

7055 高强铝合金筒形件多道次旋压成形精度与缺陷控制

孙于晴, 贺永海, 曹学文, 杨延涛, 白小雷, 刘光祖

(西安航天动力机械有限公司, 陕西 西安 710025)

摘要: 7055 铝合金兼具钢的高强度与钛合金的低密度, 同时具有良好的耐腐蚀性, 且成本远低于钛合金, 可推广并应用至固体火箭发动机的制造领域。通过分析毛坯性能、材料可旋性和温度对 7055 高强铝合金材料的力学性能的影响, 制定了合理的工艺试验方案, 以研究该材料旋压成形精度以及缺陷控制方法。通过开展 7055 高强铝合金多道次旋压试验, 得到了旋压温度对成形缺陷的影响规律, 以及旋轮成形角、进给比对工件成形精度的影响规律。最终确定了成形精度最佳的温度区间为 90~110 °C, 旋轮圆角半径为 6 mm, 进给比为 0.40~0.45, 实现了 7055 高强铝合金筒形件壁厚由 8.0 mm 至 1.6 mm 的多道次、大减薄量的旋压成形, 为该材料应用于固体火箭发动机壳体的旋压成形奠定基础。

关键词: 7055 高强铝合金; 筒形件; 强力旋压; 成形精度; 缺陷控制

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.027

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0177-06

Accuracy and defect control on multi-pass spinning for 7055 high-strength aluminum alloy cylindrical parts

Sun Yuqing, He Yonghai, Cao Xuewen, Yang Yantao, Bai Xiaolei, Liu Guangzu

(Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: 7055 aluminum alloy combines the high strength of steel with the low density of titanium alloy and also has good corrosion resistance, and the cost is much lower than that of titanium alloy, so it can be widely applied in the manufacturing field of solid rocket engines. Therefore, by analyzing the influences of blank properties, material spinability and temperature on the mechanical properties of 7055 high-strength aluminum alloy, a reasonable process test plan was formulated to study the spinning forming accuracy and defect control methods of the material. Then, by carrying out multi-pass spinning tests on 7055 high-strength aluminum alloy, the influences of spinning temperature on forming defects and the influences of spinning wheel forming angle and feeding ratio on forming accuracy of workpiece were obtained, and the process parameters were determined when the spinning accuracy was optimal with the temperature range of 90~110 °C, the fillet radius of rotary wheel of 6 mm and the feeding ratio of 0.40~0.45. Furthermore, the multi-pass and large-thinning spinning of 7055 high-strength aluminum alloy cylindrical parts with the wall thickness from 8.0 mm to 1.6 mm was achieved, laying the foundation for the material to be used in spinning of solid rocket engine casings.

Key words: 7055 high-strength aluminum alloy; cylindrical part; power spinning; forming accuracy; defect control

航空航天飞行器的设计与材料性能息息相关, 可以说航空航天材料的发展水平决定了飞行器设计的先进性。在飞行器结构设计中, 最重要的是在保证强度的前提下减轻重量, 7055 高强铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系热处理强化铝合金, 在 7050 铝合金的基础上增加 Zn 含量、降低 Mn 和 Mg 含量, 可使其强度和断裂韧性更高。该系铝合金兼具钢的高强度与钛合金的低密度, 同时具有良好的耐腐蚀性, 且成本远低于钛合金, 目前已被广泛应用于航空飞行器承力结构件上, 但尚未应用于航天固体火箭发

动机薄壁壳体制造^[1-2]。

固体火箭发动机壳体常采用强力旋压技术成形, 该成形过程是一个多场、多因素耦合下的三维连续局部塑性复杂变形过程。这就导致旋压工件精度控制复杂、工艺设计不当, 易产生缺陷。目前, 关于 7055 高强铝合金的研究多集中于合金铸锭的制备以及热处理研究, 以达到改善材料组织性能的目的, 但关于该材料的旋压性能研究及实际的旋压试验研究却鲜有报道。

1 7055 高强铝合金热旋工艺设计原则

由于 7055 高强铝合金材料的合金化程度高, 常温下塑性较差、变形抗力较大, 旋压过程中既要保

收稿日期: 2023-02-15; 修订日期: 2023-05-16

作者简介: 孙于晴 (1994-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 736657131@qq.com

证材料良好的旋压性能,防止开裂,同时要控制加热温度不能过高,防止在旋压加工时出现鼓包变形缺陷^[3]。因此,在 7055 高强铝合金筒形件旋压过程中,合理的旋压温度以及工艺参数对该材料的精确成形至关重要,故在开展工艺试验前应对该材料的旋压性能进行分析。

1.1 毛坯性能分析

7055 铝合金铸锭的毛坯制备方式通常分为熔铸成形和喷射成形,熔铸成形的 7055 高强铝合金的强度约为 550 MPa,伸长率约为 25%,而通过喷射成形的 7055 高强铝合金的强度提高至 650 MPa,但伸长率降低至 15% 左右。由于喷射成形凝固单元细小,合金时效强化速率更快,应力效应明显^[4],在后续加工中更易出现开裂、变形等缺陷,而旋压成形过程中旋轮与坯料接触区的压力极大,会放大毛坯材料缺陷,为避免此类问题,选用熔铸成形的 7055 高强铝合金筒形毛坯。

1.2 材料的可旋性分析

影响材料可旋性的因素分为外部因素和内部因素,其中内部因素与材料断面收缩率相关,外部因素即旋压工艺的设计可使得该材料达到最佳旋压效果,主要涉及进给比 f 、旋轮圆角半径、旋压温度等工艺参数的选取。

旋轮圆角半径过大或者过小时,均会影响变形区材料的平稳流动,从而影响成形精度。由于 7055 属于超硬铝合金,受热时体积容易发生膨胀,精度不易保证,因此,需要对旋轮圆角半径的选取进行分析,通常圆角半径在 3~12 mm 范围内选取。

进给比 f 对旋压成形精度有明显影响,一般来讲,进给比越大,材料沿轴向的流动速度越快,有助于缩径和保证工件的贴模度,但对直径偏差和壁厚偏差影响比较明显,过大的进给比会造成工件表面出现螺旋线纹路,影响工件表面质量。根据加工经验,进给比在 0.3~1.5 范围内选择。

1.3 旋压温度范围的确定

加热旋压时,温度不能超过其再结晶温度,加热温度要保证材料不能过烧、过热和晶粒过大^[5]。7055 高强铝合金会在 450 °C 以上会发生再结晶现象^[6],故旋压温度应控制在 450 °C 以下。同时,由于铝合金熔点在 475~635 °C 之间,如果温度过高,材料软化现象明显,旋压件容易出现局部失稳,引起鼓包现象^[7-9]。7055 高强铝合金的最佳时效温度为 120 °C,在最佳时效温度存在时效强化现象,材料的抗拉强度在该温度下达到峰值,这是旋压成形

时应避开的温度^[10-11]。试验时,旋压温度在 80~360 °C 范围内选取。

1.4 旋压道次减薄率的确定

筒形件强力旋压时在总减薄率确定的情况下,合理设计旋压道次数及每道次的减薄率对成形质量非常重要,参考 7075 高强铝合金筒形件的极限减薄率为 75%,由于 7055 高强铝合金比 7075 铝合金具有更高的塑性以及断裂韧性^[12],本次试验将毛坯由 8 mm 旋压至 1.6 mm,总减薄率为 80%,毛坯结构见图 1,其中, D 为毛坯内径, L 为毛坯长度, δ 为毛坯壁厚。为了研究该材料的可旋性,同时考虑第 1 道次加热升温过程中材料稳定性较差的因素,控制第 1 道次减薄率来防止材料表面出现裂纹,道次减薄量设计为 8.0 mm \rightarrow 6.5 mm \rightarrow 3.7 mm \rightarrow 1.6 mm。

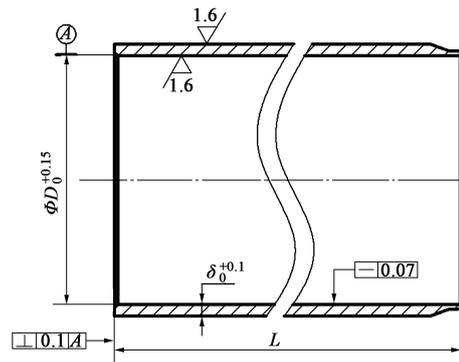


图 1 旋压毛坯结构图

Fig. 1 Structure diagram of spinning blank

2 试验条件及方案

2.1 试验材料

本次试验采用直径为 $\Phi 200$ mm 的 7055 高强铝合金铸锭,其化学成分如表 1 所示,毛坯结构见图 1,壁厚为 8 mm,毛坯实物图如图 2 所示。

表 1 7055 高强铝合金的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 7055 high-strength aluminum alloy(%, mass fraction)

Cu	Mg	Zn	Zr	Al
2.2	1.8	7.8	0.13	余量

2.2 试验条件

试验在三旋轮卧式旋压机上进行,使用加热炉对旋压芯模进行预加热至 100 °C,根据试验方案对工件进行预热。由于 7055 高强铝合金的导热性好,加工过程中散热快,因此,在加工过程中使用红外测温仪进行实时监测,持续使用乙炔火焰枪补

热以保证工件温度维持在稳定范围，图 3 为加工过程补热图。



图 2 旋压毛坯实物图

Fig. 2 Physical image of spinning blank



图 3 热旋成形过程持续补热图

Fig. 3 Continuous heating diagram during hot spinning process

2.3 试验方案

试验分为两个阶段：第 1 阶段实现毛坯壁厚由 8.0 mm 到 6.5 mm 的减薄，减薄率为 18%，主要研究不同旋压温度对工件成形精度的影响规律，试验方案如表 2 所示；基于第 1 阶段的研究结果得出最佳旋压温度区间 $t_1 \sim t_2$ 后，第 2 阶段开展第 2 道次与第 3 道次的旋压成形，研究工艺参数对工件成形精

度的影响规律，试验方案见表 3。

3 结果与讨论

通过对 7055 高强铝合金筒形件进行强力旋压试验，分别得到了旋压温度和其他旋压工艺参数对筒形件旋压成形精度的影响规律，并根据试验结果进行了第 2 道次和第 3 道次验证试验，验证旋压温度及其他工艺参数匹配的合理性。

3.1 旋压温度对 7055 高强铝合金成形精度的影响规律

7055 高强铝合金材料的旋压性能受温度影响显著，保证其余工艺参数一致，图 4~图 7 分别为不同旋压温度下（室温、90~110 ℃、180~200 ℃、400~450 ℃）的旋压件照片。可以看出，室温下 7055 高强铝合金旋压时旋轮接触到毛坯表面时表面便产生裂纹，裂纹完全贯穿毛坯厚度方向，这是因为 7055 高强铝合金属于超硬铝合金，室温下塑性差且硬度高，不具备可旋性。当温度升高至 90~110 ℃时，材料塑性性能提升，进入稳定旋压阶段，当旋压温度升高至 180~200 ℃时，旋压件出现扩径现象。在 400~450 ℃时材料软化明显，旋压成形无法控制工件的形位精度，故该温度更适用于热挤压等具有型腔的模具的塑性成形，不适用于旋压成形。从图 5 看出，温度在 90~110 ℃范围内时，工件表面出现明显的鼓包、涨径等缺陷。温度在 130~160 ℃范围内时，工件表面与图 5 所示产品表面的情况无肉眼可见变化，为了进行精度分析，对工件进行实际检测，具体壁厚偏差及直径偏差对比如图 5 所示。

表 2 不同旋压温度下的试验方案 (℃)

Table 2 Test schemes of different spinning temperatures (℃)

试验编号	1	2	3	4	5	6	7
旋压温度	室温 (对照)	90~110	130~140	140~160	160~180	180~200	400~450 (对照)

表 3 不同工艺参数下的试验方案

Table 3 Test schemes of different process parameters

试验编号	8	9	10	11	13	14	15	16
进给比	0.35	0.40	0.45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
旋轮圆角半径/mm	8	8	8	8	4	6	8	10

通过对比分析不同旋压温度下旋压件的成形精度可知，在 90~160 ℃范围内，随着旋压温度的上

升，壁厚偏差和直径偏差均呈上升趋势，如图 8 所示。这是因为 7055 高强铝合金的最佳时效温度为 120 ℃，材料的变形抗力随温度升高而增大，在时效温度时达到峰值，而后随着温度升高变形抗力下降。测量的旋压温度 90~110 ℃为旋压件表面温度，而变形区的实际温度等于加热温度和变形热，当超过最佳时效温度时，变形抗力不断减小，材料处于塑性性能与力学性能均衡阶段。但随着温度继续升

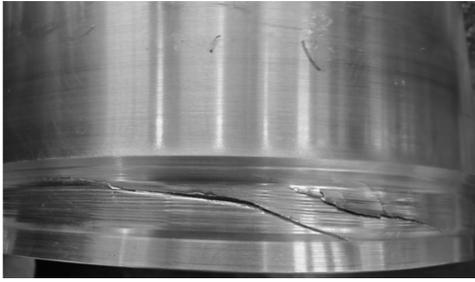


图 4 室温旋压件

Fig. 4 Spun part at room temperature



图 5 90~110 °C 温度下的旋压件

Fig. 5 Spun part at temperature of 90~110 °C

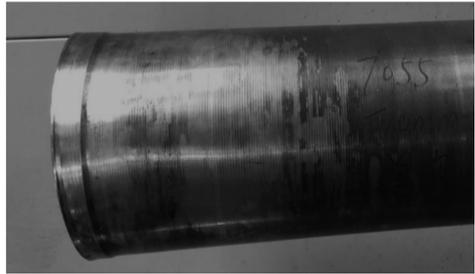


图 6 180~200 °C 温度下的旋压件

Fig. 6 Spun part at temperature of 180~200 °C



图 7 400~450 °C 温度下的旋压件

Fig. 7 Spun part at temperature of 400~450 °C

高, 7055 高强铝合金的热膨胀效应明显, 旋压件出现明显的鼓包现象, 如图 6 所示, 对壁厚精度和直径精度控制不利。因此, 7055 高强铝合金最佳的旋压温度区间 $t_1 \sim t_2$ 为 90~110 °C。

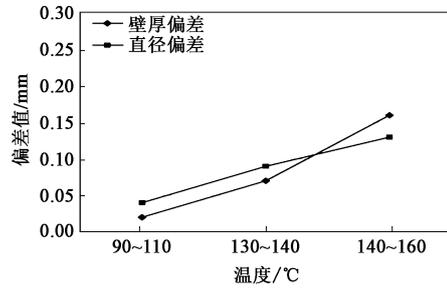


图 8 90~160 °C 温度下旋压件的成形精度对比

Fig. 8 Comparison of forming accuracy for spun parts at temperature of 90~160 °C

3.2 旋压工艺参数对 7055 高强铝合金成形精度的影响规律

保持旋压温度 90~110 °C 不变, 采用单因素试验法研究旋轮圆角半径和旋轮进给比对成形精度的影响规律。图 9、图 10 分别为旋压件壁厚偏差、直径偏差随旋轮圆角半径和旋轮进给比的变化趋势。

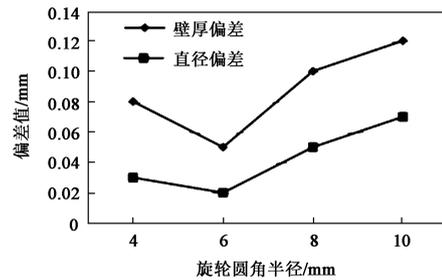


图 9 旋轮圆角半径对成形精度的影响规律

Fig. 9 Influence laws of fillet radius of spinning roller on forming accuracy

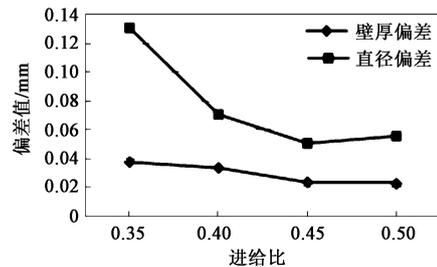


图 10 进给比对成形精度的影响规律

Fig. 10 Influence laws of feeding ratio on forming accuracy

根据图 9 可以看出, 随着旋轮圆角半径的增大, 壁厚偏差和直径偏差均呈先减小后增大的趋势, 当圆角半径为 6 mm 时, 偏差值最小, 即成形精度最佳。这是因为在其他工艺参数不变的情况下, 随着圆角半径的增大, 旋轮与毛坯的接触面积也在增大, 单位时间内旋轮与毛坯接触区的材料流动量增加, 容易在旋轮前发生材料隆起、堆积现象, 从而导致壁厚偏差和直径偏差变大。而过小的旋轮圆角半径

会使材料径向流动不足, 也会在一定程度上造成旋压件壁厚偏差和直径偏差偏大。

从图 10 可以看出, 直径偏差随着进给比的增大, 呈下降趋势, 在进给比为 0.45~0.50 时直径偏差变化不明显。壁厚偏差随进给比增大呈下降趋势, 但变化幅度较小, 随着进给比增大, 材料的轴向流动速度更快, 有助于控制直径精度。综上分析可知, 7055 高强铝合金旋压的最佳进给比为 0.45, 最佳旋轮圆角半径为 6 mm。

3.3 多道次试验验证

为了验证以上试验结果的有效性, 选取旋压温度区间为 90~110 °C、进给比为 0.45、旋轮圆角半径为 6 mm, 开展了 7055 高强铝合金第 2、3 道次旋压试验, 试验方案如表 4 所示。每道次减薄量过大时, 会造成工件畸变, 出现表面波纹堆积等问题; 每道次减薄率过小则会造成厚度方向材料变形速率不均、内表面出现裂纹等缺陷。得到的旋压件实物图如图 11 所示, 沿试验件轴向等距取 8 个测量点, 测量这 8 个横截面的直径以及壁厚, 壁厚偏差和直径偏差沿轴线波动见图 12, 可以得出, 使用该参数材料的成形精度良好, 壁厚偏差沿轴线方向波动不大, 但在工件的起旋端和尾部直径偏差较大, 稳定旋压阶段壁厚偏差较为稳定。

表 4 多道次试验方案

Table 4 Multi-pass test schemes

道次	1	2	3
减薄率/%	35	35	30



图 11 3 道次旋压件

Fig. 11 Three-pass spun part

4 结论

(1) 7055 高强铝合金的最佳旋压温度区间为 90~110 °C, 超过该温度后旋压时材料的热膨胀现象明显, 旋压时易出现鼓包等缺陷, 旋压精度不易保证, 当温度低于 100 °C 时, 旋压时易出现裂纹, 无

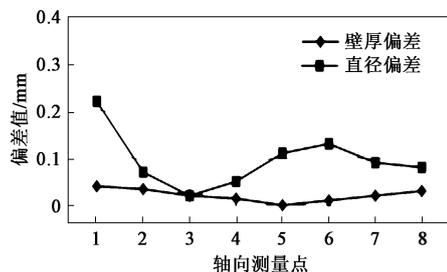


图 12 壁厚偏差和直径偏差沿轴线波动

Fig. 12 Fluctuation along axis for wall thickness deviation and diameter deviation

法实现后续道次旋压。

(2) 旋压工件的壁厚精度和直径精度随旋轮圆角半径的增大先增加后减小, 随进给比的增加呈上升趋势, 在旋轮圆角半径为 6 mm、进给比为 0.45 时, 成形精度最优。

(3) 7055 高强铝合金筒形件在热旋条件下, 可以通过多道次旋压成形实现壁厚从 8.0 mm 至 1.6 mm 的强力旋压成形, 总减薄率达到 80%。

参考文献:

- [1] 李俊鹏, 沈健, 许小静, 等. 7050 高强铝合金高温塑性变形的流变应力研究 [J]. 稀有金属, 2009, 33 (3): 318-322.
Li J P, Shen J, Xu X J, et al. Flow stress of 7050 high strength aluminum alloy during high temperature plastic deformation [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33 (3): 318-322.
- [2] 赵刚要, 张冉阳, 郭正华, 等. 难变形材料薄壁筒形件强力旋压研究进展 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (23): 85-90.
Zhao G Y, Zhang R Y, Guo Z H, et al. Review of power spinning of thin-walled hard-to-deform materials tube [J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (23): 85-90.
- [3] 闫亮明, 沈健, 李园园, 等. 变形工艺对 7055 铝合金多道次热压缩组织的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2012, 40 (10): 40-43.
Yan L M, Shen J, Li Y Y, et al. Influence of deformation process on microstructures of 7055 aluminum alloy hot compressed by multi-pass [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2012, 40 (10): 40-43.
- [4] 武泳. 喷射成形 7055 铝合金组织性能与断裂行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Wu Y. Study on Microstructure, Properties and Fracture Behavior of Spray Formed 7055 Aluminum Alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [5] 张冉阳, 余欢, 赵刚要. 难变形薄壁筒形件强力旋压组织演化研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (9): 947-952.
Zhang R Y, Yu H, Zhao G Y. Progress in microstructure evolution during power spinning process of thin-walled tube [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39 (9): 947-952.

(下转第 199 页)