

## 2219 时效强化铝合金隧道管成形工艺

祝世强<sup>1,2</sup>, 王永铭<sup>2</sup>, 沈汝洵<sup>2</sup>, 李 杰<sup>2</sup>, 王克环<sup>1</sup>, 马 哲<sup>2</sup>, 杨 迪<sup>2</sup>,  
周长乐<sup>2</sup>, 田建桥<sup>2</sup>, 刘祥龙<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

**摘要:** 以 2219 时效强化铝合金隧道管为研究对象, 制定了先旋压制坯后内高压成形的工艺方案。通过工艺试验研究了热处理状态、减薄率和旋轮进给比等对管坯旋压成形的影响, 优化了旋压工艺参数。利用有限元方法分析了两种内高压成形方案的变形特征, 制定了合理的内高压成形工艺流程。结果表明: 初始状态的管坯塑性较差, 2219 铝合金管坯的极限变形量小, 经退火或淬火处理后, 极限变形量大大提高。最终实现了  $\Phi 112$  mm 薄壁管的旋压成形, 零件的厚度为 1.51~1.58 mm、外径为  $\Phi 115.2\sim\Phi 115.6$  mm。当内高压成形压力为 65 MPa 时, 成形出合格的隧道管, 零件的最大减薄率为 7.74%。2219 时效强化铝合金隧道管的力学性能较传统隧道管大幅提高。

**关键词:** 旋压; 内高压成形; 2219 铝合金; 隧道管; 减薄率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.015

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0111-06

## Forming process on 2219 aging strengthened aluminum alloy tunnel tube

Zhu Shiqiang<sup>1,2</sup>, Wang Yongming<sup>2</sup>, Shen Ruxun<sup>2</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Wang Kehuan<sup>1</sup>, Ma Zhe<sup>2</sup>, Yang Di<sup>2</sup>,  
Zhou Changle<sup>2</sup>, Tian Jianqiao<sup>2</sup>, Liu Xianglong<sup>2</sup>

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

2. Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076, China)

**Abstract:** For aging strengthened 2219 aluminum alloy tunnel tube, a process plan for spinning blank first and then internal high pressure forming was proposed. Then, the influences of heat treatment state, thinning rate and feeding ratio of spinning wheel etc. on the spinning forming of tube blank were studied by process experiments, and the spinning process parameters were optimized. Furthermore, the deformation characteristics of two internal high pressure forming schemes were analyzed by finite element method, and a reasonable internal high pressure forming process flow was developed. The results show that the plasticity of tube blank in the initial state is poor, and the ultimate deformation of 2219 aluminum alloy tube blank is small. After annealing or quenching treatment, its ultimate deformation is greatly increased. Finally, the spinning of  $\Phi 112$  mm thin-walled tube is achieved, and its thickness is 1.51–1.58 mm and the outer diameter is  $\Phi 115.2\sim\Phi 115.6$  mm. When the internal high pressure forming pressure is 65 MPa, a qualified tunnel tube is formed, and the maximum thinning rate of part is 7.74%. Thus, the mechanical properties of aging strengthened 2219 aluminum alloy tunnel tube are significantly improved compared with the traditional tunnel tube.

**Key words:** spinning; internal high pressure forming; 2219 aluminum alloy; tunnel tube; thinning rate

隧道管是运载火箭贮箱中的重要结构件, 呈波纹管状结构, 贯穿于整个贮箱, 起到保护内部输送管输送氧化剂的作用<sup>[1]</sup>。在火箭飞行期间, 隧道管外壁完全浸渗在液态燃烧剂中, 不仅要承受易燃爆、强腐蚀的复杂液体环境, 还要承受来自燃烧剂的较

大压力载荷, 这对产品的力学性能和成形质量均提出了较高的要求。目前, 贮箱隧道管使用的材料为不可热处理强化的 5 系防锈铝合金, 虽然焊接性好, 但其强度较低<sup>[2-4]</sup>。液压气密试验时会出现波高变矮、长度增加的现象, 不仅影响隧道管的承压强度, 还影响了后续的贮箱管路装配, 需要根据每批次变长量进行补偿焊接, 保证整管长度。同时, 隧道管的传统成形工艺为先冲压波纹板后滚弯焊接, 存在成形工序复杂、成形精度低、焊接困难等缺点。因此, 亟需开展新一代铝合金材料整体成形隧道管的

收稿日期: 2023-03-13; 修订日期: 2023-05-10

作者简介: 祝世强 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: hitzsq@126.com

通信作者: 王永铭 (1982-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: wangyongming211@163.com

研制,提升产品的可靠性。

2219 铝合金是第 2 代贮箱材料的代表,属于可热处理强化铝合金,在淬火加时效处理后,其力学性能大幅度提高,具有良好的高低温力学性能、断裂韧性、抗应力腐蚀性能及焊接性能。目前,我国新一代火箭贮箱主体结构,如瓜瓣、顶盖、壁板等均已采用了 2219 铝合金<sup>[5-6]</sup>。因此,本文针对 2219 铝合金隧道管整体成形工艺开展研究。

## 1 试验对象及方案

本次研究采用的隧道管形状及尺寸如图 1 所示。产品壁厚为 1.5 mm,波高为 5.5 mm,波距为 70 mm。隧道管属于典型的变截面薄壁金属管类零件,非常适合内高压成形<sup>[7-8]</sup>,而筒形的件旋压技术非常适合制备高精度薄壁管<sup>[9-10]</sup>。因此,本文首先采用旋压工艺成形出薄壁管坯,然后再采用内高压成形技术实现波纹区的成形,从而实现 2219 铝合金隧道管的整体成形。薄壁管旋压采用正旋工艺,首先采用内径为  $\Phi 60$  mm 的小直径薄壁管件进行模拟试验,研究旋压成形过程中的质量问题,优化工艺参数。再以此为基础,进行内径为  $\Phi 112$  mm 的大直径薄壁管件的旋压试验,为内高压成形提供合格管坯。

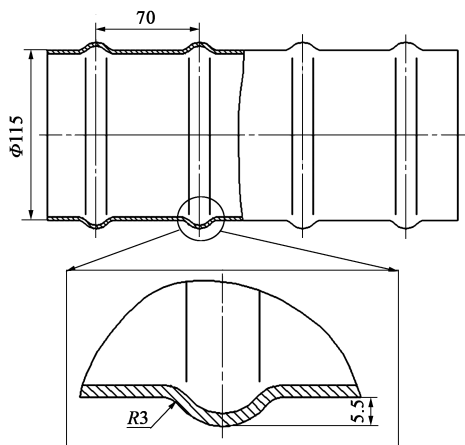


图 1 试验件尺寸

Fig. 1 Dimensions of experimental part

## 2 2219 铝合金薄壁管旋压工艺试验

### 2.1 管坯的制备

内径为  $\Phi 60$  和  $\Phi 112$  mm 的薄壁管件旋压管坯均采用 2219 铝合金棒材经机加工制成,原材料状态

为 O 态。两种旋压管坯如图 2 和图 3 所示。

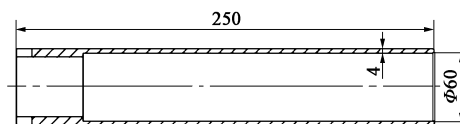


图 2 内径为  $\Phi 60$  mm 的管坯

Fig. 2 Tube blank with inner diameter of  $\Phi 60$  mm

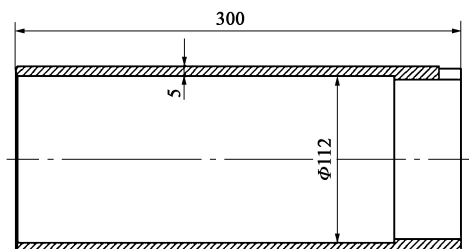


图 3 内径为  $\Phi 112$  mm 的管坯

Fig. 3 Tube blank with inner diameter of  $\Phi 112$  mm

### 2.2 $\Phi 60$ mm 薄壁管旋压成形试验

旋压试验在一台四旋轮设备上,由于管材直径小、模具刚性差,采用了对向两轮旋压,旋压过程使用乳化液润滑。针对 3 种不同热处理状态的管坯开展了旋压试验研究。

#### (1) 管坯机加工后直接旋压

首先开展了管坯机加工后直接旋压成形的试验,其结果如表 1 所示。1#零件的道次减薄率设为 25%,第 1 道次成形过程中零件破裂,如图 4a 所示。2#零件的第 1 道次减薄率设为 20%,成形无问题;第 2 道次减薄率为 20%,成形过程中零件破裂,如图 4b 所示。3#零件的第 1 道次减薄率降低为 15%,成形无问题;第 2 道次减薄率降低为 15%,零件仍然破裂,如图 4c 所示。从试验结果可以看出,未进行退火的管坯,其产品塑性较差,极限变形量小,难以实现连续稳定变形。

表 1 管坯机加工后直接旋压成形结果

Table 1 Direct spinning forming results of tube blank after machining

零件	第 1 道次减薄率/%	第 2 道次减薄率/%	成形结果
1#	25	—	破裂
2#	20	20	破裂
3#	15	15	破裂

#### (2) 管坯机加工后退火再旋压

为提高塑性,管坯机加工后先进行退火处理,再开展旋压工艺试验。退火后 4#零件的第 1 道次减薄率设为 30%,仍然开裂。后续试验采用增加旋压

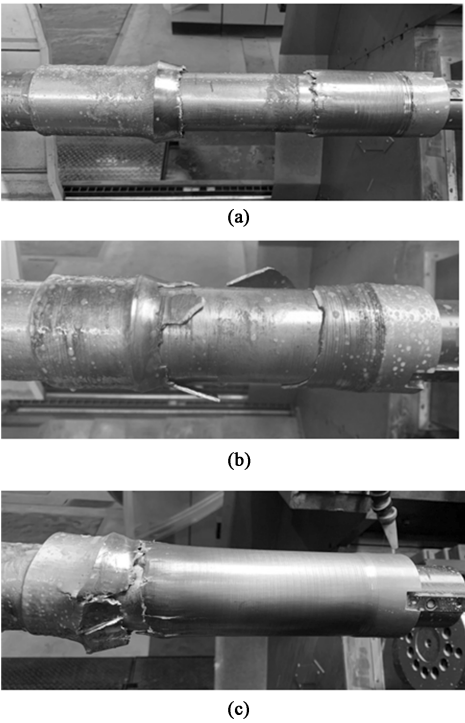


图 4 旋压破裂零件  
(a) 1#零件 (b) 2#零件 (c) 3#零件  
Fig. 4 Cracked parts by spinning  
(a) 1# part (b) 2# part (c) 3# part

道次、减少道次变形量的方式进一步试验。最终旋压制备出厚度为 2.02 ~ 2.08 mm、外径为  $\Phi 64.2 \sim \Phi 64.5$  mm 的薄壁管，如图 5 所示。



图 5 退火后旋压成形的内径为  $\Phi 60$  mm 的薄壁管  
Fig. 5 Thin wall tubes with inner diameter of  $\Phi 60$  mm formed by spinning after annealing

(3) 管坯机加工后淬火再旋压

管坯机加工后先淬火处理后旋压成形，使用了与退火处理后 4#零件相同的工艺参数，也实现了厚

度为 2 mm 的管坯的旋压成形，但外径偏大，外径尺寸为  $\Phi 64.7 \sim \Phi 65.5$  mm。这是因为 2219 铝合金淬火后强度增大，导致成形后零件回弹大。筒形件旋压时，旋轮进给比对工件直径的胀缩影响显著，旋轮进给比增大有助于缩径<sup>[11-12]</sup>。因此，通过调整旋轮进给比等工艺参数，可有效控制回弹变形，将零件外径控制在  $\Phi 64.5$  mm 以内，淬火后旋压成形出的薄壁管如图 6 所示。



图 6 淬火后旋压成形的内径为  $\Phi 60$  mm 的薄壁管  
Fig. 6 Thin wall tubes with inner diameter of  $\Phi 60$  mm formed by spinning after quenching

2.3  $\Phi 112$  mm 薄壁管旋压成形试验

$\Phi 112$  mm 薄壁管的旋压成形试验采用错距旋压，前旋轮 1 和 3 在轴向上处于同一位置，后旋轮 2 和 4 在轴向上处于同一位置，两者之间设置一定的轴向错距，如图 7 所示。

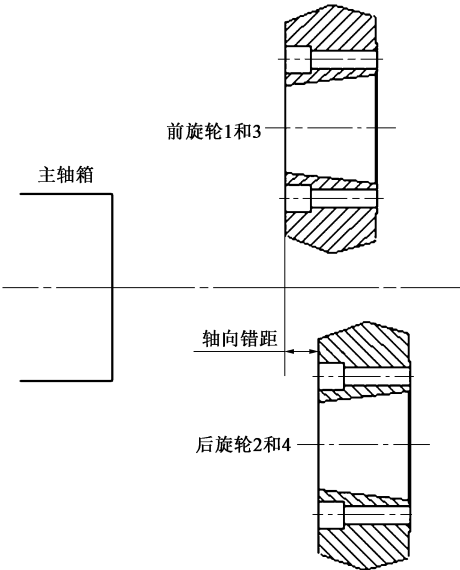


图 7 旋轮位置示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of spinning roller positions

根据  $\Phi 60$  mm 薄壁管的旋压试验结果, 确定  $\Phi 112$  mm 管坯先进行退火处理再旋压成形。最终旋压成形出内高压成形所需壁厚的 2219 铝合金薄壁管坯, 如图 8 所示, 厚度为 1.51~1.58 mm、外径为  $\Phi 115.2 \sim \Phi 115.6$  mm。



图 8 退火后旋压成形的内径为  $\Phi 112$  mm 的薄壁管

Fig. 8 Thin wall tube with inner diameter of  $\Phi 112$  mm formed by spinning after annealing

### 3 内高压成形工艺

#### 3.1 有限元仿真

隧道管内高压成形有两种方案: 多波一次整体成形与单波逐步成形, 分别如图 9 和图 10 所示。首先通过有限元仿真分析, 研究两种方案的成形特点, 从而确定最终方案。

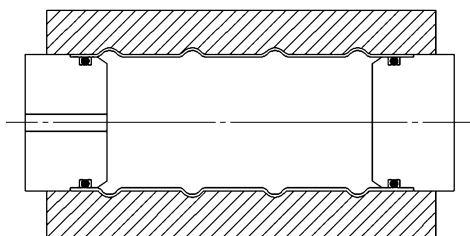


图 9 多波一次整体成形

Fig. 9 Multi-wave one-time integral forming

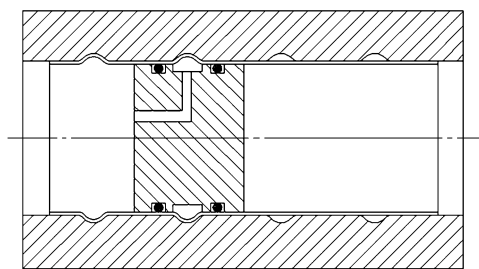


图 10 单波逐步成形

Fig. 10 Single wave forming of step by step

使用 DYNAFORM 有限元模拟软件, 管坯初始壁厚设为 1.5 mm, 最大成形压力为 60 MPa。多波一次整体成形的壁厚减薄情况如图 11 所示, 左右最外侧的两个波由于可以实现轴向补料, 壁厚减薄小, 最大壁厚减薄率为 9.1%。而中间两个波由于不能实现轴向补料, 在内高压成形时壁厚减薄大, 而且在波纹区与直线区相交的圆角附近出现了局部减薄,

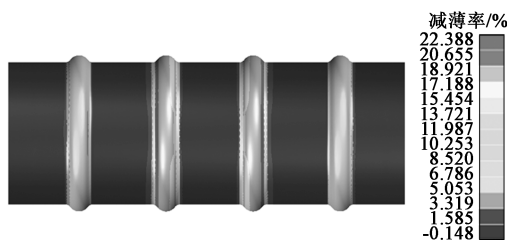


图 11 多波一次整体成形的壁厚减薄情况

Fig. 11 Wall thickness reduction of multi-wave one-time forming

最大减薄率达到 22.388%, 实际成形时此处极易破裂。

单波逐步成形的壁厚减薄情况如图 12 所示, 每个波成形时均可实现自动补料, 壁厚减薄小, 4 个波纹区的变形比较均匀, 最大壁厚减薄率为 8.966%。由此可见单波逐步成形有利于控制壁厚, 因此, 采用该方案成形隧道管。

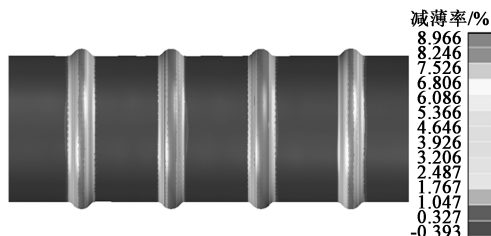


图 12 单波逐步成形的壁厚减薄情况

Fig. 12 Wall thickness reduction of single wave forming of step by step

#### 3.2 内高压成形试验

隧道管内高压成形试验在专用内高压成形设备上。通过触摸屏和工业控制计算机上的人机界面设置或修改工艺参数, 实时监测过程数据, 整个成形过程可实现全自动操作。

根据 2219 铝合金需要淬火和时效强化的特点, 考虑到旋压后管坯已发生加工硬化, 为了保证内高压成形时管坯有足够的塑性, 在内高压成形前对管坯进行淬火处理, 在内高压成形后对隧道管进行人工时效处理。内高压成形时管坯表面涂抹液压油润滑。当内高压成形压力为 65 MPa 时, 成形出符合要求的隧道管, 如图 13 所示。

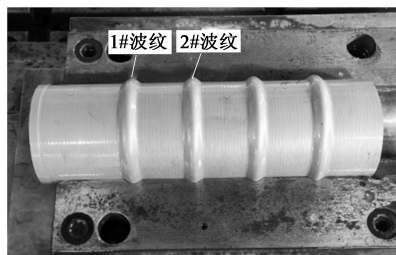


图 13 2219 铝合金隧道管

Fig. 13 2219 aluminum alloy tunnel tube



将隧道管剖切，对左侧 1#波纹及 2#波纹（图 13）进行了壁厚测量，测量位置如图 14 所示，测量结果如图 15 所示。

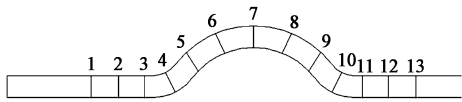


图 14 壁厚测量位置图  
Fig. 14 Location diagram of wall thickness measurement

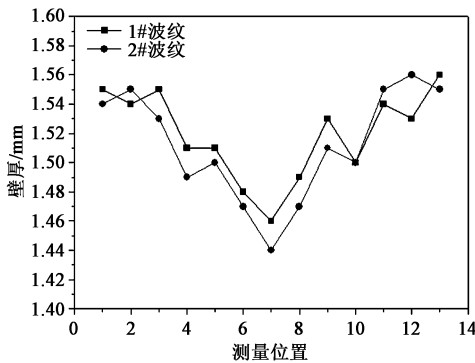


图 15 壁厚测量结果  
Fig. 15 Measurement results of wall thickness

从图 15 可以看出，零件减薄最大处位于波峰处，1#波纹的最小壁厚（1.46 mm）略大于 2#波纹的最小壁厚（1.43 mm），且 2#波纹的左侧壁厚小于右侧壁厚，这与 2#波纹仅能在右侧一侧补料有关。零件的最大减薄率为 7.74%，与有限元仿真结果接近。

管坯在旋压后、淬火后、内高压成形及人工时效后的直径测量结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，淬火前直径最大偏差为 0.4 mm，淬火后产品的直径精度变差，直径最大偏差达到 1.3 mm。但经过内高压成形后产品直径精度大大提高，这是因为：在高压液体作用下，管材完全贴模，起到了校形作用。由于时效温度较低，时效后几乎不发生变形，保留了较高的精度。

表 2 管坯在不同热处理状态下的直径（mm）  
Table 2 Tube diameters with different heat treatment conditions（mm）

零件	旋压后	淬火后	内高压成形及人工时效后
1#	$\Phi 115.2 \sim \Phi 115.5$	$\Phi 115.0 \sim \Phi 115.9$	$\Phi 115.3 \sim \Phi 115.6$
2#	$\Phi 115.3 \sim \Phi 115.6$	$\Phi 115.1 \sim \Phi 116.1$	$\Phi 115.4 \sim \Phi 115.6$
3#	$\Phi 115.2 \sim \Phi 115.6$	$\Phi 114.9 \sim \Phi 116.2$	$\Phi 115.4 \sim \Phi 115.6$

3.3 产品力学性能

分别对旋压后、淬火后、内高压成形及人工时

效后的产品的力学性能进行测试，结果如图 16 所示。从图 16 中可以看出：旋压后由于加工硬化，产品的断裂应变较小；淬火处理后产品的抗拉强度和断裂应变明显提高，更有利于成形；内高压成形及人工时效后产品的抗拉强度进一步提高，达到了 435 MPa，断裂应变减小。2219 铝合金时效后的抗拉强度远高于 GB/T 3880.2—2012<sup>[13]</sup> 中规定的 5A03-O 铝合金的抗拉强度（195 MPa），提高了近 100%；与 5A06-O 铝合金相比，抗拉强度也提高了近 30%，有利于提高产品的承压能力和促进产品进一步减重。

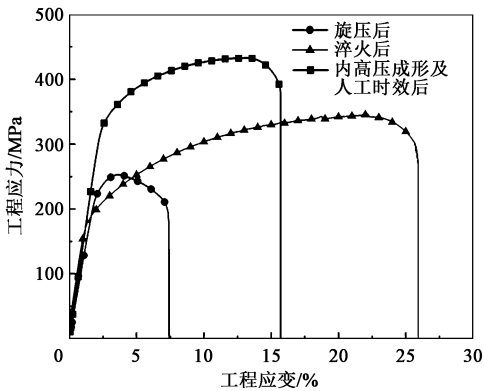


图 16 产品力学性能  
Fig. 16 Mechanical properties of products

4 结论

（1）通过挤压棒材加工的 2219 铝合金管坯，其塑性较差，极限变形量小。经过退火或淬火处理，可以大大提高 2219 铝合金的极限变形量。但淬火后回弹较大，可通过调整旋轮进给比等工艺参数提高直径精度。

（2）多波一次整体成形时，中间两个波不能实现轴向补料，壁厚减薄大，而且在波纹区与直线区相交的圆角附近出现了局部减薄现象，最大减薄率达到 22.388%。单波逐步成形时，每个波均可实现自动补料，壁厚减薄小，4 个波纹区的变形比较均匀，最大壁厚减薄率仅为 8.966%。

（3）制定了 2219 铝合金隧道管淬火、内高压成形、人工时效的工艺流程。淬火会使产品的直径精度变差，但经过内高压成形后产品直径精度大大提高。当成形压力为 65 MPa 时，成形出了合格的隧道管。零件的最大减薄率为 7.74%，与有限元仿真结果接近。产品的力学性能较传统隧道管大幅提高。

## 参考文献:

- [1] 王国辉, 曾杜娟, 刘观日, 等. 中国下一代运载火箭结构技术发展方向与关键技术分析 [J]. 宇航总体技术, 2021, 5 (5): 1-11.  
Wang G H, Zeng D J, Liu G R, et al. Development direction and key technology analysis for China's next generation launch vehicles structure [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5 (5): 1-11.
- [2] 冯苏乐, 赵毕艳, 罗益民, 等. 液力成形在运载火箭增压输送系统中的应用 [J]. 航天制造技术, 2014, (5): 38-42.  
Feng S L, Zhao B Y, Luo Y M, et al. Hydroforming technology application in pressure delivery system of carrier rocket [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014, (5): 38-42.
- [3] 李念奎, 凌泉, 聂波, 等. 铝合金材料及其热处理技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.  
Li N K, Ling G, Nie B, et al. Aluminum Alloy Materials and Its Heat Treatment Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [4] 蒋靖宇, 赖松柏, 路丽英, 等. 5XXX 系铝镁合金的研究进展 [J]. 载人航天, 2019, 25 (3): 411-418.  
Jiang J Y, Lai S B, Lu L Y, et al. Research progress of 5XXX series Al-Mg alloy [J]. Manned Spaceflight, 2019, 25 (3): 411-418.
- [5] 刘观日, 吴迪, 姚重阳, 等. 航天运载器结构先进材料及工艺技术应用与发展展望 [J]. 宇航材料工艺, 2021, 51 (4): 1-9.  
Liu G R, Wu D, Yao C Y, et al. Application and development of advanced materials and processing technology in aerospace vehicle structure [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51 (4): 1-9.
- [6] 刘利明, 李泽琛, 李倩云, 等. 浅谈贮箱材料的选择 [J]. 中国新技术新产品, 2020, (4): 80-81.  
Liu L M, Li Z C, Li Q Y, et al. Selection of tank materials [J]. New Technology & New Products of China, 2020, (4): 80-81.
- [7] 苑世剑. 现代液压成形技术 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2016.  
Yuan S J. Modern Hydroforming Technology [M]. 2nd Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [8] 苑世剑, 何祝斌, 刘钢, 等. 内高压成形理论与技术的新进展 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (10): 2523-2533.  
Yuan S J, He Z B, Liu G, et al. New developments in theory and processes of internal high pressure forming [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21 (10): 2523-2533.
- [9] 王成和, 刘克璋, 周路. 旋压技术 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 2017.  
Wang C H, Liu K Z, Zhou L. Spinning Technology [M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Publishing House, 2017.
- [10] 郭亚明, 徐恒秋, 薛秀琴, 等. 2A12 铝合金薄壁壳体强力旋压成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 143-150.  
Guo Y M, Xu H Q, Xue X Q, et al. Power spinning process of thin-walled shell parts for 2A12 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 143-150.
- [11] 仲听岳, 杜尚军, 李志远, 等. 旋压成形过程缺陷控制方法及应用 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (6): 169-174.  
Zhong X Y, Du S J, Li Z Y, et al. Defect control method and application of spinning forming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (6): 169-174.
- [12] 滕焕波, 冯再新, 张治民. 旋压产品中常见缺陷及对策 [J]. 锻压装备与制造技术, 2007, 42 (1): 67-70.  
Teng H B, Feng Z X, Zhang Z M. The familiar defect of spinning product and counterplans [J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2007, 42 (1): 67-70.
- [13] GB/T 3880.2—2012, 一般工业用铝及铝合金板、带材 第 2 部分: 力学性能 [S].  
GB/T 3880.2—2012, Wrought aluminium and aluminium alloy plates, sheets and strips for general engineering—Part 2: Mechanical properties [S].

## 关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程(锻压)分会成立于1963年,是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体,是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定:凡承认本会章程并符合条件者,可申请为本会会员。

**会员的权利与义务:** 1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌,铜牌由秘书处统一制作并颁发,可申请定制; 2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠; 3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动; 4. 优先获得本会的有关学术资料,免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志; 5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo链接; 6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权; 7. 接受本会委托,进行论证、评议、咨询等工作; 8. 享有入会、退会的自由。

**申请手续:** 提交入会申请表。申请个人会员,需填写《个人会员入会申请表》,同时提交“本人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员,需填写《团体会员入会申请表》,同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处,并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱;也可登陆学会网站,进行在线注册。经审批通过后,将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记,由学会秘书处颁发会员证书。

地 址: 北京市海淀区学清路18号707室塑性工程分会

联系人: 李佳盈、秦思晓、周 林、金 红

电 话: 010-62912592 传 真: 010-62912592 邮 箱: duanya@cmes.org 网 址: <http://www.cstp-cmes.org.cn>

中国机械工程学会塑性工程分会