文章编号: 1004-0609(2012)12-3456-06

工艺参数对镍基合金薄壁筒旋压稳定性的影响

张怀亮^{1,2}, 邹佰文², 肖 雷², 周 胜², 邓 锐²

(1. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室,长沙 410083;2. 中南大学 机电工程学院,长沙 410083)

摘 要:为实现径厚比达1400的镍基合金薄壁筒减薄旋压,研究工艺参数对旋压稳定性的影响,建立超薄壁大径厚比筒形件旋压的数值仿真模型,分析主轴转速和旋轮进给速度等工艺参数对旋压变形稳定性的影响规律和不同工艺参数下金属材料的流变规律,结合数值模拟的结论旋压出径厚比达1400的筒形件。结果表明:当主轴转速为160r/min、旋轮进给速度为40mm/min、旋轮圆角半径为6mm,减薄率为30%、工模间隙率为5%时,旋压过程中工件内壁将出现一个均匀的锁模环,加载区局部材料在锁模环的约束下发生定向流变,使超薄壁筒形件在旋压过程中保持足够的稳定性。

关键词:减薄旋压;锁模环;大径厚比;镍基合金 中图分类号:TH161.14 文献标志码:A

Effects of process parameters on spinning stability of nickel-based alloy thin-walled tube

ZHANG Huai-liang^{1, 2}, ZOU Bai-wen², XIAO Lei², ZHOU Sheng², DENG Rui²

(1. State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effects of process parameters on the stability of spinning were studied to achieve the power spinning of nickel-based alloy thin-walled tube with diameter-thickness ratio of 1 400. The numerical simulation model of the spinning of extra-thin-walled tube with high diameter-thickness ratio was established, the effects of process parameters such as the spindle speed and the spin roller feed rate, on the spinning deformation stability were analyzed. The rheological regulation of the metal material was discussed. A tube with diameter-thickness ratio up to 1 400 was spun with the conclusion of numerical simulation. The results show that, with spindle speed of 160 r/min, spin roller feed rate of 40 mm/min, spin roller fillet radius of 6 mm, thinning rate of 30%, clearance ratio of 5%, a uniform mold-lock ring is generated on the inner wall of the tube in the spinning process. The directional flow and deformation of local materials in load restriction maintains the stability of the extra-thin-walled tube in the spinning process.

Key words: power spinning; mold-lock ring; high diameter-thickness ratio; nickel-based alloy

第三代核主泵定子屏蔽套的尺寸要求为 d 560 mm×2 000 mm×0.4 mm, 径厚比达到了 1 400。其中 直径精度为±0.078 mm, 壁厚精度为±0.05 mm, 属于

超薄壁大径厚比筒类零件,是核主泵自主制造的关键 技术之一,其尺寸精度、力学性能和耐腐蚀性能直接 影响到核电机组的工作效率与反应堆的安全^[1]。高强

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724300, 2013CB035402)

收稿日期: 2012-03-26; 修订日期: 2012-06-28

通信作者: 张怀亮,教授,博士; 电话: 0731-88876810; E-mail: zhl2001@csu.edu.cn

度、超薄壁、大直径、大长度的特点对其加工制造提 出了苛刻的要求^[2]。旋压技术是实现这类零件成形的 一种先进制造技术,已广泛应用于航空航天、国防工 业、石油化工等领域,成为精密塑性成形的重要发展 方向^[3-5]。

2001年,有色金属研究总院采用离心铸造镍基合 金坯料, 经机械加工后, 采用变薄旋压工艺成形了 d 220 mm×1 600 mm×0.5 mm 的简形件, 旋压径厚比 达到440,是当时国内旋压的最高水平^[6]。前苏联科学 家采用旋压与拉伸组合成形技术,旋压出 d 400 mm×2 000 mm×0.4 mm 的不锈钢零件, 旋压径厚比 达到1000,是国外报道的最高纪录^[7]。围绕着极限径 厚比的问题,国内外有关学者做了多方面的研究,认 为旋压过程变形失稳是径厚比无法逾越1 000 的关键 原因^[8]。筒形件变薄旋压时,旋轮局部加载,旋轮与 坯料接触区产生塑性变形,旋轮不断改变加载位置, 坏料连续塑性变形,在稳定变形时,变形区金属受周 围金属约束发生有序流变^[9-12],但是对于超薄壁大径 厚比筒形件来说,由于工件的高柔性,很难形成有序 流变所需要的约束边界,旋压过程很容易出现变形失 稳, 使旋压件出现一定程度的缺陷[13-15]。

因此,为了实现对大径厚比回转零件的极限减薄 旋压,径厚比达到1400,并且使制造的屏蔽套质量和 尺寸精度方面能满足第三代核主泵使役要求,必须对 旋压过程的变形稳定性进行系统研究,探求突破旋压 减薄加工极限的有效工艺参数组合以及有效工艺参数 组合下旋压过程材料的流变规律。本文作者以实验和 数值模拟相结合的方式系统地分析了不同工艺参数对 旋压稳定性的影响,探讨旋压过程中金属材料的流变 规律,并基于模拟分析结果,成功旋压出径厚比达 1400、质量和精度满足要求的镍基合金薄壁筒,为大 径厚比、高精度、高强度的薄壁筒形件旋压加工提供 理论依据。

1 小直径薄壁筒旋压实验

为探索镍基合金薄壁筒旋压稳定性的影响因素, 进行小直径薄壁筒旋压实验。

将 C-276 板材利用氩弧焊焊接成壁厚 2 mm、直径 100 mm 的圆筒毛坯,对毛坯特别是焊缝部位进行探伤检查,确定没有微裂纹、空洞或夹杂,毛坯表面打磨毛刺,清洗表面斑痕、加工印记、污垢、锈迹,检查毛坯筒的尺寸,确定没有发生扭曲。在卧式数控

旋压实验台上经4道次旋压减薄到0.4mm,累计旋压 减薄率达80%,并进行多组旋压试验。

实验发现: 主轴转速、旋轮进给速度、旋轮圆角 半径、减薄率、工模间隙率等工艺参数选择不当时, 薄壁筒旋压变形过程失稳,旋压件的表面会出现各种 缺陷,如起皮、螺旋状波纹、鼓包、断裂等; 镍基合 金薄壁筒在旋压过程变形稳定的时候,旋轮底部靠前 的工件内壁出现一个宽度约5cm左右、与芯模紧密接 触的锁模环,如图1所示。为保证薄壁筒形件在旋压 过程中的稳定性,需分析各工艺参数对薄壁筒旋压稳 定性的影响,研究锁模环的形成机制及其对旋压稳定 性的影响,考虑到时间及成本限制,基于有限元理论 建立旋压数值模型并对模拟结果进行分析。



图 1 旋压筒形件上的锁模环 Fig. 1 Mold-lock ring of spinning tube

2 旋压数值模型的建立

基于有限元软件 MSC.Marc 建立薄壁筒旋压仿真数值模型,为了简化计算,对模型做以下假设:1)材料采用各向同性的模型且均质;2)忽略变形中的热效应影响;3)忽略重力和惯性力的影响。

采用八节点六面体单元对薄壁筒毛坯模型进行网 格划分;将旋轮和芯模设置为刚性体,薄壁筒毛坯设 置为弹性体,由于采用反旋方式,故将未成形端节点 固定;工件与芯模间的摩擦和旋轮与工件间的摩擦均 选用修正后的 Coulomb 摩擦模型。

薄壁筒形件所用材料为镍基合金 C-276,根据材 料板料的拉伸试验,其真实应力一应变曲线如图 2 所 示,其他力学性能如表 1 所列。

改变主轴转速、旋轮进给速度等工艺参数进行多 次模拟仿真,对仿真结果进行分析,研究各工艺参数 对旋压变形稳定性的影响。



Fig. 2 True stress—strain curve of C-276

Table 1 Mechanical properties of C-276

Elastic modulus/ MPa	Poisson ratio	Density/ (kg·m ⁻³)	Limit of yielding/ MPa	Tangent modulus/ MPa
205 000	0.307	8 890	343.5	79 000

3 仿真结果与分析

薄壁筒旋压仿真中发现,旋轮正下方加载区域的 单元由于受到径向载荷的作用而出现贴膜现象,加载 区两端的材料单元受到轴向和切向载荷的作用向外鼓 出,当鼓形高度较大时,轮前的力流传递经过鼓形区 发生力流畸变,切向挤压应力部分转化为径向剪切应 力,等效变形应力增加并发生塑性变形,导致塑性鼓 形,当鼓起高度超过极限值时,鼓形区局部屈服,旋 轮辗过鼓形区,旋压过程出现变形失稳现象,最终导 致旋压件内外表面都出现螺旋形波纹,严重鼓形时会 使材料折叠、撕裂,工件报废。可见,鼓形高度是旋 压变形稳定性的重要指标,因而,研究了旋轮进给速 度等工艺参数对鼓形高度的影响,各工艺参数的研究 范围根据小直径薄壁筒旋压实验及经验确定。

3.1 旋轮进给速度对旋压稳定性的影响

图 3 所示为旋轮圆角半径为 6 mm、主轴转速为 160 r/min、工模间隙率为 5%、减薄率为 30%、毛坯 直径为 565 mm 的情况下旋轮进给速度对鼓形高度的 影响规律。从图 3 可以看出,鼓形高度随着旋轮进给 速度的增加而明显增高,当旋轮进给速度达到 80 mm/min 时,鼓形高度达到 0.25 mm,比旋轮进给速度为 40 mm/min 的时候增加 200%左右。

旋压成形时,旋轮与工件之间的相对运动为螺旋 线,因此,旋轮与工件接触的变形区轨迹是一个螺旋 带,而旋轮进给速度可视为螺旋带的螺距。随着旋轮 进给速度的增加,螺旋带与已加工区域重合的部分减 少,而与未加工区域重合的部分则增加,使得参与变 形材料的体积增加,相应的旋压力也随着增加。相比 之下,径向和切向旋压力的增长比轴向旋压力快,材 料的隆起现象也就越明显。实际加工中,在保证材料 稳定变形的前提下,可适当提高旋轮进给速度,以提 高生产效率。



图 3 旋轮进给速度对鼓形高度的影响



3.2 旋轮圆角半径对旋压稳定性的影响

图 4 所示为旋轮进给速度为 40 mm/min、主轴转 速为 160 r/min、工模间隙率为 5%、减薄率为 30%、 毛坯直径为 565 mm 的情况下旋轮圆角半径对鼓形高



图 4 旋轮圆角半径对鼓形高度的影响



度的影响规律。从图 4 中可以看出,随着旋轮圆角半径的增大,工件的鼓形高度呈减小趋势,当旋轮圆角半径为 6 mm 时,鼓形高度最小。如果旋轮圆角半径继续增大,旋轮与工件接触面积增大,旋压力和工件扩径量增大,鼓形高度反而增高。这说明对于薄壁体旋压来说,旋轮圆角半径并非越大越好,而是存在一个确定的范围,使鼓形高度较小,旋压稳定性较好。

3.3 减薄率对旋压稳定性的影响

图 5 所示为旋轮进给速度为 40 mm/min、主轴转 速为 160 r/min、工模间隙率为 5%、旋轮圆角半径为 6 mm,毛坯直径为 565 mm 的情况下减薄率对鼓形高度 的影响规律。由图 5 可以看出,随着减薄率的增加, 材料径向流动趋势增大,对工件与芯模间隙的填充更 加充分,使得材料鼓形高度呈减小趋势。当减薄率达 到 30%后,鼓形高度的增长趋势出现逆转。这是由于 随着压下量的增加,不仅参与变形的材料量有所增加, 旋压力也随着增大,过大的旋压力使得材料很容易出 现鼓形现象。当减薄率超过 40%后,鼓形高度急剧增 加,可见 30%左右是最适合稳定变形的减薄率值。



Fig. 5 Effects of thinning rate on drum height

3.4 工模间隙率对鼓形现象的影响规律

图 6 所示为旋轮圆角半径为 6 mm、旋轮进给速 度为 40 mm/min、毛坯直径为 565 mm、主轴转速为 160 mm/min、减薄率为 30%的情况下工模间隙率对鼓 形高度的影响规律。由图 6 可以看出,当工模间隙率 在 0~10%时,鼓形高度在 0.1 mm 以内,鼓形高度变 化趋势平缓;当间隙率超过 10%以后,鼓形高度随间 隙率基本呈正比增加;当间隙率达到 30%时,鼓形高 度达到了 0.25 mm 以上。因此,在不影响装模的情况 下,要实现大径厚比超薄壁筒形件的稳定旋压,较理 想的工模间隙率应该是在 5%~10%之间。



Fig. 6 Effects of clearance rate on drum height

3.5 主轴转速对旋压稳定性的影响

图 7 所示为旋轮圆角半径为 6 mm、旋轮进给速 度为 40 mm/min、毛坯直径为 565 mm、工模间隙率为 5%、减薄率为 30%的情况下主轴转速对鼓形高度的影 响规律。从图 7 中可以看出,主轴转速在 160r/min 时, 鼓形高度较小,转速过大或过小会增加鼓形高度。且 转速过高时易引起机床振动,变形热量增加,特别对 于大口径筒形件,周向线速度会变很高,扩径明显且 圆度降低,容易使材料与芯模、旋轮粘连、烧伤。转 速过低时,为保持一定的进给率需用低进给率配合, 机床易出现爬行。



图 7 主轴转速对鼓形高度的影响

Fig. 7 Effects of spindle speed on drum height

3.6 锁模环的形成机理及作用机制

根据上述分析,选取使旋压过程鼓形高度较小的 工艺参数进行旋压仿真,模拟过程中发现,旋轮底部 靠前的工件内壁出现了一个宽度约5cm左右、与芯模 紧密接触的锁模环(见图 8)。与小直径薄壁筒旋压实验 结果吻合,也说明了数值模型的正确性。

超薄壁筒体起旋后,在载荷作用下,下层材料向 后流动的速度大于上层,使得起旋端起翘出现喇叭口, 旋轮的前进侧内径缩径贴模,外径材料隆起堆积。随 着旋压过程的进行,未成形区下层材料向内侧流动, 产生材料的内填缩径效应,材料连续内填,挤入工件 与芯模之间,其结果使旋轮底部稍靠前的工件内侧形 成一个与芯模紧密接触的均匀锁模环。

均匀的锁模环对薄壁件旋压稳定性有重要的影 响,加载区局部材料在周围材料的约束下发生定向流 变,即周围约束与局部变形协调。当超薄壁体不能对 局部材料的变形方向构成有效约束时,局部材料的流 变方向就会紊乱,破坏原有的约束边界。而锁模环实 际上对局部材料的流动形成了一种约束,使材料能够 有序的流动,从而使超薄壁筒形件在旋压过程中保持 足够的稳定性。



图 8 模拟结果中的锁模环示意图 Fig. 8 Mold-lock ring in simulated result

4 实验验证

4.1 材料与设备

实验材料:	镍基合金 C-276;
实验设备:	SY-4强力旋压机;
工艺参数 :	根据数值模拟结果选定(见表 2)。

表2 工艺参数

 Table 2
 Process parameters

Diameter of	Spin roller	Spindle	Spinning	Spin roller
core mould,	fillet radius,	speed,	path,	feed rate,
<i>d</i> /mm	<i>r</i> /mm	$v/(r \cdot min^{-1})$	т	$f/(\text{mm·min}^{-1})$
557	6	180	4	40

试件制作:采用厚度为2 mm的C-276 板材,用 氩弧焊焊接成外径为561.5 mm、长度为300 mm的圆 筒,修磨焊缝。

4.2 实验结果与分析

在上述条件下进行大径厚比超薄壁筒形件旋压实验,成功旋压出径厚比达1 400 的镍基合金筒形件,旋压完后工件表面光滑无裂纹及起皮现象,但存在明显旋压纹路,只在终止端位置存在微螺旋状鼓起,达到实验预期要求。对减薄旋压后的焊缝与基体进行 X 射线扫描探伤,结果未发现宏微缺陷,且用超声波测厚仪测量壁厚,测量结果为旋压件壁厚误差小于±0.03 mm,直径误差为±0.1 mm,满足屏蔽泵使役要求。

5 结论

 主轴转速、旋轮进给速度等工艺参数通过改变 鼓形高度影响旋压过程中薄壁筒的变形稳定性,随着 主轴转速、旋轮圆角半径、减薄率的提高,鼓形高度 呈现先减小后增大的趋势,存在确定的参数范围,鼓 形高度为极小值;随着旋轮进给速度的增加,鼓形高 度明显增大;工模间隙率在5%~10%之间时,鼓形高 度较小。

2) 均匀锁模环的出现是薄壁筒形件稳定旋压过程中的一种普遍现象,对保持旋压过程的稳定性有重要意义。薄壁筒旋压件未成形区下层材料的内填缩径效应使工件内壁形成一个与芯模紧密接触的均匀锁模环,均匀的锁模环约束加载区局部材料,使其定向有序地流动,保证旋压变形过程的稳定性。

REFERENCES

[1] 关 锐, 高永军. AP1000 反应堆主泵屏蔽套制造工艺浅析[J].
 中国核电, 2008, 1(1): 49-50.
 GUAN Rui, GAO Yong-jun. The brief analysis of manufacturing

process for the AP1000 main pump reactor shielding[J]. China's Nuclear Power, 2008, 1(1): 49–50.

- [2] 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.
- BAI Qian, YANG He, ZHAN Mei. Finite element modeling of power spinning of thin-walled shell with hoop inner rib[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(1): 6–13.
- [4] MA F, YANG H, ZHAN M. Plastic deformation behaviors and

their application in power spinning process of conical parts with transverse inner rib[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 180–189.

- [5] 雷玉成, 汪敏建, 贾志宏. 金属材料成型原理[M]. 北京:化学 工业出版社, 2006: 75-92.
 LEI Yu-cheng, WANG Min-jian, JIA Zhi-hong. The principle of material forming[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 75-92.
- [6] 赵云豪,张顺福.国内旋压技术发展的回顾与展望[C]//全国 锻压学术年会论文集.厦门:中国机械工程学院,1999:
 419-421.

ZHAO Yun-hao, ZHANG Fu-shun. A review and prospect: development of spinning technology in China[C]//The Seventh Academic Conference on Spinning. Xiamen: Chinese Mechanical Engineering Society, 1999: 419–421.

- [7] PRAKASH R, SINGHAL R P. Shear spinning technology for manufacture of long thin wall tubes of small bore[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 54(1/4): 186–192.
- [8] WONG C C, DEAN T A, LIN J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(14): 1419–1435.
- [9] JIANG Shu-yong, ZHENG Yu-feng, REN Zheng-yi, LI Chun-feng. Multi-pass spinning of thin-walled tubular part with longitudinal inner ribs[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 215–221.

- [10] LIN W, HUI L. Investigation of material deformation in multi-pass conventional metal spinning[J]. Materials and Design, 2011, 32(5): 2981–2899.
- [11] 张怀亮,邓 锐,李新和. 工模间隙率对大径厚比筒形件旋 压稳定性的影响研究[J]. 制造技术与机床, 2011(1): 97-100. ZHANG Huai-liang, DENG Rui, LI Xin-he. Study on the influence of clearance ratio on the spinning stability of cylindrical workpiece with high diameter/thickness ratio[J]. Manufacturing and Machine Tools, 2011(1): 97-100.
- [12] SUNGSOO N, HYUNGWON Y, LIVIU L. Effect of taper ratio on vibration and stability of a composite thin-walled spinning shaft[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(3): 362–371.
- [13] SHAN D B, YANG G P, XU W C. Deformation history and the resultant microstructure and texture in backward tube spinning of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(17): 5713–5719.
- [14] XIA Q X, CHENG X Q, HU Y, RUAN F. Finite element simulation and experimental investigation on the forming forces of 3D non-axisymmetrical tubes spinning[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48(7): 726–735.
- [15] MA Fei, YANG He, ZHAN Mei. Effects of material properties on power spinning process of parts with transverse inner rib[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8): 1476–1481.

(编辑 李艳红)