

## 2219 铝合金曲面件局部热翻边成形性能

陈军龙<sup>1</sup>, 凡晓波<sup>1</sup>, 乔科<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:** 针对超低温成形整体箱底局部翻边成形时易开裂的难题, 提出时效温度热翻边成形工艺路线。采用单向拉伸试验测试了超低温预变形后 2219 铝合金的热态力学性能; 通过工艺试验和数值模拟阐明了时效温度热翻边成形规律。研究发现: 超低温预变形试件在时效温度下的伸长率显著增加, 由常温时的 19.5% 提高至 31.3%; 在时效温度下, 实现了直径为  $\Phi 100$  mm 的孔的翻边, 平均翻边高度为 7.5 mm; 从圆角到直壁截面壁厚逐渐减小, 最大减薄率为 18.4%。研究成果成功应用于超低温成形的 2 m 级火箭整体箱底的局部翻边成形, 为整体结构局部特征成形提供了技术支撑和指导。

**关键词:** 整体结构; 2219 铝合金; 热翻边成形; 时效温度; 大型薄壁曲面件

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.006

**中图分类号:** TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0039-05

## Formability of 2219 aluminum alloy curved components in local warm flanging

Chen Junlong<sup>1</sup>, Fan Xiaobo<sup>1</sup>, Qiao Ke<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 easy cracking when local flanging of integral box bottom formed at ultra-low temperature, a process route of warm flanging at aging temperature was proposed, and the thermal mechanical properties of 2219 aluminum alloy after ultra-low temperature pre-deformation were tested by uniaxial tensile test. Furthermore, the forming law of warm flanging at aging temperature was elucidated by process tests and numerical simulations. The research find that the elongation of ultra-low temperature pre-deformed specimens significantly increase at aging temperature, from 19.5% at room temperature to 31.3%. At aging temperature, the flanging of holes with a diameter of  $\Phi 100$  mm is realized, and the average flanging height is 7.5 mm. The wall thickness of section gradually decreases from the rounded corner to the straight walls, and the maximum thinning rate is 18.4%. Thus, the research results have been successfully applied to the ultra-low temperature forming of local flanging for the overall box bottom of 2 m-class rocket, providing technical support and guidance for the local feature forming of integral structure.

**Key words:** integral structure; 2219 aluminum alloy; warm flanging; aging temperature; large thin-walled curved component

为满足轻量化、高可靠和高密集发射要求, 新一代运载火箭迫切需要采用整体结构代替分体拼焊结构, 因此, 出现了一类整体结构的大型铝合金薄壁曲面件, 如燃料贮箱整体箱底<sup>[1-2]</sup>。整体化箱底的尺寸大、壁厚薄, 整体成形难度大。为便于与燃料运输管路连接, 还需要在整体箱底成形后进行局部特征成形, 如图 1 所示。经过整体成形的局部特征区域的加工硬化严重, 同时叠加铝合金箱底材料

本身具有较低的塑性, 使得大型铝合金薄壁曲面件在后续局部特征成形时极易开裂, 成为新一代型号研制的瓶颈难题。

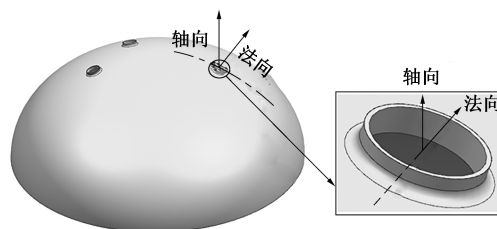


图1 带翻边孔的整体箱底示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integral box bottom with flanging holes

大型薄壁曲面件的局部特征常采用翻边成形。为提高铝合金的塑性, 通常需要加热<sup>[3-5]</sup>。由于整体成形构件已经完成热处理, 加热温度不仅影响成形性,

收稿日期: 2023-03-12; 修订日期: 2023-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFA0708804)

作者简介: 陈军龙 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: Chen\_jl0822@163.com

通信作者: 凡晓波 (1987-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: xbfan@dlut.edu.cn

还会对后续服役性能产生严重影响<sup>[6]</sup>。成形温度过高,虽能够提高成形塑性,但会损失构件强度,影响后续服役性能;成形温度过低,则会导致在成形中出现开裂缺陷。为此,常采用成形温度较低的热翻边成形技术<sup>[7-9]</sup>,以避免对最终服役性能产生影响。目前,主要对常规成形后的 2219 铝合金箱底在淬火态和 T6 态下进行翻边成形<sup>[10-11]</sup>。而整体成形箱底的尺寸较大,难以在新淬火态下进行局部翻边成形。对于超低温成形整体箱底,后续不再加工,可以在人工时效前先完成局部翻边成形。因此,如何在保证不影响服役性能的前提下实现 T4 态 2219 铝合金翻边成形至关重要。

为此,本文提出了时效温度热翻边成形工艺。采用单向拉伸试验测试了超低温预变形后 2219 铝合金的热力学性能;通过工艺试验和数值模拟阐明了时效温度热翻边成形规律,为 2219 铝合金成形整体箱底的后续局部翻边成形提供了指导。

1 研究方案

1.1 热态力学性能测试

在直径为  $\Phi 2.25\text{ m}$  的整体箱底的翻边区域(预变形程度约为 12%)切取单向拉伸试样(70 mm×10 mm)。为了避免温度对后续服役性能造成的影响,在不超过时效温度的条件下,选取 3 个典型温度(25、125 和 175 ℃)进行单向拉伸试验,测试超低温预变形后 2219 铝合金的热态力学性能。试验在装有高温炉的单向拉伸机上进行,初始应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup>。通过真实应力-真实应变曲线描述热态变形行为,为热翻边工艺试验参数的制定和有限元仿真分析提供依据。每次测试至少重复两次,以确保试验的可重复性。

1.2 热翻边成形工艺试验

图 2 为热翻边成形原理图。以直径为  $\Phi 100\text{ mm}$  的孔为翻边对象,通过热翻边工艺试验探究翻边成形规律。热翻边模具主要由凸模和凹模两部分组成。根据试件尺寸设计模具特征尺寸,其中凹模内径为  $\Phi 110.6\text{ mm}$ ,型面与曲面件翻边区域的型面一致。凸、凹模通过导向轴定位,以确保翻边过程中的同轴度。采用电阻加热模具,再依靠模具传热实现翻边区域的局部加热。通过接触式传感器实时监测成形温度,采用 PID 控制器进行控制,成形温度的控制精度为  $\pm 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了避免模具连接部分的热交换,在凸模上端和凹模下端分别增加隔热材料。

为了研究成形温度对热翻边成形性能的影响,

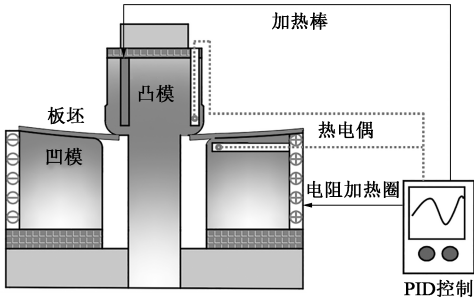


图 2 热翻边成形原理图

Fig. 2 Principle diagram of warm flanging

进行了常温和时效温度下的热翻边成形工艺试验,试验方案如表 1 所示。试验针对曲面件开展,试验坯料从超低温成形整体箱底翻边区域切取,翻边预开孔直径为  $\Phi 80\text{ mm}$ 。热翻边成形后,通过壁厚和椭圆度进一步评估翻边变形行为。

表 1 热翻边成形工艺试验方案

Table 1 Test schemes of warm flanging process

方案	温度/℃	翻边系数	分析对象
1	25	0.8	壁厚分布、椭圆度
2	175		

1.3 有限元分析方案

通过数值模拟进一步研究了常温和时效温度条件下的热翻边成形规律。分析软件为 Abaqus 6.14,有限元模型如图 3 所示。板坯网格尺寸为 1 mm、厚度为 8 层,并建立局部球坐标系。模具网格尺寸为 2 mm,摩擦因数为 0.40。仿真模型中的模具型面、几何尺寸、坯料型面及翻边系数等均与热翻边成形工艺试验一致,凸模接触板坯后下行 36 mm。

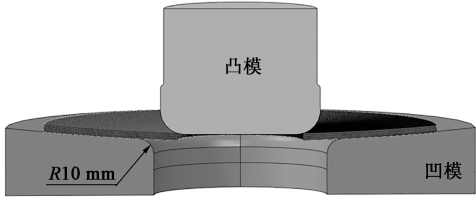


图 3 有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model

2 结果与讨论

2.1 力学性能

图 4 为预变形 2219 铝合金在不同成形温度下的真实应力-真实应变曲线。可以看出,随着成形温度的增加,超低温预变形后的 T4 态 2219 铝合金的

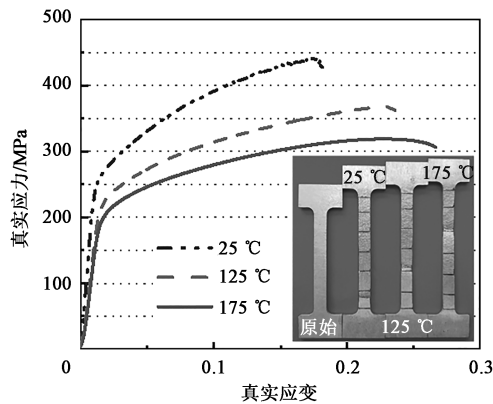


图 4 不同成形温度下预变形 2219 铝合金的真实应力-真实应变曲线  
Fig. 4 True stress-true strain curves of pre-deformed 2219 aluminum alloy at different forming temperatures

塑性得到了显著的提高，如表 2 所示。时效温度（175 ℃）下，材料的伸长率为 31.2%，相比室温时的 19.4%提高了 60.8%。由此说明，时效温度作为热翻边成形工艺试验的成形温度，可以使预变形材

料具有足够的塑性，且不会造成构件性能损失。

表 2 不同成形温度下预变形 2219 铝合金的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of pre-deformed 2219 aluminum alloy at different forming temperatures

温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
25	373.5±1.2	245.6±0.1	19.5±0.8
125	295.0±0.6	245.1±1.3	28.9±1.1
175	260.9±0.3	225.6±2.1	31.3±1.5

2.2 热翻边成形性能

2.2.1 热翻边成形试件

图 5 为室温和时效温度下的热翻边成形试件。可以看出：室温下翻边成形，试件发生了明显的开裂缺陷；时效温度下翻边成形，试件无微裂纹等缺陷，成功实现了翻边成形，其直壁段平均高度为 7.50 mm。通过多次时效温度热翻边成形，试件均未发生开裂。由此说明，时效温度可用于大型铝合金薄壁曲面件局部特征的高可靠翻边成形。

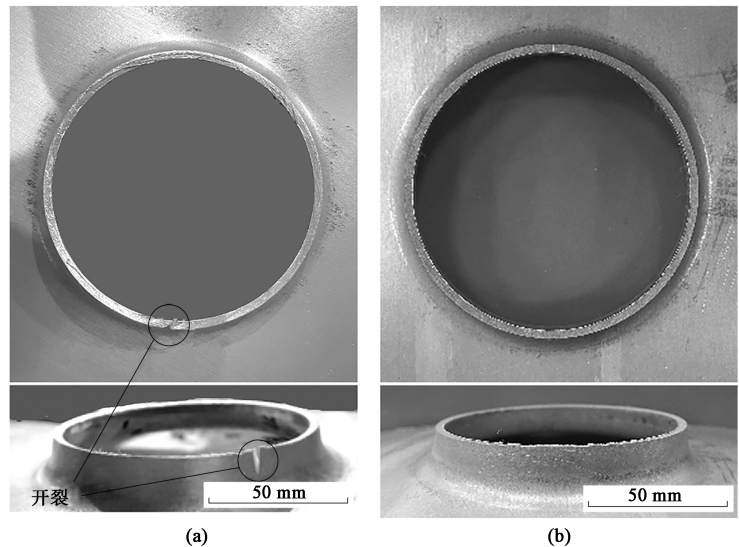


图 5 不同成形温度下的热翻边成形试件  
(a) 25 ℃ (b) 175 ℃

Fig. 5 Specimens formed by warm flanging at different forming temperatures

2.2.2 壁厚分布规律

图 6 为时效温度下热翻边成形试件在不同截面的壁厚分布规律。其中，RD 为板材轧制方向，即 0°方向。可以看出，受局部翻边成形特性决定，各截面的壁厚沿轴向均减薄，各方向的壁厚变化规律基本一致。整体上，试件在 90°方向的壁厚减薄最小，180°方向的壁厚减薄最大，0°和 270°方向差异不大。其中，试件的最小壁厚为 3.40 mm，位于 0°方向的直壁边缘处，相应的最大减薄率为 18.4%。直壁

段的平均高度为 7.50 mm，壁厚平均减薄率为 16.2%。

图 7 为不同温度下热翻边成形试件直壁边缘的环向壁厚分布规律。由图 7 可知：时效温度下热翻边成形试件直壁边缘处的壁厚分布均匀，壁厚均小于 3.50 mm，平均壁厚为 3.43 mm；室温下热翻边成形试件直壁边缘处的壁厚相差较大，分布均匀性差，平均壁厚为 3.56 mm。其中，测量点 4 为试件开裂区域，壁厚为 3.74 mm。由此表明，成形温度由室温提高至时效温度，试件材料的成形能力显著

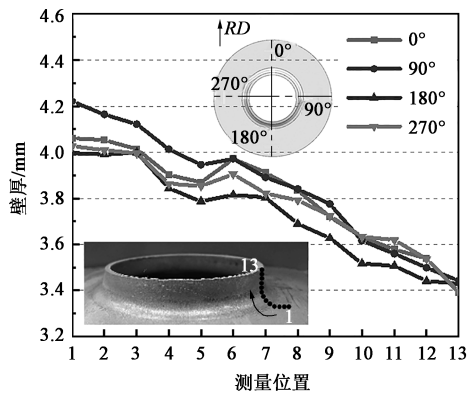


图 6 时效温度下热翻边成形试件的壁厚分布

Fig. 6 Wall thickness distribution of warm flanging specimen at aging temperature

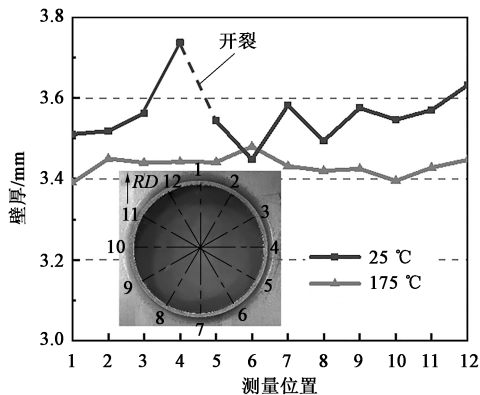


图 7 不同成形温度下热翻边成形试件直壁边缘的壁厚分布

Fig. 7 Wall thickness distribution at straight wall edge of warm flanging specimens at different forming temperatures

提升,能够满足变形需求,避免成形时发生开裂。

总体来看,时效温度下热翻边成形试件的壁厚沿圆角至直壁逐渐减小,最小壁厚位于试件的直壁边缘,最大减薄率小于 20%。试件同位置区域的壁厚分布均匀,能够满足后续装配和服役要求。

### 2.2.3 椭圆度

椭圆度是指工件的横截面接近理论圆的程度,用来衡量翻边成形精度,计算公式为:成形精度 =  $\frac{\text{最大直径} - \text{最小直径}}{\text{标称直径}} \times 100\%$ 。图 8 为时效温度下热

翻边成形试件在不同方向的内径。由图 8 可知,试件的平均孔径为  $\Phi 101.5 \text{ mm}$ ,椭圆度为 0.2%。研究表明,时效温度下热翻边成形试件的孔径分布均匀、成形精度较好,回弹程度约为 0.5%。

### 2.3 热翻边成形机制分析

图 9 为不同变形阶段截面环向应变的分布规律。由图 9 可以看出,试件在热翻边成形过程中,圆角

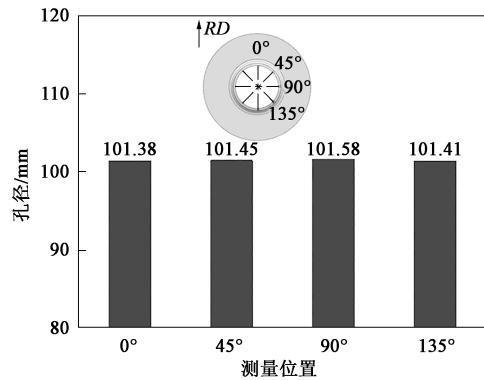


图 8 时效温度下热翻边成形试件的内径分布

Fig. 8 Inner diameter distribution of warm flanging specimen at aging temperature

区至直壁区的环向应变呈逐渐增大的趋势,在直壁边缘处达到最大。热翻边成形完成时,直壁边缘的最大环向应变为 0.29,约为圆角边缘处最大应变的 2 倍。即在热翻边成形中,试件沿圆角区域至直壁区域的变形程度逐渐增大,在直壁边缘处变形程度始终最大,从整个应变变化轨迹也可明显看出,如图 10 所示。因此,为实现凸孔翻边成形,应尽可能地提高直壁变形区的成形性,以尽可能地减小对构件服役性能的影响。

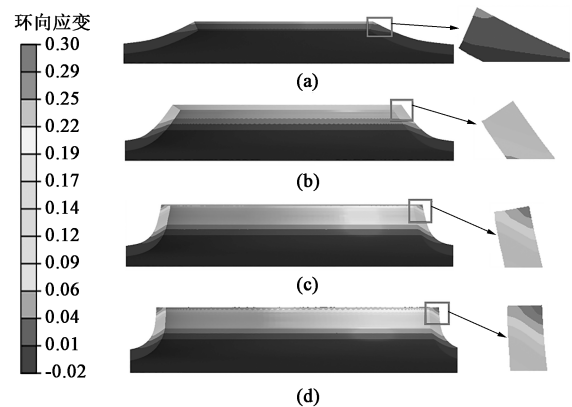


图 9 不同变形阶段的环向应变的分布

(a) 25%翻边行程 (b) 50%翻边行程 (c) 75%翻边行程 (d) 100%翻边行程

Fig. 9 Hoop strain distribution under different deformation stages

(a) 25% of flanging stroke (b) 50% of flanging stroke (c) 75% of flanging stroke (d) 100% of flanging stroke

## 3 实际应用

图 11 为热态局部翻边成形后的大型铝合金薄壁构件<sup>[12]</sup>。采用时效温度下热翻边成形工艺成功实现大型构件局部翻边成形。翻边孔无微裂纹缺陷,壁



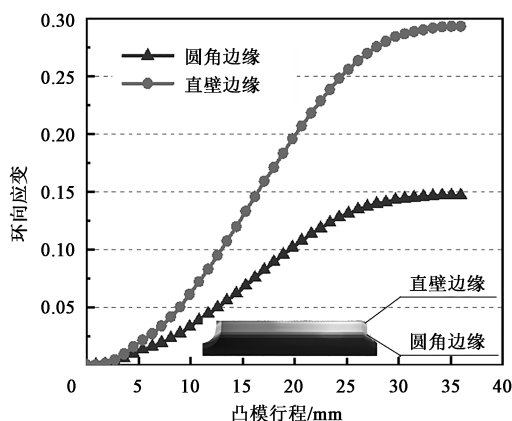


图10 圆角和直壁边缘区环向应变的变化规律

Fig. 10 Variation law of hoop strain in fillet and straight wall edge regions

厚分布均匀, 成形精度高, 且构件性能未损失, 充分验证了时效温度下热翻边成形工艺工程化应用的可行性, 可为整体结构局部特征成形提供技术支撑和指导。

图11 直径为  $\Phi 2.25$  m 的 2219 铝合金整体箱底Fig. 11 2219 aluminum alloy integral box bottom with a diameter of  $\Phi 2.25$  m

## 4 结论

(1) 提出时效温度下热翻边成形新工艺, 解决了整体箱底局部翻边成形的开裂难题。

(2) 时效温度下热翻边成形试件的壁厚沿圆角至直壁逐渐减小, 最小壁厚位于试件直壁边缘, 最大减薄率小于 20%。试件同位置区域的壁厚分布均匀, 能够满足后续装配和服役要求。

(3) 实现了直径  $\Phi 2$  m 级的 2219 铝合金整体箱底局部翻边成形, 验证了时效温度下热翻边成形工艺工程化应用的可行性, 为整体结构局部特征成形

提供技术支撑和指导。

## 参考文献:

- [1] 刘欣, 王国庆, 李曙光, 等. 重型运载火箭关键制造技术发展展望 [J]. 航天制造技术, 2013, 177 (1): 1-6.  
Liu X, Wang G Q, Li S G, et al. Forecasts on crucial manufacturing technology development of heavy lift launch vehicle [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013, 177 (1): 1-6.
- [2] 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): 33-51.
- [3] Li D M, Ghosh A. Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 352 (1-2): 279-286.
- [4] 周国伟, 李大永, 彭颖红. 7075-T6 高强度铝合金温热条件下的拉深成形性能 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46 (9): 1482-1486.  
Zhou G W, Li D Y, Peng Y H. Deep drawability of 7075-T6 high strength aluminum alloy at warm condition [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46 (9): 1482-1486.
- [5] 刘合军, 郎利辉, 李涛. 铝合金板材温热成形性能 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (3): 145-148, 181.  
Liu H J, Lang L H, Li T. Investigation of formability of aluminum alloy sheet at elevated temperature [J]. Journal of Plastic Engineering, 2009, 16 (3): 145-148, 181.
- [6] Lin Y C, Chen X M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working [J]. Materials & Design, 2011, 32 (4): 1733-1759.
- [7] Bolt P J, Lambour N A P M, Rozier P J C M. Feasibility of warm drawing of aluminium products [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115 (1): 118-121.
- [8] 李翔, 唐建国, 张新明, 等. 温变形对汽车车身用 6061 铝合金自然时效及力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26 (1): 1-6.  
Li X, Tang J G, Zhang X M, et al. Effect of warm deformation on natural ageing and mechanical properties of aluminum alloy 6061 sheets for automotive body [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26 (1): 1-6.
- [9] Toros S, Ozturk F, Kacar I. Review of warm forming of aluminum-magnesium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207 (1-3): 1-12.
- [10] 张下陆, 郭慧, 赵鸿飞, 等. 淬火态 2219 铝合金板材加热翻边工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 136-140.  
Zhang X L, Guo H, Zhao H F, et al. Heating flanging process for quenched state 2219 aluminum alloy sheets [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 136-140.
- [11] 龚集响, 杨勇, 范华明, 等. 硬态贮箱整底翻孔成形试验研究 [J]. 航天制造技术, 2022, 231 (1): 11-15.  
Gong J X, Yang Y, Fan H M, et al. Experimental research on the forming of flanging hole at whole bottom of hard tank [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2022, 231 (1): 11-15.
- [12] 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): 1-5.