

汽车镁合金轮毂等温挤旋成型工艺优化与试验*

马春生¹ 张治民² 郭玉明³

(1. 中北大学机械能与自动化学院, 太原 030051; 2. 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051;
3. 山西农业大学工学院, 太谷 030801)

【摘要】 以汽车镁合金轮毂为研究对象,根据等温挤旋成型新工艺要求,自行设计了挤旋成型装备,利用有限元方法对轮毂在径向上产生的连续局部塑性变形过程进行数值模拟,分析变形规律,并通过正交试验优化工艺参数。挤旋成型试验结果表明,新工艺明显增加了轮毂的连续变形区尺寸,变形路径合理,显著提高了成型效率与加工精度。

关键词: 汽车 镁合金轮毂 挤旋成型 正交试验 参数优化

中图分类号: TG376.2; TG146.2⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0223-07

Technology of Magnesium Alloy Car's Wheel Hub on Spinning Shaping

Ma Chunsheng¹ Zhang Zhimin² Guo Yuming³

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, North University of China, Taiyuan 030051, China
2. College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China
3. College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract

Take magnesium alloy car's wheel hub as the investigated subject, and based on the advanced technology of magnesium alloy car's isothermal spinning shaping, the equipment of spinning shaping was developed. The continuous and partial plastic deformation process of wheel hub radials were numerically simulated through finite element method, and deformation regulations were also analyzed and process parameters were optimized by orthogonal tests. The results of the experiments showed that this new technology significantly increased the size of continuous deformation zone, made deformation paths reasonable, and greatly improved shaping efficiency and machining accuracy.

Key words Vehicle, Magnesium alloy wheel hub, Spinning shaping, Orthogonal test, Optimize of parameter

引言

采用镁合金制造汽车零部件,不仅能够减轻汽车自重、提高燃料利用率、减少环境污染,而且可以改善 NVH(噪声、振动、冲击)指标,是汽车产业发展的必然趋势^[1-2]。

但到目前为止,镁合金之所以没有像铝合金等其他金属那样得到广泛的应用,主要是受镁合金材

料本身成型特性影响。因此通过分析镁合金材料特点,提出等温挤旋成型新工艺。

1 等温挤旋成型新工艺

1.1 镁合金轮毂塑性成型技术

目前汽车上使用的大部分镁合金构件都是采用铸造成型方式,大致有挤压铸造、金属型铸造、低压模铸造、半固态铸造等。但由于铸件的组织不够致

收稿日期: 2011-07-22 修回日期: 2011-10-25

* 国家自然科学基金资助项目(50735005)

作者简介: 马春生,博士生,主要从事机械工程、机械设计与理论研究,E-mail: sxtymcs@nuc.edu.cn

通讯作者: 张治民,教授,博士生导师,主要从事机械设计和精密成形研究,E-mail: rivermcs@163.com

密并存在缩松、缩孔、废品率高及力学性能差等缺陷,影响了产品性能,难以满足承力构件的强度要求。如 AZ91 镁合金铸造零件,其抗拉强度仅为 210 ~ 230 MPa,延伸率仅为 5%,无法满足汽车轮毂等承载或受力构件使用要求,因而阻碍了镁合金的推广应用^[3]。

国际镁协会指出,虽然铸造镁合金目前占主导地位,但经过挤压、锻造、轧制等塑性变形加工工艺加工的镁合金产品具有更高的强度、延展性和更多样化的性能,该协会制定的镁合金开发与应用的 3 个阶段中,长期的目标就是要开发变形镁合金的新材料和新工艺^[4]。因此镁合金塑性加工技术的发展对于镁合金的大规模使用具有决定性的作用。

由于镁合金的室温塑性很低,因此在低温下变形时容易产生裂纹等缺陷。解决这个问题的主要方法是选择最佳的变形温度、变形速率及变形程度。

本文提出的等温挤旋成型技术是综合了旋压、挤压、拉伸、弯曲和滚压等工艺特点的少无切削的先进塑性加工工艺,是一种连续的局部塑性变型过程。由于挤旋轮与轮毂的接触状态由点接触逐渐变成线接触,明显增加了金属变形区尺寸,使变形路径更趋

合理,显著提高了成形效率与加工精度,并降低生产成本^[5]。

轮毂在恒温油槽中加工,变形温度的波动幅度减小,缓解了金属内部由于变形不均匀而引起的组织性能的差异,可显著提高镁合金的塑性,降低成型时的变形抗力,减小成型后残余应力,提高了材料利用率以及工件的综合性能。

1.2 挤旋成型工艺

根据研究^[6],试验拟采用等温挤压多工步成型工艺,工序如图 1 所示。前 4 步工序通过挤压成型可以完成,但第 5 步翻边工序中,如图 2 所示,轮毂属于中间小、两头大的盘盖类零件,要想通过挤压成型达到翻边比较困难。一方面在挤压成型时,金属向型腔流动过程中,会产生折叠现象,严重破坏了工件的质量,并且在靠近凸模圆角 A 处的地方,金属几乎没有流动,故在靠近凸模圆角处的地方会出现缩颈现象,其原因在于凸模圆角半径过小,工件的变形量过大,产生了缺陷。另一方面,由于轮毂形状特点是中间小两头大,故模具的设计需要分模设计,以便于脱模,但这样给模具设计造成困难,并且分型面不易选择,对轮毂的成型精度产生较大影响。因此第 5 步翻边工序采用挤旋成型工艺。

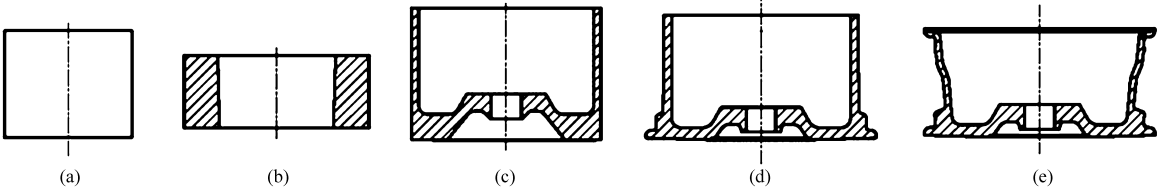


图 1 轮毂挤旋成型工艺路线

Fig. 1 Process route on wheel spin extrusion molding

(a) 下料镦粗 (b) 冲孔 (c) 挤压成型 (d) 底部镦挤预成型 (e) 挤旋成型

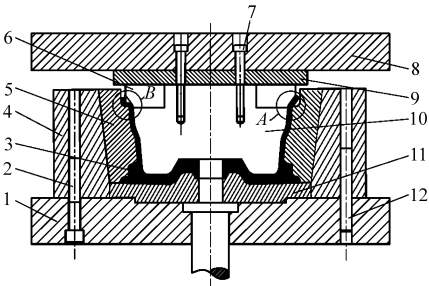


图 2 翻边成型模具装配示意图

Fig. 2 Assembly diagram for flanging forming mold

1. 下模板 2、7. 螺钉 3. 坯料 4. 凹模套 5. 分体凹模 6. 分体凸模 8. 上模板 9. 凸模垫板 10. 凸模 11. 下垫板 12. 销

挤旋成型装置如图 3 所示,首先将所述的预制毛坯置于芯模上对中,通过压板对预制毛坯进行扩口;然后,再使预制毛坯与芯模一起转动,并通过带有与轮毂外轮廓相同形状的挤旋轮沿径向运动,对

预制毛坯进行挤旋,使预制毛坯在径向上产生连续的局部塑性变形,最终成型出所需镁合金轮毂外形。此装置解决了轮毂等盘盖类零件的成型与脱模问题,具有等温挤旋、制品尺寸精度高、生产效率高等优点。

1.3 挤旋成型装备总体结构

根据新的工艺要求,设计了挤旋成型装置,如图 3 所示。选用 1250T 型多向成型液压机作为试验平台,设计的等温挤旋成型装置安装在液压机平台上进行试验。液压机具有多向成型功能,可以实现油缸的横向和纵向进给。采用液压机水平油缸驱动挤旋轮横向进给,通过液压机主油缸实现纵向进给,使结构大为简化。

成型装置首先通过油泵将油经输油管泵到加热槽中加热,电动机带动搅拌器搅动油流,油流充分混合使油温达到均匀一致,然后通过油路进入工作区,

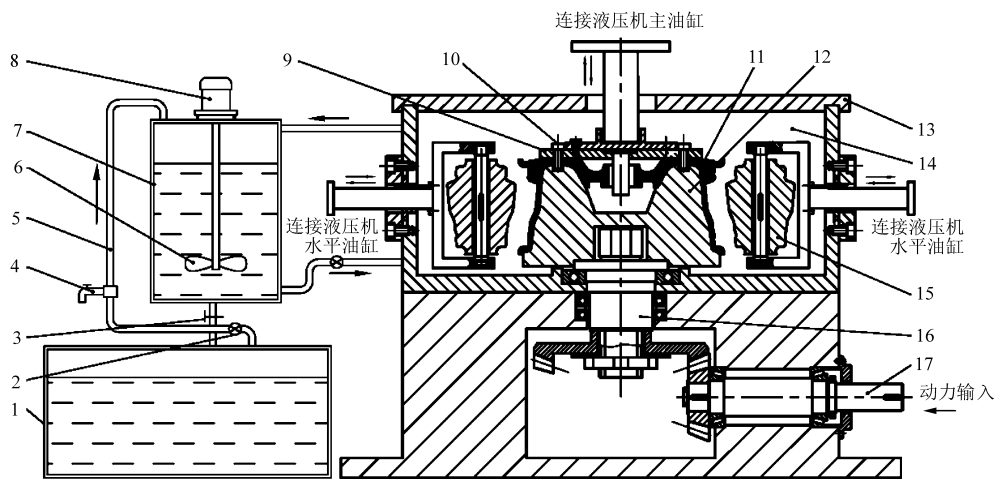


图 3 等温挤旋成型装置示意图

Fig. 3 Isothermal extrusion-spinning device

1. 储油箱 2. 油泵 3. 阀门 4. 放液阀 5. 输油管 6. 搅拌机 7. 加热槽 8. 电动机 9. 压板 10. 止动螺钉 11. 工件 12. 芯模 13. 顶端面 14. 油槽(工作区) 15. 挤旋轮 16. 主轴 17. 输入轴

最后经过油路流回加热槽,实现供油循环。油流在工作区中通过控制系统达到合适的流速,以保证它在工作区中温度均匀且稳定不变。

当恒温槽温度达到要求后,利用液压机主油缸带动轮毂进入油槽,将轮毂置于芯模上,实现轮毂和芯模的对中,使用平面加压装置对预制轮毂轴向移动进行扩口,然后启动电动机带动主轴按照合理的参数旋转,由于主轴连接芯模,芯模带动轮毂旋转,此时通过液压机的水平油缸驱动挤旋轮横向进给(进给速度配合主轴旋转速度,挤旋轮的外形与轮毂最终外轮廓形状相同),实现对轮毂的挤旋成型工艺。在轮毂加工过程中挤旋轮与轮毂的接触状态由点接触逐渐变成线接触,使轮毂在径向上产生连续的局部塑性变形,最终成型出所需镁合金车轮外轮廓。

2 数值模拟

作为一种模拟金属塑性成型过程的有效方法,有限元法已经成为分析成型过程的主要手段,许多专家学者正在运用有限元数值模拟技术对金属成型过程进行研究和分析^[7-8]。

2.1 挤旋毛坯设计

轮毂的前 4 步工序使用挤压成型,其成型技术已经达到生产要求。对于轮毂毛坯的体积可以按照变形前后体积不变的假设来计算,即毛坯的体积等于挤压完工后挤压件的体积。为了数值模拟方便,选择 15 英寸轿车轮毂作为研究对象,轮毂主要几何尺寸如图 4 所示。挤旋成型的坯料如图 1d 所示,其底部尺寸与要成型尺寸一致,挤旋主要加工轮辋和轮毂的翻边部分。

方案 1:挤压成型工艺。根据成型出的最终挤

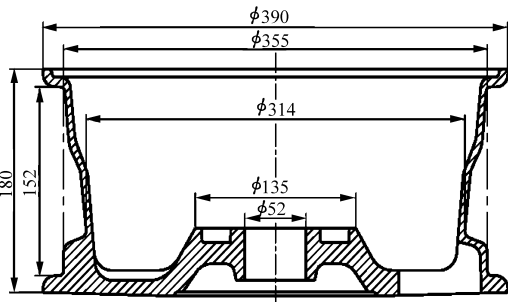


图 4 15 英寸轿车轮毂尺寸图

Fig. 4 15 inch car wheels of the geometric dimensions

压件形状,再加上机械加工余量,毛坯总体积约 $7 \times 10^6 \text{ mm}^3$,总质量 12.67 kg,耗损下料 13 kg。

方案 2:挤旋成型工艺。根据挤旋成型出最终轮毂的体积 $5.6 \times 10^6 \text{ mm}^3$,在冲孔过程中会产生冲孔连皮,产生的连皮体积与轮毂最终体积和为 $6.16 \times 10^6 \text{ mm}^3$,总质量 11.15 kg。

方案 2 选用材料比方案 1 减少 1.85 kg,提高了材料利用率。选择 AZ80 镁合金 $\Phi 230 \times 135$ 的棒料(密度 1.81 g/cm^3)为原始加工材料。

2.2 模型的建立

利用 Pro/E 建模软件分别建立挤旋轮、坯料、压板和芯模的三维模型,然后将这些文件分别导入 DEFORM 软件的前处理中,最后根据各模型之间的每一步初始相对位置关系进行组合,扩口后建立的有限元模型如图 5 所示。

网格大小的选取以保证精度前提下,尽量降低运算量为原则,同时能够准确反映零件的各个特征。为了节省模拟计算时间,对轮毂变形较大的部分采用局部细化,轮毂划分为 27 081 个节点,113 841 个单元,模型网格如图 6 所示。其中坯料定义为弹塑性体;挤旋轮、压板和芯模定义为刚体,不需要进行

网格划分和材料定义。

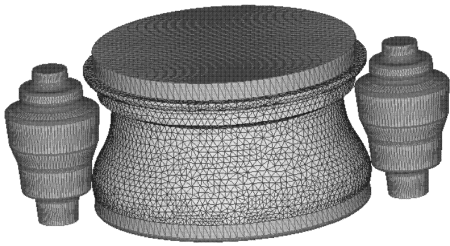


图5 轮毂网格划分示意图
Fig. 5 Wheel meshing

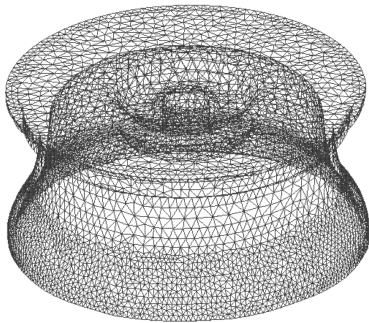


图6 挤旋成型工艺模型
Fig. 6 Extrusion molding process model

2.3 模拟和边界条件

实际挤旋成型工序的运动方式和过程在有限元分析中很难实现。为使挤旋过程模拟计算结果的准确,在建立的有限元模型中,采用相对运动的方式,假定轮毂、芯模和压板静止不动,挤旋轮在沿着轮毂旋转的同时自转,并作轴向进给运动,这样的模拟过程与实际挤旋成型过程是等同的。

试验采用 AZ80 镁合金,通过分析选择包含变形激活能 Q 和温度 T 的本构模型^[9]

$$\dot{\epsilon} = 1.1701 \times 10^{16} [\sinh(0.01\sigma)]^{8.8909} \cdot \exp(-2.015647 \times 10^5 / (RT))$$

其中 R 为气体常数(8.31 J/mol)。

确定挤旋稳定阶段行程为 18 mm,研究了坯料的应力、应变分布及变化规律。模拟选择参数:挤旋轮最初与坯料接触处的直径为 60 mm,进给比为 1 mm/r,主轴转速为 240 r/min,坯料壁厚为 10 mm,温度为 380℃,两个挤旋轮对称分布,直角坐标系下

接触区中, X 为径向, Y 为轴向, Z 为切向。

2.4 模拟结果分析

图 7 为轮毂加工过程中不同阶段的等效应力云图。由图可知,挤旋轮在成型过程中与轮毂的接触面积逐渐增加,应力作用区不仅局限于旋轮直接作用区域,还因其周围区域存在约束和被约束的关系,成型过程中增加了金属变形区范围,金属变形更加合理,提高了轮毂加工精度。

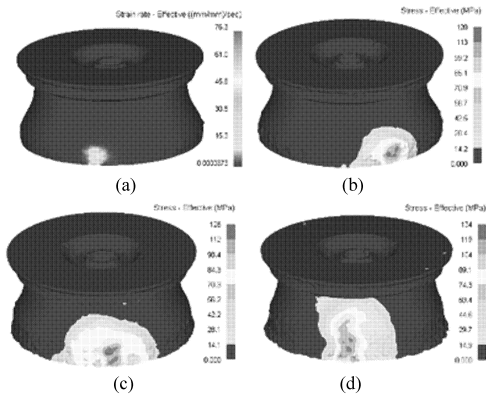


图7 不同阶段轮毂的等效应力云图

Fig. 7 Equivalent stress of the wheel in different stages

(a) 第 280 步 (b) 第 460 步 (c) 第 720 步 (d) 第 1 100 步

为了清楚地了解挤旋成型变形机理,分别在轮毂沿壁厚(X 径向方向)、纵向(Y 轴方向)和周边选取质点,如图 8 所示。轮毂在 800 步时各向应力分布曲线如图 9 所示。

由图 9 可以看出,沿轴向的三向应力变化趋势基本相同,其中接触区(P2 和 P3)为压应力,其他区域(P1、P4~P7)处于拉应力状态,在坯料与挤旋轮接触处压应力最大,并向周围快速降低;应力随壁厚的变化呈 V 字型,这是因为挤旋轮和芯模与轮毂接触受力,靠近壁厚中心的力传递减小。由于摩擦力的作用和金属流动最小阻力定律,内外壁的径向应力中间值最大,轴向应力的内外壁分别受到压应力和拉应力,使金属产生沿轴向的流动,会引起轮毂壁厚变化,应避免或抑制;在轮毂周边区域中,三向应力变化相同,由于轮毂与挤旋轮接触面积不断增加,挤旋轮的前面受到压应力,后面受到拉应力,所以应

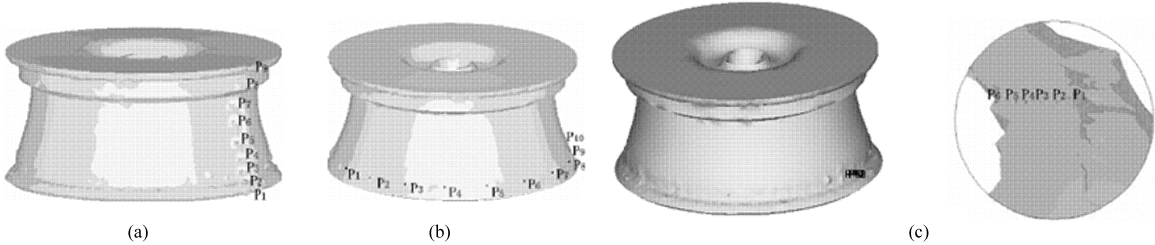


图8 轮毂取点示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the hub to take points

(a) 纵向表面取点 (b) 周向表面取点 (c) 壁厚方向取点

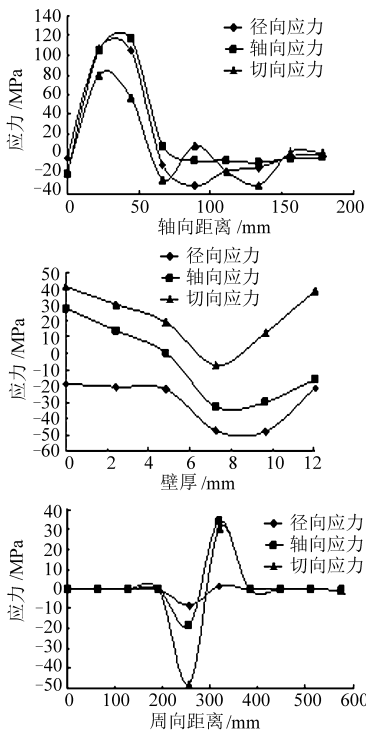


图 9 轮毂各向应力曲线

Fig. 9 Stress distribution of wheels

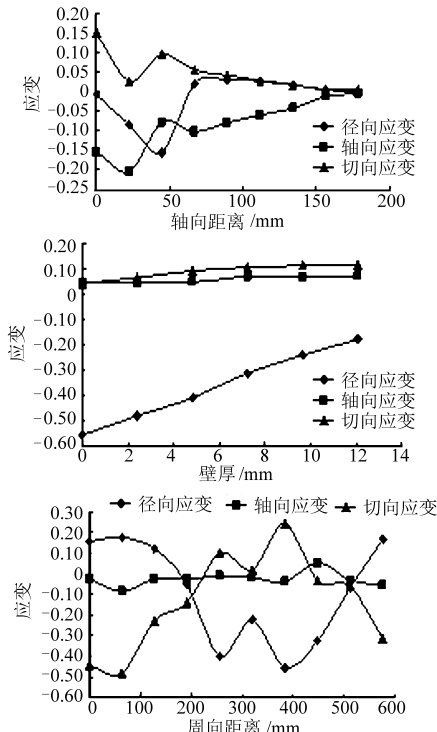


图 10 轮毂各向应变分布

Fig. 10 Strain distribution of wheels

力曲线中间有较大起伏,这会在挤旋轮前方产生金属堆积,如果堆积严重容易出现起皮现象^[10]。

由图 10 看出,随着加工的继续,金属在径向和轴向的流动受到更多约束,变形空间更小,因而基本为压缩变形,而切向约束较小,仍然以拉伸变形为主;轮毂在壁厚方向的径向应变以压缩变形为主,沿壁厚呈线性减小,而轴向和切向变形不大;由周向距离曲线图可以看出,曲线中间为接触变形区,变形范围逐步增加,径向应变以压缩变形为主,切向以拉伸变形为主,切向与径向变形基本反向对应。轴向变形以压缩变形为主,但变形很小。轮毂总体应变以压缩变形为主,这在增强了金属塑性的同时,提高了工件的力学性能。

挤旋成型中希望金属不要在 Y 和 Z 向发生相对运动,只有 X 向运动,完成轮毂成型,因此绘制了轮毂壁厚横向质点的 Y 方向坐标变化图,如图 11 所示。图中看到点 1~4 向轮毂上端运动,点 6 和点 7 向下运动,点 5 趋中。点 1~4 在 Y 方向的坐标变化趋势相同,但变化幅度不同,造成点 1~4 后半段曲线交织在一起,而点 6 和点 7 向相反方向变化,说明轮毂内外表面发生了相对移动。这是由于随着挤旋轮的进给,内表面逐步与芯模接触产生摩擦,由于芯模摩擦力的作用使轮毂内表面在 Y 向产生约束,在开始阶段阻止内表面移动,但随着成型的继续进行,芯模与轮毂接触面积增加,在芯模自身的形体特点作用下,使点 6 和点 7 向下运动。由此可知,挤旋成

型进行到后段,会造成轮毂内外表面移动,轮毂壁厚发生变化,并会出现起皮现象。这就需要优化工艺参数,提高轮毂成型质量。

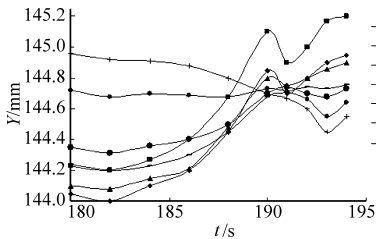


图 11 质点在 Y 方向坐标变化曲线

Fig. 11 Changes in Y direction of the particle coordinate

3 优化工艺参数

挤旋成型中影响产品质量和成型性的因素很多,而工艺参数对成型的影响机理复杂。通过正交试验和方差分析,研究各主要工艺参数对旋压力和工件成型质量的影响,以得到最优组合,用于指导生产^[11]。

如表 1 所示,选取温度、进给率(径向)、挤旋轮直径、主轴转速作为主要工艺参数,选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表,进行四因素四水平的正交试验。

试验得到挤旋力、等效应力和壁厚差的数据,对其进行方差分析。表 2 为轮毂等效应力方差分析数据。

表 2 表明,在减小等效应力上,因素 A 和 D 高度显著,因素 B 显著,因素 C 不显著。

表 1 因素水平表

Tab.1 Levels of the parameters

水平	温度 $A/^{\circ}\text{C}$	进给率 B	挤旋轮直径	主轴转速
			C/mm	$D/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$
1	250	0.5	60	60
2	330	1.0	90	120
3	380	1.5	120	240
4	430	2.5	160	360

采用综合平衡法,通过单指标分别独立分析,根据分析的结果进行综合平衡,充分考虑各项指标对试验的重要程度,结合材料的特性,在工艺参数的适当范围内,得到一组较优的工艺参数组合为:温度 380℃、进给率 1.5、挤旋轮直径 90 mm、主轴转速 120 r/min。

表 2 轮毂等效应力方差分析

Tab.2 Analysis of equivalent stress variance

方差来源	离差平方和	自由度	平均离差平方和	F	$F_{1-\alpha}$	显著性
温度	33 036	3	11 012	1 384.45	9.28	**
进给率	186	3	62	7.78	5.39	*
挤旋轮直径	101	3	34	4.23	5.39	
主轴转速	584	3	195	24.46	9.28	**
误差	24	3	8			
总和	33 931	15				

4 挤旋成型试验

把挤旋成型装置安装在 12500-3150-3150 型多向加载液压机上,材料为山西闻喜镁业有限公司提供的 AZ80 镁合金棒料,材料成分见表 3。

选择二苳基甲苯型导热油作为恒温油槽的加工介质,成型工艺参数以模拟试验中优化参数为基础,按照对中、扩口、挤旋和整形的工艺路线加工轮毂,

试验出的镁合金轮毂如图 12 所示。

表 3 AZ80 镁合金的化学成分含量

Tab.3 Chemical composition of AZ80 magnesium alloy

		%	
化学成分	含量	化学成分	含量
Al	8.90	Fe	<0.005
Zn	0.53	Cu	<0.01
Mn	0.20	Ni	<0.001
Si	<0.01	Mg	余量

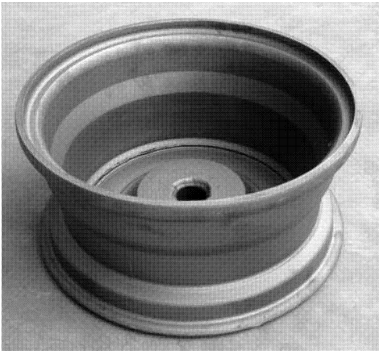


图 12 挤旋成型轮毂实物图

Fig.12 Photo of spinning forming wheel

5 结论

(1)通过对轮毂挤旋成型过程数值模拟,建立了新型高效挤旋成型的基本理论、优化了工艺参数。

(2)新型挤旋成型工艺的塑性变形规律更趋合理,显著提高了成型效率与加工精度,尤其在加工外形复杂回转体工件方面具有较大的优势。

(3)由于挤旋成型装置的挤旋轮可以更换,因此成型装置可以加工各种不同尺寸和形状的镁合金轮毂。

(4)自行设计挤旋成型装置,实现了镁合金轮毂等温挤旋成型新工艺,提高了生产效率,节约了生产成本。

参 考 文 献

1 叶辉,胡平,申国哲,等. 基于灵敏度和碰撞仿真的汽车车身轻量化优化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(10):18~22.
Ye Hui, Hu Ping, Shen Guozhe, et al. Lightweight optimization design of car body based on sensitivity and side crash simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10):18~22. (in Chinese)

2 贺岩松,杨诚. 镁合金在轻量化汽车中的应用[J]. 汽车工艺与材料,2002(6):25~27.
He Yansong, Yang Cheng. Application of magnesium alloy in automotive industry [J]. Automobile Technology & Material, 2002(6):25~27. (in Chinese)

3 李天生,徐慧. 镁合金成形技术的研究和发展现状[J]. 材料研究与应用,2007,1(2):91~94.
Li Tiansheng, Xu Hui. Research into magnesium alloy forming technology and its developing status quo [J]. Materials Research and Application, 2007, 1(2): 91~94. (in Chinese)

4 高仑. 镁合金成形技术的开发与应用[J]. 轻合金加工技术,2004,32(3):5~12.
Gao Lun. Exploit and application of magnesium alloy forming technology [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2004, 32(3):5~12. (in Chinese)

5 胡志清,李明哲,隋振. 基于连续多点成形原理的旋压成形技术[J]. 农业机械学报,2009,40(12):247~250.
Hu Zhiqing, Li Mingzhe, Sui Zhen. Spinning technology based on principle of continuous multipoint forming [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12):247~250. (in Chinese)

6 陈芳雷,张治民,曹亚强. 镁合金汽车轮毂成形工艺及数值模拟[J]. 热加工工艺,2007,36(1):79~81.
Chen Fanglei, Zhang Zhimin, Cao Yaqiang. Forming process and numerical simulation of magnesia alloy auto hub [J]. Hot Working Technology, 2007, 36(1):79~81. (in Chinese)

7 钱立军,徐飞. 装备无级变速器的整车前向模型建立与仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(7):10~14.
Qian Lijun, Xu Fei. Forward modeling and simulation on vehicle equipped with CVT[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7):10~14. (in Chinese)

8 韩佳颖,王太勇,李清. 基于解析计算的螺旋锥齿轮切削仿真算法[J]. 农业机械学报,2010,41(12):223~227.
Han Jiaying, Wang Taiyong, Li Qing. A cutting simulation algorithm of spiral bevel gears based on analytic calculation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):223~227. (in Chinese)

9 郭强,严红革,陈振华,等. 铸态 AZ80 镁合金高温热变形行为研究[J]. 塑性工程学报,2006,13(5):26~31.
Guo Qiang, Yan Hongge, Chen Zhenhua, et al. Hot deformation behaviors of as-cast AZ80 magnesium alloy at elevated temperatures[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(5):26~31. (in Chinese)

10 刘陶,龙思远. 基于 Deform-3D 的铝合金筒形件旋压成形过程数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2010,30(6):508~510.
Liu Tao, Long Siyuan. Numerical simulation of spinning forming process for aluminum alloy cylindrical workpieces based on the Deform-3D software [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(6):508~510. (in Chinese)

11 程秀全,陈家华,夏琴香,等. 无芯模缩径旋压力的有限元数值模拟及试验研究[J]. 塑性工程学报,2007,14(5):38~42.
Cheng Xiuquan, Chen Jiahua, Xia Qinxiang, et al. Finite element numerical simulation and experimental research on the forming force of mandrels neck-spinning with single roller[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(5):38~42. (in Chinese)

(上接第 222 页)

参 考 文 献

1 杨培中,蒋寿伟. 表面粗糙度三维评定的研究[J]. 机械设计与研究,2002,18(2):64~67.
Yang Peizhong, Jiang Shouwei. The study on 3D assessment of surface roughness [J]. Machine Design and Research, 2002, 18(2):64~67. (in Chinese)

2 曾文涵,高咏生,谢铁邦,等. 三维表面粗糙度高斯滤波快速算法[J]. 计量学报,2003,24(1):10~13.
Zeng Wenhan, Gao Yongsheng, Xie Tiebang, et al. A fast Gauss filtering algorithm for 3D surface roughness [J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(1):10~13. (in Chinese)

3 陈国强,张维强,彭文静. 研磨表面微观形貌的三维检测及 Areal 表征[J]. 机械设计与研究,2009,25(2):19~22.
Chen Guoqiang, Zhang Weiqiang, Peng Wenjing. Research on the 3-D detection and areal characterization of micro-topography of lapping surface [J]. Machine Design and Research, 2009, 25(2):19~22. (in Chinese)

4 Gadelmawla E, Koura M, Maksoud T, et al. Roughness parameters [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(1):133~145.

5 ISO 11562. Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method metrological characteristics of phase correct filters[S]. 1996.

6 Brinkmann S, Bodschwinna H, Lemke H W. Accessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(13~14):2153~2161.

7 ISO 13565. Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method; surfaces having stratified functional properties [S]. 1998.