

模具结构化表面 SAF 精密光整技术*

计时鸣, 赵凌寒, 谭大鹏, 袁巧玲, 李 琛

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对模具结构化表面难以采用传统抛光工具实现精密光整加工的问题,提出了一种基于软性磨粒流(SAF)的模具结构化表面无工具精密加工新技术。该技术通过约束模块与结构化表面组合构成特定形状的磨粒流通道,利用SAF在通道中的湍流流动使磨粒对结构化表面进行微力微量切削,进而实现光整加工。介绍了SAF加工技术原理、SAF流体动力学特征以及加工机理的理论研究进展和加工试验结果,给出了描述SAF加工的材料去除效果的定量化数学模型以及工艺参数与表面粗糙度关系的经验公式。

关键词:模具;结构化表面;软性磨粒流;光整加工

中图分类号: TG580.1; TH161⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)10-1161-09

Soft abrasive flow machining for structural surfaces of moulds

Ji Shi-ming, ZHAO Ling-han, TAN Da-peng, YUAN Qiao-ling, LI Chen

(Key Lab of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In allusion to the problem of difficult precise finishing for structural surface in course of mould manufacturing, a new no-tool precision machining method based on soft abrasive flow (SAF) was proposed. It allocated restrained component near to surface machined, constituted restrained abrasive flow passage, and used the turbulence of SAF in restrained passage to realize micro cutting for passage wall. SAF technical principles, SAF fluid dynamic characteristics, micro machining mechanism and the results of machining experiments were introduced, the SAF material cutting effects model and the corresponding empirical equation of surface roughness and technical parameters were brought forward.

Key words: mould; structural surface; soft abrasive flow (SAF); finishing machining

0 引 言

在模具制造过程中,为了消除模具表面所残留的机械加工痕迹,光整加工技术成为必要的工艺环节。现有方法一般需借助工具接触或靠近待加工表面进行加工。但是,模具的结构化表面(特指沟、槽、孔、棱柱、棱锥、窄缝等异型表面),特别是尺寸微小或形状复杂的结构化表面,则难以使工具与之接触从而进行光整加工。

松散磨粒与流体混合,可构成液-固两相磨粒流,通过磨粒流与加工表面接触时的壁面效应,形成磨粒对表面的微切削,从而可以实现表面光整加工,而磨粒

流的流体特性则使之可以方便地与复杂型面形成良好仿形接触,因此,其在异型面加工中体现出了明显的技术优势。

基于磨粒流形成了一系列表面光整加工方法,例如挤压珩磨^[1-4]、磨粒水射流抛光^[5]、磁流变抛光^[6-8]、磁射流抛光^[9]、电流变液抛光^[10]等。挤压珩磨和磨粒水射流抛光属于“硬性”磨粒流强力加工,这类方法需要对磨粒流施加强大的挤压力或喷射动力,使工件表面受到磨粒的强力刮削或冲击碰撞,虽加工效率高,但在磨粒强力作用下,不能获得良好的表面粗糙度,在表面会留下具有明显方向性的加工痕迹,因此,它们只能用作表面的粗抛加工。磁流变抛光、磁射流抛光和电

收稿日期: 2011-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5087242);浙江省自然科学基金重点资助项目(Z107517)

作者简介: 计时鸣(1957-),男,浙江温州人,教授,博士生导师,主要从事精密光整技术方面的研究。E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

流变液抛光则仍须借助工具进行,受工具尺寸限制尚无法用于结构化表面微小尺寸的沟、槽、狭缝加工。

为解决模具结构化表面精密光整加工问题,笔者提出了一种基于 SAF 的模具结构化表面无工具精密加工新方法。该方法借鉴磨粒流加工的技术优势,实现结构化表面微小尺寸的沟、槽、狭缝加工的无工具化光整加工。本研究将介绍模具结构化表面 SAF (Soft Abrasive Flow, SAF) 精密光整技术的原理及其研究现状。

1 模具结构化表面 SAF 加工技术原理

所谓 SAF 是一种液-固两相磨粒流,具有弱粘性或无粘性,流动特性良好,易于实现湍流流动。借鉴磨粒流光整加工高仿形性的优点,并考虑到各种磨粒流加工技术的优势与不足,笔者及其研究团队提出了针对模具结构化表面的 SAF 精密光整技术^[11-12]。

基于 SAF 实现模具结构化表面无工具精密光整加工的技术原理是:① 通过在被加工的结构化表面配置约束模块,约束模块与被加工表面组合构成磨粒流约束流道,被加工表面成为流道壁面的一部分;② 在约束流道内,通入高速湍流流动的 SAF 以替代加工工具实现对流道内壁,包括被加工表面的光整加工;③ SAF 在湍流状态实现加工,不是通过射流的形式强力冲击被加工表面,而是利用磨粒的微力微量切削的频繁作用实现表面的逐步光整,湍流流场中的磨粒运动的随机性可使得加工表面纹理无序化,从而可以不通过加工工具的接触而实现对结构化表面的镜面级光整加工。传统工具光整方法与 SAF 加工技术的对比如图 1 所示。

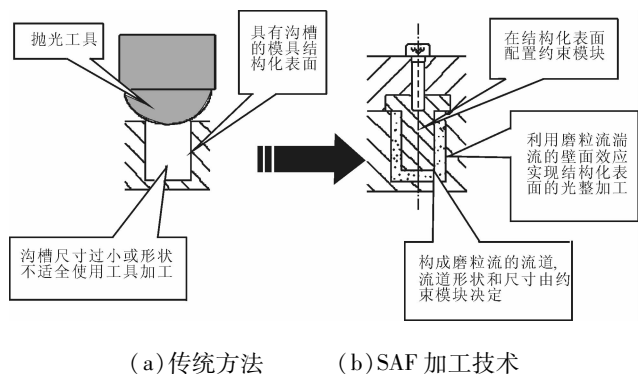


图 1 传统抛光方法与 SAF 加工技术的对比

SAF 加工技术的特点是:①磨粒流可与复杂形状的模具结构化表面形成良好接触,克服了细小尺度的结构化表面无法使用工具进行光整加工的困难;②加

工过程可自动化进行;③利用湍流壁面效应实现微力微量切削,结构化表面无加工变形,可用于薄壁件加工;④利用磨粒在封闭流道内循环流动反复碰撞被加工表面,可提高磨粒利用率和加工效率,并可通过过滤加工残留并减少排放实现清洁加工,节约能源。

2 SAF 加工技术理论模型研究

不同的流道截面与内表面形态将直接影响流过流道流体的流动状态,因此必须合理设计约束模块的形状,使之与被加工表面组合构成的磨粒流约束流道的截面形状和流道内表面形态,便于 SAF 在其中形成特定的湍流状态,从而得到对加工壁面的良好加工效果。另外,SAF 的湍流形态还与其自身的流体力学特性以及流动参数密切相关,而湍流形态决定了 SAF 光整加工的效率和质量。因此,建立 SAF 流动特性分析的理论模型和分析手段,对 SAF 的湍流形态分析和研究 SAF 加工机理和加工工艺参数设计具有重要的意义。笔者从以下若干方面对 SAF 的理论模型与分析方法进行了研究。

2.1 基于 DPM 的 SAF 颗粒运动分析

首先,笔者引入离散相模型 (Discrete Phase Model, DPM) 对 SAF 进行分析^[13]。在离散相的体积分数约为 10% ~ 12% 的情况下,本研究采用 DPM 对磨粒相 (即磨粒) 中的粒子轨道进行计算,得到了约束流道内颗粒相运动的仿真结果,并在单颗粒情况下模拟了颗粒的运动轨迹和碰撞特征。

在分析中,鉴于磨粒流为不可压缩流体,本研究采用了欧拉 (Euler) 多相流模型方程和欧拉颗粒模型。欧拉颗粒模型的优势在于它非常易于在流体相方程中进行执行和求解,而流体相方程的数值计算方法同样可用于颗粒相的求解。在拉格朗日 (Lagrange) 坐标下通过对粒子力平衡方程求积分,可得到离散相颗粒的运动轨迹。当固-液两相流的密度比大于 200,颗粒相的特征尺度小于科尔莫夫 (Kolmogorov) 尺度时,颗粒的动量方程可进行简化,忽略除了重力与曳力以外的其它力,例如巴塞特力、虚拟质量力、马格努斯力、萨夫曼力 (Saffman) 和浮力等。通过随机轨道模型,可以模拟湍流扰动导致的颗粒运动分布。

由于线性底层中的磨粒运动是 SAF 加工的最主要运动,在加密网格的同时对壁面采用双层模型方法进行处理,采用 Kader 提出的壁面函数模拟湍流线性底层的运行情况,对工作磨粒的运动情况和运动轨迹进行评测。

本研究通过 DPM 模型对 SAF 进行分析,得到以下结论:①磨粒流对流动壁面的微切削,在磨粒流压力影响下表现为主要切削位置的推移,在近壁区,磨粒速度的影响表现为切削效率的增减;②加工过程中磨粒主要处于湍流边界层的线性底层,通过对磨粒轨迹的数值模拟和观测试验,结果表明软性磨粒两相流的精密加工机理主要是磨粒流中磨粒在近壁区沿流向遵循涡轨迹进行的微量切削,磨粒流磨粒在壁面的切削痕迹可以呈现无序形态,因此,基于软性磨粒两相流实现镜面级精密光整加工是可行的(镜面级精密光整加工需要随机型的切削痕迹);③给定约束流道入口处磨粒流的速度及其持续流动的时间,可以利用 Preston 方程来确定速度、压力和去除量之间的定量关系,基于该定量关系可以制订符合加工需求的磨粒流加工工艺,Preston 方程的系数经过理论和试验研究可以得到符合实际的数值;④磨粒在进入流道后,随着湍流的发展和磨粒的沉降,在经历一段时间之后颗粒相在流道内的流形分布将趋于稳定,但随着湍流雷诺数的增大,趋于稳定则需要更长的时间,稳定的流形分布可以确保流道内的部分局部壁面得到高效的加工,改变约束流道的形状,可以调整具有高效加工效果的局部壁面的分布位置,因此,时序化地更换约束流道,可以实现全流道范围内待加工壁面的均匀化加工;⑤磨粒压力对磨粒产生的切削作用具有重要影响,在湍流状态下磨粒压力的变化规律是复杂的,受到颗粒相体积分率、微粒传导率、流道内切向位置、壁面处的颗粒相分布状态等因素的影响,确保流道壁面处的颗粒相分布和湍流发展处于基本稳定状态,则可以保证磨粒压力分布更为均衡,加工效果也更好。

2.2 基于 LSM 的 SAF 流场特性分析

磨粒两相流在流动过程中没有化学反应,物理性质稳定,因此,笔者采用了水平集方法(Level Set Method, LSM),分析 SAF 速度矢量分布及其发展趋势,实现对相界面运动过程的模拟^[14]。上述方法的基本思想是:将界面看成高一维空间中某一函数(称为水平集函数)的零水平集,且将界面的速度也扩充到高维的水平集函数上,得到水平集函数所满足的拓扑方程,通过求解方程,推导水平集函数,计算至规定时刻,找出此新时刻水平集函数的零水平集,得到界面的形状。界面的法向方向、曲率等由水平集函数的偏导数进行计算。

笔者对 SAF 进行了界面定义,定义 $\Phi = 0$ 为瞬态预混合两相流界面的位置,可将整个流场划分为 2 个

区域,其中 $\Phi > 0$ 为磨粒流区, $\Phi < 0$ 为流体区。通过建立边界水平集和颗粒运动守恒方程,并采用高阶 TVD Runge-Kutta 法对方程进行离散和求解。基于 SIMPLEC 算法求解离散后的差分方程组,计算出速度场和压力场,其离散化步骤包括为:①空间离散化;②通过投影,使得有散度的速度场变为无散度的速度场;③时间离散化;④对边界水平集函数进行初始化重构,从而提高求解的精确度。

由于流道的几何特征和初始条件等因素,速度、压力在流道中的分布呈现位置和时间上的相应变化,在单一的入口流速时,流道内壁面必然发生加工不均匀状况,因此通过对流速和流道内壁面区扰流的控制是实现流道全程均匀加工的必要措施。基于水平集方法的分析结果表明,当磨粒流以一定的速度流向另一流体区的过程中,流道的速度分布将发生相应的变化。流体在静止平壁上的流动,由于粘性作用,磨粒流速度在壁面上存在最小值,上端部分相对下端的速度较大,随着磨粒流流动长度的增加,上下两端的速度差逐渐变小。流体通过流道后速度分布不再均匀,存在一定的速度差,同时由于流道的几何特点,存在一定的流体流量变化,即流体的流通面积的变化(由于流道宽度变小,形成两流量之差,粘滞作用导致流量损失,而此为排挤厚度的含义)。

磨粒流在流动过程中,压力和湍动能则经历了各自的不同变化。由于受流道几何特点的影响,在流道的中形成了压力局部最大值区域,由于流道拐角的影响,湍动能随时间变化在壁面的分布,随着时间的推移,压力总体分布呈现先逐渐增加,后略有下降的变化过程。

速度越大的区域,磨粒流对壁面的碰撞频率也越大,加工效率也随之提高,压力越大,光整力度也更大,在约束模块和加工工艺设计时需考虑单一流速作用下,流道壁面的切削情况的不均衡性。

2.3 基于 SOM 的 SAF 湍动特性分析

鉴于颗粒相体积浓度和颗粒相压力关系密切,在 SAF 分析中,笔者从考虑颗粒相体积浓度对颗粒相压力的影响出发,提出使用二阶矩(Second-order Moment, SOM)湍流模型下考虑浓度修正值影响的两相湍流流动的算法^[15]。该算法既考虑了浓度修正的影响,又将 SIMPLEC 算法中速度修正值和压力修正值的关系式融合在内,具有一定的优越性。

上述算法主要步骤包括:①给定两相速度、两相雷诺应力、两相脉动关联应力、两相湍动能耗散率、颗粒

相温度、颗粒体积浓度及流体压力分布的初始值和颗粒相压力;②由颗粒相连续方程计算颗粒相体积浓度,然后由体积浓度总守恒方程计算流体相体积浓度;③根据两相压力场,计算两相动量方程,得出两相速度场;④计算两相压力修正方程,得出两相压力修正值;⑤由两相压力修正值修正两相的速度场,由颗粒相压力修正值修正体积浓度场;⑥计算两相雷诺应力方程、两相脉动速度关联方程、两相湍动能耗散率方程及颗粒相似温度方程,求出流体相和颗粒相的湍流扩散系数以及动力粘性系数,再次由颗粒相压力和颗粒相体积浓度的关系式计算颗粒相体积浓度;⑦返回步骤②,重复以上过程直至收敛。

基于以上算法分析,可以得到在流道中 SAF 的湍动能的变化,较充分描述颗粒的脉动情况,可以反映出颗粒和壁面发生碰撞以及在狭长的水平通道当中颗粒载荷比较高时,颗粒与颗粒之间的频繁碰撞造成颗粒雷诺应力在各个方向上的重新分配和耗散情况。磨粒流流态发展中液相粘度的影响相对比较少,主要受到颗粒与颗粒之间的碰撞对颗粒雷诺应力的影响。

2.4 基于 VOF 模型的 SAF 组份分析

流体体积模型 (Volume of Fluid, VOF) 方法适用于两种或多种互不穿透流体间界面的跟踪计算。模型对每一相引入体积分数变量,通过求解每一控制单元内体积分数值确定相间界面。笔者基于该方法,对磨粒流分散发展过程中的体积组份进行跟踪,从而确定磨粒流有效加工位置及其变化发展规律^[16]。

VOF 模型的控制方程由流体函数的输运方程和流体运动控制方程一起构成。本研究通过求解一相或多相的体积分数的连续方程来跟踪相与相之间的界面的变化。由于 SAF 采用湍流状态进行加工,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,只需求解一套输运方程,湍流变量被通过整个区域的各相所共享。由于磨粒的颗粒足够的细,假设为连续的流体相,若流体采用机油,则将机油考虑为第一相,碳化硅磨粒 (SiC) 为第二相,求解方程组时,碳化硅相的体积分数为 10% 和其他物理参数一起参与迭代求解。

2.5 仿真分析结果

如图 2 所示,由约束模块与被加工表面构成了 U 型流道,流道总长为 50 mm。

本研究采用非结构化的六面体网格进行网格划分,网格总数约为 80 000。边界条件选用速度入口、自由出口。流体相密度和粘度分别为 880 kg/m^3 、 $46 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。颗粒相选用 SiC,密度和动力粘度分别为

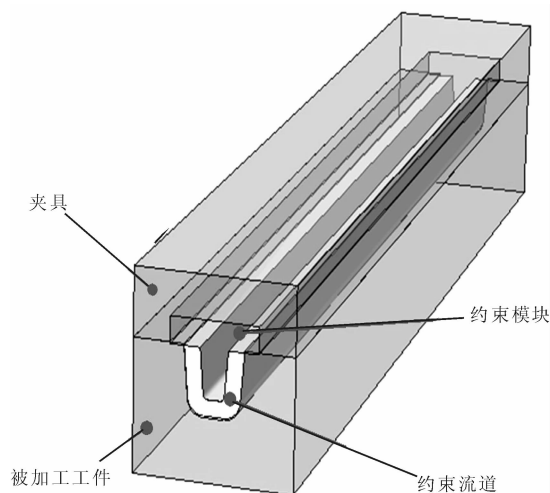


图 2 由约束模块与被加工表面构成的 U 型流道

3170 kg/m^3 、 $2.064 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 平均粒径为 $55 \mu\text{m}$ 。颗粒相体积分数为 0.1。本研究在流道入口处布置垂直于入口截面入射的稀疏粒子流。

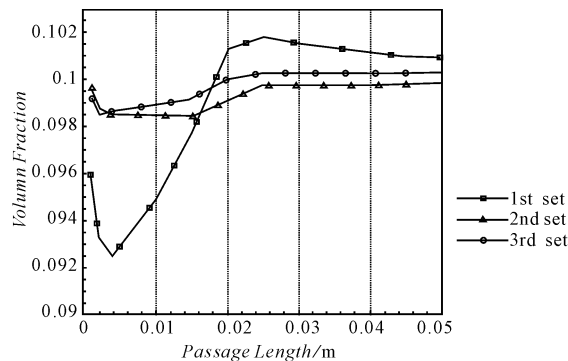


图 3 流道不同位置处颗粒相体积分分数分布情况

基于 DPM 方法,本研究对 SAF 颗粒的运动进行分析,得到了流道不同位置处颗粒相体积分分数分布情况,如图 3 所示。

基于 DPM 方法,本研究还得到了不同雷诺数下流道近壁处颗粒相体积分分数分布情况和流道近壁处颗粒相湍动能分布情况、恒定雷诺数情况下流道壁面处的颗粒相体积分分布等值线和流道壁面处的颗粒相湍动能等值线、不同雷诺数下流道近壁处颗粒压力分布情况、流道不同位置处颗粒压力分布情况以及近壁区磨粒轨迹在 yz 面上的投影。

VOF 方法根据体积比函数来构造和追踪自由面,由于 VOF 模型在边界区域是不连续的,且在处理复杂的几何问题上也较困难,但当与水平集方法结合后,能较好地解决这个问题。同时,也能很好地减小水平集方法的质量损失。当处于未知边界的位置时,无法使 VOF 模型转化为可计算区域模型,但利用水平集的方法便可以定位边界和体积模型,从而与 VOF 模型结

合,实现流体模型模拟与计算。本研究以 FLUENT-6.3 为计算平台,计算区域和网格划分由 GAMBIT-2.2.30 前处理器生成,对特定流道进行了分析。

流道为方形截面弯道,平均半径 9 mm,方形截面边长 4 mm,弯道前直弯段 9 mm,弯道段长 30 mm,如图 4 所示。设定流体相流动已充分发展为湍流,采用速度进口,自由出流出口;磨粒相给定与流体相同的初始速度,采用速度进口,自由出流出口。

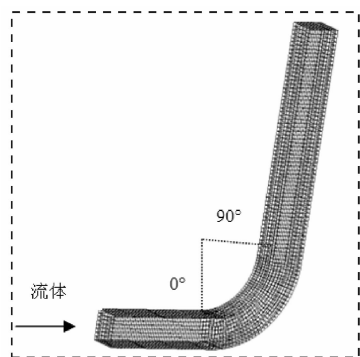


图 4 弯道的形状与网格划分示意图

通过水平集方法与 VOF 方法结合分析,本研究得到了整个弯道磨粒流的速度矢量分布、不同角度速度矢量变化情况,整个弯道中磨粒流的速度分布和 X-Y 平面的压力矢量图、X-Y 截面处内(外)径的压力变化。

磨粒流通过弯道时速度分布如图 5 所示,本研究根据角度的变化选取不同截面处的速度矢量分布如图 6 所示。

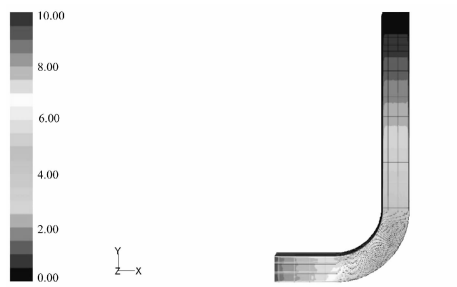


图 5 整个弯管道的速度矢量分布

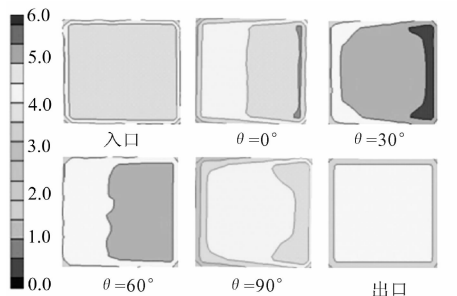


图 6 不同角度速度矢量变化图

基于 VOF 模型,本研究对磨粒流分散发展过程中的体积组份进行跟踪。另外选择了“之”字形流道为例,假设 SAF 为不可压缩流体,为避免使用六面体结构网格时出现网格形状扭曲,甚至产生负单元体积,在计算时容易产生奇异解,特别是对于流道拐弯处变形较大,故这里采用了四面体的网格,既能反映整个流道的流场特征,又能减少划分的网格数量,减少计算内存和提高计算速度,如图 7 所示。

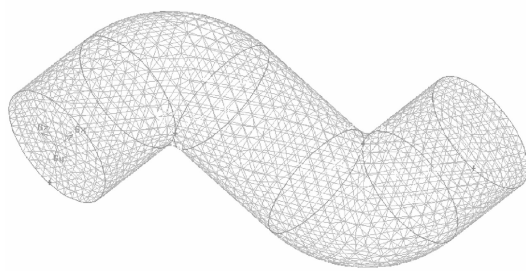


图 7 “之”字形流道的网格划分示意图

在计算过程中本研究采用了自适应的方法来完善计算结果的精度,采用了前处理器 GAMBIT 来生成网格和计算区域。由于“之”字形流道结构分布不均匀,分段划分流道的网格同时采用边界层网格技术,使网格更接近实际模型。



图 8 入口直径为 2 mm 时流道壁面的体积分数分布图

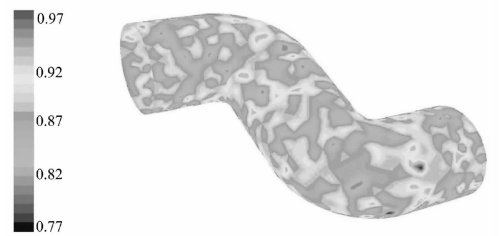


图 9 入口直径为 4 mm 时流道壁面的体积分数分布图

不同流道直径情况下 SAF 的第一相在壁面处的体积分数的对比分析如图 8、图 9 所示,可以看出随着流道直径的增大,该相在壁面处的分布也随之变得稀释,在同一流道内,变形较大处突变比较大,该相的体积分数在不同位置分布基本趋于均匀,有利于模具结

构化表面取得较一致的形状精度。由于 SAF 加工的实质就是近壁区的磨粒与模具结构化表面相互碰撞和摩擦,靠近壁面的磨粒浓度大,则单位面积内参与作用的有效磨粒数量多,越有利于提高加工效率。

3 SAFM 精密加工机理与实现

3.1 约束模块结构及表面

为了能有效光整加工结构化表面,磨粒流应在一定湍流状态下通过结构化表面,因此,需利用约束模块与结构化表面构成封闭的流道,特别是设计约束模块的特定结构形态,使之确保流道内软性磨粒两相流的流动状态符合加工要求。

清华大学郝鹏飞等^[17]人对内壁存在分布粗糙单元的直线矩形截面流道中流阻、湍流及其转捩过程进行实验与分析,其结果表明,层流状态下 3% ~ 7% 的相对粗糙度可导致微管道内流动阻力明显增加,粗糙单元会引起微管道内流动失稳,导致层流提前向湍流转捩。因此,通过约束模块的表面粗糙度设计,可以调控 SAF 的湍流转捩以及湍流形态,从而影响流道截面中有待加工部分的加工效果。

MYUNG G L 等人^[18]对流道内存在内外直角的变矩形截面微流道涡流场进行了实验分析,结论表明流道沿程截面积的急剧变化,可使流场中外直角分离涡与二次流涡充分联合,形成对流场中介质的显著混合作用。因此,通过约束模块设计流道截面的变化,可以调控局部湍流涡动状态,从而调控流道有待加工局部的加工效果。

由于流体沿程压力损失以及流体在前进过程中所受到的物理阻碍差异,单一形状的约束模块所构成的磨粒流流道,一般情况下难以形成对整个加工区的均匀加工。因此,笔者将约束模块设计成为形态可变的多组模块,通过对流道不同局部截面和表面的调整,以改善各局部区域的加工效率和加工效果。

3.2 SAF 在近壁区域流场特性

笔者基于 DPM 模型分析了不同粘度工作介质在通过矩形流道时其近壁区域的湍流特征,对不同直径磨粒在不同粘度液相中的运动轨迹进行了模拟和比较。其结果显示流体粘度和速度越大,壁面压力和剪切应力越强,有助于去除工件表面材料;但更大的粘度将导致磨粒速度衰减,且直径较小的磨料粒子的速度衰减较弱,可保持更长的颗粒流动距离^[19]。笔者的课题组通过 U 形截面约束流道内的 SAF 动力学模型,得

到了 SAF 在流道中运动轨迹的变化规律,湍流参数曲线以及压力分布,并以此为参考,基于尼古拉斯(Nikuradse)实验对 SAF 近壁区的动力学特性进行分析,通过不同入口流速的对比仿真实验,得到流道近壁区的压力分布变化,从近壁面动力学特性的角度确定采用 SAF 对细微尺度结构化表面加工时的最佳加工区域,优化流体加工效率。

课题组的袁巧玲等人^[20-21]引入低雷诺数 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对强曲率弯曲流道和 U 型流道近壁面处的流场进行了数值分析,并进一步分析了磨粒场的运动方式,结果显示磨粒的微切割作用主要发生在切削位置受到颗粒压力影响而发生改变,以及受近壁处磨粒速度控制的切削效率发生变化的情形下。结果表明,可以通过控制介质入口速度以及加工时长来控制抛光效果。

西安交通大学王昊利等人^[22]采用摄动分析方法研究了微尺度条件下壁面粗糙度对流场的影响,研究结果表明,壁面相对粗糙度和粗糙元间距是影响微尺度流场结构的主要因素,由于壁面粗糙元的存在,流场近壁区出现明显涡结构。

清华大学崔桂香等人^[23]研究了圆管湍流的近壁活动,发现圆管湍流近壁流动结构和直壁湍流的相干结构相似,如条带、流向涡和外抛等,但在定量特性上两者略有差别,圆管湍流的平均条带宽度较大,猝发周期较长。近壁区域是大部分近壁湍流的发源地,近壁湍流中存在低速条带,这种条带形成后出现抖动,随即破碎、最后导致低速流体向外层的喷射以及继之而来的外层高速流体的下扫,该过程称为猝发,它对湍流发生起主要作用。

3.3 SAF 的材料去除特性

笔者基于 Preston 方程及其修正系数的分析研究,得到了适用于 SAF 的材料去除经验公式。Preston 常数 k_p 是一个包含了诸多因素的复杂算式集合,可以将这些因素分成两个部分:

(1) 磨粒与壁面作用时的参数。理论上,这些参数可认为是一个单独变量的函数,为方便计算,将被加工区域近似缩小至一点,即可认为磨粒与壁面的作用参数为常数。其中对磨削效果影响最大的是颗粒与壁面撞击时的入射角度,所以将入射角引入 Preston 方程的修正系数中。颗粒以 90° 和 0° 为入射角对加工表面进行撞击时的加工效果最差,因此 Preston 系数 K_1 可表示为:

$$K_1 = f(\alpha) \quad (1)$$

式中: $f(\alpha)$ —颗粒与壁面碰撞角 α 的函数。

(2) 客观不变的参数。磨粒的规格尺寸(包括磨粒的大小、硬度等)和被加工工件的规格(工件的硬度等)。基于拉宾诺维奇(Rabinowicz)对于磨损模型的研究,可认为当磨粒硬度远大于被加工表面硬度时,此时加工表面为软性表面,磨粒对工件的磨削效果较好;而当磨粒硬度小于加工表面时,磨削同样会发生,但是磨削效果较差,极端条件下会出现磨粒反被工件磨损的情况。引入硬度比 K_z , K_z 为磨粒硬度 H_p 与被加工工件硬度 H_{face} 的比值:

$$K_z = \frac{H_p}{H_{face}} \quad (2)$$

对于式(2)所描述的硬度比,当 $K_z < 0.8$ 时,即认为加工表面为软性表面,此时 $K_z = C$, C 为常数;当 $1.25 < K_z < 0.8$ 时,此时 K_z 正比于 Δz ;当 $K_z > 1.25$ 时,此时磨削效果较差。

因此, Preston 方程的系数 K_2 可表示为:

$$K_2 = K_z D(d_p) = \frac{D(d_p) H_p}{H_{face}} \quad (3)$$

式中: $D(d_p)$ —颗粒直径函数, H_p —颗粒硬度, H_{face} —工件表面硬度。

综上所述,将上述系数合并后,得到修正后的 Preston 常数 k_p' 为:

$$k_p' = K_1 \times K_2 \quad (4)$$

修正后的 Preston 方程可以计算固-液两相 SAF 的加工去除率。

3.3 SAF 的配比

低粘度 SAF 的配制,选择了切削液、分散剂 and 水的混合液作为液相流体,选取不同成分的配比配制 SAF。经过颗粒悬浮持久度试验对比,选择 RX-1 系列切削液和 HT-5000 系列分散剂,组份配比试验如下:

- (1) 50 ml 水 + 150 ml 分散剂;
- (2) 50 ml 切削液 + 150 ml 分散剂;
- (3) 150 ml 水 + 50 ml 分散剂;
- (4) 100 ml 切削液 + 100 ml 分散剂;
- (5) 50 ml 切削液 + 150 ml 水 + 50 ml 分散剂;
- (6) 150 ml 分散剂。

在以上配制流体中添加 SiC 颗粒,使其体积分数达到 10%, SiC 颗粒直径为 2000 目左右 ($6.5 \mu\text{m}$), 构成 SAF。

6 种不同成份的磨粒流在混合初期, SiC 颗粒能够均匀分布在流体中, 0.5 h 后, 有较多分散剂 (150 ml 分散剂) 的流体中 SiC 颗粒能够基本分散在流体内, 而

较低含量的分散剂溶液中, 固体颗粒绝大部分已经沉淀。分散剂本身的粘度较大, 但其粘度可通过水稀释进行调节, 分散剂含量越高, 使 SiC 颗粒带同种电荷的电量越大, 同时磨粒流溶液粘度越大, 颗粒在磨粒流溶液中悬浮时间越长。分散剂含量在 50% 以上, 具有较好的分散效果, 含量低的时候磨粒沉淀速度很快。为了使磨粒流能够达到较高的雷诺数, 需要控制分散剂在磨粒流溶液中的比例 (50% 左右), 分散剂与水比例应为 1:1 进行混合调配, 才能使磨粒流的中颗粒的悬浮和雷诺数达到理想的效果。切削液的粘度和水相近, 可以替代水配制磨粒流, 以避免工件发生锈蚀。

3.4 SAF 的光整加工工艺试验

基于前期研究成果, 在相关支撑项目的资助下, 笔者建立了面向模具结构化表面精密光整加工的 SAF 加工实验台, 如图 10 所示。该实验台采用液压隔膜式计量泵输送 SAF, 隔膜泵的额定流量为 240 L/h, 额定工作压力为 10 MPa, 配置了内循环压力平衡系统, 液压腔体采用密封和耐高压结构, 可在高、中、低压的工况和零泄露状态下连续稳定可靠运行。



图 10 SAF 加工实验台

实验台配置了可重构型的模块化流场约束模块的装夹定位系统, 可以更换各种模具结构化表面的试样, 更换并夹持各种构型和不同表面特性的约束模块和不同物性的磨粒流, 配置了仅对模具的局部进行加工的流道封堵和局部密封系统, 设置了显微视频系统以便观察记录磨粒流流动情况, 并进行图像分析。

3.5 SAF 精密加工实验

为观察颗粒对壁面的微切削效应, 本研究设计了基于 KEYENCE-VW-6 000 动态分析三维显示系统的实验观察装置。在结构化表面粘贴金属薄膜, 加工时颗粒撞击会在金属薄膜上够留切削痕迹, 磨粒中混合部分彩色示踪颗粒, 可用 KEYENCE-VW-6000 动态拍摄磨粒运动过程。本研究用 200 目的筛网筛选颗粒的直径为 $74 \mu\text{m}$, 与配置的弱粘性流体混合后, 将磨粒流

泵入封闭流道,实验过程持续 10 h。获得了颗粒与壁面碰撞、颗粒之间碰撞后颗粒呈一定角度反射后的运动序列图像,观察到在湍流形态的 SAF 的作用下颗粒呈漩涡状的轨迹进行运动。

加工前金属薄膜的表面,由于在运输及撕膜的过程中,留下了明显的凹凸不平,并且带有纹理的表面,如图 11 所示。10 h 后观察金属薄膜表面的微切削情况如图 12 所示。对比两张图,可以发现以下两点:①原来凹凸不平带有纹理的表面变得很平整;②金属薄膜表面有明显的颗粒撞击留下的痕迹。

由于颗粒随流体在湍流的状态下运动,颗粒有可能从各个方向撞向表面,所以原来带有纹理表面消失了。颗粒撞向金属表面的力是微利微量的,它可以是金属表面变得更加光整,进一步它不会造成被撞击表面的塑性变形,不会破坏被撞击表面的材料属性。

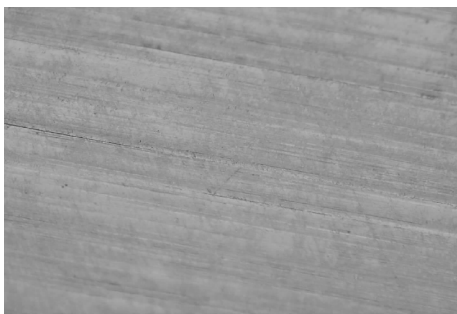


图 11 加工前金属薄膜的表面

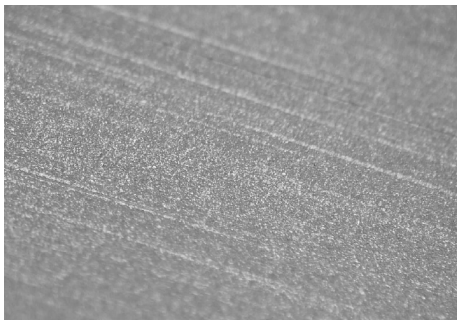


图 12 加工后金属薄膜的表面

本研究对材料为 45#钢的工件进行试验,流体压力 3 MPa 工况条件进行加工,进行 50 h 加工实验,工件表面粗糙度得到有效改善,由 R_a 0.566 μm 降低到 R_a 0.271 μm ,如图 13 和图 14 所示。

本研究采用正交试验的方法对表面粗糙度 R_a 的经验公式进行了研究。基于 Preston 方程,可知影响表面粗糙度的因素包括流体压力峰值 P 、抛光时间 T 、流量 qv 等参数, R_a 的经验公式可以表达为:

$$R_a = kP^{\alpha_1} T^{\alpha_2} (qv)^{\alpha_3} \quad (5)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 —经验常数。

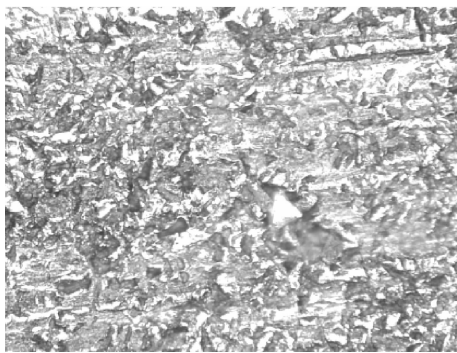


图 13 加工前的工件表面

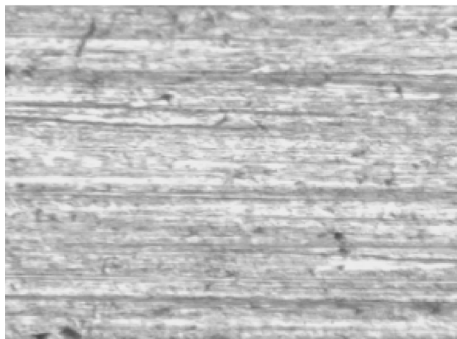


图 14 加工后的工件表面

若工件材料设定为 45#钢,通过正交试验得到的 R_a 的经验公式为:

$$R_a = (3.489 \times 10^4) P^{-1.720} T^{-1.131} qv^{-1.248} = \frac{3.489 \times 10^4}{P^{-1.720} T^{-1.131} qv^{-1.248}} \quad (6)$$

4 结束语

基于 SAF 的模具表面无工具化精密加工新原理,本研究通过一定手段实现 SAF 在被加工结构化表面的湍流流动,借助湍流中磨粒对壁面的微力微量切削实现结构化表面的无工具化精密加工,为解决模具结构化表面难以采用工具接触加工方法实现精密光整加工的技术难题,提供了一种可行的解决方案。

本研究给出的基于离散相模型、水平集方法、统一二阶矩方法以及流体体积模型等方法,为 SAF 磨粒流的加工机理和加工过程研究提供了理论工具和分析手段,这些方法在磨粒流磨粒相浓度较低时具有较好的准确性,有待进一步深入研究的问题是在较高磨粒浓度情况下,如何较准确地分析计算磨粒流湍流流态。

本研究通过理论与试验分析,基于 Preston 方程,通过修正系数方法,得到了描述 SAF 加工的材料去除效果的定量化数学模型以及工艺参数与表面粗糙度关系的经验公式,为工艺路线和工艺参数设计提供了指

导依据。

参考文献 (References):

- [1] TZENG H J, YAN B H. Self-modulating abrasive medium and its application to abrasive flow machining for finishing micro channel surfaces [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2007, 32 (11): 1163-1169.
- [2] TZENG H J, YAN B H. Finishing effect of abrasive flow machining on micro slit fabricated by wire-EDM [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2007, 34(7): 649-656.
- [3] JAIN V K, ADSUL S G. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM) [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2000, 40(7): 1003-1021.
- [4] LOVELESS T R, WILLIAMS R E, KAJURKER K P. Study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 1994, 47(1): 133-151.
- [5] 方 慧, 郭培基, 余景池. 液体喷射抛光材料去除机理的研究 [J]. **光学技术**, 2004, 30(2): 248-250.
- [6] GEISS A, SCHINHAERL M. Sedimentations on high precision surfaces of advanced materials by magnetorheological finishing [C]// *Proceedings of SPIE - Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VII*, 2006, 6288: 62880R.
- [7] SUN X W, ZHANG F H, DONG S. Two-stage interpolated algorithm for magnetorheological finishing optical curved face [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, 33(2): 61-64.
- [8] KORDONSKI W, JACOBS S. Model of magnetorheological finishing [J]. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 1996, 7(2): 131-137.
- [9] 张学成, 戴一帆, 李圣怡. 磁射流抛光中磁场的分析与设计 [J]. **航空精密制造技术**, 2006, 42(1): 12-15.
- [10] KURIYAGAWA T, SAEKI M, SYOJI K. Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts [J]. **Precision Engineering**, 2002, 26(4): 370-380.
- [11] 计时鸣, 唐波, 谭大鹏, 等. 结构化表面 SAF 精密光整加工方法及其磨粒流动力学数值分析 [J]. **机械工程学报**, 2010, 46(15): 178-184.
- [12] JI S M, GONG B, YUAN Q L, et al. Mould machining of structural surface based on liquid solid two phase abrasive flow [J]. **Advanced Materials Research**, 2009 (69-70): 198-202.
- [13] JI S M, XIAO F Q, TAN D P. Analytical method for softness abrasive flow field based on discrete phase model [J]. **Science China - Technological Sciences**, 2010, 53(10): 2867-2877.
- [14] JI S M, WENG X X, TAN D P. Research on precision processing method for softness abrasive two-phase flow based on LSM [C]// *Proceedings of International Conference on Networking, Sensing, and Control*. Chicago, USA: IEEE-CS, 2010: 53-57.
- [15] JI S M, GONG B, TAN D P, et al. Research on liquid-solid two phase abrasive flow based on the unified second-moment [J]. **Advanced Materials Research**, 2010 (102-104): 489-494.
- [16] 计时鸣, 唐波, 谭大鹏. 基于 VOF 的模具结构化表面 SAF 数值模拟 [J]. **中国机械工程**, 2011, 22(3): 334-339.
- [17] 郝鹏飞, 姚朝晖, 何枫. 粗糙微管道内液体流动特性的实验研究 [J]. **物理学报**, 2007, 56(8): 4728-4732.
- [18] MYUNG G L, SUNGYOUNG C, JE-KYUN P. Rapid multi-vortex mixing in an alternately formed contraction-expansion array microchannel [J]. **Biomedical Microdevices**, 2010, 12(6): 1019-1026.
- [19] JI S M, XU J L, ZHANG L, et al. Motion model and numerical simulation of fluid and abrasive particle in near wall region [J]. **Materials Science Forum**, 2009 (626-627): 237-241.
- [20] YUAN Q L, JI S M, TAN D P, et al. Analytical method for softness abrasive flow field based on low Reynolds k- ϵ model [J]. **Advanced Materials Research**, 2011 (188): 230-235.
- [21] YUAN Q L, JI S M, TAN D P, et al. Analysis for softness abrasive flow field of the greater curvature of small size tube [J]. **Advanced Materials Research**, 2010(97-101): 3055-3059.
- [22] 王昊利, 王元, 刘江. 平板微通道表面粗糙度对流场影响的摄动分析 [J]. **西安交通大学学报**, 2005, 39(5): 540-543.
- [23] 崔桂香, 张兆顺. 圆管湍流的近壁涡结构 [J]. **空气动力学学报**, 2000, 增刊: 10-14.

[编辑: 罗向阳]