

一种基于高压水射流的金属板材柔性渐进成形技术

李赳华^{1,2} 何 凯¹ 罗 群¹ 毛 贺¹ 杜如虚¹

¹ (中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

² (中国科学院大学 北京 100039)

摘 要 本文提出了一种新型的金属板材无模成形方法,即高压水射流柔性渐进成形方法,并基于此方法设计出一套五轴成形装置,其中喷嘴具有二个旋转自由度,工作台具有三个平动自由度,具有很好的柔性,非常适合多品种小批量产品的生产和新产品的试制。对高压水射流柔性渐进成形装置的各个子系统进行了详细的介绍,并对成形过程提出了一种新的仿真分析方法,将比较复杂的流固耦合问题,简化为加载等效压强的方法。最后通过单点水柱成形的仿真分析,揭示射流压力和板厚对金属板材成形性能的影响。

关键词 高压水射流; 渐进成形; 五轴成形装置; 仿真分析

A New Method for Incremental Sheet Metal Forming Using Water Jet Technology

LI Jiu-hua^{1,2} HE Kai¹ LUO Qun¹ MAO He¹ Du Ru-xu¹

¹ (Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

² (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract This paper presents a new method of dieless sheet metal forming, water jet incremental sheet metal forming (WJISMF). A five-axis WJISMF machine was designed based on this technology. The machine has five degrees of freedom (DOF) including two rotational DOF of the nozzle and three translational DOF of the workbench. It has good flexibility and can be used for low cost production of prototype. The paper introduces the subsystems of WJISMF system. In addition, a new simulation method for the forming process is given, in which the complex simulation about fluid-structure interaction is simplified by loading equivalent pressure. The effect of water jet pressure and sheet thickness on the metal forming accuracy is evaluated by simulation analysis respectively.

Keywords water jet; incremental forming; five-axis wjismf machine; simulation analysis

1 引 言

金属板材成形在制造业中有着广泛的应用,在传统金属板材成形方法中,模具必不可少,模具成形方法生产效率高、加工件的精度高、适合大批量生产。但缺点是模具设计制造周期长,维护费用高,往往成形一个零件需要多个模具,造成新产品开发周期长,

成本高,而且缺乏柔性,产品稍作改变后模具需要重新设计更换。因此一些新型的板材成形技术应运而生,如:喷丸成形^[1]、激光成形^[2]、无模多点成形^[3]、数字化渐进成形^[4]等。这些技术都实现了板材的无模成形,具有很大的柔性,极大地降低了新产品开发的周期和成本。然而这些技术都存在一些缺点,比如,加工时间长(成形效率低)、零件精度不高、表面质量差等^[5]。

基金项目: 深圳市重点实验室(CXB201005250018A)资助项目。

作者简介: 李赳华, 博士研究生, 主要研究方向为高压水射流成形、金属冲压成形、数值仿真分析等; 何凯, 博士, 副研究员, 主要研究方向为精密制造及自动化技术、金属成形技术及装备等, E-mail: kai.he@siat.ac.cn; 罗群, 硕士研究生, 研究方向为有限元分析; 毛贺, 硕士, 研究实习员, 研究方向为机械设计与结构分析; 杜如虚, 博士, 教授, 主要研究方向为精密工程设备与制造、计算机辅助设计与制造、金属成型、工业缝纫、在线监控与诊断、制造过程和系统的控制等。

金属板材高压水射流柔性渐进成形技术，是在现有的无模渐进成形技术基础上结合高压水射流技术而发展起来的一种新技术，它的核心思想是用具有一定压强和射流压力的水柱替代普通无模渐进成形的金属工具头。由于利用了水射流，使其具有传统工具头成形无法比拟的优点^[6,7]，主要包括：

(1) 加工时，接触的界面是液体-固体，因此摩擦较小，无需润滑；

(2) 其接触面上的压力分布更加均匀，因此零件表面质量较好；

(3) 成形工件的复杂程度和延伸率比传统工艺高；

(4) 低成本、高柔性、高效率、绿色环保。

最早将水射流技术引入板材成形的是日本的Iseki^[8,9]，他将高速水射流技术与板材逐次胀形技术结合，提出加工非对称的浅壳类零件的新技术。此后斯洛文尼亚的Jurisevic、Kuzman、Junkar等人对水射流渐进成形技术做了初步探讨^[10,11]，提出了水射流渐进成形的基本理论模型，并通过实验制订了技术窗口，来显示工件的成形极限。Emmens^[12,13]用旋转高压水射流成形了非直壁型的钢饮料罐，并且还讨论了水压、喷头进给速率、喷头内径等对罐壁膨胀率的影响。在国内，吉林大学的王龙山教授改装、设计了一台简易的二轴水射流渐进成形样机，并对水射流渐进成形的机理进行了初步探讨^[14]。

本文提出一种新型的金属板材高压水射流柔性渐进成形技术，喷嘴具有二个旋转自由度，工作台具有三个平动自由度，具有很好的柔性，为多品种小批量产品的生产和新产品的试制提供了一种新的思路和途径。

2 渐进成形装置的设计

2.1 水射流渐进成形原理

金属板材高压水射流柔性渐进成形技术采用快速原型技术中“分层制造”的思想，首先导入设计好的最终零件的三维CAD模型，然后按给定的层间距将CAD模型分层切片，将复杂的三维钣金件的整体成形分解成为一系列二维局部塑性成形，高压水沿每个片层的外轮廓线连续冲击金属板材，当作用在表面上的压力超过材料的屈服极限值时，板材将发生局部塑性变形。在计算机控制下高压水喷嘴沿规划路径运动，完成一层加工后，进而成形下一层，加工过程中根据零件成形需要实时调节高压水射流成形的工艺参数，如

此循环直至最终成形，如图1所示。

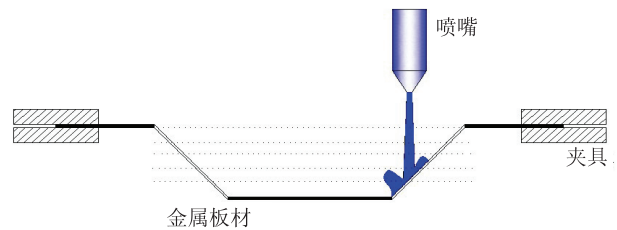


图1 金属板材高压水射流柔性渐进成形原理图

2.2 金属板材高压水射流柔性渐进成形系统的设计

根据金属板材高压水射流柔性渐进成形的原理，整个装置系统可以分为四个部分，高压水发生装置、执行系统、数控系统和辅助系统，如图2所示。

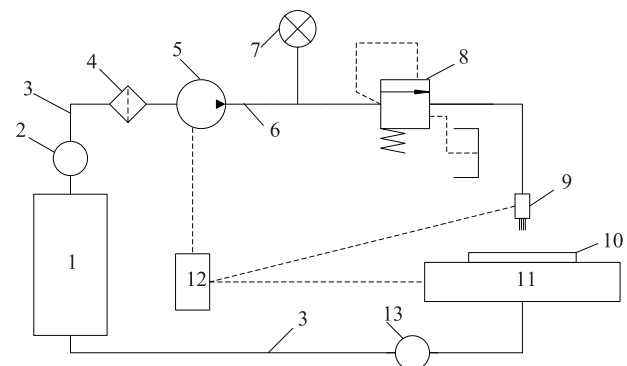


图2 高压水射流柔性渐进成形装置总体系统构成

2.2.1 高压水发生装置

高压水发生装置是整个高压水射流柔性渐进成形系统的核心部分，它提供金属板材变形的能量。本研究选用的高压水发生装置所提供的最大水压100 Mpa，额定流量为30 L/min。由于在工作过程中，水压需根据板材成形的程度而变化，因此我们采用变频器来控制水压的大小达到无级调压。整个高压水发生装置如图3所示。

其工作工程如下：首先水箱注满水，由管道泵抽



1-水箱 2-管道泵 3-低压水管 4-过滤器 5-高压泵 6-高压软管 7-压力表 8-溢流阀 9-喷射装置 10-夹具 11-工作台 12-控制台 13-管道泵

图3 高压水发生系统

出, 流经低压水管和过滤器, 进入高压泵产生高压水, 经过高压软管, 由喷射装置喷出, 喷射出的水, 由另一个管道泵抽回水箱, 由过滤器过滤后, 再进入下一个循环使用。整个高压水发生装置构成一个循环系统, 这样能节约水, 降低成本。为了保证安全, 采用溢流阀装置, 当水压超过允许值时, 溢流阀自动打开迅速降压。压力表显示着每一时刻的压力值。

2.2.2 控制系统的设计

本控制系统采用的是基于PC的开放式控制方式(即PC+运动控制卡方式), PC作为控制系统的中心部分, 运动控制卡负责整个控制细节, 运动控制卡以PCI插卡形式嵌入PC机中, 将PC机的信息处理能力和运动控制能力有机的结合到一起, 具有开放性程度高, 信息处理能力强, 实时调整, 运动控制轨迹准确, 通用性好等优点。同时运动控制卡都提供了Windows环境下的动态链接库, 使用非常方便, 不仅大大缩短了产品的研制和开发周期, 而且能够实现更加完美的运动控制系统, 如图4所示。

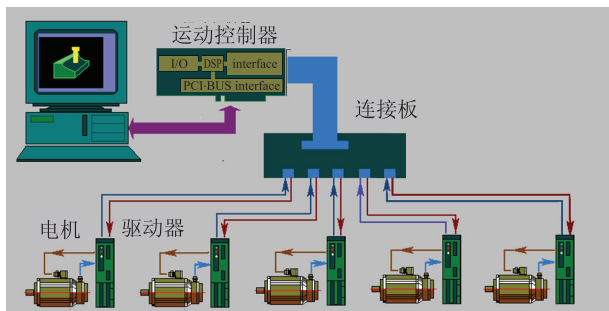


图4 运动控制系统

2.2.3 执行系统

本装置的执行系统由工作台进给机构和喷头倾斜机构构成, 进给机构具有X、Y、Z三个方向的平动自由度, 喷头具有绕Z轴旋转自由度(C轴)和绕Y轴的旋转自由度(B轴), 如图5所示, 这样可以成形更复杂的零件, 使得本系统具有更大的柔性。

根据以上金属板材高压水射流柔性渐进成形原理, 我们设计并制造了一台金属板材高压水射流柔性渐进成形样机, 如图6所示。

3 高压水射流柔性渐进成形仿真分析

高压水射流柔性渐进的过程十分复杂, 其成形机理研究尚处于起步阶段, 为了更快掌握该成形技术, 减少实验次数, 降低试验费用, 采用数值模拟技术进行成形过程模拟, 预测板料的变形以及确定工艺参数

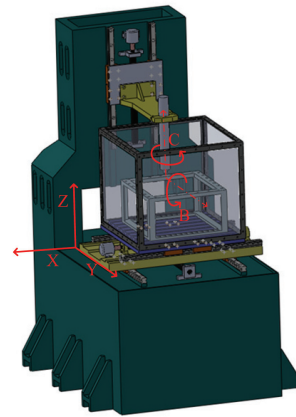


图5 执行系统



图6 金属板材高压水射流柔性渐进成形样机

对板材成形的影响是非常有效的一种方式。

3.1 有限元模型的建立

高压水射流柔性渐进成形的基本原理是用高速的水流冲击金属板材并使其产生局部塑性变形, 涉及到流体与固体的相互作用以及固体的变形等问题, 通常必须采用流固耦合方法进行成形过程的有限元仿真分析。然而流固耦合分析非常耗时, 并且涉及到很强的非线性问题, 求解时常不收敛。因此本文提出了一种新的有限元分析方法来处理这类问题: 先不考虑板材的变形, 单独计算出流体冲击在板材上的区域和对应的压强, 然后将等效的压强作用在对应的区域上再计算出板材的变形和应力应变分布等。

实验中选用的是厚度为0.5 mm, 长宽为200 mm×200 mm铝板(6061A1)。仿真分析中, 选用的是shell1181单元, 该模型的材料参数包括: 材料密度、弹性模量、泊松比和应力—应变曲线等, 其中应力—应变曲线通过拉伸实验获得, 如表1和表2所示。

表1 材料参数

参数名称	密度 (kg/m ³)	弹性模量(Mpa)	泊松比
值	2810	0.69×10 ⁵	0.3

表2 应力-应变数据

	应变	应力/mm
1	0.003008	189.65
2	0.0283	235.51
3	0.0559	261.41
4	0.0824	277.17
5	0.1154	288.21
6	0.1753	296.27

3.2 有限元模拟方法

高压水在喷嘴处出口压力为40 Mpa，喷嘴直径为2 mm，我们模拟水柱单点冲击板材的过程。经实验研究和仿真分析得出高压水射流打击面的压力是呈现高斯分布，且作用区域半径为2.6倍的扩散半径。为了更加的接近真实情况，我们选用射流的起始段用于成形，假设扩散半径等于喷嘴半径。我们按下列方法进行载荷加载，将射流打击区域面分成5个等分如图7，再分别算出射流在各个部分的作用压强， $P_1=37.92$ Mpa， $P_2=30.88$ Mpa， $P_3=20$ Mpa， $P_4=7.77$ Mpa， $P_5=0.73$ Mpa。在金属板材的成形中，会产生弹性变形和塑性变形，因此我们要分为两个载荷步对其进行施加：第一步，对作用区域进行施加载荷，我们将不同的压强（ $P_1\sim P_5$ ）加在对应的作用区域上；第二步，对其进行卸载，这是为了恢复材料变形中弹性变形的部分，如图8所示。

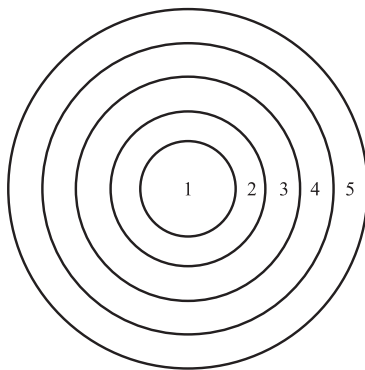


图7 射流打击区域

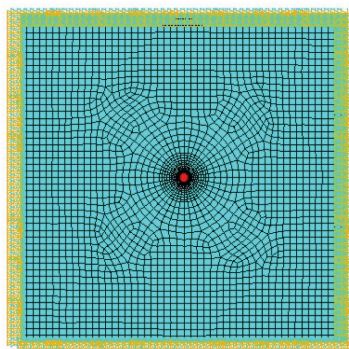


图8 约束加载

3.3 结果分析

金属板材变形后如图9所示，其成形深度为0.700847 mm，对应的实验结果为0.75 mm，二者接近，因此，上述简化的仿真方法是可行的。



图9 单点成形结果

在高压水射流柔性渐进成形中，影响零件成形精度的工艺参数非常多，如，射流压力、喷嘴直径、板厚、纵向进给量、靶距、喷头进给速度等，其中射流压力和板厚这两个参数直接影响到成形精度，甚至是零件加工的成功与否。我们进行了一系列的仿真分析来研究射流压力和板厚对板材变形的影响，结果如图10和11所示。

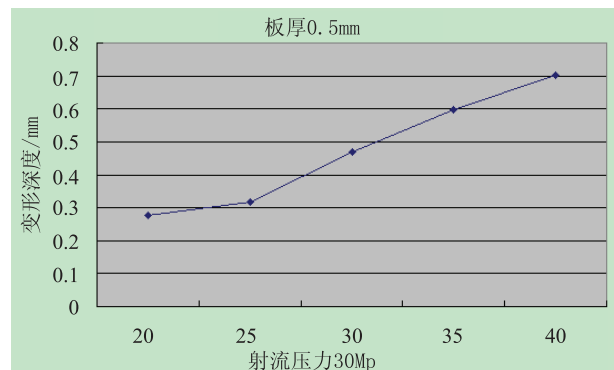


图10 水射流压力对变形的影响

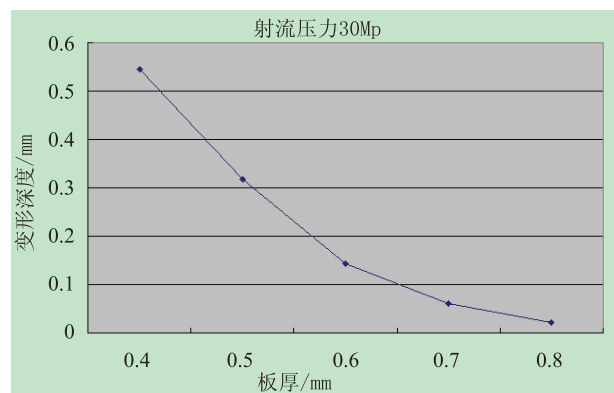


图11 金属板厚对变形的影响

由上面的模拟结果可知，射流压力越大金属板形的深度越大，板厚越小，变形的深度也越大，板材的成形性能越好。但是过大的射流压力和过小的板厚，容易导致板材破裂的现象，因此必须根据实际成形的零件特点，选择合适的参数。

4 总 结

本文提出了一种新型的金属板材无模成形方法,即高压水射流柔性渐进成形方法,基于此方法设计出一套五轴的成形装置,其中喷嘴具有二个旋转自由度,工作台具有三个平动自由度,此成形装置具有很好的柔性,非常适合多品种小批量产品的生产和新产品的试制。高压水射流柔性渐进的过程十分复杂,目前的研究还处于初步阶段,为了减少实验次数,降低试验费用,采用数值模拟技术进行板料变形的预测和分析工艺参数对板材成形的影响是一种非常有效的方式。本文提出的将复杂的流固耦合仿真分析问题简化为加载等效压强的仿真分析方法,经与实验结果比较,验证该方法是有效的。最后本文通过单点水柱成形的仿真分析,揭示了射流压力和板厚对板材成形性能的影响。目前我们的实验和仿真分析研究仅限于单点成形和简单模型,对于复杂的渐进成形还有许多问题需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 康小明,马泽恩,何涛,等.机翼整体壁板喷丸成形CAD/CAM/CAE系统[J].航空制造工程,1998(6):35-36.
- [2] Geiger M, Merklein M, Pitz M. Laser and forming technology-an idea and the way of implementation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151: 3-11.
- [3] 李明哲,中村敬一.基本的な成形原理の检讨(板材多点成形法の研究第1报)[C]//日本平成4年度塑性加工春季讲演会论文集.1992:519-522.
- [4] Matsubara S. Incremental drawing of sheet metal with hemispherical tool on NC machine [C]//Proceedings of the 1995 Japanese Spring Conference on Technology of Plasticity. 1995: 209-210. (in Japanese)
- [5] 莫健华,韩飞.金属板材数字化渐进成形技术研究现状[J].中国机械工程,2008,19(4):491-497.
- [6] Momber A W, Kovacevic R. Principles of abrasive water jet machining [M]. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- [7] 李荣种,雷玉勇,易北华.水射流特种加工技术应用[J].中国测试技术,2007,33(4):37-39.
- [8] Iseki H. Flexible and incremental bulging of sheet metal using high speed water jet [J]. JSME International Journal Series C, 2001,44(2):486-493.
- [9] Iseki H, Nara T. Incremental bulging of sheet metal using water jet and shots [J]. Key Engineering Materials, 2007, 344: 575-582.
- [10] Jurisevic B, Kuzman K, Junkar M. Water jetting technology: an alternative in incremental sheet metal forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 31: 18-23.
- [11] Jurisevic B, Sajn V, Junkar M, et al. Experimental and numerical study of the tool in water jet incremental sheet metal forming [C]//Proceedings of 6th International Conference on Integrated Design in Mechanical Engineering, 11 pages.
- [12] Emmens W C. Water jet forming of steel beverage cans [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 1243-1247.
- [13] Emmens W C. Detailed incremental forming of steel beverage cans by a high-pressure water jet [J]. Key Engineering Materials, 2007, 344: 567-574.
- [14] Cheng X M, Zhou L, et al. The experiment study of water jet incremental sheet metal forming [J]. Advanced Materials Research, 2011, 230-232: 1010-1013.