引文格式：王永娣，高鹏飞，李宏伟，等. 工艺参数对高温合金薄壁异型曲面件旋压成形质量的影响［J］. 塑性工程学报，2023，30（5）：73-80. WANG Yongdi，GAO Pengfei，LI Hongwei，et al. Effect of process parameters on spinning forming quality of superalloy thin-walled conical part with curved surface［J］. Journal of Plasticity Engineering，2023，30（5）：73-80.

工艺参数对高温合金薄壁异型曲面件旋压成形质量的影响

王永娣，高鹏飞，李宏伟，詹　梅
（西北工业大学 材料学院 陕西省高性能精确成形技术与装备重点实验室，陕西 西安 710072）

摘　要：研究了进给比、芯模转速、旋压温度和坯料直径对 GH3128 高温合金薄壁异型曲面构件热旋成形质量的影响。结果表明，在给定参数内，随着进给比的增大，壁厚减薄量减小，但起皱程度增大。随着芯模转速的增加，壁厚减薄量增大，但起皱程度减小。随着旋压温度的升高，壁厚减薄量呈现先增大后减小的趋势，而起皱程度呈现先减小后增大的趋势。随着坯料直径的增大，壁厚减薄量和起皱程度都呈现出逐渐增大的趋势。综上，在给定参数内，进给比、芯模转速和旋压温度 3 种参数对壁厚减薄量和起皱程度的影响规律均呈现相反的变化趋势，而坯料直径对起皱程度和壁厚减薄量的影响变化趋势一致，因此为了得到较小的壁厚减薄量和起皱程度，进给比、芯模转速和旋压温度应该取参数范围的中间值，而坯料直径可在满足成形要求的前提下取较小值，据此确定了最优的旋压参数组合。

关键词：高温合金；薄壁异型曲面件；旋压参数；起皱程度；壁厚减薄量
中图分类号：TG376　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-2012（2023）05-0073-08
doi：10. 3969/j. issn. 1007-2012. 2023. 05. 010

Effect of process parameters on spinning forming quality of superalloy thin-walled conical part with curved surface

WANG Yong-di，GAO Peng-fei，LI Hong-wei，ZHAN Mei
（Shaanxi Key Laboratory of High-Performance Precision Forming Technology and Equipment，School of Materials Science and Engineering，Northwestern Polytechnical University，Xi′an 710072，China）

Abstract：The effects of feed ratio，mandrel rotate speed，spinning temperature and blank diameter on the hot spinning forming quality of GH3128 superalloy thin-walled conical parts with curved surface were studied. The results show that within the given parameters，with the increase of feed ratio，the wall thickness reduction decreases，but the wrinkling degree increases. With the increase of mandrel rotate speed，the wall thickness reduction decreases，but the wrinkling degree increases. With the increase of spinning temperature，the wall thickness reduction first increases and then decreases，while the wrinkling degree first decreases and then increases. With the increase of blank diameter，both the wall thickness reduction and wrinkling degree show a gradual increase trend. To sum up，within the given parameters，the effect laws of feed ratio，mandrel rotate speed and spinning temperature on wall thickness reduction and wrinkling degree show the opposite trend. However，the effect of blank diameter on wrinkling degree and wall thickness reduction shows similar variation trend. Therefore，in order to obtain smaller wall thickness reduction and wrinkling degree，the middle value of the test range for feed ratio，mandrel rotate speed and spinning temperature should be chosen，while a smaller value of the blank diameter can be chosen on the premise of meeting the forming requirements. Based on above analyses，the optimal spinning parameter combination was determined.

Key words：superalloy；thin-walled conical part with curved surface；spinning parameters；wrinkling degree；wall thickness reduction

---

基金项目：国家科技重大专项（J2019-VII-0014-0154）；国家自然科学基金资助项目（92060107）
通信作者：高鹏飞，男，1988 年生，博士，副教授，主要从事航空航天领域难变形材料复杂构件的高性能精确塑性成形理论与技术研究，E-mail：gaopengfei@ nwpu. edu. cn
第一作者：王永娣，女，1987 年生，博士研究生，主要从事高温合金薄壁件热旋成形工艺技术及理论研究，E-mail：wangyongdi111999@ 163. com
收稿日期：2022-07-06；**修订日期**：2023-03-13

引言

为了提高构件轻量化和整体性能水平，航空航天等先进制造领域迫切需要采用轻质高强材料成形结构效益显著的薄壁复杂整体构件[1-2]。GH3128 高温合金薄壁异型曲面构件就是其中的典型代表，它具有薄壁轻量化和形状复杂化的特点。采用传统冲压等技术成形该类构件时会面临成形能力不足及复杂结构难成形的限制，而旋压成形技术作为一种高柔性的点局部加载成形方法，为该类构件的成形提供了有效途径[3-5]。

薄壁异型曲面构件旋压成形是一个多道次、多参数耦合下的复杂非线性过程，材料经过多道次局部加载不均匀变形且工艺过程复杂。不合理的成形条件往往会造成起皱、过度减薄以及开裂等质量问题，因此旋压参数的合理选取对保证旋压件成形质量至关重要。为此，国内外研究者针对薄壁异型曲面构件旋压成形规律开展了系列研究。WANG L 等[6]研究了不同旋压轨迹和工艺参数对无芯模旋压成形质量的影响，发现旋压轨迹曲率越大或进给比越小，壁厚减薄越明显。WATSON M 等[7]研究了工艺参数对薄壁杯形件多道次旋压起皱的影响，发现较大的进给比、较大的旋轮圆角半径、较小的坯料厚度以及较大屈服强度会导致旋压起皱更容易发生。马飞[8]研究了锥形件旋压过程中进给率、旋轮圆角半径、旋轮入旋角和板料厚度对壁厚变化的影响规律。王雨等[9]研究了工艺参数对薄壁锥形件旋压成形中凸缘平直度的影响，发现凸缘平直度随着芯模转速的增大而提高，但当芯模转速增大到一定值以后，凸缘平直度不再变化；增大旋轮进给速率，凸缘平直度呈降低趋势。凌泽宇等[10]基于旋压实验对镍基高温合金锥筒形件室温拉深旋压成形进行了研究，发现当进给比或坯料直径过大时，因凸缘处周向压应力过大，将导致起皱缺陷。上述研究对象主要为锥形件和杯形件的冷旋成形，对于难变形高温合金薄壁异型曲面件的热旋成形质量规律研究较少。薄壁异型曲面件热旋成形过程中的起皱和过度减薄是影响该类构件顺利成形的主要问题，亟需开展旋压参数对其成形中壁厚减薄和起皱影响规律的研究。

本文将结合有限元模拟与实验，研究进给比、芯模转速、旋压温度和坯料直径对薄壁异型曲面件热旋成形中壁厚均匀性和起皱程度的影响规律，结果将为其工程生产提供指导。

1 研究方法

薄壁异型曲面构件几何尺寸如图 1 所示，其曲母线由 4 个特征段构成，包括 30°直线锥段、半径为 500 mm 圆弧段、18°直线锥段和半径为 350 mm 圆弧段，壁厚为 0.8 mm。其半锥角从 30°逐渐减小至 10°。由于构件结构较复杂，且 GH3128 高温合金变形抗力较大[11]，结合前期模拟和实验，最终确定该构件的成形工艺为热强旋加普旋复合成形，即 30°锥段通过一道次强旋成形，后面 3 段通过多道次普旋成形。

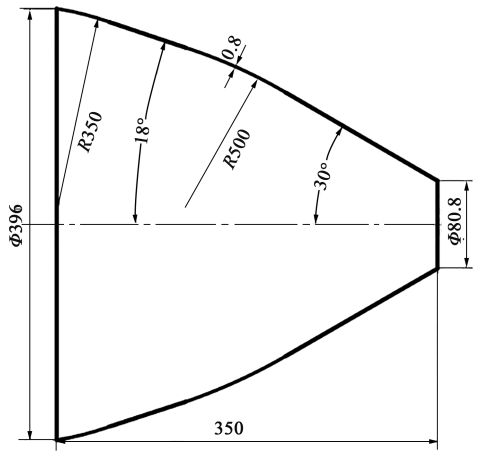

图 1 薄壁异型曲面构件几何尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric dimensions of thin-walled conical part with curved surface

1.1 有限元模型建立

GH3128 高温合金薄壁异型曲面构件热旋成形是一多参数耦合下的复杂成形过程，通过有限元模拟成形过程，可得到工件在成形过程中应力及应变分布与成形质量情况，是分析旋压成形规律和优化工艺的重要手段[12-13]。

为此，本文建立了 GH3128 高温合金薄壁异型曲面构件热旋成形有限元模型，如图 2a 所示。建模中将芯模和旋轮作为刚体处理，将坯料作为变形体处理。坯料与旋轮的接触采用罚函数算法，并用库伦摩擦模型计算摩擦力，接触摩擦因数为 0.05[14]。坯料与环境的传热系数和坯料热辐射系数分别为 17.2 和 0.7 $W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}$。网格大小及类型的选择会直接影响计算过程的稳定性，其关键依据是保证在旋压成形过程中工件上有 3~4 个单元与旋轮型面接触。同时，考虑到网格的均匀性，在半径方向上距坯料边缘 40 mm 处采用三角形-四边形网格进行

过渡，网格大小按照径向长度 2.5 mm；周向按照数量划分，过渡区域之前周向节点数为 180 个，过渡区域以后的周向节点数为 240 个。单元类型为 S4RT，此单元具有抗沙漏效应，抗畸变能力强，并能高效、稳定地进行复杂热力耦合计算，如图 2b 所示。根据火焰喷枪的口径确定了加热区域的宽度，通过建立内生热的面热源与时间的幅值曲线来模拟实验中喷枪的移动加热过程，使得旋轮前方区域不断加热。GH3128 高温合金在不同温度和应变速率下的真应力-真应变曲线通过拉伸实验得到，如图 3 所示，相关热物理性参数，如表 1 所示[15]。为了提高计算效率，质量放大因子设置为 2500。根据前期的实验和模拟发现该构件的锥段强旋过程容易成形，其难点为普旋段成形，因此本文选取第1道次普旋为典型过程，研究普旋工艺参数对成形质量的影响，建模时以强旋段结束后的工件形状做为起点，如图 2a 所示。

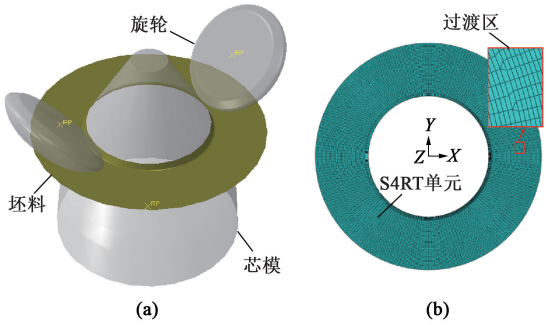

图 2　薄壁异型曲面构件热旋有限元模型（a）和网格划分示意图（b）

Fig. 2　Hot spinning finite element model (a) and meshing schematic diagram (b) of thin-walled conical part with curved surface

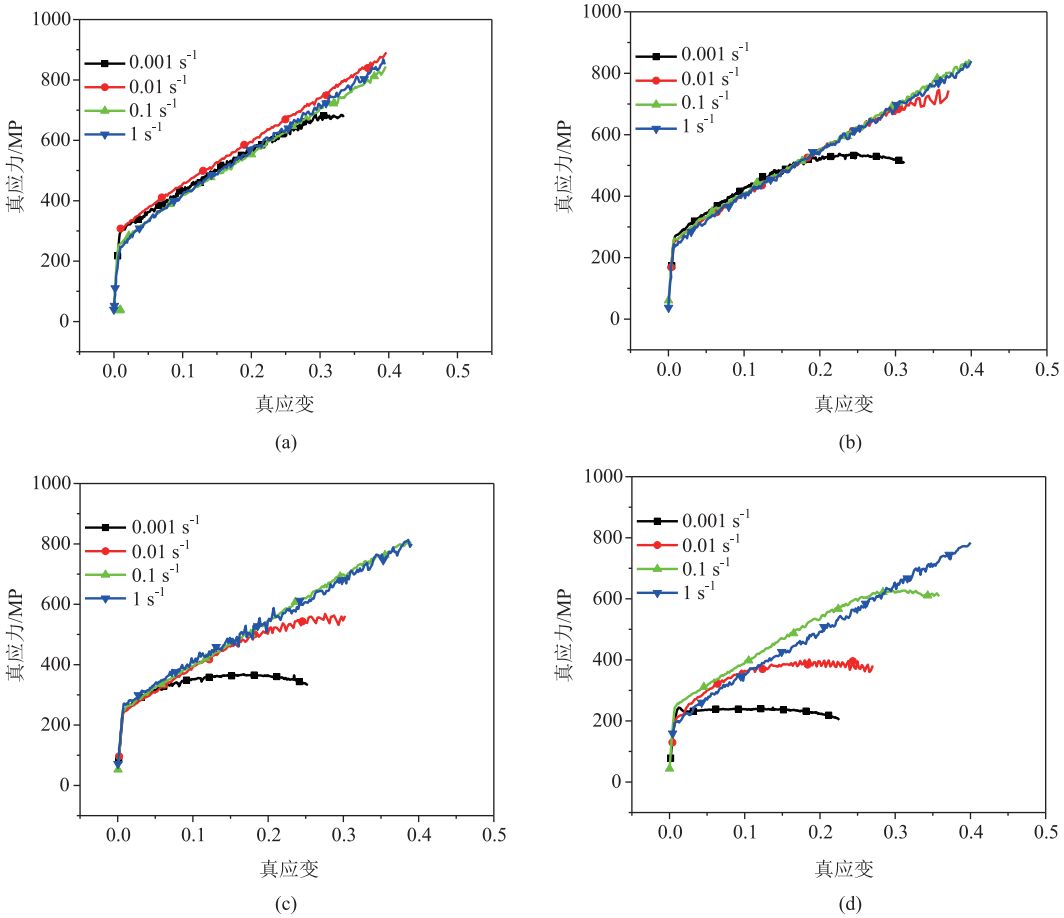

图 3　GH3128 高温合金不同温度和应变速率下的真应力-真应变曲线

（a）750 ℃　（b）800 ℃　（c）850 ℃　（d）900 ℃

Fig. 3　True stress-true strain curves of GH3128 superalloy at different temperatures and strain rates

有限元模型的有效性从两个方面进行验证。一方面，动内能比在大部分时间里必须小于 0.1；另一方面，为了保证模型不会出现沙漏效应，伪应变能和内能的比值必须小于 0.05。验证模型的工艺参数如表 2 所示，旋压轨迹如图 4 所示。所得结果的动内能比变化曲线如图 5 所示，由图可知，动能与内能之比在大部分时间内小于 0.1。伪应变能和内能的比值先升高，随后急剧降低至 0.05 以下。以上分析

意味着质量放大因子对成形质量的影响可以忽略不计，同时模型不会出现沙漏效应，说明该模型有效。

表 1 GH3128 高温合金热物理性能参数[15]

Tab. 1 Thermophysical property parameters of GH3128 superalloy[15]

温度 T/℃	比热容 c/（J·kg^{-1}·℃$^{-1}$）	热导率 λ/（W·m^{-2}·℃$^{-1}$）	弹性模量 E/GPa
20	372.6	—	—
100	383.5	11.3	—
200	389.4	12.56	—
300	—	14.24	199
400	—	15.4	191
500	452.2	16.75	189
600	464.7	18.42	187
700	515.0	19.68	175
800	535.9	21.35	162
900	561.0	23.02	152

表 2 验证模型的工艺参数

Tab. 2 Process parameters of validation model

工艺参数	值
进给比/（mm·r^{-1}）	1.5
芯模转速/（r·min^{-1}）	120
旋压温度/℃	800
坯料直径/mm	Φ520
旋轮圆角半径/mm	10
旋轮直径/mm	Φ250
旋轮安装角/（°）	45

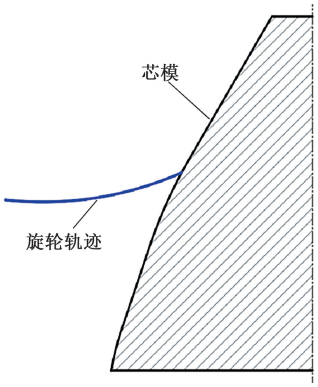

图 4 旋压轨迹示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spinning trajectory

为了进一步验证模型可靠性，采用与验证模型相同的工艺参数和轨迹进行热旋压实验。图 6 为实验与模拟壁厚沿径向的分布对比，可以看出，壁厚分布的整体趋势相同，最大壁厚偏差为 0.55%。以上分析说明该旋压模拟结果和实验结果吻合较好，采用该模型研究工艺参数对成形质量的影响规律是可靠的。

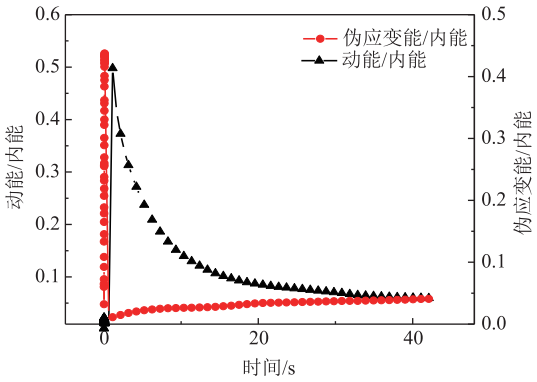

图 5 模拟动内能比和伪应变能与内能比随时间的变化

Fig. 5 Variations of ratio of kinetic energy to internal energy and ratio of artificial strain energy to internal energy in simulation

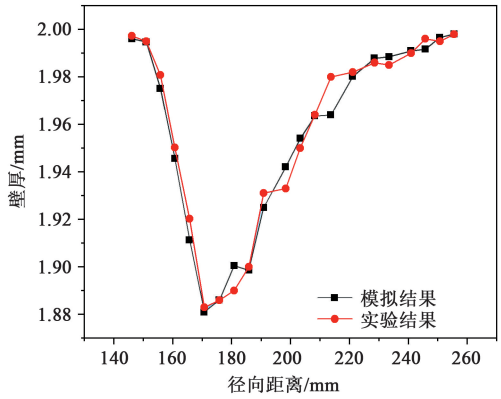

图 6 模拟和实验壁厚分布对比

Fig. 6 Comparison of wall thickness distribution between simulation and experiment

1.2 旋压工艺方案和质量评价指标

对于普旋过程，第 1 道次的成形质量对整个成形过程的影响显著，是最典型的普旋道次[16-19]，因此，本文主要研究普旋第 1 道次成形过程中进给比、芯模转速、旋压温度和坯料直径对薄壁异型曲面构件旋压成形质量的影响规律，具体旋压参数的取值如表 3 所示。其中，就坯料直径而言，成形该构件的理论坯料直径为 Φ440 mm，这里按经验另外选取了 4 个更大的坯料直径，以增加旋压过程的稳定性。采用单因素实验方法开展研究，除要研究的工艺参数外，其他工艺参数取因素水平 3 的数值，旋压轨迹同图 4。

根据前期实验，该构件在成形中存在的主要问题是过度减薄和凸缘处起皱，因此本文采用壁厚平均减薄量 T 来衡量壁厚的减薄程度，如式（1）所示，测量方法为在成形构件上沿径向均匀选取 4 条路径，每条路径间隔一个节点选取测量点，如图 7 中4条直线段所示，按照式（1）计算各点初始坯

表 3　单因素实验的因素和水平

Tab. 3　Factors and levels of single factor experiments

因素	水平				
	1	2	3	4	5
进给比/(mm·r^{-1})	0.5	1	1.5	2	2.5
芯模转速/(r·min^{-1})	60	80	100	120	140
旋压温度/℃	700	750	800	850	900
坯料直径/mm	Φ440	Φ480	Φ520	Φ560	Φ600

料的厚度与成形后的坯料厚度差的平均值，简称壁厚减薄量。壁厚减薄量越小，越有利于多道次普旋成形，可以避免多道次旋压后壁厚过度减薄。起皱较严重的区域一般为坯料最边缘一周，如图 7 所示，间隔 4 个节点选取测量点，起皱程度采用旋压后坯料最边缘处轴向坐标的极差 W 来衡量，如式（2）所示。起皱程度越小，说明成形过程越稳定。

$$T=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(t_0-t_i) \tag{1}$$

式中：t_0 为坯料的初始壁厚；t_i 为第 i 个节点旋压后壁厚；n 为所测量的节点个数。

$$W=y_{\max}-y_{\min} \tag{2}$$

式中：$y_{\max}$ 和 $y_{\min}$ 分别为轴向坐标的最大值和最小值。

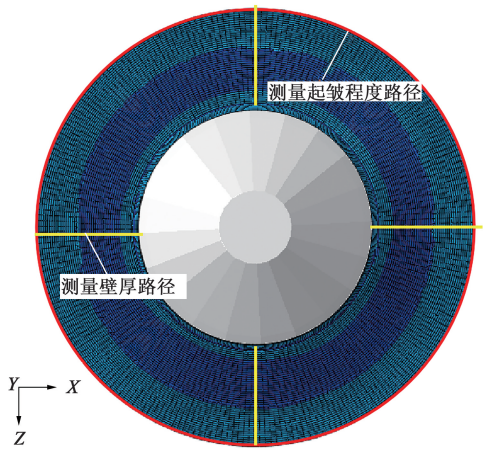

图 7　壁厚减薄量和起皱程度的测量路径示意图

Fig. 7　Schematic diagram of measurement paths of wall thickness reduction and wrinkling degree

2　结果与讨论

2.1　进给比对成形质量的影响

图 8 为进给比对壁厚减薄和起皱程度的影响规律，由图可知，随着进给比的增加，壁厚减薄量呈逐渐减小的趋势。当进给比为 0.5 mm·r^{-1} 时，单

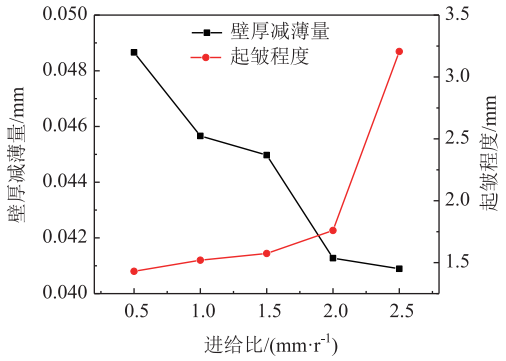

图 8　进给比对壁厚减薄量和起皱程度的影响

Fig. 8　Effects of feed ratio on wall thickness reduction and wrinkling degree

位时间内参与变形的区域较小，易出现局部过度碾薄，导致壁厚减薄较大。随着进给比的增大，参与变形的区域逐渐增大，使得变形区碾压不充分，材料流动不充分，变形量减少，从而使得壁厚减薄量降低，导致构件壁厚减薄量呈现逐渐减小的趋势。

随着进给比的增大，起皱程度呈逐渐增大的趋势。起皱主要是由周向压应力引起的，在旋压过程中，当周向压应力值大于临界周向压应力时起皱发生[20]。根据临界周向压应力的计算公式（式（3）[20]），可以得出随着进给比的增加，临界周向压应力的绝对值逐渐减小，这就使得凸缘起皱越来越容易。

$$\sigma_{\theta cr}=-\frac{1}{\sqrt{3}}\frac{\sigma_s\cdot t_0}{f\cdot\cos\alpha} \tag{3}$$

式中：$\sigma_{\theta cr}$ 为临界周向压应力；f 为进给比；σ_s 为材料屈服强度；α 为轨迹与芯轴的夹角。

另外，提取旋压结束时刻起皱程度路径上的周向应力，如图 9 所示，可以发现随着进给比的增加，周向应力从拉应力向压应力转变，更容易发生起皱。综合以上两方面因素，即起皱程度随进给比的增加而增加。

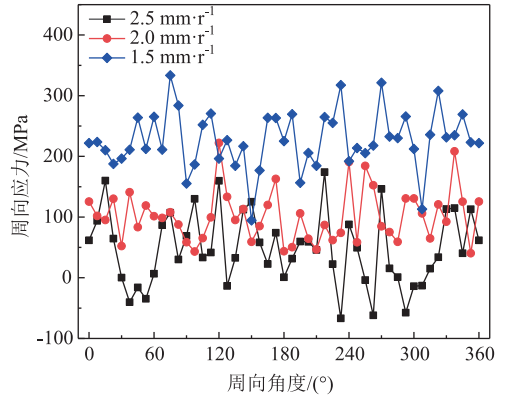

图 9　不同进给比下周向应力分布

Fig. 9　Circumferential stress distribution with different feed ratios

2.2 芯模转速对成形质量的影响

芯模转速对壁厚减薄量和起皱程度的影响如图 10 所示，由图可知，当芯模转速从 60 r·min^{-1} 增加到 140 r·min^{-1} 时，壁厚减薄量逐渐增大，但当芯模转速由 120 r·min^{-1} 增加到 140 r·min^{-1} 时，壁厚减薄量增大幅度较小。增大转速将增加旋压成形中材料变形速率，这会使旋轮加载区的变形材料产生更大的强化。旋轮加载区变形材料的强化，会增大旋压力，同时增大旋轮加载区材料与旋轮后方材料间的强度差，二者综合作用会一定程度上增加坯料在旋轮辗压后的拉薄变形。因此随着转速的增加，旋压成形减薄量略有增加。随着芯模转速的增大，凸缘起皱程度呈现降低的趋势，低转速区间降低幅度较大，当芯模转速从 80 r·min^{-1} 增加到 140 r·min^{-1} 时，起皱程度降低趋势减缓。这是因为随着芯模转速的增大，单位时间内旋轮作用次数增加，使得单位时间内变形量增加，壁厚减薄加剧，旋压过程中成形区的流入法兰区的材料较少，即周向压应力较小造成的。

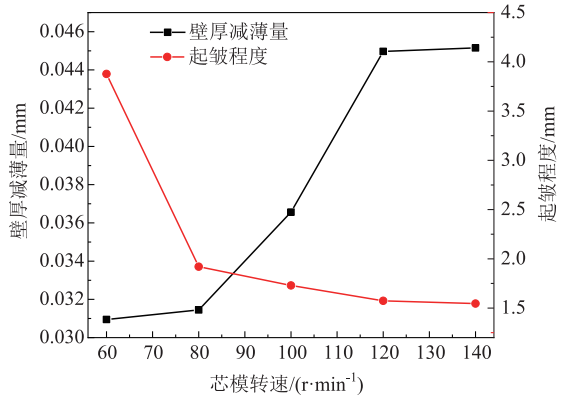

图 10 芯模转速对壁厚减薄量和起皱程度的影响

Fig. 10 Effects of mandrel rotate speed on wall thickness reduction and wrinkling degree

2.3 旋压温度对成形质量的影响

图 11 为温度对壁厚减薄量和起皱程度的影响，由图可知，随着温度的升高，壁厚减薄量逐渐增大，当温度达到 900 ℃时，壁厚减薄量略有下降。根据热拉伸实验，温度对材料的力学性能有显著影响，当温度较低时，变形抗力较大，变形困难，平均壁厚减薄量较小；随着温度的升高，变形抗力逐渐降低，变形越容易，因此平均壁厚减薄量增大。当温度升高至 900 ℃时，材料继续软化，起皱程度增加，凸缘对变形区的约束作用减弱，使得平均壁厚减薄量降低。随着温度的升高，起皱程度呈先减小后增大的趋势，850 ℃时起皱程度最低。这是由于在较

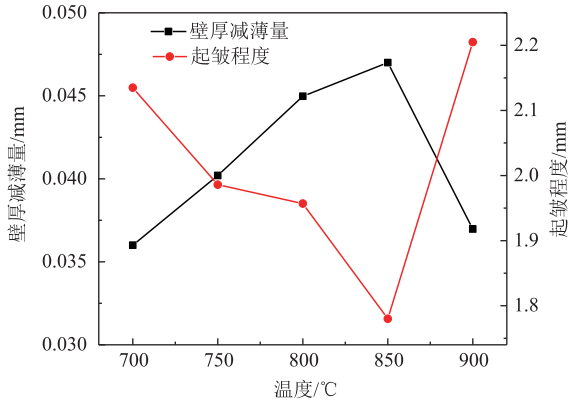

图 11 旋压温度对壁厚减薄量和起皱程度的影响

Fig. 11 Effects of spinning temperature on wall thickness reduction and wrinkling degree

低温度下材料变形抗力较大，材料变形困难，进而使得凸缘边上起皱度较大，随着温度的升高，材料软化，材料流动性提高，减薄量增大，变形较均匀，使得起皱度降低。当温度达到 900 ℃时，材料软化加剧，使得其整体抗皱性显著降低，这一点可以结合式（3）获得，随着温度的升高，屈服强度逐渐降低，这就使得临界极限周向应力的绝对值逐渐减小，即材料本身的抗皱性降低，从而使得 900 ℃的起皱程度明显增大。综上分析，温度对壁厚减薄量的影响和起皱程度的影响规律呈现相反的趋势，因此在选择参数时需要进行综合考虑。

2.4 坯料直径对成形质量的影响

图 12 为坯料直径对壁厚减薄量和起皱程度的影响，由图可知，随着坯料直径的增大，壁厚减薄量逐渐增大。这是由于坯料直径越大，旋压过程中凸缘宽度越大，产生的径向拉应力越大[18]，使得坯料的减薄趋势增加。

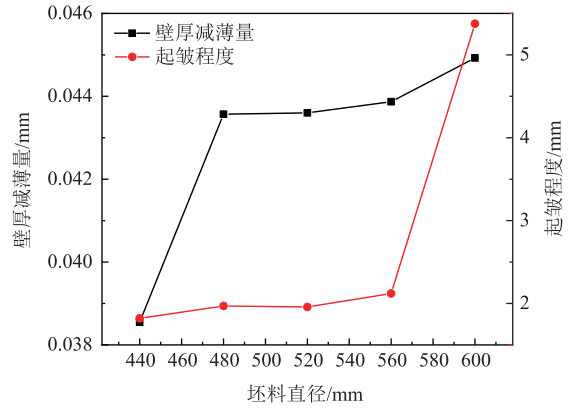

图 12 坯料直径对壁厚减薄量和起皱程度的影响

Fig. 12 Effects of blank diameter on wall thickness reduction and wrinkling degree

坯料直径为 $\Phi440\sim\Phi560$ mm 时，随着坯料直径的增大，起皱程度的变化很小，呈缓慢增加趋势，当坯料直径达到 $\Phi600$ mm 时，起皱程度明显增大。为了分析原因，提取 5 组实验 1 道次旋压后凸缘环的直径。根据式（4）[21]计算变形后的周向应变 ε_θ。

$$\varepsilon_\theta = \ln\frac{r}{R} \tag{4}$$

式中：r 为变形后的坯料半径；R 为变形前的坯料半径。

直径为 $\Phi440$、$\Phi480$、$\Phi520$、$\Phi560$ 和 $\Phi600$ mm 的坯料旋压后对应的周向应变分别为 0、−0.0012、−0.0072、−0.0182 和−0.0339。可以发现起皱程度较大的实验组对应的周向应变的绝对值较大，这就会产生较大的周向压应力，也就解释了以上起皱程度的变化规律。综上分析，起皱程度和坯料直径关系密切，适当的坯料直径可以抑制起皱和壁厚减薄，而坯料直径太大又会使得坯料局部区域过度减薄，容易造成破裂和起皱，因此要在保证满足构件成形的前提下选择较小的坯料直径。

2.5　合理工艺参数的确定

根据壁厚减薄量和起皱程度越小越好的原则，所确定的旋压工艺参数为：进给比为 2 mm·r^{-1}、转速为 80 r·min^{-1}、旋压温度为 850 ℃、坯料直径为 $\Phi520$ mm。将以上优选参数组合后再次进行模拟仿真，将模拟结果和前面的单因素实验进行对比（图 13），其中实验序号 1～17 是单因素实验的模拟结果，图中被圈的结果为优选工艺参数组合 18 号的模拟结果。可以发现所选参数组合获得的壁厚减薄量和起皱程度均最小，其数值分别为 0.0295 和 1.058 mm，表明优选的工艺参数组合显著改善了凸缘的起皱程度和壁厚减薄量。

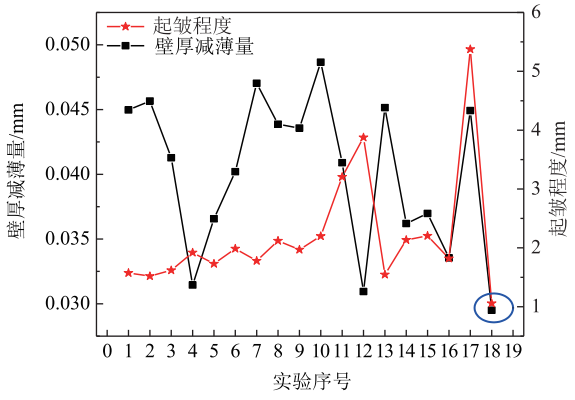

图 13　单因素实验与优选参数实验结果对比

Fig. 13　Comparison of single factor experiment and priority parameter experiment results

3　结论

（1）旋压参数对薄壁异型曲面构件壁厚减薄量的影响规律如下：在给定参数变化范围内，随着进给比的增加，壁厚减薄量逐渐减小；随着芯模转速的增大，壁厚减薄量呈现逐渐增加的趋势，转速在 80～120 r·min^{-1} 范围内壁厚减薄量变化明显；随着旋压温度的升高，壁厚减薄量出现先增大后减小的趋势；随着坯料直径的增大，壁厚减薄量逐渐增大。

（2）旋压参数对薄壁异型曲面构件起皱程度的影响规律如下：在给定参数变化范围内，随着进给比的增大，起皱程度呈现逐渐增大的趋势；而随着芯模转速的增大，起皱程度逐渐降低；随着旋压温度的升高，起皱程度呈现先减小后增大的趋势；在一定范围内，坯料直径对起皱的影响不明显，当增大到一定程度时，起皱程度明显增大。

（3）进给比、芯模转速和旋压温度 3 种工艺参数对壁厚减薄量和起皱程度的影响规律均呈现相反的变化趋势，即随着以上参数的变化，壁厚减薄量和起皱程度一个随之增加，另一个随之减小，因此这 3 个参数应该选取实验范围内的中间值。而坯料直径对壁厚减薄量和起皱程度的影响是一致的，应该取较小值有利于提升成形质量。综合考虑壁厚减薄量和起皱程度，优选的旋压参数组合为：进给比 2 mm·r^{-1}，芯模转速 80 r·min^{-1}，旋压温度 850 ℃，坯料直径为 $\Phi520$ mm。

参考文献：

[1]　国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告（2011—2020）[M]. 北京：科学出版社，2010.
Ministry of Engineering and Materials Science, National Natural Science Foundation of China. Development strategy report of mechanical engineering discipline (2011—2020) [M]. Beijing: Science Press, 2010.

[2]　WEN D X, LIN Y C, LI H B, et al. Hot deformation behavior and processing map of a typical Ni-based superalloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 591: 183-192.

[3]　MUSIC O, ALLWOOD J M, KAWAI K. A review of the mechanics of metal spinning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (1): 3-23.

[4]　ZHAN M, GAO P F. The conventional spinning of sheet metals for fabrication of metallic parts and structures-Science direct [J]. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2022, 4: 197-213.

[5]　杨合，詹梅，李甜，等. 铝合金大型复杂薄壁壳体旋压研究进展 [J]. 中国有色金属学报，2011，21 (10)：2534-2550.

YANG He, ZHAN Mei, LI Tian, et al. Advances in spinning of aluminum alloy large-sized complicated thin-walled shells [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21 (10): 2534-2550.

[6] WANG L, LONG H. A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness variation in conventional metal spinning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (12): 2140-2151.

[7] WATSON M, LONG H, LU B. Investigation of wrinkling failure mechanics in metal spinning by Box-Behnken design of experiments using finite element method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78: 981-995.

[8] 马飞. 工艺和材料参数对多道次普旋成形影响规律的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
MA Fei. Research on the effect of process and material parameters on multi-pass conventional spinning [D]. Xi′an: Northwestern Polytechnical University, 2005.

[9] 王雨, 束学道, 田端阳, 等. 工艺参数对薄壁锥形旋压件凸缘平直度的影响 [J]. 机械科学与技术, 2017, 36 (7): 1068-1072.
WANG Yu, SHU Xuedao, TIAN Duanyang, et al. Influence of process parameters on flange flatness of conical spun parts with thin wall [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineerin, 2017, 36 (7): 1068-1072.

[10] 凌泽宇, 肖刚锋, 夏琴香, 等. 镍基高温合金锥筒形件拉深旋压成形机理研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 100-105.
LING Zeyu, XIAO Gangfeng, XIA Qinxiang, et al. Research on deep drawing spinning forming mechanism of conical-cylindrical part of Ni-based superalloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 100-105.

[11] 刘庭耀, 赖宇, 付建辉, 等. GH3128 合金的高温流变行为与组织演变规律 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (6): 141-148.
LUI Tingyao, LAI Yu, FU Jianhui, et al. High temperature rheological behavior and microstructure evolution of GH3128 alloy [J]. Heat Treatment of Metal, 2020, 45 (6): 141-148.

[12] 李虎, 詹梅, 杨合, 等. 钛合金薄壁壳体强旋热力耦合有限元分析 [J]. 机械工程学报, 2008, 44 (6): 188-193.
LI Hu, ZHAN Mei, YANG He, et al. Coupled thermal-mechanical FEM analysis of power spinning of titanium alloy thin-walled shell [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44 (6): 188-193.

[13] 詹梅, 李甜, 王巧玲, 等. 热剪切旋压过程中芯模对零件形貌和壁厚分布的影响 [J]. 西北工业大学学报, 2013, 31 (3): 491-497.
ZHAN Mei, LI Tian, WANG Qiaoling, et al. Effect of mandral on hot shear spinning of titanium alloy [J]. Journal of Northwest Polytechnical University, 2013, 31 (3): 491-497.

[14] LYU W, ZHAN M, GAO P F, et al. Improvement of rib-grid structure of thin-walled tube with helical grid-stiffened ribs based on the multi-mode filling behaviors in flow forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296: 117167

[15] 《中国航空材料手册》委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
China Aviation Materials Manual Committee. China aviation materials manual [M]. Beijing: China Standards Press, 2002.

[16] WEI Z C, LI W D, WAN M, et al. Influence of roller-trace on multi-pass conventional spinning process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 7 (3): 108-112.

[17] CHEN S W, GAO P F, ZHAN M, et al. Determination of formability considering wrinkling defect in first-pass conventional spinning with linear roller path [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 44-55.

[18] GAO P F, YAN X G, LI F G, et al. Deformation mode and wall thickness variation in conventional spinning of metal sheets [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2022, 173: 103846.

[19] WONG C C, DEAN T A, LIN J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43 (14): 1419-1435.

[20] CHEN S W, GAO P F, ZHAN M, et al. Determination of formability considering wrinkling defect in first-pass conventional spinning with linear roller path [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 256: 44-55.

[21] WANG Y D, LI H W, GAO P F, et al. A method based on circumferential strain distribution for roller path design in conventional spinning of thin-walled conical part with curved surface [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119: 4509-4518.