

## 铜合金成形

# 超声振动辅助 T2 紫铜薄板软模微胀形工艺研究

王春举<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>2,3</sup>, 张志强<sup>2</sup>, 程利冬<sup>1</sup>, 单德彬<sup>2</sup>, 郭斌<sup>2</sup>

(1. 苏州大学 机电工程学院 机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215131; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 3. 吉首大学 物理与机电工程学院, 湖南 吉首 416000)

**摘要:** 目的 解决薄板微胀形工艺中尺度效应导致的零件尺寸精度及形状精度不稳定以及板料减薄带来的成形极限下降等问题。**方法** 对 T2 紫铜薄板进行多球冠微结构胀形工艺研究, 对比刚模微胀形和超声振动辅助软模微胀形工艺条件下球冠微结构的成形质量, 分析壁厚减薄率的变化规律, 研究超声振动保压时间对球冠形貌及胀形高度的影响, 对比分析紫铜薄板厚度对球冠胀形质量的影响规律。**结果** 超声振动辅助软模微胀形工艺能够提高球冠微结构胀形极限, 促进材料均匀变形, 改善壁厚分布, 相比于刚模微胀形, 在超声作用下壁厚减薄率降低了约 7%。超声振动保压时间越长, 球冠贴模性越好, 当保压时间为 80 s 时, 球冠相对高度提升了 0.1 mm。板料厚度越薄, 成形极限越低, 当板料厚度为 100 μm 时, 球冠成形质量及成形精度最高, 在超声振动辅助软模微胀形工艺条件下, 球冠成形极限进一步提高。**结论** 超声振动与软模相结合的复合成形方法能够降低 T2 紫铜薄板微胀形尺度效应的不利影响, 抑制壁厚过度减薄, 显著提升胀形精度和成形极限。

**关键词:** 超声振动; 球冠; 软模; 微胀形; 紫铜薄板

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.019

**中图分类号:** TG306    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-6457(2023)05-0156-08

## Soft Die Micro Bulging Assisted by Ultrasonic Vibration Using T2 Copper Foil

WANG Chun-ju<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>2,3</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>2</sup>, CHENG Li-dong<sup>1</sup>, SHAN De-bin<sup>2</sup>, GUO Bin<sup>2</sup>

(1. Robotics and Microsystems Center, School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Jiangsu Suzhou 215131, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. College of Physics and Electromechanical Engineering, Jishou University, Hunan Jishou 416000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the unstable dimensional accuracy and shape accuracy of parts caused by size effect in micro bulging process of foils and the reduction of forming limit caused by thinning of foils. In this work, micro bulging process of multi-spherical cap structure for T2 copper foil was researched. By the comparison between rigid die bulging and ultrasonic

收稿日期: 2022-12-13

Received: 2022-12-13

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51875128); 国防基础科研项目 (JCKY2020203B056); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目 (20KJA460003); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目 (GDZB-069); 湖南省教育厅优秀青年项目 (22B0539)

**Fund:** The National Natural Science Foundation of China (51875128); the State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense (JCKY2020203B056); the Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions of China (20KJA460003); Six Talent Peaks in Jiangsu Province (GDZB-069); the Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province (22B0539)

**作者简介:** 王春举 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属微结构智能制造与系统应用。

**Biography:** WANG Chun-ju (1978-), Male, Doctor, Professor, Research focus: intelligent manufacturing of metal microstructure and system application.

**引文格式:** 王春举, 刘洋, 张志强, 等. 超声振动辅助 T2 紫铜薄板软模微胀形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 156-163. WANG Chun-ju, LIU Yang, ZHANG Zhi-qiang, et al. Soft Die Micro Bulging Assisted by Ultrasonic Vibration Using T2 Copper Foil[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 156-163.

vibration assisted soft die micro bulging, the change of forming quality and wall thickness reduction rate was studied. The effects of ultrasonic holding time on spherical cap morphology and bulging height were discussed. The effects of wall thickness of copper foils on bulging quality were compared and analyzed. The results showed that the micro bulging process combining ultrasonic vibration and soft die could increase the bulging limit of spherical cap, promote deformation uniformity and improve wall thickness distribution. Compared with rigid die micro bulging, the thinning ratio was decreased by 7% under the effects of ultrasonic vibration. The fitness increased with the increase of ultrasonic holding time. The relative height of spherical cap was increased by 0.1 mm when the holding time was 80 s. The bulging limit decreased with the decrease of wall thickness. The forming quality and accuracy were the best when the wall thickness was 100  $\mu\text{m}$ . The bulging limit can be further improved during ultrasonic vibration assisted soft die micro bulging process. The forming method combining ultrasonic vibration and soft die can decrease the negative size effect, inhibit the excessive thinning in micro bulging of T2 copper foils and effectively improve the bulging accuracy and forming limit.

**KEY WORDS:** ultrasonic vibration; spherical cap; soft die; micro bulging; copper foil

金属薄板微胀形工艺在微小金属零部件塑性成形领域具有广泛应用，其基本原理是利用微胀形模具，使金属薄板在双向拉应力作用下实现厚度减薄、表面积增大，以获得所需几何形状和尺寸的成形技术。微胀形工艺中存在的主要问题是板材减薄甚至产生破裂<sup>[1]</sup>，特别是当金属薄板厚度达到微米级别时，板材的减薄问题直接关系到零件精度和质量<sup>[2]</sup>。为此，国内外学者针对金属薄板在微尺度范围内的微胀形工艺和零件胀形质量的提升做了大量研究。Mahabunphachai 等<sup>[3-4]</sup>通过薄板液压微胀形实验，研究了尺度效应对芯片微细特征结构成形过程的影响，以及不同材料的微胀形工艺变形特点。孙立君等<sup>[5]</sup>对超薄不锈钢薄板微胀形工艺进行了数值模拟，利用 Hill 集中性失稳理论预测了超薄不锈钢板胀形破裂极限。吴杰锋等<sup>[6]</sup>进行了不同厚度的 304 不锈钢薄板有限元数值模拟和刚模微胀形实验，研究表明，随着板料厚度的减小，材料的屈服强度先减小后增大，抗拉强度和伸长率先增大后减小，表现出明显的力学性能尺寸效应。Vollertsen 等<sup>[7]</sup>利用液压橡皮囊代替刚性凸模对板材进行了拉深成形，有效控制了板材表面受到的局部压力，提高了成形极限和成形质量。刘铮等<sup>[8]</sup>开展了多脉冲激光冲击微胀形实验，研究了激光功率密度、初始晶粒尺寸和箔材厚度对胀形极限的影响。Wakai 等<sup>[9]</sup>利用粉体作为软凸模进行了微胀形实验，提高了零件成形极限。王刚等<sup>[10]</sup>对板厚 1.0 mm 的细晶 AZ31B 镁合金板材进行了快速气压微胀形研究，结果表明，温度和压强共同影响微胀形件的胀形高度，在温度 400 °C、压强 0.6 MPa 条件下，胀形高度最大，同时，随着胀形高度的增加，薄板壁厚不均匀性增大。相关研究结果表明，微胀形工艺中的无模或软模成形能够在一定程度上提高零件的成形极限和成形质量<sup>[11-13]</sup>。

近年来，超声振动辅助成形作为一种外加物理场复合成形方法，在拉深、拉拔、挤压、冲裁等塑性成

形工艺中得到了广泛研究和实际应用<sup>[14-18]</sup>。由于体积效应与表面效应的存在，超声振动辅助成形能够显著降低成形力，减少模具与零件的接触摩擦，促进材料流动，提高成形效率，显著提高零件的表面质量和形状尺寸精度<sup>[19-21]</sup>。Jimma 等<sup>[22]</sup>、韩光超等<sup>[23]</sup>开展了超声振动辅助拉深成形实验，研究表明，超声振动能够提高 304 不锈钢的拉深极限，降低拉深力，提高成形质量。Luo 等<sup>[24-25]</sup>采用超声柔性冲头微冲压成形方法，在金属薄板表面成形出高质量微结构。相比于传统的刚性凸模微胀形工艺，软模微胀形能够改变金属薄板胀形过程中变形区应力-应变状态，使板材塑性变形更加均匀，而超声振动可以降低材料成形力，提高材料塑性及材料的流动性能，改善应力集中，使壁厚分布更加均匀。为此，文中采用超声振动辅助成形方法，结合软模成形工艺，通过不同参数的超声振动辅助软模微胀形实验，研究振动保压时间、薄板厚度对胀形过程的影响规律，对球冠微结构进行质量分析，并与刚模微胀形工艺进行比较，探索进一步提升金属薄板微胀形质量的成形方法。

## 1 实验

### 1.1 材料及方案

超声振动辅助软模微胀形实验材料为直径 20 mm 的 T2 紫铜圆形板料。根据制定的实验方案(如表 1 所示)，对 20、40、60、80、100  $\mu\text{m}$  板厚的坯料进行 550 °C 退火热处理。软模选择 EVA (乙烯-醋酸乙烯共聚物) 树脂材料，EVA 具有较好的柔韧性、抗冲击性、填充性能，无毒环保，同时具有较低的热分解温度，在超声振动作用下可以熔融固化，获得所需要的软模。

### 1.2 实验装置

超声振动辅助微胀形实验装置包括电子万能材

表 1 超声振动辅助软模微胀形实验方案  
Tab.1 Experimental scheme of ultrasonic vibration assisted soft die micro bulging

Group	Number	Male die	Holding time/s	Foil thickness/ $\mu\text{m}$
1 ( Male die )	1	Rigid die	80	20
	2	Ultrasonic	80	20
	3	EVA	80	20
	4	Ultrasonic+EVA	80	20
2 ( Holding time )	5	Ultrasonic+EVA	0	100
	6	Ultrasonic+EVA	20	100
	7	Ultrasonic+EVA	40	100
	8	Ultrasonic+EVA	60	100
	9	Ultrasonic+EVA	80	100
3 ( Foil thickness )	10	Ultrasonic+EVA	80	20
	11	Ultrasonic+EVA	80	40
	12	Ultrasonic+EVA	80	60
	13	Ultrasonic+EVA	80	80
	14	Ultrasonic+EVA	80	100

料实验机、超声波发生设备、超声设备固定模架以及微胀形模具，如图 1 所示。凸模导向板可以提高凸模与凹模的配合精度，同时也可以起到压料作用。刚模微胀形模具采用电火花加工，由刚性凹模、刚性凸模、EVA 软模、压料板（凸模导向板）等组成。

刚模微胀形及超声振动辅助软模微胀形示意图如图 2 和图 3 所示。刚模微胀形工艺通过刚性凸模与金属薄板的直接接触载荷使金属薄板发生塑性变形。超声振动辅助软模微胀形工艺将超声振动与软模成形相结合，在实验过程中先固定 T2 紫铜薄板并将 EVA 固体颗粒放入固定槽中，然后合模并施加超声振动。EVA 颗粒熔点仅为 90 °C，在模具压力与超声频率的机械摩擦温升作用下能够顺利熔融，形成半流体状态，当超声振动停止后，模具热传导作用使 EVA 迅速降温，同时在载荷作用下固化成具有特征微结构的软凸模，超声振动载荷通过软凸模均匀传递给坯

料，使零件成形，最后保压一段时间，以提高零件的贴模性，获得合格的微胀形件。在实验过程中，凸模下行速度统一为 1 mm/s，超声振幅约为 3.5  $\mu\text{m}$ ，超声振动施加方式为全程加载。

## 2 结果与分析

### 2.1 微胀形工艺

20  $\mu\text{m}$  厚度 T2 紫铜坯料在 4 种不同微胀形工艺条件下获得的球冠形貌如图 4 所示。与刚模微胀形工艺相比，在超声振动作用下，贴模性有所提高，但侧壁发生了严重破裂，球冠微结构与坯料分离。因板料较薄、伸长率低、塑性变形能力差，超声振动作用下的软化效应和表面效应并不明显，反而使板料受力不均匀，特别是凸模圆角处破裂更加严重。软模微胀形时，侧壁破裂情况减轻，球冠微结构形状精度提高，

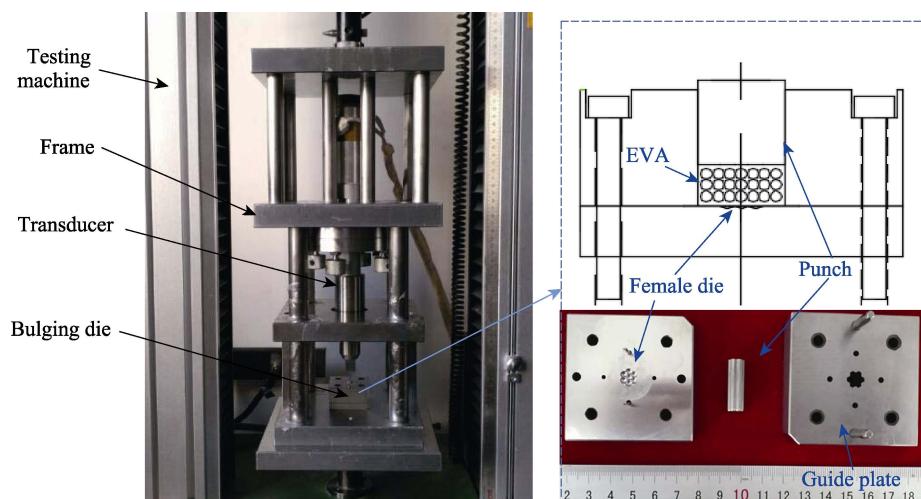


图 1 超声振动辅助微胀形装置  
Fig.1 Ultrasonic vibration assisted micro bulging device

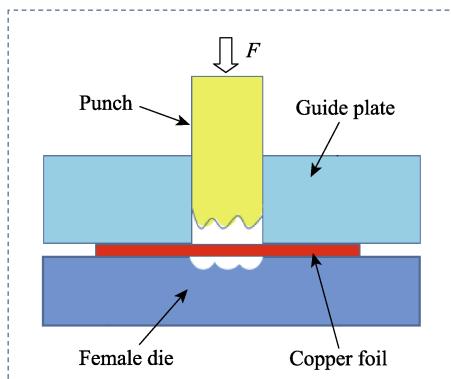


图 2 刚模微胀形示意图  
Fig.2 Diagram of rigid die micro bulging

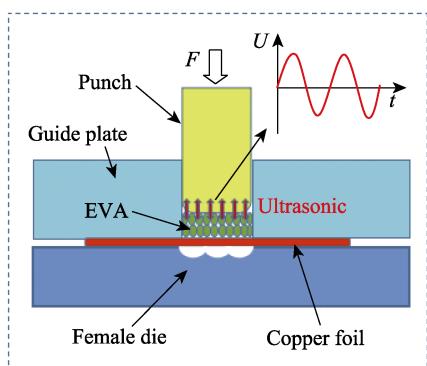


图 3 超声振动辅助软模微胀形示意图  
Fig.3 Diagram of ultrasonic vibration assisted soft die micro bulging

但是球冠底部发生破裂, 说明软模改变了薄板的受力情况。超声振动辅助软模微胀形工艺可以非常明显地

提高 T2 紫铜薄板的成形极限和贴模能力, 使特征交汇点、交汇边轮廓明显, 表面质量得到提高。施加超声振动可以在成形过程中使软模继续软化, 超声振动能量可以更加柔地传递给薄板, 同时超声振动表面效应与软模共同发挥作用, 从而降低界面接触应力和成形力。

分别采用刚模微胀形工艺和超声振动辅助软模微胀形工艺对 100 μm 厚度的 T2 紫铜薄板进行胀形, 获得球冠形貌如图 5 所示。可以看出, 2 种微胀形工艺都可以获得高质量的球冠微结构。从激光共聚焦三维图像可以看出, 超声振动辅助软模微胀形工艺获得的微结构在球冠交汇点和交汇边处特征结构更加清晰, 成形质量更好。

对超声振动辅助软模微胀形工艺获得的微胀形件进行剖切, 对其壁厚分布情况进行测量与分析, 并与刚模微胀形件进行对比, 得到的壁厚减薄率和壁厚分布情况分别如图 6 和图 7 所示。可以看出, 2 种工艺获得的球冠微结构侧壁、交汇边、交汇点、球冠底部的壁厚分布趋势基本一致, 均是侧壁位置减薄最严重, 其次是交汇点和交汇边, 球冠底部减薄最少。由于压边力的存在, 圆形板料外圈固定, 内圈在微胀形过程中发生较大塑性变形, 在变形区与非变形区的过渡部分应变集中相对严重, 因此, 侧壁位置减薄率最大。而在变形区内, 交汇点和交汇边都位于模具微结构形状突变位置, 这易导致局部应力集中, 从而发生明显减薄。在超声振动辅助软模微胀形工艺条件下, 各个位置减薄趋势不变, 但从整体上看, 不同点位减

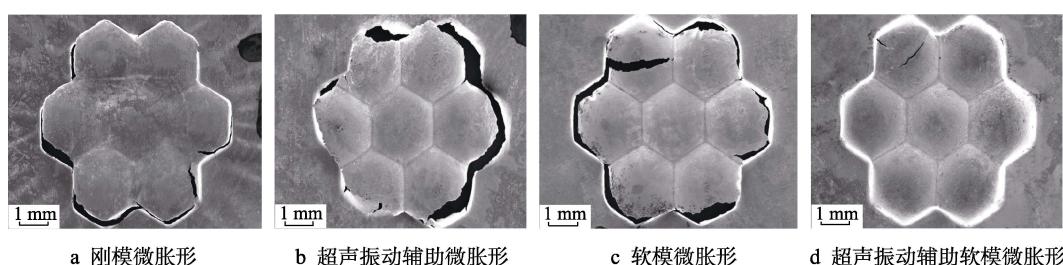


图 4 不同微胀形工艺下的球冠形貌对比 (20 μm)

Fig.4 Comparison on spherical cap morphology under different bulging processes (20 μm): a) rigid die micro bulging; b) ultrasonic vibration assisted micro bulging; c) soft die micro bulging; d) ultrasonic vibration assisted soft die micro bulging

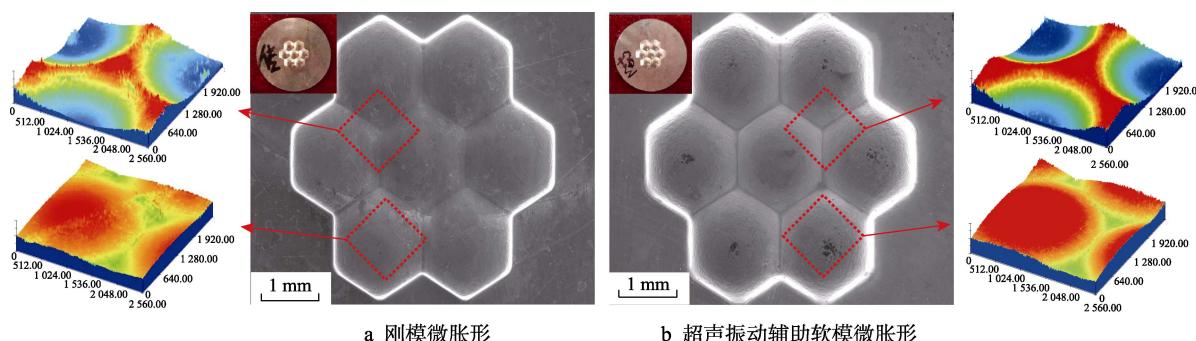


图 5 刚模微胀形与超声振动辅助软模微胀形球冠形貌对比 (100 μm)

Fig.5 Comparison on morphology between rigid die micro bulging and ultrasonic vibration assisted soft die micro bulging (100 μm): a) rigid die micro bulging; b) ultrasonic vibration assisted soft die micro bulging

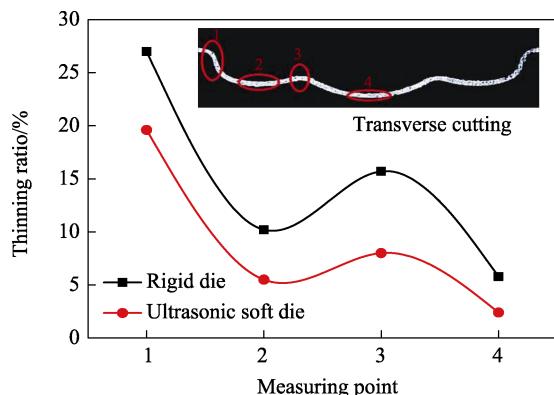


图 6 壁厚减薄率对比  
Fig.6 Comparison on thickness thinning

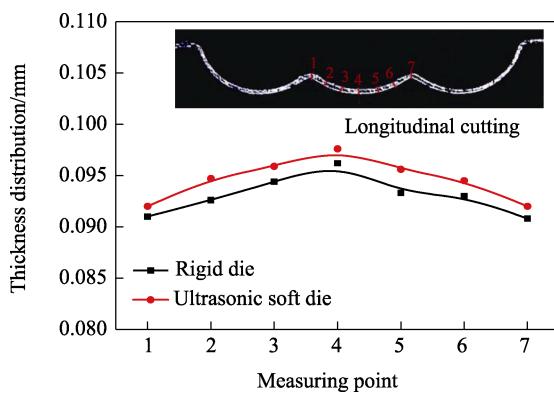


图 7 球冠壁厚分布对比  
Fig.7 Comparison on thickness distribution of spherical cap

薄率均有明显降低。其主要原因在于一方面软模改变

了板料应力-应变状态，局部刚性接触点的应力集中得到有效缓解，另一方面超声振动能量的输入促进了材料流动，提高了材料变形均匀性，这有利于缓解板料过度减薄，提高薄板胀形极限。

## 2.2 超声振动保压时间

不同超声振动保压时间下的球冠形貌及激光共聚焦三维图像如图 8 所示。在凸模行程结束后，继续施加超声振动进行保压，这样可以提高 T2 紫铜薄板的贴模能力。超声振动载荷通过软模传递到 T2 紫铜薄板，使其受力更加均匀，变形均匀性进一步提高。从图 8 可以发现，随着保压时间的增加，微胀形件的贴模性增强，表面形貌和轮廓精度明显提高，交汇点、交汇边等特征结构更加清晰。从激光共聚焦图像也可以看出，当振动保压时间为 20 s 和 40 s 时，交汇点、交汇边结构不明显；在振动保压 80 s 后交汇点、交汇边结构清晰。当凸模行程结束后，继续施加超声振动一方面可以促进交汇边、交汇点等结构突变位置的内应力释放，充分抑制回弹，使球冠形状与尺寸更加稳定，另一方面可以改善模具与板料界面的接触应力与摩擦状态，提高 T2 紫铜薄板变形均匀性和贴模程度，有利于提高微胀形件成形精度。微胀形件的中心球冠和交汇点、交汇边的相对高度如图 9 所示，随着振动保压时间的增加，相对高度明显增加，说明球冠微观结构的成形精度和贴模程度提高，成形质量更好。

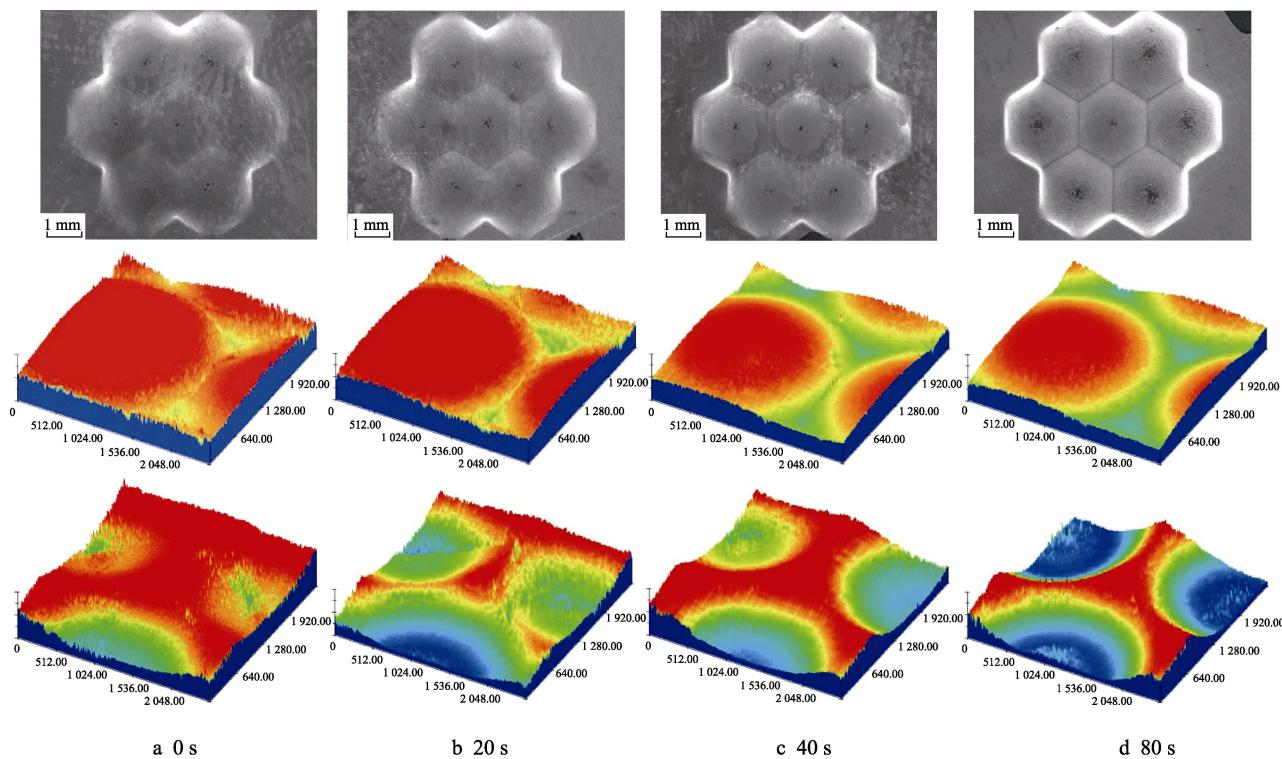


图 8 不同超声振动保压时间下的球冠形貌及激光共聚焦三维图像  
Fig.8 Morphology and laser confocal three-dimensional images of spherical caps under different ultrasonic vibration holding times

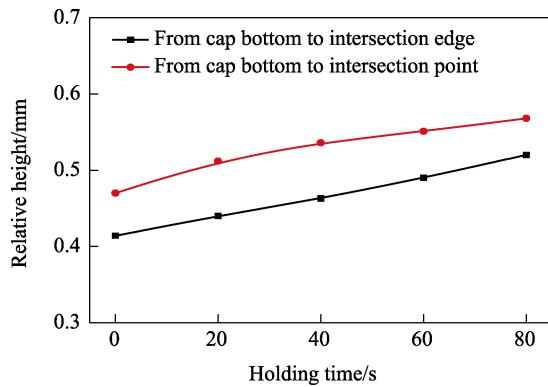


图 9 不同保压时间下的相对高度

Fig.9 Relative height under different holding time

### 2.3 薄板厚度

在刚模微胀形和超声振动辅助软模微胀形工艺下, 当薄板厚度不同时, 微胀形件的形貌如图 10 所示。可以发现, 在超声振动辅助软模微胀形条件下, 当薄板厚度为 20  $\mu\text{m}$  时, 成形极限获得显著提升, 材料流动得到改善, 侧壁破裂分离现象消失, 但是球冠底部、侧壁依然会出现裂纹, 说明应力分布发生改变, 同时形状精度得到提高, 微胀形件表面光滑, 特征结构明显。当薄板厚度为 40  $\mu\text{m}$  时, 整体形貌良好, 侧壁未发生破裂, 但存在明显危险平面, 具有极大的破裂风险。当薄板厚度为 60、80、100  $\mu\text{m}$  时, 超声振

动辅助软模微胀形条件下球冠表面质量较好, 特征结构更加明显, 侧壁微裂纹消失, 成形极限获得较大提高。当板料较薄时, 厚度方向仅有一个晶粒, 在受到外力作用, 尤其是刚性集中应力作用时, 材料的塑性变形方式主要为晶内位错滑移, 位错滑移受到的来自晶界和其他缺陷的阻力作用较小, 位错的积累能够顺利引发裂纹及断裂。当板料较厚时, 厚度方向晶粒较多, 位错运动受多重晶界阻力作用, 在外力作用下位错开动和滑移变得困难, 材料出现应变硬化现象, 即不易发生破裂。超声振动辅助软模微胀形工艺提升成形极限主要得益于软模对材料受力状态的改善以及超声能量对非均匀变形的抑制作用, 尤其是对厚度较薄的板料, 局部集中变形大幅缓解, 有效抑制了薄弱区域过早出现破裂的情况。

刚模微胀形与超声振动辅助软模微胀形板料受力状态对比如图 11 所示。可以看出, 在刚模微胀形过程中, 凸模与板料发生局部刚性接触, 受力集中于球冠底部, 板料在球冠交汇点处受到凹模尖点约束, 应力集中较为严重。在球冠边缘侧壁位置, 刚模成形过程中的板料基本处于悬空状态, 由于导向板压边力的作用, 板料处于二维双向拉应力状态, 极易发生集中塑性变形, 导致过度减薄。而在超声振动辅助软模微胀形过程中, 软模在超声作用下瞬间熔融为半流体, 并始终与板料全面接触, 使板料整体受力均匀,

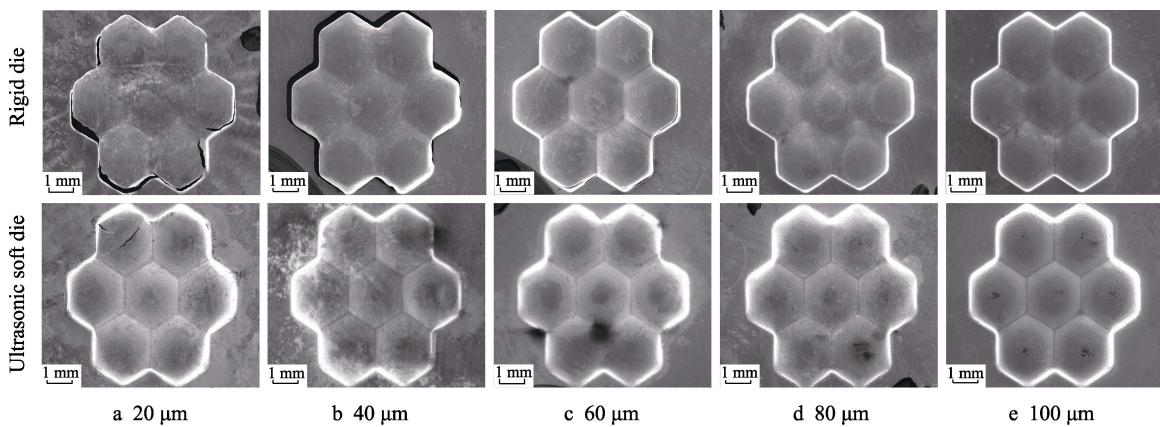


图 10 不同薄板厚度的微胀形件形貌  
Fig.10 Morphology of micro bulging parts with different foil thicknesses

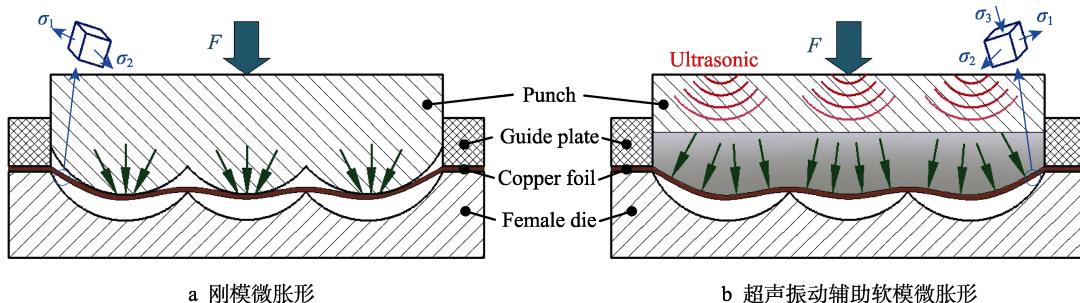


图 11 板料受力状态对比

Fig.11 Loading state comparison of foil: a) rigid die micro bulging; b) ultrasonic vibration assisted soft die micro bulging

尤其是球冠边缘侧壁位置，由刚模微胀形过程中的二维应力状态转变为三维应力状态，有效抑制了局部集中塑性变形，超声能量的输入进一步促进了材料流动，显著提高了球冠胀形极限。

### 3 结论

1) 比较了刚模微胀形、软模微胀形、超声振动辅助微胀形、超声振动辅助软模微胀形 4 种工艺，其中超声振动辅助软模微胀形工艺下球冠成形质量最好。

2) 分别对 100 μm 厚度 T2 紫铜薄板进行刚模微胀形和超声振动辅助软模微胀形实验，结果表明，后者可以提高材料变形均匀性，使壁厚分布均匀，提高成形极限；同时，微结构成形精度提高，成形高度增加，表面质量更优。

3) 在超声振动辅助软模微胀形工艺中，随着保压时间的增加，微胀形件的贴模性明显增强，交汇点和交汇边微结构更加清晰，成形高度增加。

4) 随着薄板厚度的增加，微胀形件交汇点和交汇边特征结构更加清晰，贴模程度和成形精度不断提高。与刚模微胀形相比，超声振动辅助软模微胀形可以明显提高成形精度和成形极限，使特征微结构更加清晰，表面质量得到提升。

### 参考文献：

- [1] 赵栋, 张明宇, 李广震, 等. 板厚对 08Al 薄板单点渐进成形中成形极限的影响[J]. 精密成形工程, 2022, 14(5): 14-19.  
ZHAO Dong, ZHANG Ming-yu, LI Guang-zhen, et al. Effect of Sheet Thickness on Forming Limit of 08Al Sheet in Single Point Incremental Forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(5): 14-19.
- [2] 徐竹田, 孙磊, 姜天豪, 等. 钛板微成形断裂尺度效应及细观损伤准则[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 51-57.  
XU Zhu-tian, SUN Lei, JIANG Tian-hao, et al. Fracture Size Effect of Titanium Sheets in Microforming and Its Meso Damage Criterion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 51-57.
- [3] MAHABUNPHACHAI S, KOÇ M. Fabrication of Micro-Channel Arrays on Thin Metallic Sheet Using Internal Fluid Pressure: Investigations on Size Effects and Development of Design Guidelines[J]. Journal of Power Sources, 2008, 175(1): 363-371.
- [4] MAHABUNPHACHAI S, KOÇ M. Investigation of Size Effects on Material Behavior of Thin Sheet Metals Using Hydraulic Bulge Testing at Micro/Meso-Scales[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(9): 1014-1029.
- [5] 孙立君, 黄珍媛, 张寒. 超薄板胀形破裂极限预测理论研究[J]. 锻压技术, 2013, 38(2): 142-146.
- [6] 吴杰锋, 陈炜, 张玲, 等. 不锈钢超薄板的力学性能及成形极限研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(1): 127-130.  
WU Jie-feng, CHEN Wei, ZHANG Ling, et al. Study on Mechanical Property and Forming Limit of 304 Stainless Steel[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(1): 127-130.
- [7] VOLLENTSEN F, BREEDE R, LANGE K. A Method for Deep Drawing with Multiple Elastomer Membranes[J]. Annals of CIRP, 1999, 48(1): 221-226.
- [8] 刘铮, 郑超, 宋立彬, 等. 多脉冲激光冲击微胀形的成形极限及断裂模式[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 54-61.  
LIU Zheng, ZHENG Chao, SONG Li-bin, et al. Forming Limit and Fracture Mode in Multiple-Pulse Laser Shock Micro-Bulging Process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 54-61.
- [9] WAKAI F, SAKAGUCHI S, KANAYAMA K. Ceramic Materials and Components for Engineering Using[C]// Proceedings of the Second International Symposium VDKG Luebeck-Travemuende, 1986: 315-318.
- [10] 王刚, 王建珑, 张拓达, 等. AZ31B 镁合金板材快速气压胀形行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2023-2026.  
WANG Gang, WANG Jian-long, ZHANG Tuo-da, et al. Quick Gas Blow Forming Behavior of AZ31B Magnesium Alloy Sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2023-2026.
- [11] 张彦杰, 李渤海, 陶会发, 等. 纯钛燃料电池双极板软模成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(4): 109-114.  
ZHANG Yan-jie, LI Bo-bo, TAO Hui-fa, et al. Soft Mold Forming Process of Pure Titanium Bipolar Plate for Fuel Cell[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(4): 109-114.
- [12] 王朋义, 王忠金. 板材磁流变液软模成形中磁场条件对 Al1060 成形极限的影响[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(9): 59-63.  
WANG Peng-yi, WANG Zhong-jin. Effect of Magnetic Field Conditions on Forming Limit of Al1060 in Sheet Magnetorheological Fluid Flexible-Die Forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(9): 59-63.
- [13] CAO Miao-yan, LI Jian-chao, YUAN Ya-ning, et al. Flexible Die Drawing of Magnesium Alloy Sheet by Superimposing Ultrasonic Vibration[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(1): 163-171.
- [14] WU Li-jun, ZHAO Chang-cai, CAO Miao-yan, et al. Effect of Ultrasonic and Low Frequency Vibrations on Friction Coefficient at Die Radius in Deep Drawing Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 71: 56-69.

- [15] LIU Shen, XIE Tao, HAN Jing, et al. Stress Superposition Effect in Ultrasonic Drawing of Titanium Wires: An Experimental Study[J]. Ultrasonics, 2022, 125: 106775-106775.
- [16] ZHAI Ji-qiang, GUAN Yan-jin, LI Yi, et al. The Surface Effect of Ultrasonic Vibration in Double Cup Extrusion test[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117344.
- [17] LIU Chang-tao, XU Xiao-guang, ZHANG Dong, et al. Effect of Ultrasonic Vibration on Forming Force and Forming Quality in Micro-Punching with a Flexible Punch[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 16851-16851.
- [18] TAKEMASU T, YAMASAKI S, MIURA H, et al. Piercing Process by Punch Striking Using Ultrasonic Vibration-Trial Construction of Experimental Apparatus and Forming Property of Microholes[J]. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 2006, 47(548): 885-889.
- [19] SAUTOME Y, OKAMOTO T. An In-Situ Incremental Microforming System for Three Dimensional Shell Structures of Foil Materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1/2/3): 636-640.
- [20] SHAO Guang-da, LI Hong-wei, ZHAN Mei. A Review on Ultrasonic-Assisted Forming: Mechanism, Model, and Process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(5): 163-186.
- [21] 孟德安, 朱成成, 董渊哲, 等. 振动辅助塑性成形工艺及机理的研究进展[J]. 锻压技术, 2022, 47(4): 1-13.
- [22] MENG De-an, ZHU Cheng-cheng, DONG Yuan-zhe, et al. Research Progress on Vibration-Assisted Plastic Forming Process and Mechanism[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(4): 1-13.
- [23] 韩光超, 刘军, 温晓宁, 等. 基于不同振动模式的超声辅助拉深精密成形工艺[J]. 锻压技术, 2021, 46(9): 118-123.
- [24] LUO Feng, LI Kai-hui, ZHONG Jin-ming, et al. An Ultrasonic Microforming Process for Thin Sheet Metals and Its Replication Abilities[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 10-18.
- [25] LUO Feng, WANG Bei, LI Zhuo-wei, et al. Time Factors and Optimal Process Parameters for Ultrasonic Microchannel Formation in Thin Sheet Metals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89: 255-263.

责任编辑: 蒋红晨