

doi: 10.7690/bgzdh.2019.03.017

磨料水射流光整身管表面方法

涂炯灿, 薛百文, 王常龙, 咎博勋
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为提高射击精度, 满足枪械对枪管内表面高质量的要求, 提出一种磨料水射流光整身管表面的方法。根据枪管具有螺旋线的结构特点, 采用螺旋磨料水射流光整身管, 结合磨料水射流加工方式, 设计了螺旋磨料水射流的加工装置, 建立磨料水射流数学模型, 利用 Fluent 流体仿真软件, 对磨料水射流加工过程进行数值分析与计算。结果表明: 磨料水射流光整身管表面加工方法是可行的, 可为磨料水射流光整身管内表面加工提供参考依据。

关键词: 射击精度; 磨料; 螺旋水射流

中图分类号: TJ202 **文献标志码:** A

Method of Abrasive Water Ejection in Inner Surface Machining of Gun Barrel

Tu Jiongcan, Xue Baiwen, Wang Changlong, Zan Boxun

(College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the shooting accuracy of the gun to meet the high quality of the inner surface of the gun barrel, a method of the abrasive water ejection in inner surface machining of gun barrel is proposed. According to the structural characteristics of the barrel with spiral line, used the spiral body abrasive water jet streamer tube, combined with abrasive water jet machining method, the machining device of spiral abrasive water jet design, establish the mathematical model of the abrasive water jet flow numerical analysis and calculation process by using Fluent fluid simulation software. The results show that the method is feasible, and it can provide a reference for abrasive water jet machining the inner surface of the tube body.

Keywords: shooting accuracy; abrasive materials; spiral water jet

0 引言

现代战争对现代枪械特别是高精度狙击枪的精度要求越来越高, 因此对枪管内表面质量的要求也越来越高^[1-2]。枪管内表面质量具体表现在尺寸精度、形位精度和表面质量^[3]。

枪械身管具有内孔直径尺寸小、内孔表面有膛线等特点, 对提高身管内表面的质量起到限制作用。目前, 生产厂家光整身管内表面的方法是工人用蘸有金钢砂的纱布打磨内表面的膛线。该方法难以保证生产质量与生产效率, 不容易保证打磨的一致性^[4]。

磨料流加工技术因其材料加工范围广、效率高, 被许多行业在去毛刺和抛光中广泛应用^[5-6]。磨料水射流是以水为介质, 通过增压系统装置使水获得巨大能量, 然后通过送料和混合装置把磨料混入到高能水中, 形成液固两相混合磨料水射流, 依靠磨料水射流的冲击和冲刷, 实现去除工件表面材料和光整加工的一种方法^[4]。针对枪管具有膛线的特点, 笔者采用螺旋磨料水射流光整身管, 并且设计产生

螺旋磨料水射流的加工装置。

1 结构设计

根据枪管具有螺旋线的结构特点, 设计的光整加工装置结构如图 1 所示, 主要包括水箱增压系统、待加工身管、磨料回收装置、磨料输入接口、旋转起旋装置。

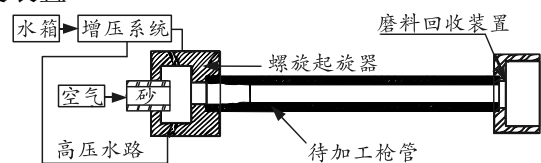


图 1 枪管内表面光整加工原理

该加工装置工作过程是利用从增压机输出的具有一定压力的水流, 经过起旋装置的起旋头喷嘴加速得到切向内膛的高速流体。喷嘴与起旋头的内壁相切, 与起旋头的截面具有一定的夹角, 故高速喷入的水流在起旋头的内腔和枪管的内腔中作螺旋运动, 此时在起旋装置内的磨料入口处, 产生较高的负压将磨料粒自动吸入。磨料粒子在旋转流体的作用下作高速旋转运动, 磨粒高速旋转产生将其压在

收稿日期: 2018-10-22; 修回日期: 2018-11-28

作者简介: 涂炯灿(1993—), 男, 重庆人, 硕士, 从事火炮结构设计、流场仿真研究。

枪管内壁上的离心力，同时磨粒还具有沿着身管轴向方向运动的速度，从而使磨料颗粒产生较大的剪切力，对枪管内表面进行光整加工。

磨料选用的一般原则：1) 切割效果好；2) 价格低廉，货源充足。

不同工件材料性能不同，需要考虑磨料同工件材料的相对硬度，工件材料的硬度必须高于磨料的硬度，否则会在工件上产生麻点^[9]。考虑到枪管的材料是炮钢，因此选择用工业上普遍使用的石榴石作为磨料。

该加工方法特点：

1) 可调整水的流量、高压力系统的压力、加速水流喷嘴的直径和角度、磨料的材料性质和直径大小、加工时间等参数。

2) 该方法由于流体在枪管内运动，速度衰减快，对长度大的枪管不适用。

3) 该加工方法考虑磨料的回收，设计了回收装置，减少加工成本，减小磨料产生的污染。

2 数学模型

2.1 磨料水射流流动模型

由于旋转水射流的螺旋特点，采用圆柱坐标系建立运动方程描述旋转水射流运动。假设旋转水射流的水流为不可压缩的轴对称流体，则可以用雷诺方程组来描述旋转射流的运动。由于该雷诺方程组非常复杂，因此有必要进行合理的简化，得到简化的方程组^[6]：

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial r \tau_x}{\partial r}; \quad (1)$$

$$\frac{w^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (2)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{wv}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_\phi}{\partial r} + \frac{2\tau_\phi}{r\rho}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial ru}{\partial x} + \frac{\partial rv}{\partial r} = 0; \quad (4)$$

$$\tau_x = -\rho u'v'; \quad (5)$$

$$\tau_\phi = -\rho v'w'. \quad (6)$$

式中： u 为轴向速度； v 为径向速度； w 为切向速度； ρ 为流体密度； p 为流体压力； r 为径向半径； x 为沿 x 轴的距离。

磨料水射流在管道中的流动一般是定常不可压缩紊流流动^[8]。由于磨料颗粒在磨料水射流中所占有的比例小，因此可以适当简化磨料颗粒在流体中运

动的受力。由牛顿加速度定律，分析磨料水射流中的一个颗粒的受力情况，则有^[8]：

$$\begin{aligned} \frac{\pi D^3}{6} \rho_s \frac{du_s}{dt} &= 3\pi\rho v D(u - u_s) - \\ &\frac{\pi D^3}{6} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\pi D^3}{12} \rho a + \\ &\frac{3}{2} D^2 \rho \sqrt{\pi v} \int_{t_0}^t \frac{a}{\sqrt{t-t'}} dt + X + F_x + F_s. \end{aligned} \quad (7)$$

式中： u 、 ρ 分别为水的速度、密度； v 为水运动黏度； u_s 、 ρ_s 分别为磨料颗粒的速度、密度； a 为磨料颗粒的相对加速度； t 为作用时间； p 为作用的压力； X 为质量力； D 为磨料颗粒直径。

2.2 磨料水射流切割模型

磨料水射流光整身管是复杂的去除过程，其中不仅包含了磨料颗粒对身管材料的撞击、微切削和反复冲蚀的影响，还包含了水射流的冲击，冲蚀的影响。水射流增加材料的去除效率和对材料冲蚀效率。因磨粒挤压和切削工件表面，使得工件表面层的材料产生变形，从而达到光整工件表面的效果，获得较好的表面质量^[9]。

于鸿春等^[10]对磨料水射流切割套管进行合理的假设，把磨料颗粒在高压水中的运动过程中看作是伪流体，而且假设它和液相的速度相等，利用弹性力学接触理论，建立磨料射流切割套管的数学模型^[6]。导出磨料颗粒与切应力之间的数学关系：

$$\tau_{\max} = \left[\frac{71.424(R_1 - R_2)^2 \rho_s u_0^2 D^2}{\pi^2 (k_1 - k_2)^2 R_2^2 x^2} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

其中： $k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}$ ， $k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}$ ， E_1 为颗粒的弹性模量， E_2 为材料的弹性模量， μ_1 为颗粒的泊松比， μ_2 为套管的泊松比； ρ_s 为粒子的密度； D 为喷嘴直径； R_1 为粒子半径； R_2 为套管内径； u_0 为喷管口速度。

3 仿真分析

3.1 流场模型

为满足仿真精度要求，同时避免一些对结果影响小的问题，结合具体情况，建立简化的磨料水射流光整身管内表面的加工模型。

仿真计算精度受划分计算域的网格质量和数量的影响。为了满足计算结果的精度要求，计算场的网格应划分得尽量多而且质量好。使用四面体网格，其大小为 0.1 mm，总共划分 165 041 个网格节点和

453 538 个网格单元。

加工装置的3维流场模型及网格划分如图2。

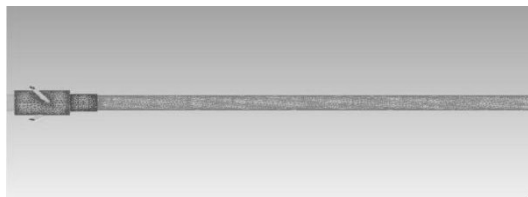


图2 身管加工装置3维流场分析模型

3.2 流场控制

1) 求解器设置。

针对磨料的粒子性特点, 选用 DPM 模型仿真计算。湍流方程采用 SST $k-\omega$, 算法采用 SIMPLEC。

2) 边界条件设置。

入口的边界条件采用压力入口, 其为 50 MPa。出口的边界条件采用压力出口, 其为一个大气压。

3) 参数设置。

水的密度取 998.2 kg/m^3 , 水的动力黏度 $0.001\ 003 \text{ kg/s}$ 。

颗粒选用石榴石, 粒径 0.2 mm , 密度 $2\ 650 \text{ kg/m}^3$, 动力黏度 $0.000\ 08 \text{ kg/s}$ 。

3.3 流场仿真分析

磨料在加工时, 从增压机输出具有一定压力的水流, 经过起旋装置的起旋头喷嘴加速得到切向内膛的高速流体。由于喷嘴与起旋头的内壁相切, 而且还与起旋头的截面具有一定的夹角, 故高速喷入的水流在起旋头内腔和枪管的内腔中作螺旋运动, 此时在起旋装置内磨料入口处产生较高的负压而将磨料粒自动吸入。

过轴线的剖面上磨料的速度分布如3所示。

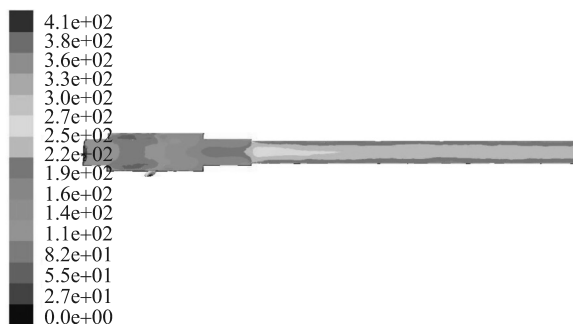


图3 磨料速度分布

从图中可以看出: 在加工装置的磨料入口处, 磨料粒子因高速射入的水流向右运动产生负压, 而向右运动与水混合后, 被加速到更高的速度。

监测身管最右边边缘处的一点, 其速度变化如图4所示。

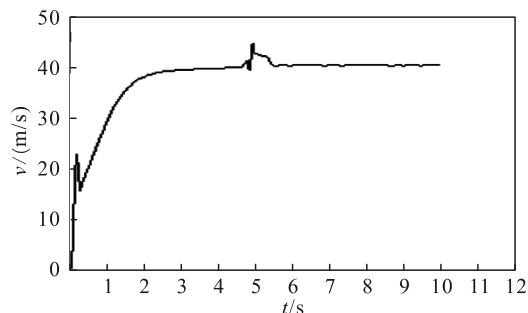


图4 身管最右侧边缘点的速度变化

从图中可以看出, 边缘点的磨料速度最终稳定在 42 m/s 。磨料颗粒的弹性模量 $E_1=85 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu_1=0.2$ 。身管的弹性模量 $E_2=275 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu_2=0.27$ 。颗粒粒径 0.2 mm , 密度 $2\ 650 \text{ kg/m}^3$ 。枪管口径 6 cm , 长度 30 cm 。运用磨料水射流切割套管的数学模型, 计算得出磨料产生的切应力大小为 $\tau_{\max}=222.34 \text{ MPa}$ 。说明磨料在枪管的最右侧都具有较高的剪切力, 满足光整条件。表明该方法可行。

4 结论

通过对现有的枪管加工工艺方法分析, 根据现代枪械对枪管内表面质量的要求, 笔者提出了用磨料水射流光滑枪管内表面的加工方法, 设计了相应的装置。在此基础上, 对其加工时磨料流场的分布进行仿真分析。结果表明: 该方法可行, 可进一步提高枪管内表面质量。

参考文献:

- [1] 王靖君, 郝信鹏. 火炮概论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 96-99.
- [2] 谈乐斌, 张相炎, 管红根, 等. 火炮概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 111-115.
- [3] 王先违. 机械制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 132-138.
- [4] 薛百文, 常德顺. 枪管内表面光整加工方法研究[J]. 中北大学学报, 2014, 35(4): 399-401, 418.
- [5] 朱洪涛. 精密磨料水射流加工硬脆材料冲蚀机理及抛光技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [6] 董志国. 磨料流加工的切削机理及加工工艺的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [7] 方慧. 液体喷射抛光[D]. 苏州: 苏州大学, 2004.
- [8] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998: 250-325.
- [9] 杨世春, 汪鸣铮, 张银喜. 表面质量与光整加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 86-90.
- [10] 于鸿春, 张永利. 磨料射流切割金属套管机理及计算公式[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(6): 850-852.