

特约专栏

# 挤压模具的数字化设计与数字化制造

张志豪, 谢建新

(北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083)

**摘要:** 介绍了基于数字仿真技术的挤压模具数字化设计、结构优化、产品质量预测的实现方法, 以及挤压模具数字化制造的加工工艺。挤压模具数字化设计的目的是提供模具的几何、拓扑信息和挤压成形的工艺信息, 其核心技术是数字化建模与数字化仿真。数字化仿真技术在挤压过程金属流动行为分析、模具结构优化、型材成形质量预测等方面已取得了良好的应用效果。采用基于仿真技术的虚拟试模方法, 是实现挤压模具的“零试模”有效途径, 也是形成新设计思路和设计方法的重要手段。大量采用 CNC 加工、热处理和表面处理系统是挤压模具数字化制造的主要特征。实现 CAD、CAM 和 CAE 的有效结合, 提高复杂多孔空心型材挤压模具的制造技术水平, 是我国挤压模具数字化制造的重要发展方向。

**关键词:** 挤压模具; 数字化设计; CNC 加工; 数值模拟

**中图分类号:** TG375.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-3962(2013)05-0292-08

## Digital Design and Manufacture of Extrusion Die

ZHANG Zhihao, XIE Jianxin

(Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The article introduced the die digital design, optimization and production quality forecast of extrusion, and the processes of die digital manufacture. The authors pointed out that, the aims of the digital design of extrusion die were providing geometry and topology information of the die, as well as the process information of extrusion practice. The core technologies of the digital design were digital modeling and digital simulation. Digital simulation was applied in analyzing metal flowing behaviors, die optimization, and production quality forecast of extrusion. Using virtual extrusion based on digital simulation was an effective way to achieve “without die test” of extrusion die, and also was an important platform for developing new design ideas and methods. The feature of digital manufacture of extrusion die was the wide application of CNC processing, heat treatment and surface treatment. Improving the manufacture level of extrusion dies with complicated and multi-orifice structure through combining CAD, CAM and CAE effectively, was the key development direction of the extrusion die digital manufacture industry at the current stage of our country.

**Key words:** extrusion die; digital design; CNC process; numerical simulation

### 1 前言

模具设计制造是挤压生产的核心技术, 对于铝合金型材挤压, 模具成本可占挤压成本的 30% ~ 40%, 对于某些钛合金、钢铁材料挤压, 模具成本可达生产成本的 50%<sup>[1]</sup>。

传统的铝合金型材挤压模具设计主要依据工程类比和模具设计者的个人经验, 模具设计加工完成后需经多次试模和修模才能保证顺利投入使用, 导致挤压产品质量稳定性和一致性差、模具使用寿命较短, 甚至造成

企业停工待模, 影响正常生产。随着挤压产品在航空航天、轨道交通、国防军工等领域应用范围的扩大, 挤压产品不断向精密化、大型化、断面形状复杂化、产品性能均匀化发展, 传统的挤压模具设计方法已经很难满足挤压生产的高效率、高产品附加值的实际需求, 改进传统的模具设计方法已成为铝型材工业发展的当务之急。

近年来, 随着数字化设计与数字化制造技术水平的提高, 通过综合利用三维建模、数字模拟、过程仿真、数控加工等技术手段, 实现挤压模具结构和尺寸、挤压工艺的优化设计和无纸化精确制造, 已经成为挤压模具行业的重要发展方向<sup>[1]</sup>。

现代挤压模具设计制造流程如图 1 所示。与传统设计流程的重要区别在于: ①省略了模具制造后的实际试

收稿日期: 2013-03-10

第一作者及通信作者: 张志豪, 男, 1970 年生, 副教授

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.05.06

模与修模过程, 而代之以基于数字仿真的虚拟试模, 从而大大减少了设计制造流程和试验成本; ②在模具制造过程中, 大量采用 CNC (Computer Numerical Control, 计算机数字控制) 加工机床、CNC 线切割机床、CNC 热处理和表面处理系统代替传统的机加工、热处理和人工研磨抛光等工序, 可满足更高的加工效率、尺寸精度、表面质量等要求。

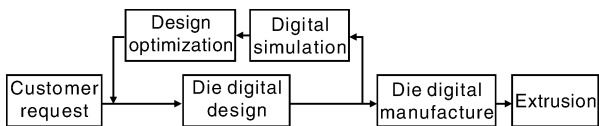


图1 现代挤压模具设计制造流程图

Fig.1 Flowchart for contemporary design and manufacture of extrusion die

## 2 挤压模具数字化设计

挤压模具设计不同于一般的机械设计, 除参考机械设计所需要遵循的原则(如强度、公差、表面质量、装配等设计原则)外, 还需要考虑挤压条件下的各种工艺因素<sup>[2-3]</sup>, 如挤压设备条件、模具材料、模具结构尺寸、模具加工工艺流程、模具加热温度、挤压速度、工艺润滑等。

因此, 挤压模具设计对设计者的数学、力学、材料学等理论知识以及工程实践经验具有较高的要求。而对于复杂断面型材的挤压模具也很难由模具设计者单独完

成, 通常需要与模具制造者和挤压生产者(用户)进行反复沟通交流, 不断调整和修改设计思路 and 方案。利用 CAD/CAE/CAM 的高效设计环境, 实现挤压模具的数字化设计, 对于降低模具设计难度, 最大限度地发挥模具设计者的创造性, 提高模具设计质量以及模具设计的标准化具有重要意义。

挤压模具数字化设计的最终目的, 除了提供模具的几何信息与拓扑信息外, 还需提供挤压成形的工艺信息, 其核心技术是数字化建模与数字化仿真。

### 2.1 数字化建模

数字化建模就是人们根据已有的草图或形象思维, 利用交互方式将物体的几何形状在计算机的虚拟空间中建立数字化模型(数学模型)<sup>[4]</sup>。

目前, 铝型材挤压模具设计领域常用的数字化建模软件有 Pro/ENGINEER、UG、Solidworks 等。通过对挤压型材可挤压性分析, 结合挤压设备、模具材料等具体条件, 采用上述软件形成模具的设计参数并生成三维模具结构图。

例如, 对于图 2a 中剖面线所示的 A6005 空心型材, 用户提出的焊合面位置如图中点划线所示。根据型材尺寸, 选择平面分流模进行挤压, 挤压筒直径 95 mm, 根据空心型材挤压的一般原则, 采用 4 个扇形分流孔, 上模二维尺寸参数如图 2a 所示。根据图 2a 及焊合室的设计原则, 在 Pro/ENGINEER 中生成模具三维结构, 如图 2b 和 2c 所示<sup>[5]</sup>。

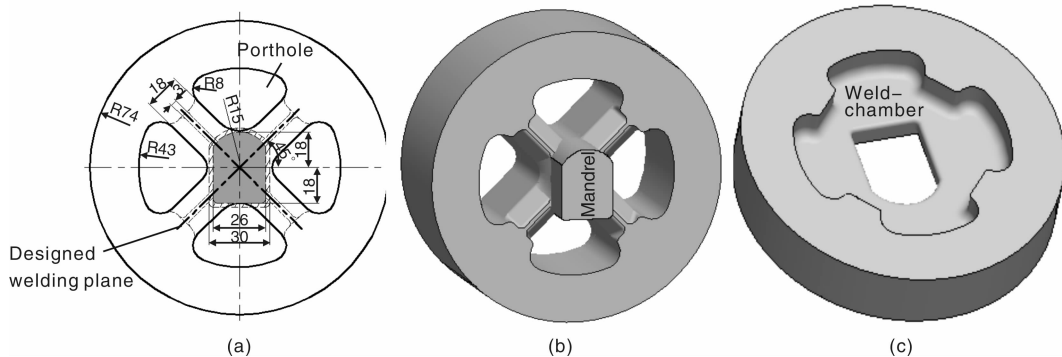


图2 简单空心型材模具结构设计图<sup>[5]</sup>

Fig.2 Structural design drawing of a hollow profile with simple section: (a) upper die and profile dimensions, (b) upper die structure, and (c) bottom die structure<sup>[5]</sup>

图3所示为一种复杂断面空心型材的断面形状和主要尺寸, 断面面积为  $1435.5 \text{ mm}^2$ , 具有两个型孔、一个凹槽(左侧)、一个C形槽(右侧), 且C形槽部位壁厚大于其它部位壁厚。

针对图3型材, 设计挤压模具的实体模型如图4所示, 其中上模(凸模)有8个分流孔、2个模芯和1个引流孔<sup>[6]</sup>。

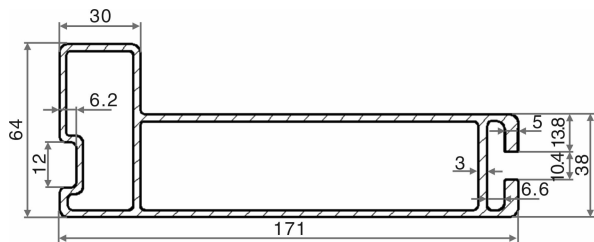


图3 复杂断面空心型材形状及尺寸<sup>[6]</sup>

Fig.3 Shape and dimensions of a profile with complicate section<sup>[6]</sup>

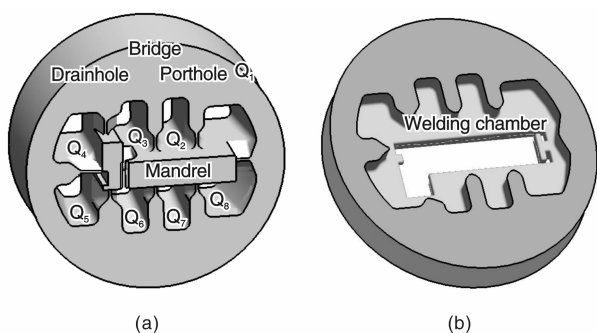


图 4 复杂断面空心型材分流模挤压模具结构设计图<sup>[6]</sup>

Fig. 4 Structural design drawing of a hollow profile with complicate section: (a) upper die and (b) bottom die<sup>[6]</sup>

完成挤压模具的初步设计后,需对其强度进行校核,尤其是对于平面分流模,主要需校核分流桥所承受的弯曲应力和剪切应力。具体可参考相关专著<sup>[7]</sup>。

除了上述 Pro/ENGINEER、UG、Solidworks 等大型通用建模软件外,国内外也开发了一些专用的挤压模具建模和分析软件,如 Extrusionpower 软件<sup>[8]</sup>、铝型材挤压模具设计及数据库管理系统<sup>[9]</sup>等。

由于挤压模具设计时所考虑的因素较多,尤其是分流模挤压,除了挤压生产条件、型材几何特征、合金成分和尺寸精度要求、模具加工条件等因素之外,分流比、分流孔的形状与配置、分流桥的结构、模芯结构、焊合腔的结构形式与尺寸、模孔定径带结构等,都会对挤压力、模具失效、金属的流动变形行为、焊合质量、型材表面质量等产生重要影响。因此,在挤压模具正式用于挤压生产之前必须进行试模,试模的方法可采用实际挤压试模或基于数字仿真技术的虚拟试模。

## 2.2 基于数字仿真技术的模具结构优化与型材质量预测

挤压过程数字仿真的目的在于在计算机上实现挤压成形过程的可视化,研究金属流动行为、挤压力、应力和温度分布及其影响因素,分析模具、工艺设计的合理性,并反复修正,从而替代或部分替代挤压模具设计制造过程中费时费工的试模与修模工作。通过对金属变形体内的应力场、应变场、温度场、速度场等物理量的分析,可预测产品成形质量,减少甚至替代传统模具设计过程中的反复试模工作,为设计合理模具结构和制定挤压工艺提供理论依据,从而达到提高生产效率和产品质量、降低生产成本的目的。

目前应用于挤压成形数字仿真的方法主要包括有限元法(FEM)、有限体积法(FVM)、任意拉格朗日欧拉法(ALE)等。商业化的三维数值模拟软件主要有 MSC. Marc、ANSYS、Defrom-3D 和 HyperXtrude 等。其中,基

于 FEM 的 MSC. Marc、ANSYS、Defrom-3D 可用于模拟分析瞬态挤压过程中金属流动行为;基于 ALE 的 HyperXtrude 主要用于稳态挤压过程中金属流动行为的分析,即假设焊合室已充满并已经挤出型材头部,根据模拟计算的速度场、应力、应变场、温度场等情况来推断模具结构对金属流动行为的影响。

由于有限元法能够很好地处理变形体与模具的接触问题,且模拟精度较高,因而在型材挤压成形数值模拟时,有限元法仍然是最常用的方法。

采用有限元法模拟断面形状复杂、焊合位置与型材断面几何对称线不一致的空心型材的型材挤压过程时,现有的有限元方法只能模拟分流过程或稳态成形过程,而焊合过程中由于网格分离或穿透现象<sup>[5]</sup>(如图 5 所示),往往导致计算终止,因而不能分析分流和焊合过程的金属流动行为对挤出型材质量的影响。而采用有限体积方法时,模拟过程中由于焊合面的网格单元节点处于分离状态,虽然能够对焊合过程进行模拟,但无法对焊合面两侧金属流速不均而导致的型材弯曲、扭拧等缺陷进行正确的判断和分析<sup>[10-11]</sup>。

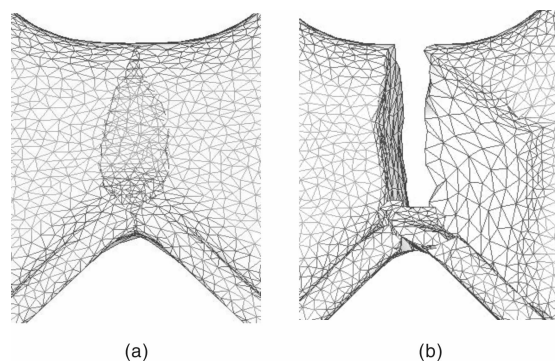


图 5 分流模挤压 FEM 模拟时焊合面网格穿透与分离现象<sup>[5]</sup>

Fig. 5 Meshes penetration (a) and separation (b) when simulating the welding process using FEM<sup>[5]</sup>

为此,本文作者提出了一种基于 Defrom-3D 与 Pro/ENGINEER 的焊合区网格重构技术<sup>[12]</sup>,解决了分流模挤压有限元模拟过程中,焊合面附近网格的相互穿透与分离问题,在空心型材挤压全过程金属流动行为分析与模具结构优化,挤压过程金属温度场、模芯受力及型材成形质量预测等方面取得了良好的应用效果<sup>[6, 13-14]</sup>。

**金属流动行为分析与模具结构优化** 对于图 2 所示的型材和模具结构,采用 Defrom-3D 进行模拟,获得挤压各阶段型材金属流动行为,如图 6 所示<sup>[5]</sup>。在分流阶段(如图 6a 所示),金属在分流桥的作用下被拆分为 4 股进入分流孔,由于 4 个分流孔面积相同,因此由各分流孔内挤出金属的长度相同。在填充焊合室阶段

(如图6b所示), 4股金属相继与焊合室底面接触, 形成径向流动并围绕模芯开始填充焊合室。型材成形阶段

(如图6c所示), 焊合室已经被金属完全填满, 此时开始进入稳态挤压阶段。

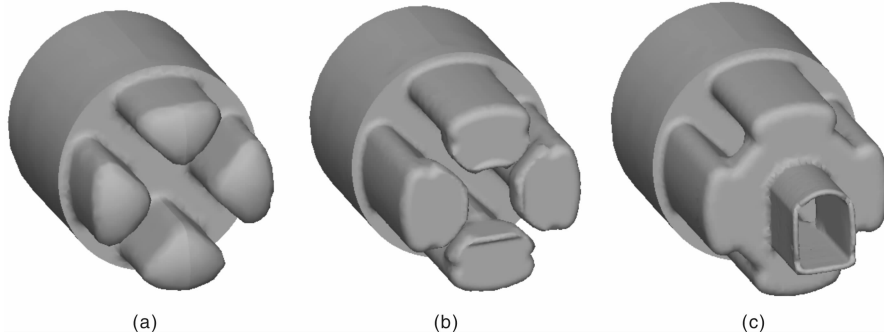


图6 简单空心断面型材挤压分流、充填焊合室和成形阶段的金属流动分析<sup>[5]</sup>

Fig. 6 Metal flowing behaviors in diversion (a), filling weld-chamber (b), and forming (c) stages during extruding of a profile with simple section<sup>[5]</sup>

图7给出了从开始填充焊合室到焊合完成时的焊合过程的金属流动行为。初始填充焊合室时, 相邻金属流动面的相距情况如图7a所示。随着挤压行程的增加, 相邻两面逐渐接近, 如图7b所示。当行程为33.1 mm时, 相邻两面已形成焊合面, 如图7c。

置基本与设计位置(如图2a中的点划线所示)相同、分流孔内金属流动均匀、型材无明显扭拧、刀弯等缺陷, 因此可以认为模具结构设计合理。

挤压试模所得的焊合面情况如图7d所示。由图7c和7d对比可知, 该型材的仿真结果和实验所获得的焊合面位置基本一致。

上述金属流动行为的数字仿真结果表明, 焊合面位

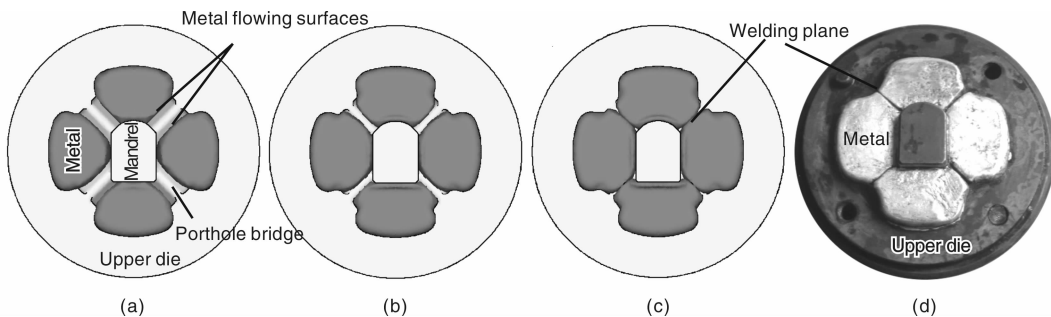


图7 焊合室内的金属流动<sup>[5]</sup>

Fig. 7 Metal flowing behaviors in weld-chamber during extruding of a profile with simple section: (a) extrusion stroke( $S$ ) = 31.3 mm, (b)  $S$  = 32.3 mm, (c)  $S$  = 33.1 mm, and (d) experimental result<sup>[5]</sup>

对于图3所示的型材, 采用图4所示的模具进行挤压, 金属流动行为如图8所示。引流孔内金属焊合面上

开始发生焊合时,  $Q_1$  和  $Q_8$ ,  $Q_3$  和  $Q_4$ ,  $Q_4$  和  $Q_5$  焊合面尚未开始焊合, 而中部流速较快的部位已有金属被挤出

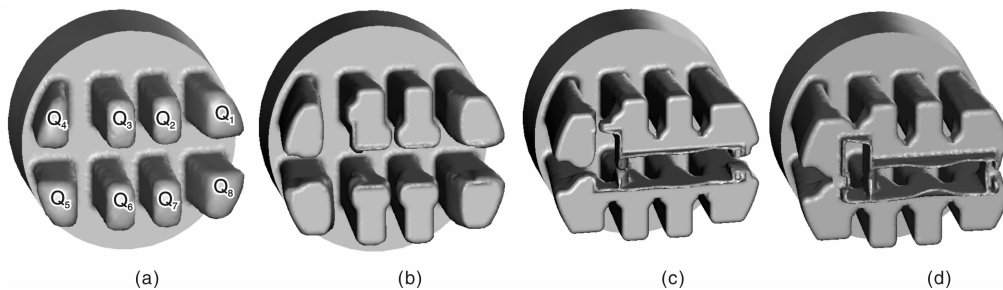


图8 复杂断面型材挤压金属流动分析<sup>[6]</sup>

Fig. 8 Metal flowing behaviors during extruding of a profile with complicate section: (a) diversion, (b) filing weld-chamber, (c) welding and extruding, and (d) steady extrusion<sup>[6]</sup>

模孔。由于中部分流孔内金属流速高于边部分流孔, 导致  $Q_3$  和  $Q_4$  的焊合面位置(焊缝)偏离分流桥对称面。在成形阶段, 金属的流动延续了填充焊合阶段的不均匀性, 挤出型材的断面流速不均, 且型材头部长度不等, 导致型材底边中间部位上产生了卷翘。

根据上述金属流动行为的分析结果可知, 在分流和焊合过程中各部位金属流速相差较大, 从而导致出模孔处型材断面金属流量不均及底部产生卷翘缺陷。因而可从分流孔配置优化调整金属的流速, 使中部 4 个分流孔内的金属流速减小, 边部 4 个分流孔内金属流速增加, 从而降低中部和边部分流孔内金属流速差, 实现分流及焊合过程的金属流速及流量的平衡, 尽量保证各焊合面同时进入焊合阶段。

模具结构尺寸优化后, 分流孔挤出金属流速及流量匹配较合理, 消除了挤出型材底面卷翘的缺陷, 改善了挤出型材的外形质量。图 9 所示为分流孔配置优化前后的挤出型材头部形状。

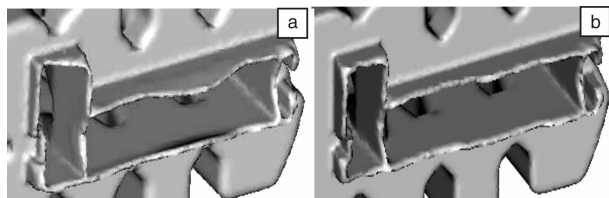


图 9 模具优化前后挤出型材外形<sup>[6]</sup>

Fig. 9 The shapes of the extruded section: before (a) and after (b) optimization<sup>[6]</sup>

**挤压产品质量预测** 分流模挤压过程中, 焊合室内静水压力大小决定型材的焊合质量, 焊合面上的静水压力越高, 挤出型材的焊合质量就越好。同时, 焊合室内静水

压力分布决定着模芯均匀受力情况, 模芯受不均应力作用而产生偏移是导致型材断面壁厚偏差的主要因素之一。

图 3 所示型材稳态挤压时焊合室内金属变形体的静水压力分布如图 10 所示<sup>[5]</sup>。由图 10 可知, 焊合室内的静水压力分布由焊合室周边向模芯表面逐渐减小, 模芯周围所受静水压力分布较为均匀, 大小约为 253 MPa, 模芯受力均匀, 不容易产生偏移, 有利于减小或避免型材壁厚超差缺陷。

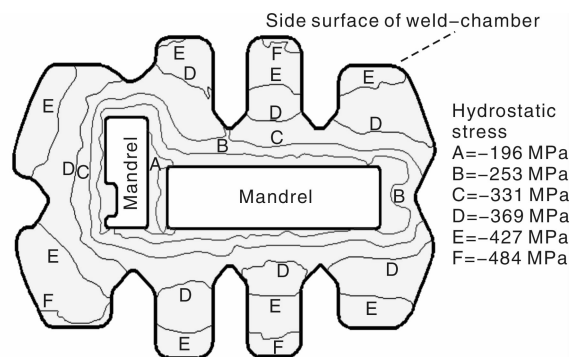


图 10 复杂断面空心型材焊合室内金属静水压力分布(稳定成形阶段)<sup>[5]</sup>

Fig. 10 Hydrostatic stress distribution in weld-chamber during extruding a profile with complicate section (steady extrusion stage)<sup>[5]</sup>

图 11a 所示异型断面型材稳态挤压时焊合室内金属变形体的静水压力分布如图 11b 所示<sup>[15]</sup>。由图 11b 可知, 焊合室内模芯周围的最小静水压力为 212 MPa, 而根据计算表明此时焊合面附近温度约为 500 ℃, 在此温度下, A6005 铝合金屈服强度约为 45 MPa, 其静水压力约为合金屈服强度的 5 倍, 能满足焊合要求。

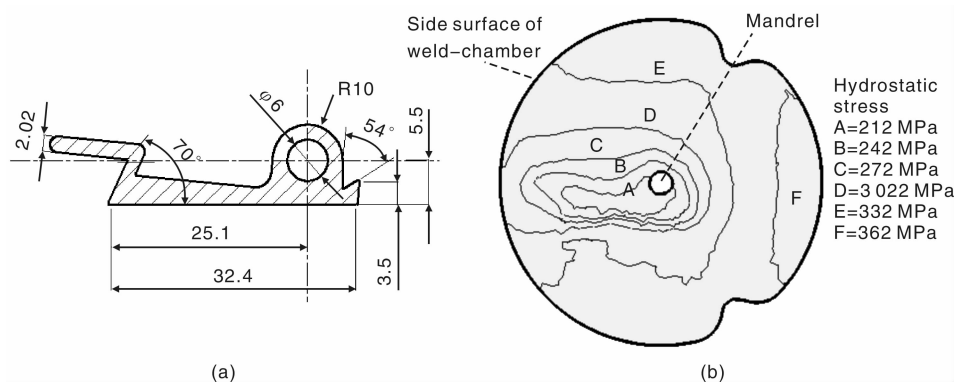


图 11 型材形状尺寸及焊合室内金属静水压力分布<sup>[15]</sup>

Fig. 11 Hydrostatic stress distribution in weld-chamber: (a) cross section of a profile and (b) hydrostatic stress distribution<sup>[15]</sup>

模芯受不均应力作用而产生的弹性偏移是型材断面壁厚偏差的主要因素之一。图 11a 型材稳定挤压时

的上模弹性偏移量分布如图 12 所示<sup>[15]</sup>, 其模芯最大弹性偏移量仅为 0.083 mm, 图 12 中箭头方向为模芯

弹性变形方向, 即由模芯偏移引起的挤出型材壁厚偏差约在  $\pm 0.08$  mm 左右, 挤出型材尺寸符合规定要求。

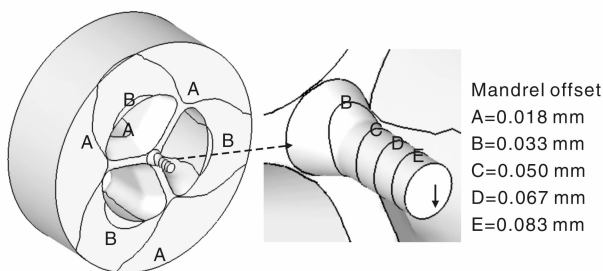


图 12 图 11(a) 型材稳定挤压时上模弹性偏移量分布<sup>[15]</sup>

Fig. 12 Elastic offset of the mandrel during extruding the profile showed in Fig. 11(a) (steady extrusion stage)<sup>[15]</sup>

采用上述基于仿真技术的挤压模具设计方法具有多方面优势, 如: 模具初始设计后, 在计算机上以虚拟试模代替物理试模, 降低模具设计成本; 大幅缩短模具设计和制造周期, 确保交付时间; 为设计人员提供精确的计算结果, 分析、评价和优化模具设计方案, 从而提高了模具设计质量; 有利于设计知识和经验的积累。

归纳起来, 现阶段挤压模具与挤压过程数字仿真的技术水平可分为 3 个层次:

(1) 实际挤压试模与数字仿真相结合, 以提高模具

设计效率、减少实际修模次数。例如, 在设计某些焊合位置与型材断面几何对称线不一致的空心型材挤压模具时, 由于 HyperXtrude 软件或有限元软件(若未采用焊合区网格重构技术)只能对稳态挤压过程进行分析, 而无法准确描述分流和焊合过程, 因此数字仿真的结果只能为模具设计者提供部分参考信息。虽然其在一定程度上也能提高模具设计效率、减少修模次数, 但是, 对于分流孔配置、分流桥结构、模芯结构等决定分流与焊合过程的主要影响因素, 还不得不根据实际挤压试模的型材焊合质量、模芯变形等作具体分析处理。

(2) 试模之前进行虚拟试模, 针对“虚拟试模”中出现的问题优化模具结构, 达到“零试模”的目的。如图 4、图 8 和图 9 所示的结果。

(3) 确定模具最终设计方案之前进行仿真, 充分发挥模具设计者的创造性, 形成新的设计思路和设计方法。例如, 对于图 13a 所示的型材<sup>[16]</sup>, 采用相同的模芯结构(如图 13b), 传统的分流孔和分流桥的形状结构如图 13c 和 13d 所示, 两种较为新颖的分流孔和分流桥的形状结构如图 13e 和 13f 所示。模拟结果表明, 与图 13c 和 13d 传统的设计方案相比, 采用图 13e 和 13f 的设计方案, 挤出型材具有更好的断面温度均匀性、更小的模芯偏移量, 且单位挤压力较低, 因而, 可以采用更高的挤压速度, 有利于提高挤压产品质量。

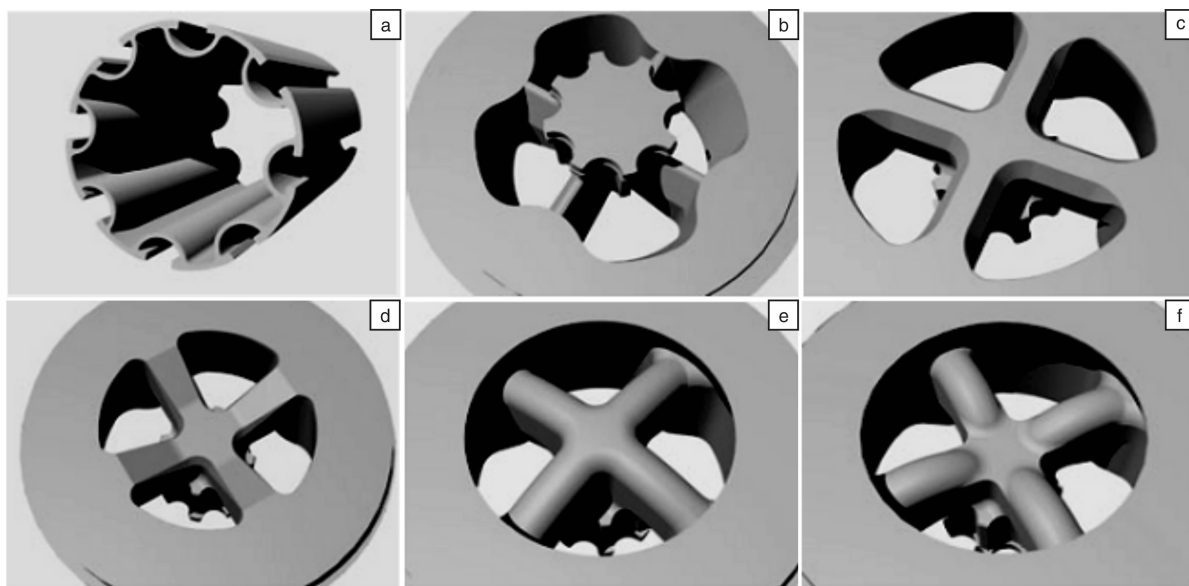


图 13 图(a)所示型材挤压模具的分流孔与分流桥形状(模芯结构相同)<sup>[16]</sup>

Fig. 13 Shapes of portholes and port bridges of the extrusion die for the profile showed in Fig. 13a (with the same mandrel): (a) profile, (b) mandrel, (c) 1#, (d) 2#, (e) 3#, and (f) 4# design scheme<sup>[16]</sup>

综上所述, 基于数字仿真技术的“虚拟试模”是实现“零试模”的有效途径, 也是开发挤压模具设计新思路和新方法的重要技术手段。

### 3 挤压模具数字化加工

典型的挤压模具加工流程如图 14 所示, 包括模具

材料选择、数字建模、数控程序编制、机加工、电加工、热处理和表面处理等多种工序。在制定挤压模具的具体工艺时,应综合考虑模具结构、规格、精度要求、批量大小、设备条件和技术水平等多方面的因素。

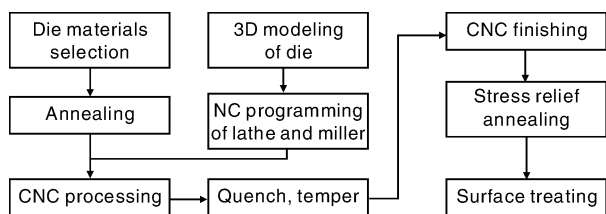


图 14 挤压模具加工流程

Fig. 14 Processing flow of extrusion die

对于结构特殊、模孔形状和尺寸复杂的挤压模具,采用传统的模具制造方法很难满足尺寸精度、表面粗糙度要求。目前,世界各国普遍采用 CNC 加工机床、CNC 线切割机床、CNC 热处理和表面处理系统实现挤压模具(尤其是大型、复杂结构模具)的加工。

在确定了合理的挤压模具结构和尺寸后,直接应用数字化三维建模与设计结果,将模具三维图形导入 Mastercam 等软件,通过加工过程规划、刀具轨迹生成、机床运动指令生成,编制 CNC 加工程序,再将 CNC 指令传输到加工车间,完成数控加工,实现数字化制造<sup>[17]</sup>。

目前,我国在挤压模具制造方面,传统的人工加工方法仍占相当大的比重,机床的 CNC 程度为 50% 左右(西方先进发达国家达 95% 以上),虽然部分挤压生产和模具制造企业建立了模具加工中心,但复杂多孔空心型材挤压模的制造技术水平尚有待进一步提高<sup>[18]</sup>。

在大力发展数控、数显、计算机控制技术,使挤压模具加工 CNC 水平不断提高和普及的同时,将挤压模具的计算机辅助设计(CAD)、辅助制造(CAM)和辅助工程(CAE)有效结合,开发新的模具设计思路和模具加工手段,优化模具加工流程,提高挤压模具(尤其是复杂多腔、多孔空心模具)的制造效率、质量和使用寿命,是现阶段我国挤压模具数字化制造需要重点解决的问题,也是今后发展的重要发展方向。

## 4 结 语

随着挤压产品向精密化、大型化、断面形状复杂化、产品性能均匀化等方向的不断发展,对挤压模具和挤压产品的质量提出了越来越高的要求,数字化设计与数字化制造已经成为挤压模具行业的主流发展方向,具有广阔的研究和开发空间。

挤压模具数字化设计的核心技术是数字化建模与数字仿真,基于仿真技术的“虚拟试模”是实现“零试模”的有效途径,也是开发挤压模具设计新思路和新方法的重要技术手段。

大力发展挤压模具数字化制造技术和制造设备,实现 CAD、CAM 和 CAE 的有效结合,提高复杂多孔空心型材挤压模具的制造技术水平,是现阶段我国挤压模具数字化制造行业的重要发展方向。

## 参考文献 References

- [1] Xie Jianxin(谢建新), Liu Jingan(刘静安). *Theory and Technology of Metals Extrusion(2nd Edt)*(金属挤压理论与技术(第2版))[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [2] Li Jibin(李积彬). *CAD/CAE 3D Design Technology of Al-alloys Extrusion Die*(铝型材挤压模具 3D 设计 CAD/CAE 实用技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [3] Zhang Guozhi(张国志). *Dies Design of Materials Forming*(材料成型模具设计)[M]. Liaoning: Northeastern University Press, 2006.
- [4] Liu Xijuan(刘溪涓), Liu Dishu(刘镭时). *Technical Foundation of Digital Design, Manufacture and Application*(数字化设计制造应用技术基础)[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [5] Huang Dongnan(黄东男). *The Influence of Die-Structure on Metal Flow Behaviours during Extrusion Process of Aluminum Alloy Sections*(模具结构对铝合金型材挤压流动变形行为的影响)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010.
- [6] Huang D N, Zhang Z H, Li J Y, et al. FEM Analysis of Metal Flowing Behaviors in Porthole Die Extrusion Based on the Mesh Reconstruction Technology of the Welding Process[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2010, 17(6): 763-769.
- [7] Liu Jingan(刘静安), Xie Jianxin(谢建新). *Extrusion Technology and Die Optimization Design of Large Al-Alloy Profile*(大型铝合金型材挤压技术与工模具优化设计)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [8] MP-GROVP. *Extrusion Power 3D CAD for Aluminium Extrusion Die Design*[EB/OL]. (2011-11-21)[2013-03-21]. <http://www.extrusionpower.com/>.
- [9] Ma Qingheng(马庆恒), Zhang Yongning(张永宁), Hu Rui(胡睿). 铝型材挤压模具设计及数据库管理系统[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*(制造技术与机床), 2007, (1): 122-124.
- [10] Wu X H, Zhao G Q, Luan Y G, et al. Numerical Simulation and Die Structure Optimization of an Aluminum Rectangular Hollow Pipe Extrusion Process[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 435(5): 266-274.

- [11] Yang D Y, Kim K J. Design of Processes and Products Through Simulation of Three-Dimensional Extrusion[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191: 2–6.
- [12] Xie Jianxin (谢建新), Huang Dongnan (黄东男), Li Jingyuan (李静媛), et al. *One Numerical Simulation Method of Welding Process for Hollow Profile Extrusion* (一种空心型材分流模挤压焊接过程数值模拟技术): China, ZL200910088960.7[P]. 2010–8–11.
- [13] Huang Dongnan (黄东男), Li Jingyuan (李静媛), Zhang Zhihao (张志豪), et al. 方形管分流模双孔挤压过程中金属的流动行为[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2010, 20(3): 488–495.
- [14] Huang Dongnan (黄东男), Zhang Zhihao (张志豪), Li Jingyuan (李静媛), et al. 焊合室深度及焊合角对方形管分流模双孔挤压成形质量的影响[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2010, 20(5): 954–960.
- [15] Zhang Z H, Hou W R, Huang D N, et al. Mesh Reconstruction Technology of Welding Process in 3D FEM Simulation of Porthole Extrusion and Its Application[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 36: 253–260.
- [16] Andreoli T, Krähenbühl Y. *Extrusion Simulation as the Way to Close the Loop in Die Design*[C]. Florida: Proceedings of 9th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2008.
- [17] Yang Haicheng (杨海成). *Technical Foundation of Digital Design and Manufacture* (数字化设计制造技术基础)[M]. Shanxi: Northwestern Polytechnical University Press, 2007.
- [18] Liu Jingan (刘静安). 铝合金挤压工模具技术的发展概况与趋势[J]. *Aluminum Fabrication* (铝加工), 2011, (1): 16–23.

## 科学家用激光实现对量子比特多种操纵

加利福尼亚大学圣芭芭拉分校(UCSB)研究人员开发出一种技术,只用激光就能对量子比特初始化,并实现了多种操纵、读取电子自旋态等。这种方法不仅比传统方法更能实现统一控制,而且功能更多样,为探索新型固态量子系统打开了大门。相关论文发表在最新版的美国《国家科学院学报》上。

虽然实验用的量子比特是钻石中的瑕疵——氮晶格空位(NV)中心,但新技术能在更广泛的材料中操作。UCSB自旋电子学与量子计算机中心主管、物理学教授戴维·奥斯盖勒姆说:“与传统技术不同,我们开发的是一种利用激光脉冲在半导体内控制单个量子比特的全光策略。这将带来一个好机会,让人们有望用光子芯片处理和交流量子信息。”

传统方法是利用微波场和钻石瑕疵的特殊属性来操作,尽管NV中心是一种很有前景的量子比特,过去10年来一直被广泛研究,但要用工业或生长的方法造出所需钻石却是极大的挑战。全光控制让人们能更多样地操纵NV中心,这和传统方法完全不同,还能用其他材料来研究量子系统,制造这些材料的技术也更加成熟。UCSB物理学研究生鲍勃·巴克尔说:“这些技术将来会更普及,还可用于未曾探索过的量子系统。”

NV中心是钻石原子结构上的一种瑕疵,钻石晶格中一个碳原子被一个氮原子取代,使其附近空缺出一个晶格空位,围绕氮原子旋转的自旋电子就变成一个量子比特,即量子计算机的基本单位。传统技术要先把这一量子比特初始化,成为具有界限清晰的能量态,然后才能与其对接。传统计算机的基本信息单位是比特,要么是0要么是1;而量子比特可以同时是0和1,或者同时处于任何两个数学叠加位,允许研究人员进行更复杂的操作。

“最初我们是想找到一种方法,只需一步就把量子比特放在其状态中任何可能的叠加位。”论文第一作者、物理学研究生克里斯托弗·耶尔说,“结果我们只需调整与自旋电子相互作用的激光就实现了这一点,而且我们能产生自旋态的相干旋转,并读出电子的相对自旋状态。”

此外,全光方法还有升级的潜力。物理学研究生戴维·克里斯托指出:“假如你有一排按顺序排列的这种量子比特,当用传统的微波场方法时,很难在与其中任一个交谈时不影响其他比特。理论上,在一个理想的光学系统中,新技术能把光线集中到单个量子比特上,只跟它‘交谈’。”

研究小组认为,虽然开发出实际的量子计算机还要再等几年,但新研究为这一最终目标开辟了新路径。量子计算设备能执行某些精密计算和复杂功能,比现有计算机效率高得多,将推动诸多领域进一步发展,如量子加密和量子模拟。

(From <http://paper.sciencenet.cn/htmlpaper/20135310316328964.shtm>)