

大长径比铝合金异形件精密旋压成形工艺研究

温 涛, 张绪虎, 阴中炜, 沈正章, 尹嘉明, 赵 磊, 陈永来

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

摘 要: 通过工艺试验及组织性能分析, 研究了变形温度、道次和减薄率、进给比对大长径比铝合金异形件旋压成形的影响, 优化的特征旋压温度为 370~420 °C、变形道次为 10~12 道次、道次减薄率为 20%~25%、总减薄率为 35%~50%、普旋进给比为 2.0~2.5 mm/r、强旋进给比为 1.3~1.8 mm/r。采用上述工艺实现了大长径比异形旋压件经历 1 次装卡由板材直接成形, 大幅提升了生产效率, 同时满足构件“控形”和“控性”要求, 其壁厚差 ≤ 0.2 mm, 内型面与理论型面单边间隙 ≤ 0.1 mm, 旋压变形后抗拉强度和延伸率基本不变, 而屈服强度提高 10.1%。

关键词: 大长径比; 异形件; 精密旋压

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)12-4074-07

旋压技术是一种实现筒形件、锥形件、曲母线构件及异形件(两种或者两种以上形状)等回转体部件高精度一体化连续成形的近净成形工艺, 它集成了挤压、锻造、环压、滚压等工艺特性, 通过连续逐点变形可获得显著的细晶强化效果, 具有材料利用率高、构件成形效率及成形精度高、成本较低等优势, 近年来广泛应用于航空航天领域^[1-5]。而大长径比构件则是航空航天领域广泛应用的一类零部件, 针对其结构特性、成形精度及可靠性等要求, 传统的“拉深成形”、“分段旋压+多段拼焊”等成形工艺不再适用, 因此近年来科研人员开展了大量旋压工艺研究以实现大长径比结构件的整体成形^[6-8], 如李增辉^[6]通过控制管坯碾薄旋压过程中变形的均匀性及残余应力分布、采用三旋轮错距旋压工艺实现了长径比达 15.85 (长度 4200 mm、内径 $\Phi 265$ mm) 的 30CrMnSiA 钢质筒形件整体成形; 周宇静^[7]通过采用管坯预先热处理+设置呈梯度的变形量、进给比、错距量等手段实现了长径比达 9.68 (长度 1200 mm、内径 $\Phi 124$ mm) 的 6061 铝合金筒形件高精度成形; 张行健^[8]采用设计 2 套旋压模具分别进行预成形和终成形+设置合理优化旋压工艺的路径、使用铝合金板材实现了长径比达 1.66 (长度 552 mm、内径 $\Phi 342$ mm) 的 5A06 铝合金异形件整体成形。然而, 采用一套旋压模具、经历一次装卡即实现大长径比铝合金异形件整体成形的情况还鲜有报道。

本研究通过精确设计旋压模具、开展工艺试验, 对旋压工艺参数进行合理匹配及优化, 掌握长直线段

在旋压变形过程中的扩径控制、壁厚均匀性控制及局部突起、开裂等缺陷控制方法, 实现大长径比 5A06 铝合金异形件通过一套旋压模具、经历一次装卡即整体精密成形。本研究涉及的 5A06 铝合金异形件型面包含圆弧面和长直线段, 其结构设计如图 1 所示。

1 实 验

采用的原材料为 5A06 铝合金轧板, 状态为 H112 态, 其化学成分如表 1 所示、力学性能如表 2 所示。旋压坯料规格为 $\Phi (570\sim 610)$ mm \times 16 mm (对应异形旋压件直线段的设计工艺余量为 30 mm, 即旋压件直线段设计高度为 510 mm; 对应异形旋压件直线段内、外型面的设计加工余量均为 0.8 mm, 即旋压件直线段设计壁厚为 5.6 mm)。

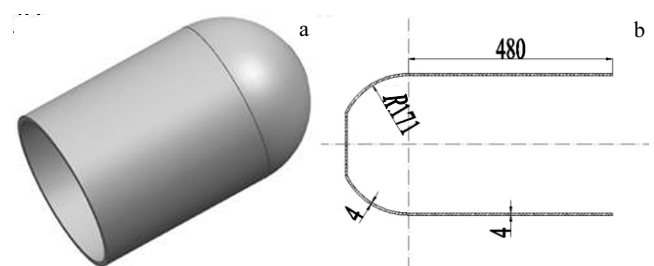


图 1 目标构件结构设计示意图

Fig.1 Schematic diagrams of structural designing on target component: (a) 3D model and (b) dimensions

收稿日期: 2018-12-10

作者简介: 温 涛, 男, 1985 年生, 博士, 高级工程师, 航天材料及工艺研究所, 北京 100076, 电话: 010-68383316, E-mail: wentao0323@163.com

表 1 试验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of experiment material ($\omega/\%$)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Al
0.06	0.15	0.01	0.64	6.4	0.05	0.02	Bal.

表 2 试验材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of experiment material

UTS/MPa	YS/MPa	Elongation/%
363	158	28.0

旋压工艺试验的模具外观与目标构件保持一致，包含圆弧段和直线段，其结构设计如图 2 所示。其中，圆弧段的顶端为直径 $\Phi 80$ mm 的平台，尾顶通过与该平台接触以固定旋压坯料；直线段的下方为堑口，其用于与旋压设备连接。旋压工艺试验在 TORC-180/2FC 双旋轮数控旋压机上进行，工艺参数设置如下：即温度为 290~500 $^{\circ}\text{C}$ 、旋压道次及道次减薄率分别为 4~19 道次及 11%~33%、总减薄率为 35%~50%、主轴转速为 80~200 r/min、旋轮进给速率为 120~200 mm/min、进给比为 1.3~2.5 mm/r。

经旋压工艺试验成形大长径比异形件后，沿着变形方向在异形旋压件上切割拉伸试样进行室温力学性能检测，拉伸变形速率为 2 mm/min；同时沿着变形方向切割金相试样，镶嵌并进行机械抛光，然后用腐蚀剂进行侵蚀。采用 TG3000 型金相分析系统对变形试样进行微观组织观察。

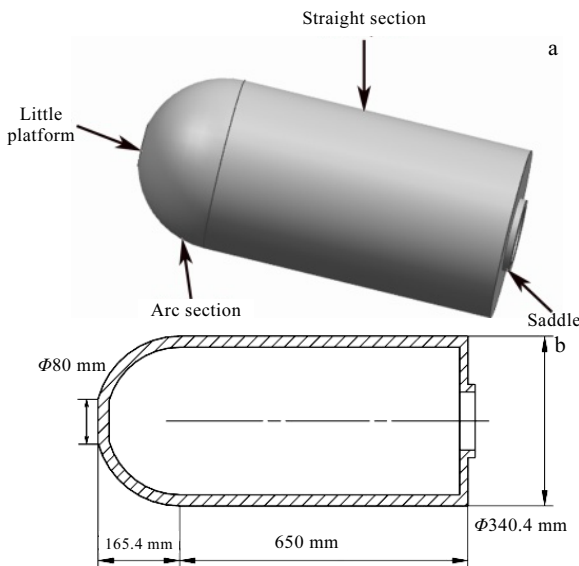


图 2 旋压模具结构设计示意图

Fig.2 Schematic diagrams of structural designing on spinning mold: (a) 3D model and (b) dimensions

2 结果与分析

2.1 工艺参数对异形旋压件型面的影响

2.1.1 温度对异形旋压件型面的影响

图 3 为当工艺试旋温度为 290~330 $^{\circ}\text{C}$ 时获得的铝合金异形件宏观形貌。从图 3 中可以看出，第 1 道次旋压结束后，在旋压件表面即出现了微裂纹。另外，在该温度区间旋压变形后，获得的异形旋压件与旋压模具贴合效果较差，内型面与理论型面单边间隙达到 1.05~2.22 mm，出现了明显的扩径效应，如表 3 所示。

图 4 为经 450~470 $^{\circ}\text{C}$ 工艺试旋后获得的铝合金异形件，从图中可以看出，在异形旋压件直筒段外缘出现了明显的“喇叭口”。另外，在该温区旋压变形后，相对于异形旋压件直线段设计长度 510 mm、设计壁厚 5.6 mm，工艺试验件直线段长度过长，达到 530~550 mm，但直线段壁厚严重减薄，仅为 5.14~5.38 mm，如表 4 所示。随着工艺试旋温度进一步提高到 480~500 $^{\circ}\text{C}$ 时，出现了由于 5A06 合金发生明显“过烧”而导致的旋压失稳现象，如图 5 所示。

而当工艺试旋温度为 370~420 $^{\circ}\text{C}$ 时，获得的异形旋压件表面质量良好，无肉眼可见缺陷，如图 6 所示。另外，异形旋压件与旋压模具贴合效果良好，内型面与理论型面单边间隙仅为 0.01~0.08 mm，如表 3 所示。同时，相对于异形旋压件直线段设计长度 510 mm、设计壁厚 5.6 mm，工艺试验件直线段长度和壁厚均适中，



图 3 经 290~330 $^{\circ}\text{C}$ 旋压变形后表面微裂纹形貌

Fig.3 Morphology of microcrack after spinning at 290~330 $^{\circ}\text{C}$

表 3 异形旋压件直线段内径与旋压温度的相互关系

Table 3 Relationship between inner diameter of straight section and spinning temperature for alien spinning piece

No.	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Maximum diameter of member/mm	Maximum diameter of mold/mm
1	290~330	342.50~344.84	
2	370~420	340.42~340.56	340.40
3	430~470	340.48~340.54	

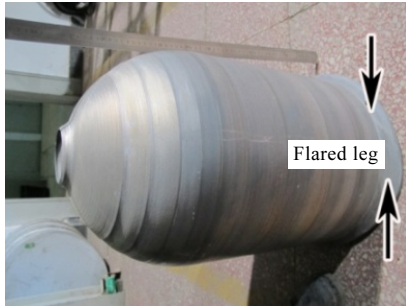


图 4 经 450~470 °C 旋压变形后“喇叭口”形貌

Fig.4 Morphology of flaring effect after spinning at 450~470 °C

表 4 异形旋压件直线段长度和壁厚与旋压温度的相互关系

Table 4 Relationship between length and wall thickness of straight section and spinning temperature for alien spinning piece

No.	Temperature/ °C	Length of straight section/mm	Wall thickness of straight section/mm
1	290~330	512~515	5.62~5.71
2	370~420	510~513	5.66~5.73
3	430~470	530~550	5.14~5.38



图 5 经 480~500 °C 旋压变形后“过烧”失稳形貌

Fig.5 Morphologies of overburning induced instability after spinning at 480~500 °C: (a) overlooking view and (b) side view

分别为 510~513 mm 和 5.66~5.73 mm，如表 4 所示。

旋压温度是大长径比铝合金异形件旋压成形及缺陷控制的最关键要素。现有研究表明，5A06 铝合金的



图 6 经 370~420 °C 旋压变形后异形旋压件形貌

Fig.6 Morphology of alien piece after spinning at 370~420 °C

热加工温度窗口为 320~470 °C^[9]。当变形温度过低时，5A06 合金塑性提高幅度较小，旋压过程中变形抗力较大，易产生裂纹^[10]。同时，旋压变形温度过低时，旋压坯料与模具不易贴合，上述效应在全旋程中累积和迭加，极易引发明显的扩径效应。

当变形温度过高时，旋压过程中易产生堆积、隆起、变形后晶粒增大及表面氧化加剧等缺陷，影响旋压件的尺寸精度^[11]；同时易造成坯料内、外表面温度梯度过大，导致其由于变形不均而产生密集型裂纹^[12]。另外，变形温度过高时，材料处于软化状态，同时异形旋压件跟随主轴旋转时将产生比较明显的“离心”效应，而异形旋压件外端刚度较小，对变形较为敏感，如果约束力不足时，在旋压变形过程中异形旋压件极易出现“喇叭口”^[13,14]。同时由于材料在高温下过于向直筒段流动导致其长度明显增加，直筒段壁厚过减薄效应显著。此外，过高的变形温度极易导致 5A06 合金超过其低熔点共晶的熔点，使低熔点共晶和晶界发生复熔，从而引发“过烧”，导致铝合金异形件“过烧”失稳^[9]。

而在合理的变形温度下，5A06 铝合金具有较好的塑性，这将有助于实现旋压坯料快速缩径，提高旋压效率；同时使得旋压坯料及旋压件与模具贴合效果良好，直筒段壁厚和长度与设计尺寸保持一致^[9]；另外，在合理的变形温度窗口内还可以有效抑制大长径比构件旋压成形过程中极易出现的“扩径”现象^[9,14]，提高铝合金异形旋压件的型面及尺寸精度。

2.1.2 道次及减薄率对异形旋压件型面的影响

表 5 为当温度保持在 370~420 °C、总减薄率保持在 35%~50%时，经历不同道次及道次变形量旋压变形后获得的铝合金异形件表面质量情况。从表中可以看出，当变形道次为 4~6、道次变形量为 29%~33%时，在异形旋压件表面出现了局部“隆起”，同时直线段端部出现了“褶皱”；当变形道次为 16~19、道次变形量

表 5 异形旋压件表面质量与旋压道次、减薄率的相互关系
Table 5 Relationship between surface quality of alien spinning piece and spinning pass, thinning rate

No.	Pass	Pass thinning rate/%	Total thinning rate/%	Surface
1	4~6	29~33		Wrinkle, apophysis
2	10~12	20~25	35~50	Perfect
3	16~19	11~16		Incomplete deformation

为 11%~16% 时, 异形旋压件成形过程中出现了“旋不透”(变形不充分) 现象, 即靠近外表面材料变形量较大, 而靠近内表面材料变形量较小; 当变形道次为 10~12、道次变形量为 20%~25% 时, 异形旋压件表面质量良好, 成形过程中未出现肉眼可见的缺陷。

旋压道次及减薄率是大长径比铝合金异形件旋压成形及缺陷控制的另一个关键要素。旋压道次较多时, 道次减薄率较小, 旋压变形过程容易进行, 但同时将导致旋压坯料壁厚方向变形不均匀, 极易出现“旋不透”的现象, 造成旋压件精度变差, 甚至会出现坯料内表面由于变形不充分而产生裂纹的情况^[15,16]。另外, 旋压道次较多将导致 5A06 铝合金产生比较严重的加工硬化, 甚至需要增加中间退火工序才能保证后续旋压道次顺利进行。而旋压道次较少时, 道次减薄率相对较大, 极易导致大量金属在旋轮前堆积, 造成旋压坯料畸变增加, 旋压件表面出现“隆起”、“鼓包”等缺陷^[17,18]。

而在合理的旋压道次及减薄率条件下, 将总减薄量合理地分配在每个旋压道次, 构建出合理的旋压轨迹, 如图 7 所示, 将有效抑制“褶皱”、“隆起”等缺陷, 提高旋压件成形质量^[9]。从图中可以看出, 将普旋与强旋相结合, 每一道次均先通过普旋使坯料向模具表面压窝, 可显著抑制坯料出现“反背”^[9]。在变形起始阶段, 坯料的刚度较好, 在不出现“褶皱”的前提下, 应尽量提高压窝量以实现快速缩径, 提高旋压效率; 而随着变形进行, 坯料刚度逐渐降低, 则应适当降低普旋压窝量以防止变形失稳。每一道次普旋结束后, 开始进行强旋。为了实现后一道次普旋顺利压窝, 前一道次强旋行程应逐渐增加, 如图 7a 和 7b 所示, 即第 1 道次普旋压窝量为 m 、强旋量为 a , 后续道次普旋量若均为 n 、强旋量为 $b \rightarrow k$, 那么 $m > n$ 、同时从 $a \rightarrow k$ 逐道次增加, 从而提高铝合金异形旋压件的表面质量, 实现高精度成形。

2.1.3 转速、进给及进给比对异形旋压件型面的影响

图 8 为当温度保持在 370~420 °C、总减薄率保持在 35%~50%、变形道次保持在 10~12、道次减薄率保

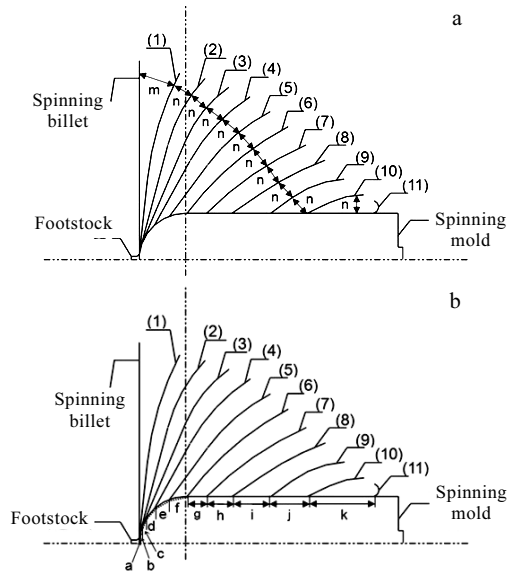


图 7 旋压道次及压下量示意图
Fig.7 Schematic diagrams of spinning passes reduction in each pass: (a) reduction in each pass of ordinary spinning and (b) reduction in each pass of strong spinning



图 8 合理转速和进给旋压变形后异形旋压件形貌
Fig.8 Morphology of alien piece after spinning at reasonable rotating speed and feed ratio

持在 20%~25% 时, 在主轴转速为 80~200 r/min、进给速率为 120~200 mm/min 条件下经历旋压变形后获得的铝合金异形件宏观形貌。从图中可以看出, 异形旋压件表面质量良好, 未出现肉眼可见的缺陷。另外, 异形旋压件直线段壁厚比较均匀, 壁厚差小于 0.2 mm, 同时目标构件内型面与理论型面样板单边间隙小于 0.1 mm。

旋压进给比是大长径比铝合金异形件旋压成形及缺陷控制的第 3 个关键要素。进给比与主轴转速和旋轮进给速率密切相关, 如公式 (1) 所示^[9]:

$$f = \frac{v_f}{N_m} \tag{1}$$

其中： f 为进给比； v_f 为旋轮进给速率； N_m 为主轴转速。

主轴转速较高时，将有利于提高旋压效率，但过高的转速极易导致机床发生共振，降低旋压件的尺寸精度^[9]。旋轮进给速率较快时，将降低旋压件的表面质量，加深旋压件表面的滚压纹路，同时较大的进给速率也极易导致变形区金属堆积，影响旋压变形^[9,19]；而进给速率较小时则易引起旋压件表面产生“鳞皮状”缺陷，同时降低旋压效率^[9,20]。针对直径 $\Phi 550\sim 600$ mm 的旋压坯料，主轴转速一般选择为 60~500 r/min，进给速率一般选择为 100~450 mm/min^[9]。

主轴转速与旋轮进给速率应相互匹配，获得合理的进给比，才能保证旋压件的型面、尺寸精度以及表面质量。针对大长径比构件的结构特点，应在不起“褶皱”的前提下尽量选择较大的进给比，以改善“贴模”情况和提高生产效率；否则由于旋轮与构件在同一位置的旋转接触和辗压次数增加将加重旋压件的“扩径”程度，甚至使旋压件壁厚过度减薄而发生破裂^[13-14,20]。另外，进给比与减薄率应合理配合，当减薄率较高时，应选择较小的进给比；反之，则选择较大的进给比^[9]。在本研究中，强旋阶段采用较小的旋轮进给比： $f=1.3\sim 1.8$ mm/r；而普旋阶段则采用较大的旋轮进给比： $f=2.0\sim 2.5$ mm/r。

2.2 旋压变形对异形旋压件组织和性能的影响

图 9 为异形旋压件成形后沿变形方向、不同位置

的显微组织，图 9a~9d 相对应的取样位置分别为圆弧段顶部、底部以及直线段中部、底部。从图中可以看出，经历旋压变形后，异形旋压件不同位置的显微组织均呈现典型的“纤维特征”，同时有少量 β (Mg_2Al_3) 相质点从 α (Al) 基体中析出，但由于 β 相与基体不发生共格强化，因此该 β 相无强化效果^[8]；另外，4 个位置的显微组织均比较均匀，晶粒沿着旋压进给方向（即轴线）被拉长，晶粒尺寸为 50~150 μm ，未发生明显的动态再结晶，同时均未发生“过烧”，组织状态良好。

表 6 为异形旋压件成形后其轴向的室温力学性能。从表中可以看出，相对于原始板材，异形旋压件的抗拉强度和延伸率在旋压变形前后无显著变化，其中抗拉强度分别为 363 MPa（变形前）和 367 MPa（变形后）、延伸率分别为 28.0%（变形前）和 29.0%（变形后）；但屈服强度从旋压变形前的 158 MPa 提高到 174 MPa，增幅达到 10.1%。

材料经旋压变形后其晶粒被显著细化^[2,5]，而 Hall-Petch 理论显示材料屈服强度与晶粒尺寸密切相关，如公式（2）所示^[9]：

$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{1/2} \quad (2)$$

其中： σ_s 为屈服强度； σ_0 为移动单个位错时产生的晶格摩擦阻力； k 为常数； d 为平均晶粒直径；

对于同种材料， σ_0 和 k 相同，由于旋压变形后晶粒尺寸减小，因此异形旋压件屈服强度获得提高。但

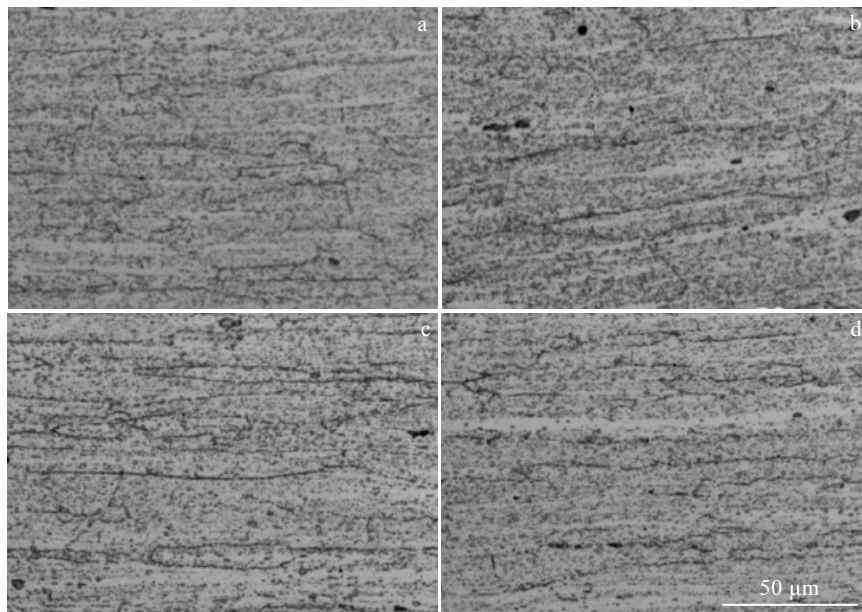


图 9 旋压变形后异形旋压件不同位置显微组织

Fig.9 Microstructures of alien piece at different positions after spinning: (a) top of arc segment, (b) bottom of arc segment, (c) middle of straight segment, and (d) bottom of straight segment

表6 大长径比异形旋压件的力学性能

Table 6 Mechanical properties of alien piece with large aspect ratio

Mechanical property	UTS/MPa	YS/MPa	Elongation/%
Raw material	363	158	28.0
Spinning piece	367	174	29.0

旋压变形后异形旋压件的抗拉强度和延伸率均未发生明显变化,导致这种现象的原因尚不清楚,可能是经历旋压变形后异形旋压件的抗拉强度和延伸率对晶粒尺寸不敏感所致,后续需进一步研究确认。

3 结论

1) 采用一套旋压模具,经历一次装卡,可以实现长径比达1.98的大长径比铝合金异形件精密旋压成形。

2) 根据异形件的结构特性,精确设计了旋压模具和坯料;通过旋压工艺试验确定了优化的特征工艺参数,即旋压温度为370~420℃;10~12道次旋压轨迹,道次减薄率和总减薄率分别为20%~25%、35%~50%;主轴转速为80~200 r/min,进给速率为120~200 mm/min,强旋进给比为1.3~1.8 mm/r,而普旋进给比为2.0~2.5 mm/r。

3) 旋制的大长径比铝合金异形件具有良好的内、外型面,壁厚差 ≤ 0.2 mm,壳体内型面与理论型面样板单边间隙 ≤ 0.1 mm,相对于原始板材其抗拉强度和延伸率基本不变,屈服强度提高10.1%。

参考文献 References

- [1] Yu Hui(于辉), Liu Shuashuai(刘帅帅), Wang Xiulin(王秀琳) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2015, 22(4): 84
- [2] Yuan Yujun(袁玉军), Xia Qinxiang(夏琴香), Xiao Gangfeng(肖刚锋) et al. *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2014, 39(4): 42
- [3] Zhang Tan(张坦), Li Xinhe(李新和), Luo Yazhou(骆亚洲) et al. *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2017, 42(1): 47
- [4] Liao Weiliang(繇伟亮), Liu Dahai(刘大海), Shao Xueming(邵雪明). *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2014, 6(2): 18
- [5] Fan Wenxin(樊文欣), Xi Qihao(席奇豪), Lv Wei(吕伟) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2016, 45(17): 119
- [6] Li Zenghui(李增辉), Wen Shubin(温树彬), Han Dong(韩冬) et al. *China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology*(锻压装备与制造技术)[J], 2009, 44(5): 102
- [7] Zhou Yujing(周宇静), Cheng Xiuquan(程秀全), Xia Qinxiang(夏琴香). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2011, 39(8): 30
- [8] Zhang Xingjian(张行健), Zhang Xuhu(张绪虎), Yin Zhongwei(阴中炜) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(19): 33
- [9] Wang Chenghe(王成和), Liu Kezhang(刘克璋), Zhou Lu(周路). *Spinning Technology*(旋压技术)[M]. Fujian: Fujian Science and Technology Press, 2017: 680, 704, 717, 720
- [10] Zhang Cheng(张成), Yang Haicheng(杨海成), Han Dong(韩冬) et al. *Journal of Solid Rocket Technology*(固体火箭技术)[J], 2013, 36(1): 127
- [11] Chai Guoqiang(柴国强), Li Defu(李德富). *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2015, 40(11): 112
- [12] Yang Yingli(杨英丽), Guo Dizi(郭荻子), Zhao Yongqing(赵永庆) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(4): 625
- [13] Wei Zhun(魏准), Li Xinhe(李新和), Zhang Tan(张坦) et al. *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2016, 41(12): 137
- [14] Yu Dahui(俞大辉), Li Xinhe(李新和), Bo Jianan(卜佳南) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2016, 23(4): 48
- [15] Tian Hui(田辉), Huang Haiqing(黄海青), Chen Guoqing(陈国清) et al. *Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2009(5): 19
- [16] Mou Shaozheng(牟少正), Han Dong(韩冬), Yang Yingli(杨英丽) et al. *China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology*(锻压装备与制造技术)[J], 2009, 44(2): 98
- [17] Xu Wencheng(徐文臣), Shan Debing(单德彬), Chen Yu(陈宇) et al. *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2008, 33(3): 56
- [18] Xue Song(薛松). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011
- [19] Zhan Mei(詹梅), Li Hu(李虎), Yang He(杨合) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2008, 15(2): 115
- [20] Song Xiaofei(宋晓飞), Zhan Mei(詹梅), Jiang Huabin(蒋华兵) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2013, 20(1): 31

Study of Netshape Spinning Process of Al-Alloy Alien Piece with Large Aspect Ratio

Wen Tao, Zhang Xuhu, Yin Zhongwei, Shen Zhengzhang, Yin Jiaming, Zhao Lei, Chen Yonglai
(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The effect of temperature, passes, thinning rate and feed ratio on the alien piece with large aspect ratio during spinning formation was studied through processing test and analysis of microstructure and mechanical properties. The optimized conditions are as follows: characteristic temperature 370~420 °C, deformation passes 10~12, thinning rate of each pass 20%~25% and whole process 35%~50%, feed ratio of ordinary spinning 2.0~2.5 mm/r, and feed ratio of strong spinning 1.3~1.8 mm/r. It is achieved that alien piece with large aspect ratio spinning is formed directly from sheet material which undergoes only one time card loading. The process above not only improves production efficiency significantly, but also simultaneously fulfils requirements of controlling shape and properties. The wall thickness difference of alien piece with large aspect ratio is not greater than 0.2 mm, and the unilateral gap between inner profile and theoretical model is not higher than 0.1 mm. Compared to those of the original plate, the ultimate tensile strength and elongation of alien piece with large aspect ratio basically is unchanged, while the yield strength increases by 10.1%.

Key words: large aspect ratio; alien piece; netshape spinning

Corresponding author: Wen Tao, Ph. D., Senior Engineer, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, P. R. China, Tel: 0086-10-68383316, E-mail: wentao0323@163.com