condition was trial-produced by ultra-low temperature deep drawing process device. Then, combined with numerical simulation, the gradient ultra-low temperature deep drawing law of spherical shell with differential thickness was analyzed, and the deformation coordination mechanism in the thin-thickness transition zone was revealed. The results indicate that the high hardening capacity at ultra-low temperature can transfer the concentrated deformation in the thin-thickness transition zone, and has sufficient plastic deformation capacity to withstand the increased deformation in the thin zone caused by the constraint in the thick zone. Under the gradient ultra-low temperature, the formability of differential thickness sheet with a thickness ratio of 2.0 is significantly improved, which is 76.4% higher than that at normal temperature. Thus, the differential thickness spherical shell obtained by gradient ultra-low temperature forming has great potential, which can provide a new way for the forming of large differential thickness thin-walled curved surface parts.

**Key words:** aluminum alloy; differential thickness sheet; gradient ultra-low temperature deep drawing; formability; deformation uniformity

薄壁曲面构件是运载火箭、飞机等高端运载装备的关键结构, 其制造技术水平代表了国家制造业的核心竞争力<sup>[1-2]</sup>。为满足大运力、长寿命和高可靠性等发展需求, 新一代装备迫切需要发展大型薄

壁曲面件的整体成形技术<sup>[3-4]</sup>。燃料贮箱作为火箭的重要功能和承力构件, 在服役期间箱底底部的受力情况复杂。为保证箱底的刚度和轻量化要求, 出现一类底部厚、开口薄的椭球形整体薄壳结构件。然而, 现役制造工艺仍采用多块拼焊结构, 难以满足高密度发射要求, 急需研发全新的整体成形技术。

目前, 差厚板成形研究主要集中在复杂形状曲面件的工艺参数优化<sup>[5-6]</sup>。通过拉深成形方法试制出极限拉深高度为 27.1 mm 的差厚盒形件<sup>[7]</sup>。采用

收稿日期: 2023-03-12; 修订日期: 2023-04-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFA0708804); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (DUT20ZD101)

作者简介: 凡晓波 (1987-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: xbfan@dlut.edu.cn

充液拉深工艺进一步抑制过度减薄和过渡区转移,从而提升了差厚盒形件的成形性能<sup>[8]</sup>。但是,受制于铝合金的常温成形性,薄厚过渡区易发生集中变形而导致开裂,严重限制了其工程化应用。近年来,研究发现铝合金在超低温条件下具有伸长率与硬化指数同时提高的双增效应<sup>[9-10]</sup>,可以从根本上提高铝合金的成形性能。大连理工大学高性能精密成形研究所已将超低温双增效应用于铝合金超薄壳体整体成形,采用与构件等厚的薄板直接实现直径为 $\Phi 2.25$  m 的火箭整体箱底成形<sup>[11-12]</sup>,验证了超低温成形技术显著的可行性。本文针对铝合金差厚球壳薄厚过渡区易集中变形而导致开裂的难题,提出差厚球壳梯度超低温拉深成形新技术,采用梯度超低温实现了差厚壳体的协调变形。通过数值模拟和工艺试验,研究了梯度超低温条件下差厚球壳的变形规律,试制出直径为 $\Phi 200$  mm 的 2219 铝合金差厚球型曲面件,验证了差厚球壳梯度超低温成形的可行性,可为铝合金大型差厚薄壁曲面件的整体成形提供技术支持和基础指导。

## 1 差厚球壳梯度超低温成形技术原理

针对铝合金差厚球壳薄厚过渡区易集中变形而导致开裂的难题,提出差厚球壳梯度超低温拉深成形新技术,并采用梯度超低温实现了差厚壳体的协调变形。图 1 为差厚球壳梯度超低温拉深成形技术原理图,其中, $T_A$ 、 $T_B$  分别为主要变形区与法兰区的温度, $\Delta T$  为这两个区域的温度梯度, $T_C$  为铝合金材料的临界转变温度。梯度超低温拉深成形技术的核心思想是通过超低温介质(例如液氮)将薄厚过渡区冷却至具有显著双增效应的临界温度以下,以提高该区域材料的硬化应力和伸长率;再通过调控法兰区温度形成法兰区硬化应力小、悬空区(主要变形区)硬化应力大的应力梯度,以增加法兰材料的流动性,进一步减小薄厚过渡区的集中变形程度。因此,差厚球壳梯度超低温成形技术有利于薄厚过渡区传递和承受变形,从而避免薄厚几何过渡区的局部集中变形和开裂。

差厚球壳梯度超低温成形具有以下技术优势:

(1) 超低温条件下提升了薄厚过渡区材料的极限硬化应力和延展性,可以有效避免局部集中变形和开裂;

(2) 法兰区材料在常温下更容易变形流动,进一步提升了成形极限和壁厚均匀性;

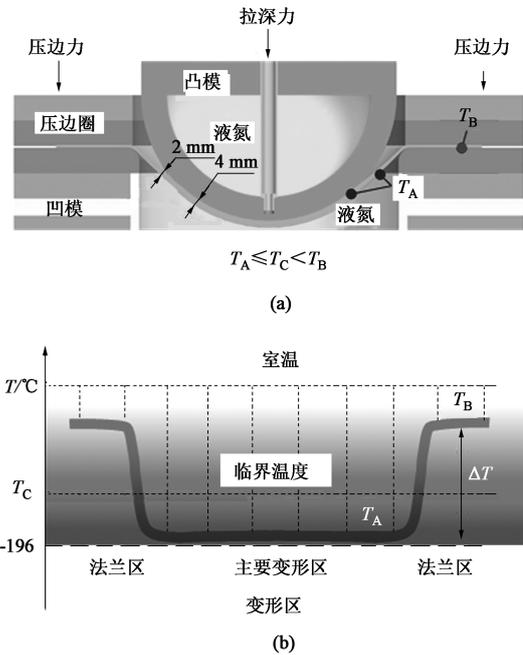


图 1 铝合金差厚球壳梯度超低温拉深成形技术原理图 (a) 和温度分布 (b)

Fig. 1 Principle diagram (a) and temperature distribution (b) of gradient ultra-low temperature deep drawing technology for aluminum alloy spherical shell with differential thickness

(3) 无需整体冷却模具,效率高、成本低。

## 2 试验方法及仿真模型

### 2.1 材料

采用厚度为 4.0 mm 的 2219 铝合金退火态板材。通过拉伸试验测试了材料的超低温力学性能,其中试样的标距长度和标距宽度分别为 80 和 10 mm,拉伸速度为  $4.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,结果如表 1 所示。图 2 给出了 2219-O 铝合金板材在 25 和  $-196$  °C 下的真实应力-真实应变曲线及 Hollomon 拟合曲线。2219-O 铝合金板材在  $-196$  °C 下的伸长率可由常温时的 25.8% 提高至 42.6%;硬化指数可由常温时的 0.25 提高至 0.38,呈现出显著的超低温双增效应,说明超低温可以显著提高铝合金的成形极限。

表 1 2219-O 铝合金的超低温力学性能

Table 1 Mechanical properties of 2219-O aluminum alloy at ultra-low temperature

参数	温度/°C	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	硬化指数 $n$	伸长率/%	弹性模量/MPa	泊松比
数值	25	56	145	0.25	25.8	79000	0.33
	-196	74	246	0.38	42.6		

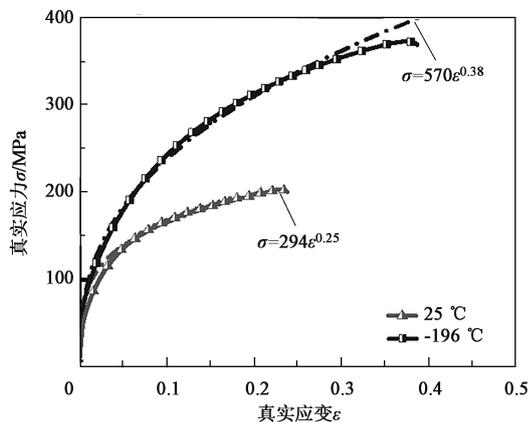


图 2 不同温度下 2219-O 铝合金板材的真实应力-真实应变曲线  
Fig. 2 True stress-true strain curves of 2219-O aluminum alloy sheet at different temperatures

### 2.2 试验方法

图 3 为自主研制的梯度超低温拉深成形工艺试验装置<sup>[9]</sup>。该装置主要包括双动压力机、超低温冷却单元和控制系统 3 部分。通过双动压力机实现压边和拉深位移控制，其中压边滑块的位移行程为 600 mm，拉深滑块的位移行程为 1400 mm；通过在凹模型腔内直接充填液氮，实现薄厚过渡区板坯直接冷却，最低温度可达 -196 °C；通过控制系统实现超低温-压力-位移多参数控制<sup>[10]</sup>。超低温模具由凸模、凹模和压边圈 3 部分组成，其中凸模直径为  $\Phi 200$  mm、凹模内径为  $\Phi 204.4$  mm、圆角半径为 15 mm。

图 4 为差厚板制坯尺寸，通过铣削工艺制备差厚板坯，将厚度为 4 mm、直径为  $\Phi 350$  mm 的等厚圆形板坯从直径  $\Phi 150$  mm 处向外铣削为 2 mm 厚度

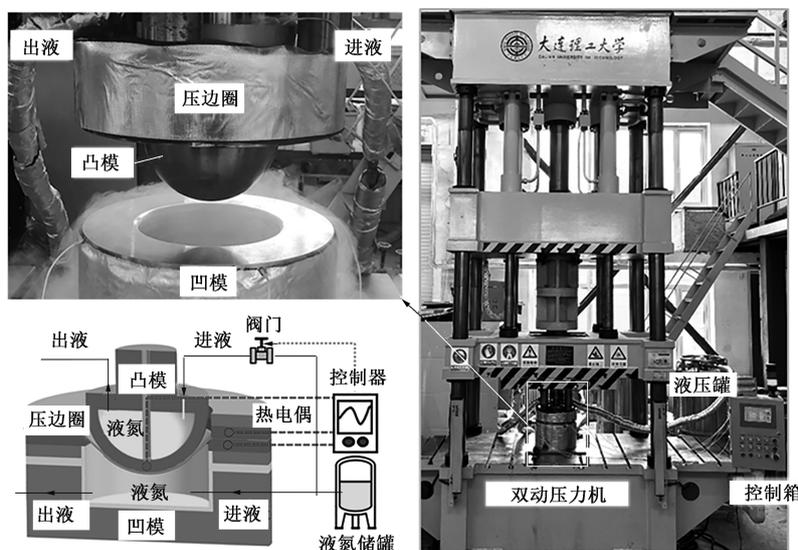


图 3 梯度超低温拉深成形工艺试验装置  
Fig. 3 Test device of gradient ultra-low temperature deep drawing process

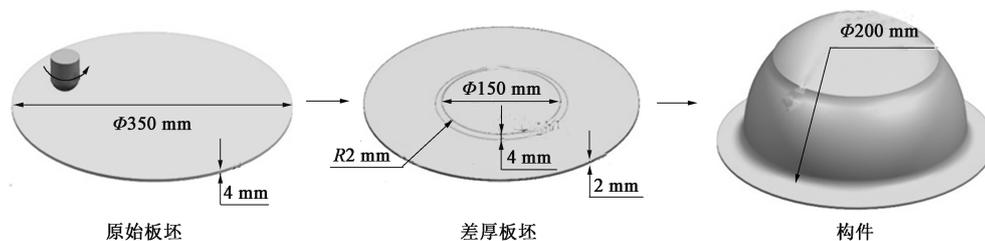


图 4 差厚板制坯示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of blank making for differential thickness sheet

的差厚板，薄区与厚区间以半径为 2 mm 的圆角进行过渡，并最终成形出直径为  $\Phi 200$  mm 的半球形试件。试验前，板坯表面印制六边形点状网格，圆点直径为  $\Phi 1.5$  mm，点距为 3 mm。拉深变形后基于光学测量技术获取网格的空间三维坐标，并进行全

场应变计算。

图 5 为差厚球壳梯度超低温拉深成形有限元模型。采用 Abaqus 6.14 动态显式求解器进行成形过程仿真。定义凸模、凹模和压边圈为离散刚体，板坯为可变形体，采用自由网格划分策略，薄区沿厚

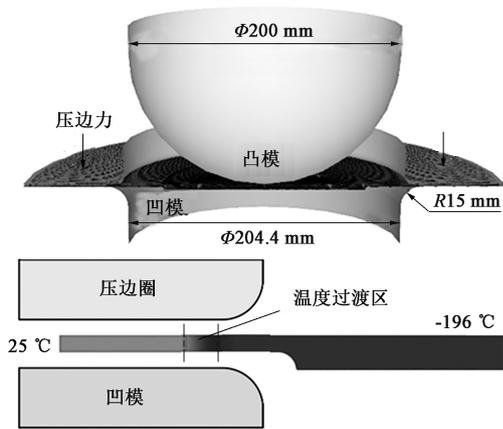


图 5 差厚球壳梯度超低温拉深成形的有限元模型  
Fig. 5 Finite element model of gradient ultra-low deep drawing for spherical shell with differential thickness

向分配 4 层网格，厚区和过渡区分配八层网格，网格类型为 C3D8R 单元，网格总数量约为 180000。通过建立局部柱坐标系来获取径向、环向应力与应

变。定义模具与板坯之间的接触属性为面-面接触，并采用罚函数法定义两者间的切向行为。在实际的梯度超低温拉深成形试验中，凸模直接与板坯接触，板坯、凹模和压边圈之间使用聚四氟乙烯薄膜进行润滑。根据低温带材拉拔摩擦试验的测量结果，仿真中冲头与板坯间的摩擦因数设定为 0.60<sup>[13]</sup>，压边圈/凹模与板坯间的摩擦因数设为 0.09。通过 VU-MAT 子程序定义梯度温度场，法兰与主要变形区分别设置为 25 和 -196 °C，二者之间的温度设置为线性过渡，过渡区的宽度为 15 mm。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 温度对变形行为的影响

图 6 为常温和 -196~25 °C 温度场下差厚球壳拉深成形过程中的径向应变分布。由图 6 可以看出，在相同变形量下，梯度超低温成形时，差厚球壳过

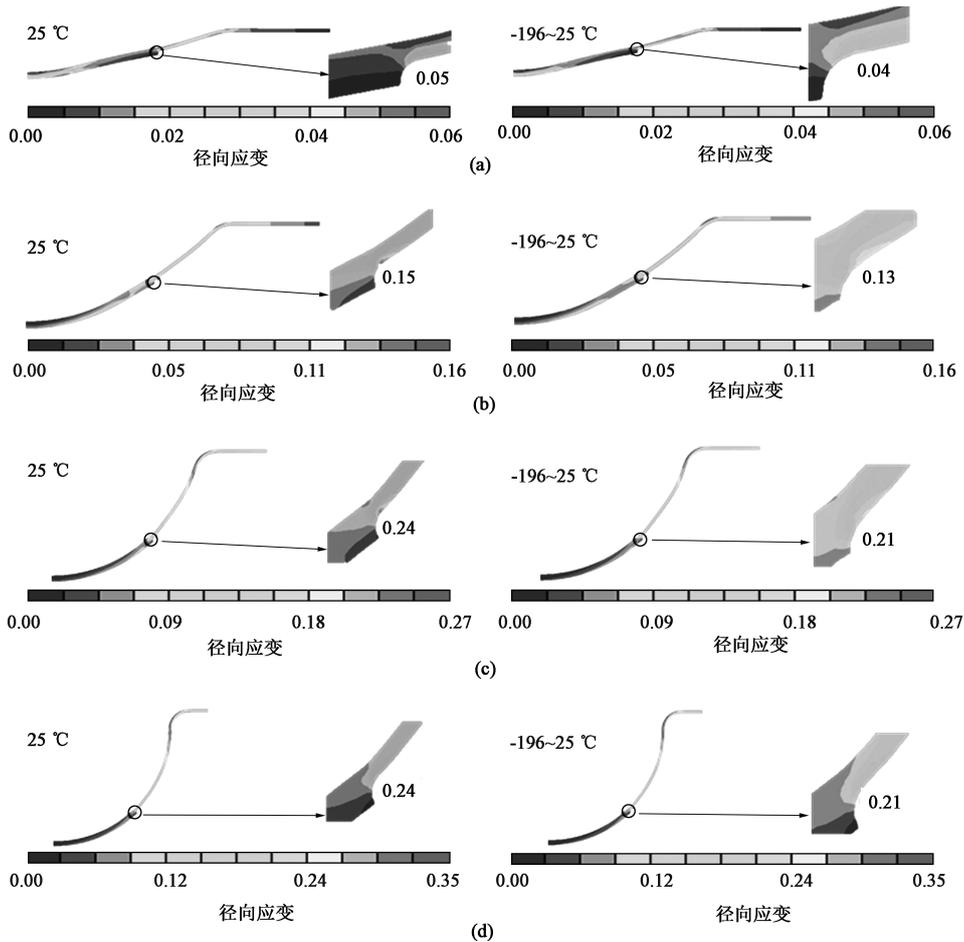


图 6 不同温度条件下差厚球壳拉深成形过程中的径向应变分布

(a) 拉深深度为 25% (b) 拉深深度为 50% (c) 拉深深度为 75% (d) 拉深深度为 100%

Fig. 6 Radial strain distributions of spherical shell with differential thickness in deep drawing process at different temperatures  
(a) Drawing depth of 25% (b) Drawing depth of 50% (c) Drawing depth of 75% (d) Drawing depth of 100%

渡区的最大应变与应变梯度均显著降低, 集中变形被抑制。在拉深深度为 100% 时, 常温成形时的薄厚过渡区的极限径向应变为 0.24, 而在  $-196 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度场下成形时的极限径向应变降低为 0.21, 相比于前者降低了 12.5%。这是因为: 超低温下铝合金的硬化能力大幅提高, 避免了过渡区的集中变形; 并且, 由于铝合金超低温下的塑性显著改善, 因此, 过渡区可承受更大的径向变形而避免开裂。研究结果表明, 差厚球壳梯度超低温拉深成形不仅可以改善过渡区的变形均匀性, 还可以降低过渡区的极限应变, 避免该区域产生应变集中而造成开裂缺陷。

图 7 为过渡区 3 个典型位置在拉深过程中的径向应变变化。由图 7 可以看到, 不同位置的径向应

变随着拉深进行均先增加后趋于平缓。这是因为: 在拉深前期, 过渡区位于悬空区, 该区为主要变形区, 在拉应力作用下发生较大变形; 在拉深后期, 过渡区完全贴膜, 变形程度大幅降低。可以发现, A、B 位置 (薄区) 和 C 位置 (厚区) 分别在拉深行程达到 90 和 75 mm 时趋于平缓。这是因为拉深过程中 C 位置率先贴膜。由于薄厚过渡区存在壁厚差异, 在成形过程中会加剧应变集中, 导致 B、C 位置存在较大的应变梯度。可以发现, 梯度超低温条件下, 过渡区的应变梯度显著降低, B、C 位置间的应变梯度降低为 0.16, 相比常温时减少 23.8%。研究结果表明, 梯度超低温条件可以有效改善薄厚过渡区不同位置的变形协调性, 从而避免集中变形开裂。

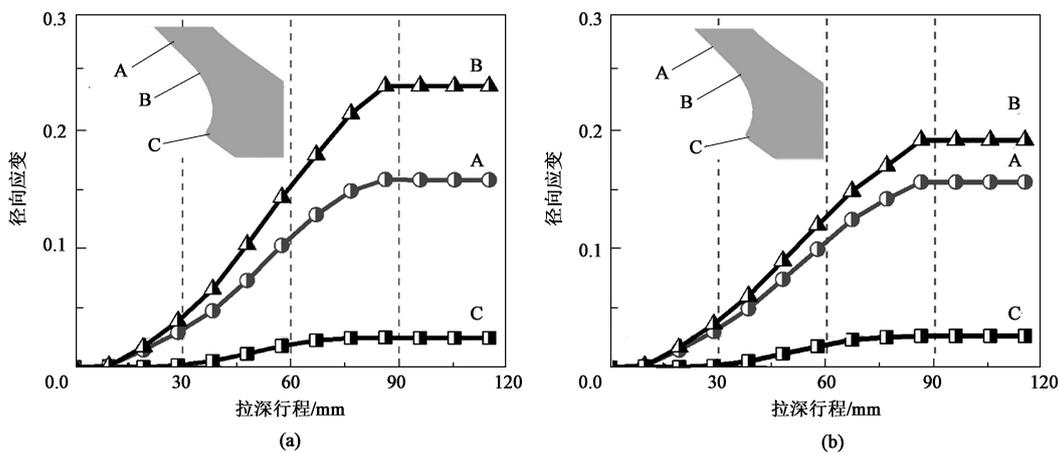


图 7 不同温度下差厚球壳拉深过程中典型位置的径向应变路径  
(a)  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (b)  $-196 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 7 Radial strain paths of typical positions for spherical shell with differential thickness during deep drawing process at different temperatures

图 8 为薄厚过渡区典型位置的径向应力路径变化。可以看出, 在梯度超低温条件下, 薄厚过渡区

承受的径向应力显著提升。在 3 个典型位置中, B 位置的径向应力最大, 当拉深行程为 96 mm 时, 梯

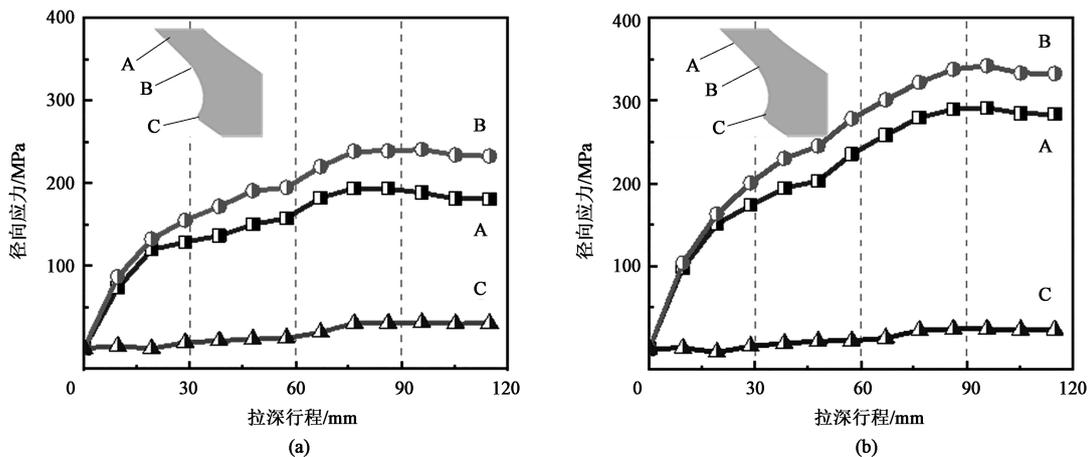


图 8 不同温度下差厚球壳拉深过程中典型位置的径向应力路径  
(a)  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (b)  $-196 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 8 Radial stress paths of typical positions for spherical shell with differential thickness during deep drawing process at different temperatures

度超低温条件下 B 位置的径向应力达到最大值 342.4 MPa, 较常温时提升 42.3%。说明该区域在梯度超低温条件下的变形抗力增加。由于超低温条件下铝合金可承受的极限应力水平大幅提高, 远大于变形的抗力的增加, 因此, 在梯度超低温条件下成形差厚球壳有较高的成形极限。

### 3.2 差厚板梯度超低温成形试件

图 9 为常温和梯度超低温条件下成形的差厚球壳

试件。为避免法兰起皱, 常温压边力为 2 t, 梯度超低温条件下压边力为 25 t。由于超低温条件下铝合金的变形抗力更高, 导致梯度超低温拉深成形时拉深力达到 27 t, 比常温时提高 50%。常温下, 试件在拉深至 65.7 mm 时产生开裂缺陷, 开裂位置位于薄厚过渡区域; 梯度超低温条件下, 试件可以完好成形, 深度为 115.9 mm, 比常温时提高 76.4%。由此说明, 梯度超低温成形技术可以显著提高差厚球壳的成形性能。

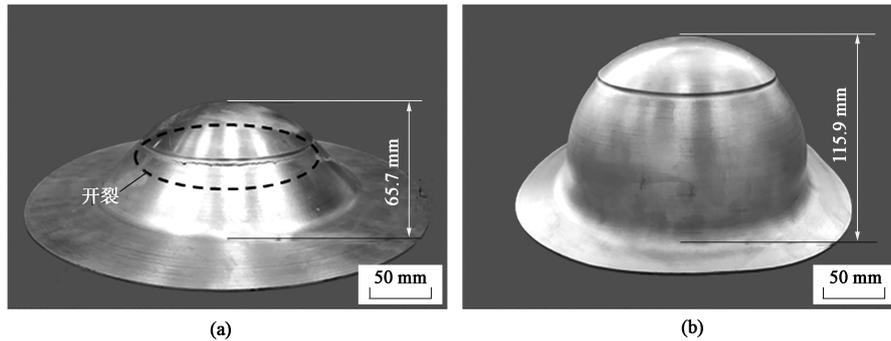


图 9 不同温度下成形的差厚球壳试件

(a) 25 °C (b) -196~25 °C

Fig. 9 Spherical shell specimens with differential thickness formed at different temperatures

### 3.3 应变分布规律

图 10 为常温和梯度超低温条件下成形的差厚球壳试件的应变分布图。常温成形时, 集中变形位于薄厚过渡区; -196~25 °C 梯度超低温条件下, 薄厚过渡区处的应变分布均匀, 最大应变位于试件圆角

区。研究结果表明, 差厚球壳在超低温梯度温度场下成形时, 几何过渡区的应变集中被显著抑制, 变形均匀性显著提升。梯度超低温成形技术不仅可提高差厚球壳的成形极限, 避免几何过渡区的开裂缺陷, 同时还可以显著改善变形均匀性。

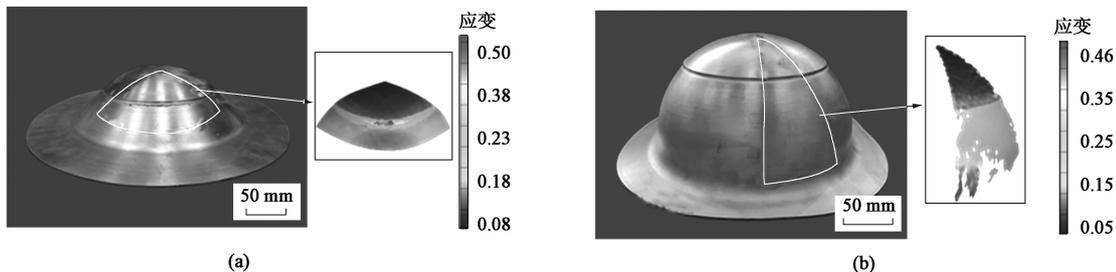


图 10 不同温度下成形的差厚球壳的应变分布

(a) 25 °C (b) -196~25 °C

Fig. 10 Strain distributions of spherical shell with differential thickness formed at different temperatures

## 4 结论

(1) 提出差厚球壳梯度超低温拉深成形新技术, 利用梯度超低温实现铝合金差厚壳体的协调变形, 解决了差厚球壳薄厚过渡区易集中变形而导致开裂的难题。

(2) 差厚球壳梯度超低温成形不仅提升了过渡

区的极限应变, 避免开裂缺陷, 同时可以改善过渡区的变形均匀性, 薄厚过渡区的最大径向应变降低为 0.21。

(3) 在梯度超低温条件下试制出直径为  $\Phi 200$  mm 的 2219 铝合金差厚球壳, 其成形高度比常温成形时提升 76.4%, 验证了差厚球壳梯度超低温拉深成形的可行性, 可为铝合金大型差厚薄壁曲面件的整体成形提供技术支持和基础指导。

## 参考文献:

- [1] 徐永超, 韩思雨, 刘胜京. 液室压力加载路径对 5A06 铝合金锥形件充液拉深成形的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 38-43.  
Xu Y C, Han S Y, Liu S J. The influence of liquid chamber pressure loading path on the liquid filled deep drawing forming of 5A06 aluminum alloy conical parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 38-43.
- [2] 张洪瑞, 詹梅, 郑泽邦, 等. 航天大型薄壁回转曲面构件成形制造技术的发展与挑战 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (20): 166-185.  
Zhang H R, Zhan M, Zheng Z B, et al. Development and challenge of forming technology for aerospace large thin-wall rotary surface components [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (20): 166-185.
- [3] Yuan S J. Research progress of fluid pressure forming theory and technology for thin-wall components with complex surfaces [J]. Engineering, 2021, 7 (3): 189-206.
- [4] Yuan S J, Fan X B. Developments and perspectives on the precision forming processes for ultra-large size integrated components [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, 1 (2): 022002.
- [5] Kleiner M, Chatti S, Klaus A. Metal forming techniques for light-weight construction [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177 (1-3): 2-7.
- [6] Urban M, Krahn M, Hirt G, et al. Numerical research and optimisation of high pressure sheet metal forming of tailor rolled blanks [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177 (1-3): 360-363.
- [7] 张思佳, 胡贤磊, 刘相华. 轧制差厚板方盒件拉深成形的试验与数值模拟 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2022, 43 (6): 801-808.  
Zhang S J, Hu X L, Liu X H. Experimental and numerical simulation of deep drawing of rolled square box with differential thickness [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2022, 43 (6): 801-808.
- [8] 张华伟, 王永喆, 吴佳璐. 基于灰色关联分析的轧制差厚板盒形件充液拉深成形工艺参数多目标优化 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (2): 180-187.  
Zhang H W, Wang Y Z, Wu J L. Multi objective optimization of process parameters for liquid filled deep drawing of rolling thick plate box shaped parts based on grey correlation analysis [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (2): 180-187.
- [9] 凡晓波, 王旭刚, 陈险烁, 等. 铝合金管材超低温介质压力胀形行为 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 1-6.  
Fan X B, Wang X G, Chen X S, et al. Pressure bulging behavior of aluminum alloy pipe under ultra-low temperature medium [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 1-6.
- [10] 凡晓波, 洪吉庆, 赖小明, 等. 铝锂合金曲面件超低温成形工艺 [J]. 宇航材料工艺, 2021, 51 (4): 126-130.  
Fan X B, Hong J Q, Lai X M, et al. Ultra-low temperature forming technology of Al-Li alloy curved parts [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51 (4): 126-130.
- [11] Fan X B, Yuan S J. Innovation for forming aluminum alloy thin shells at ultra-low temperature by the dual enhancement effect [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 4 (3): 103-107.
- [12] Fan X B, Chen X S, Yuan S J. Novel forming process for aluminum alloy thin shells at ultra-low temperature gradient [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 185: 103992.
- [13] Gao Y R, Li H X, Zhao D Y, et al. Cryogenic friction behavior of aluminum alloys sheets under dry contact condition [J]. Tribology International, 2023, 180: 108227.
- 
- (上接第 122 页)
- [4] Wagoner R H, Lim H, Lee M G. Advanced Issues in springback [J]. International Journal of Plasticity, 2013, 45 (45): 3-20.
- [5] Ghaei A, Green D E, Aryanpour A. Springback simulation of advanced high strength steels considering nonlinear elastic unloading-reloading behavior [J]. Materials & Design, 2015, 88: 461-470.
- [6] Mori K, Akita K, Abe Y. Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47 (2): 321-325.
- [7] Zang S L, Lee M G, Sun L, et al. Measurement of the Bauschinger behavior of sheet metals by three-point bending springback test with pre-strained strips [J]. International Journal of Plasticity, 2014, 59: 84-107.
- [8] Strano M. Automatic tooling design for rotary draw bending of tubes [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26 (7-8): 733-740.
- [9] Corona E. A simple analysis for bend-stretch forming of aluminum extrusions [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46 (3): 433-448.
- [10] Zhan M, Gu C G, Jiang Z Q, et al. Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes [J]. Computational Materials Science, 2009, 47 (2): 353-365.
- [11] Clausen A H, Hopperstad O S, Langseth M. Stretch bending of aluminum extrusions: Effect of geometry and alloy [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125 (4): 392-400.
- [12] Wang J, Agarwal R. Tube bending under axial force and internal pressure [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128 (2): 598.
- [13] Ueda M, Ueno K, Kobayashi M. A study of springback in the stretch bending of channels [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1981, 5 (3-4): 163-179.
- [14] Chu G N, Chen G, Lin Y L. Tube hydro-forging-A method to manufacture hollow component with varied cross-section perimeters [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 150-157.