

共轨管小孔磨粒流加工特性三维数值分析

Three-Dimensional Numerical Analysis for Micro-Hole Abrasive Flow Machining Feature of the Common-Rail Tube

中航工业长春航空液压控制有限公司 吴桂玲 侯吉坤

[摘要] 应用现代设计技术和现代设计手段,恰当地使用数值计算可理解和揭示试验,指导生产工艺规程,改善产品的综合性能。利用 CFD 软件 FLUENT 对磨粒流加工共轨管流道及小孔结构进行三维数值分析,获得稳态压强、湍流动能、湍流强度及速度图像,为磨粒流加工工艺的制定提供参考。

关键词: 共轨管 小孔 磨粒流加工 数值分析

[ABSTRACT] By applying modern design technology and modern design means, numerical calculation is appropriately used to understand and reveal the experiment, to instruct the procedures of producing technology, and to improve synthesized properties of the products. CFD software FLUENT is employed to do numerical analysis of three-dimensions on abrasive flow machining common-rail tube runners and holes in order to obtain steady pressure, turbulence kinetic energy, turbulence intensity and speed image, which provides references to the making of abrasive flow machining technology.

Keywords: Common-rail tube Micro-hole Abrasive flow machining Numerical analysis

共轨管是发动机供油系统的重要组成部件,具有高硬度,低表面粗糙度,在交叉部有倒圆角,流道无毛刺且表面光滑的特点。共轨管流道小孔抛光及去毛刺一直是有待解决与提高的问题^[1],而共轨管小孔的加工质量最终将影响发动机的经济性、动力性和排放指标。

利用传统加工方法来实现对共轨管交叉孔处的去毛刺及倒圆角是极其困难的,磨粒流加工技术的出现为解决这一问题提供了有效的方法^[2]。为研究磨粒流加工工艺,这里利用 CFD 软件 FLUENT 对磨粒流加工过程进行数值模拟,获得用于指导生产的工艺规程。

FLUENT 可用来模拟从不可压缩流体到高度可压缩流体范围内的复杂运动,该软件采用最佳的数值解法,以期在计算速度、结果的稳定性和精度等方面优化组合,从而高效解决各个领域的流体计算问题,在层

流、湍流、传热、化学反应和多相流等方面都有着广泛应用^[3]。其强大的求解功能使其广泛应用于国防、航空航天、机器制造、汽车、船舶、兵器、电子、铁道、石油天然气、材料工程等领域^[4]。

1 仿真模型建立及参数设置

磨粒流加工过程属于复杂的湍流流动,湍流的平均流动和脉动之间存在很强的相互作用,湍流的数值模拟计算结果比层流流动更容易受到网格的影响。为了保证计算结果的准确性,对于靠近壁面区域的湍流求解选择在平均流动变化快且平均应力较大的边界层所在的区域进行。在计算网格的处理方式上,在流动区域靠近壁面的部分采用加附面层的方法,在流体流动区域的表面网格和内部网格之间再划分一个特定区域,用以保证壁面附近的湍流计算的准确性。共轨管的内部通道结构较为简单,采用的是非结构化六面体进行网格划分。

在进行数值模拟的过程中,假设颗粒相与介质相之间不发生溶解或结晶等化学过程。颗粒相固体磨料与介质所构成的两相流动过程满足如下条件:

(1) 颗粒状固体磨料与介质具有相同的压力作用。

(2) 颗粒状固体磨料与介质分别满足动量守恒和能量守恒方程。

(3) 颗粒状固体磨料与介质之间的相互作用通过阻力系数来实现。

根据磨粒流的加工特点,采用 FLUENT 前处理模块 GAMBIT 对共轨管零件进行流动区域几何形状的构建、边界类型设置以及网格的生成,选用非耦合隐式双精度求解器,通过湍流 RNG 固液两相 MIXTURE 湍流模型进行数值分析;磨粒流介质载体作为主相,碳化硅颗粒作为第二相,体积分数为 0.3;此外,入口边界条件定义为压强入口,出口边界条件定义为压强出口,其余边界定义为固壁。考虑重力影响,以上条件设置好后,经过初始化后进行迭代计算,对共轨管微小孔磨粒流加工过程进行流体力学数值模拟。

2 仿真结果与分析

当参数设置成功后,采用SIMPLEC算法求解两相流动力学方程,利用求解器对流动区域进行求解计算,经过初始化后进行迭代计算,对共轨管小孔磨粒流加工过程进行流体力学数值分析。计算结束后,得到其残差曲线,在迭代120次开始收敛,说明模型结构设计和求解参数设置合理,能得到满意的收敛解。

为了更加真实准确地模拟磨粒流加工共轨管小孔的情况,采用三维数值模拟方式对磨粒流加工共轨管过程进行数值分析,获得磨粒流加工共轨管流道及小孔结构的加工特性。

2.1 稳态压强数值分析

利用三维数值分析方式模拟不同进出口压力条件下磨粒流同时加工共轨管所有小孔结构的情况。可以清晰看到,在共轨管流道内存在较大压力差,接近于共轨管小孔处的压强快速递减,在共轨管小孔处的稳态压强压差明显,说明磨粒流在该处的运动最为激烈。

2.2 湍流强度数值分析

湍流强度是衡量湍流强弱的相对指标,是描述速度随时间和空间变化的程度,是反映脉动速度的相对强度,是描述湍流运动特性的最重要的特征量。

从湍流强度图像来看,在共轨管流道内湍流强度逐阶明显递减,喷孔处湍流强度最大,交叉孔处湍流强度增幅明显,磨粒流在交叉孔处活动瞬时增强,磨粒流在此处的倒圆角及抛光能力瞬时增强。

综上,磨粒流在小孔部分的加工能力最强,可保证喷孔的加工精度。但在共轨管流道内的稳态压强和湍流强度呈阶梯递减,变化明显,不利于加工的一致性。因此,采用单独加工单一支路,逐个加工小孔的工艺方式较好,这样可保证共轨管小孔精度,可获得较佳的喷射性能。

2.3 单个支路稳态压强数值分析

这里选择共轨管第三支路进行数值模拟,单独加工共轨管单一支路的稳态压强。通过对比,发现当单独加工某一支路时,只是在支路处存在压降,磨粒流对这一支路的作用明显,有利于共轨管支路小孔的去毛刺及抛光作用。

2.4 单个支路速度数值分析

为了更好地分析磨粒流的加工特性,对磨粒流加工时磨料的流动特性进行数值分析,可以看出,在共轨管小孔与流道孔壁交界处速度瞬时变大,在共轨管小孔处的磨粒流速度最大,速度随进口压差的增加而增加。从数值模拟结果可知,若想获得较大的磨粒流加工速度,

应当适当增加进出口压差。随着小孔处的边界层与流道表面的速度差的增大,磨粒流中的磨粒与孔壁的接触机会将增大,边界层磨粒流与加工面之间的相对滑移量也随之增加,流道表面的去除量也越大,更有利于磨粒流对小孔流道的精加工。

2.5 单个支路湍流动能数值分析

湍流动能反映了湍流混合能力,从湍流动能图像同样可以说明磨粒流在共轨管支路小孔处的运动最为激烈,在小孔内壁积聚的能量远大于在流道内腔孔壁的湍流动能。因此,磨粒流在共轨管喷孔处最为活跃,对喷孔内壁精加工更强,在喷孔处可获得更为理想的表面质量。

从湍流动能图像可以看出,流经共轨管支路的湍流动能远大于流经主干路的湍流动能。也就是说,当用磨粒流单独加工共轨管某一支路时,加工能量主要作用于共轨管的支路上。

从数值模拟结果来看,湍流动能在支路上分布大小一致,这样将确保经磨粒流加工的共轨管小孔流道会取得一致的表面质量,实现对其精加工。

3 共轨管磨粒流加工实践

通过上述分析,从理论上证明磨粒流对于共轨管毛刺能够达到设计需要,下面将通过加工实例介绍磨粒流在去除共轨管毛刺的实际效果。

3.1 加工设备

磨粒流去除共轨管毛刺主要采用易趋宏(EXTRUDE HONE)的EasyFlow磨粒流设备(见图1)。

机床由PLC控制,触摸屏为终端操作界面。标准功



图1 磨粒流设备

Fig.1 Abrasive flow equipment

能包括磨料压力远程控制,磨料缸活塞位置实时监控,自动和手动模式,一个位移计数器,一个循环计数器和一个循环计时器。机床加工参数可通过终端操作界面进行预设,也可于自动模式启动后通过终端进行控制。液压系统的主要构成部件有:一个液压单元,两个磨料液压缸,两个夹紧缸和一个气/油泵。

3.2 加工介质

加工介质是由易趋宏公司提供的拥有专利技术的磨料。磨料由载体和磨砂组成:载体有软硬之分,软的类似液体,硬的类似固体。

磨砂按材料来分有:氧化铝、碳化硅、金刚砂和立方氮化硼;按粒度来分有粗细之分,从8目($5\mu\text{m}$)到1000目($4000\mu\text{m}$)。在加工时它就像三维流动的“砂纸”,不同的磨料会产生不同的加工效果。

3.3 加工工艺

共轨管零件主要加工目的为内腔去毛刺、倒圆角和抛光,所以应采用较低粘度的磨粒流介质和较低的系统压力。根据以上分析选择磨料为软、细类的加工磨料。确定挤压行程为400mm,每个支路挤压3次,然后调换加工支路。

4 结论

从磨粒流加工共轨管小孔流道的数值模拟结果可以看出,利用磨粒流加工技术对小孔零件进行精抛加工是一种有效的加工方法。

通过对不同磨粒流加工工艺分析可知,采用磨粒流单独加工共轨管单一支路,逐个加工的工艺方法较好,有利于加工的一致性。

从数值模拟结果可知,共轨管小孔流道内的压强差越大,磨粒流流速、湍流强度及湍流动能越大,磨粒的切削能力越强,加工精度也将越好。由于磨粒流的挤压研磨作用,在交叉孔处较大的湍流动能和速度会产生较大的圆角,能有效降低高脉冲产生的疲劳应力,改善疲劳强度。用磨粒流加工方法能获得理想的表面质量,可增强零件可靠性,延长使用寿命。

参考文献

- [1] Li J Y, Liu W N, Yang L F, et al. The development of nozzle micro-hole abrasive flow machining equipment. *Applied Mechanics and Materials*, 2011 (44-47): 251-255.
- [2] 李俊焯. 微小孔磨粒流抛光装置的研制与工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [3] 付曙光, 卢云丹, 程翔. 基于Fluent的除鳞喷嘴内部流场数值模拟. *制造业自动化*, 2010, 32(2): 89-92.
- [4] 冯国增, 马哲树. 柴油机气缸套三维温度场数值计算与分析. *机械设计与制造*, 2008(9): 1-3.

(责编 小城)

(上接第157页)

径增大0.02mm,角度增大约 0.5° 。

2.2.2 喷雾锥角偏大时

在流量允许的情况下,可以用砂轮片修磨涡流器的切向槽或更换孔径较大的涡流片,或换上半径较小的喷口或涡流片。

2.3 分布不均匀度的调试

2.3.1 液面呈较圆滑的弧峰形或较规则的斜峰形

斜峰形液面主要是由喷口中心孔椭圆、喷口出口边缘倒角不均匀、涡流器(涡流片)槽(孔)的尺寸不均匀、喷口中心与涡流器(涡流片)中心不同轴等原因造成的。调整时,如果流量值偏小,可先用稍带紧度的研磨棒研磨喷口;研磨后仍无法满足要求时可逐次变动涡流器(涡流片)与喷口的相对位置;如果经3次变动后仍无显著效果,则应检查涡流器(涡流片)的切向槽(孔)尺寸,并用砂轮片修磨最小的槽或更换涡流片。

2.3.2 液面呈无规则的排列

无规则排列液面主要是由喷口中心孔存在棱度,喷口内锥面和中心孔、涡流器(涡流片)切向槽(孔)等流油表面质量不好,有拉沟,划伤等缺陷造成的,但有时也与零件的相对位置有关。调整的方法是抛光喷口的内锥面和中心孔、涡流器的切向槽,根据现场经验,有时将喷口和涡流器(涡流片)互转一下位置($\leq 90^\circ$)也能得到良好效果。

2.3.3 液面呈“烛峰”或“烛谷”形

峰谷形液面主要是由喷口出口边缘具有缺陷或毛刺,使喷雾锥体上有一条过浓或过稀的燃油柱(射线)造成的。调整的方法是抛光喷口的中心孔或分解喷嘴冲洗。

3 燃油喷嘴综合调试

通过上述分析,涡流器切向槽的宽度 B 、深度 H ,涡流片的切向孔孔径 r ,喷口的涡流室半径 R 、中心孔半径 r_c ,涡流器和喷口的形状(圆度)位置(同轴度、垂直度等)误差、表面粗糙度等都直接影响喷嘴的性能调试。但是由于喷口和涡流器的某一个尺寸常控制多个性能参数,在调试过程中需熟练掌握各个性能参数随有关几何尺寸的变化规律。

经理论分析与试验验证,各性能参数的最佳调试顺序为:喷雾锥角→流量→分布不均匀度。但调试锥角时应尽量兼顾流量和锥角,调试流量时不要破坏锥角,且尽可能改善喷雾锥角的分布不均匀度;而调试分布不均匀度时,不要影响已经基本调试合格的锥角和流量。调试时,合理运用该调试技术将获得事半功倍的效果。

(责编 叶枫)