

# 基于水射流支撑的细长轴加工振动控制研究

吴利明

(江苏信息职业技术学院, 无锡 214153)

**[摘要]** 振动严重影响细长轴的加工质量, 由于细长轴类长径比大、刚性差, 故很难控制其切削过程产生的振动。本文从振动的角度对细长轴切削时变形情况进行了分析, 建立其振动的数学模型, 并提出运用水射流辅助支撑来控制细长轴在切削过程中的振动。最后, 对细长轴在有水射流辅助支撑作用下进行了试验对比分析。结果表明, 水射流辅助支撑可很好地控制细长轴加工振动, 为提高细长轴的精度提供理论指导。

**关键词:** 细长轴; 振动; 数学模型; 射流

## Research on Vibration Control of Slender Shaft Machining Based on Jet Supportor

WU Liming

(Jiangsu College of Information Technology, Wuxi 214153, China)

**[ABSTRACT]** Vibration seriously affects the machining quality of slender shaft. It is very difficult to control the vibration due to its big length-diameter ratios, poor rigidity. This article analyzes the features of deformation of slender shaft on machining from the angle of vibration, establishes a mathematical model of slender shaft vibration, and proposed using water jet support to control the vibration of slender shaft in the machining process. Finally, experiments on the slender shaft in anhydrous jet assisted support are carried out, compared and analysed. The results show that, water jet assisted support can well reduce the machining vibration of slender shaft, providing theoretical guidance to improve the quality of slender shaft.

**Keywords:** Slender shaft; Vibration; Mathematical model; Jet

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.17.103

低刚度细长轴在人们的生活中和装备制造业中有着广泛的应用, 但往往会因为其具有的特性影响其推广, 如细长轴在加工过程中因切削力的作用而容易产生振动误差, 该振动严重影响工件的加工质量, 有时候还影响加工过程, 使得加工中断。针对细长轴加工时产生振动的现象, 国内外专家进行了相关研究<sup>[1]</sup>。Altinas<sup>[2]</sup>和Budak<sup>[3]</sup>等对工件切削加工过程中的稳定性进行研究, 提出工件加工过程中振动稳定区域的预测模型, 可以通过该模型求解出工件加工时的极限切削用量, 有效地减小工件的振动。Weck<sup>[4]</sup>通过对机床的固有动态特性进行研究, 可避免工件加工振动。Seguy等<sup>[5]</sup>分析细长轴在外载荷作用下的各阶模态和谐响应振动, 建立细长轴在移动外载荷作用下的振动尺寸误差。Merdol等<sup>[6]</sup>和Thevenot等<sup>[7]</sup>分析不同的切削用量对细长轴振动的影响, 建立其加工过程在外载荷作用下稳定性模型。Campa等<sup>[8]</sup>考虑刀具和细长轴之间相互耦合的作用, 建立了三维动力学的切削稳定性模型, 从而实现细长轴的精加工。

本文将水射流技术运用到细长轴切削加工, 通过运用水射流辅助支撑细长轴来提高其刚度, 从而减小细长轴在加工过程中的振动。

### 1 射流冲击模型

本文中的射流由喷嘴射到空气中属于非淹没流体, 射流由喷嘴的入口端流入, 出口端流出, 如图1所示。假设流体在喷嘴中连续流动并不可压缩, 应用粘性流体的伯努利方程可以将流体表示为<sup>[9-11]</sup>:

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2}, \quad (1)$$

式中,  $p_1$ 、 $p_2$  为流体流过喷嘴入口、出口流体产生的压力;  $v_1$ 、 $v_2$  为流体流过喷嘴入口、出口的均速;  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  为流体流过喷嘴前、后的密度。

射流在喷嘴中流动可简化成流动参数只在某个方向有变化而其他方向的变化忽略不计的一元流动问题, 并射流在喷嘴中连续流动, 即可得下式:

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2, \quad (2)$$

式中,  $A_1$ 、 $A_2$  为流体流过喷嘴入、出口截面的面积。

本文中喷嘴横截面为圆形, 则喷嘴入、出口截面的面积  $A_1$ 、 $A_2$  可以表示为

$$A_1 = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4}, \quad A_2 = \pi \cdot \frac{d_2^2}{4}, \quad (3)$$

$$\rho_1 = \rho_2, \quad (4)$$

式中,  $d_1$ 、 $d_2$  为喷嘴入口、出口直径。

联立式(1)~(4), 可得喷嘴出口处流速:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[ 1 - \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right]}} \quad (5)$$

本文喷嘴中的射流由喷嘴的结构可知,  $d_1/d_2 \leq 1$ ,  $p_2 \leq p_1$ , 并水射流的密度  $\rho=998\text{kg/m}^3$ , 等式(5)可以简化为

$$v_2 = 44.7\sqrt{p_1}, \quad (6)$$

由图1可知, 喷嘴射出的流体流量  $q$  由喷嘴的出口截面积  $A_2$  和流体在喷嘴出口处的流速  $v$  两因素共同决定, 即:

$$q = v \cdot A = 44.7A\sqrt{p} = 2.1d^2\sqrt{p}, \quad (7)$$

式中,  $q$  为射流流量, L/min;  $d$  为喷嘴出口直径, mm;  $p$  为喷嘴入口流体压力, MPa。

经喷嘴射流的流体撞击到细长轴产生的冲击力  $F$  由流体的流速  $v$  和单位时间冲击到工件上的流量  $q$  共同决定, 即:

$$F = \rho Qv - \rho Qv\cos\varphi = \rho Qv(1 - \cos\varphi), \quad (8)$$

式中,  $Q$  为单位时间冲击到细长轴上的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $v$  为流体从喷嘴出口射出的速度,  $\text{m/s}$ ;  $\varphi$  为射流冲击工件和离开工件的夹角。

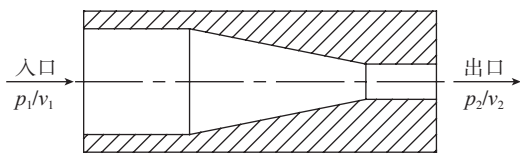


图1 喷嘴结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of nozzle structure

## 2 细长轴振动动态特性分析

### 2.1 细长轴加工力学模型

细长轴切削加工过程主要外载荷为其受到的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的切削力, 分别为轴向切削力  $F_x$ 、背向力  $F_y$ 、主切削力  $F_z$ 。根据相关文献可知, 上述各个方向的切削分力都会引起细长轴产生振动和变形等尺寸误差, 而且背向力  $F_y$  对细长轴产生尺寸误差的影响远远大于轴向切削力  $F_x$  和主切削力  $F_z$  产生的尺寸误差。故本文仅分析和建立细长轴在  $xoy$  平面的受力模型。

本文中细长轴采用的装夹方式为顶针式。根据该装夹方可知细长轴的受力模型可以简化成工程上的超静定梁问题, 简化后的受力模型如图2所示。卡盘对细长轴的约束可以简化为  $F_{Ax}$ 、 $F_{Ay}$  和弯矩  $M_A$ ; 车刀在  $xoy$  平面对细长轴产生的切削分力简化为  $F_{Lx}$ 、 $F_y$ ; 射流对细长轴产生的冲击力简化为  $F_2$ ; 顶针对细长轴的约束简化为支座约束反力  $F_{By}$ 。

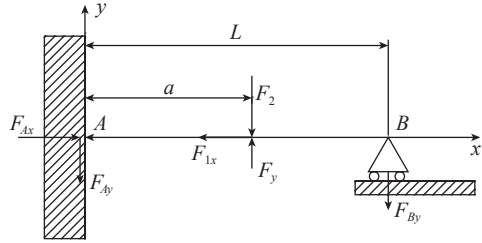


图2 射流辅助支撑车削力学模型  
Fig.2 Mechanical model of jet assisted support

细长轴加工过程背向力  $F_y$  是使其产生振动变形的主要原因。根据相关参考文献知, 背向力的经验公式为:

$$F_y = 9.81C_{F_y} a_p^{x_{F_y}} f^{y_{F_y}} v_c^{n_{F_y}} K_{F_y}, \quad (9)$$

式中,  $a_p$ 、 $f$ 、 $v_c$  分别为切削背吃刀量、进给量、切削速度;  $C_{F_y}$  为工件材料对切削力影响相关系数;  $K_{F_y}$  为不同加工条件对切削力影响的相关系数;  $x_{F_y}$ 、 $y_{F_y}$ 、 $n_{F_y}$  分别表示公式(9)中背吃刀量、进给量、切削速度的指数。

### 2.2 细长轴径向振动分析

细长轴在切削加工时易发生径向振动, 如图3所示, 取细长轴上任意微小截面  $dx$ , 在  $t$  时刻, 此微小截面受振动而产生的位移为  $y(x, t)$ , 单位长度上受到的激振载荷为  $p(x, t)$  和外力矩为  $m(x, t)$ 。

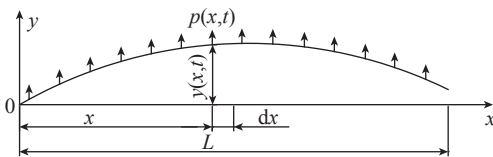


图3 细长轴径向振动示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the radial vibration of slender shaft

由振动的微分单元法得到此微小截面在激振载荷  $p(x, t)$  作用下产生的振动微分方程为

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = p(x, t) \quad (10)$$

对于简化后的等截面细长轴, 令  $p(x, t)=0$ , 可得细长轴的径向自由振动方程为

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (11)$$

式中:  $\rho$  为细长轴的密度;  $A$  为细长轴横截面积;  $E$  为细长轴的材料弹性模量;  $I$  为细长轴截面对中性轴的惯性

矩。

由细长轴的径向振动基本理论,通过运用分离变量法,将式(11)用  $x$  的  $Y(x)$  与  $t$  的谐函数的积分表示,其振动的固有频率可用  $w$  表示,即

$$y(x, t) = Y(x) (A \cos wt + B \sin wt) \quad (12)$$

将本文中的细长轴视为等截面梁,则式(12)的通解为

$$Y(x) = C_1 \sin \beta x + C_2 \cos \beta x + C_3 \sinh \beta x + C_4 \cosh \beta x \quad (13)$$

细长轴在切削加工过程中采用的装夹方式为一夹一顶,可得出细长轴加工时的主振型函数为

$$Y_i(x) = C_4 [\cos \beta l \sin \beta_i x - \cos \beta_i x - \cot \beta_i l \sinh \beta_i x + \cosh \beta_i x] \quad (14)$$

其中

$$C_4 = \frac{1}{\sqrt{\rho A \int_0^l (\cot \beta_i l \sin \beta_i x - \cos \beta_i x - \cot \beta_i l \sinh \beta_i x + \cosh \beta_i x)^2 dx}}$$

### 2.3 细长轴切削力作用下的振动响应

细长轴在切削加工过程中受到的激振载荷  $p(x, t) = p(t) Y(x)$ , 其中  $p(t)$  为细长轴在切削时的径向受到的合力  $F$ , 其大小为  $F = |F_y - F_2|$ , 其  $F$  的作用点位置  $x$  是个变量,  $x = L - \frac{nft}{60}$ , 故可得

$$p(x, t) = FY(L - \frac{nft}{60}) \quad (15)$$

将等式(15)代入等式(10)可得

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = FY(L - \frac{nft}{60}) \quad (16)$$

对  $y(x, t)$  进行坐标变换,并用  $q_r(t)$  来表示更新后的坐标,即得

$$y(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} Y_r(x) q_r(t) \quad (17)$$

将(17)式分别对  $t$  求 2 阶偏导数、对  $x$  求 4 阶偏导数,运用正交性可得细长轴的振型为

$$\frac{d^2 q_r(t)}{dt^2} + w_r q_r(t) = FY_r(L - \frac{nft}{60}) \quad (18)$$

由边界条件,细长轴在切削加工前,细长轴的挠度和速度都为 0,则可求出上式的解

$$q_r(t) = \frac{F}{w_{nj}} \int_0^t Y_r(L - \frac{nft}{60}) \sin w_{nj}(t - T) dT \quad (19)$$

将等式(19)反带回等式(17),可得到细长轴在水射流辅助支撑的切削过程中切削点对切削力的响应,即为

$$y(t) = F \sum_{j=1}^{\infty} \frac{Y(L - \frac{nft}{60})}{w_{nj}} \int_0^t (L - \frac{nft}{60}) \sin w_{nj}(T - t) dT \quad (20)$$

因此,采用水射流辅助支撑细长轴切削加工可有效的降低其在加工过程中的振动,可使细长轴的表面精度提高。

### 3 试验

为了验证本文提出的以射流辅助支撑抑制细长轴振动的有效性,分别选两组细长轴分别进行有无射流辅助支撑加工的实验。细长轴的毛坯尺寸为,材料为 45 号钢。试验中采用的加工参数如下:背吃刀量  $a_p=0.2\text{mm}$ ,进给量  $f=0.1\text{mm/min}$ ,切削速度  $V_c=60\text{m/min}$ ;切削液射流发生系统中的参数如下:泵压为  $P=6.5\text{MPa}$ ,喷嘴直径  $d=2\text{mm}$ ,喷距  $L=1\text{mm}$ ;采用的刀具是硬质合金车刀,刀具具体几何角度如表 1 所示。

表1 车刀的几何角度

刃倾角 $\lambda_s$ ( $^\circ$ )	主偏角 $K_r$ ( $^\circ$ )	副偏角 $K'_r$ ( $^\circ$ )	前角 $\gamma_0$ ( $^\circ$ )	后角 $\alpha_0$ ( $^\circ$ )
-50	750	150	150	50

本文首先任选一组细长轴进行普通车削加工,加工完成后采用 JB-1C 型粗糙度测量仪对其初始端及中间位置的表面进行粗糙度测量;再将细长轴按照本文提出的射流辅助支撑方法进行加工,车削加工完成后同样其在同一位置进行粗糙度测量,测得的结果分别由打印机打印出来。细长轴加工试验现场图如图 4 所示,粗糙度测量图如图 5 所示。



图4 细长轴加工试验现场图

Fig.4 Experimental field of long axis machining experiment

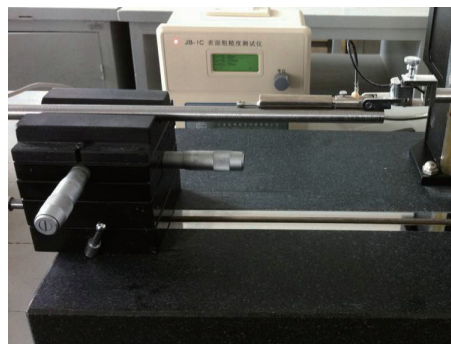


图5 细长轴粗糙度测量

Fig.5 Roughness measurement of slender long axis

从表面粗糙度的测试报告可知,无射流支撑时细长轴在初始端和中间位置的表面粗糙度分别为 4.687、5.917,有射流支撑时细长轴在初始端和中间位置的表面粗糙度分别为 3.789、4.058,由于细长轴初始段用三角卡盘进行装夹,故其比中间位置处的刚度大,振动小,表面粗糙度小。上述表明水射流辅助支撑可以提高细长轴的刚度,从而有效地控制其振动,使细长轴的粗糙度得到了较好的改善。

#### 4 结论

本文针对低刚度细长轴在切削加工过程中因切削力作用而容易产生振动尺寸误差,将水射流技术应用到细长轴柔性辅助加工,以此提高细长轴的刚度抑制其振动尺寸误差,并通过研究了细长轴在水射流辅助支撑作用时的振动特性,获得细长轴辅助支撑时受切削力的响应方程,从理论上验证了水射流辅助支撑可很大减小细长轴的振动。最后,通过试验验证水射流辅助支撑技术可有效地提高细长轴的刚度和加工精度。

#### 参考文献

[1] 杨叔子. 机械加工工艺师手册[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2010.

YANG Shuzi. Handbook of machining process[M]. Second Edition. Beijing: China Machine Process, 2010.

[2] ALTINTAS Y, BUDAK E. Analysis prediction of stability lobes in milling[J]. Annals CIRP, 1995, 44(1):357-362.

[3] BUDAK E, ALTINTAS Y. Analytical prediction of chatter stability in milling—part I: general formulation[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1998, 120:22-30.

[4] WECK M. Handbook of Machine Tools[M]. Wiley, 1984.

[5] SEGUY S, DESSEIN Q, ARNAUD L. Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal interactions[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(3-4): 261-274.

[6] MERDOL S D, ALTINTAS Y. Multi frequency solution of chatter stability for low immersion milling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126:459-466

[7] THEVENOT V, ARNAUD L, DESSEIN G. Integration of dynamic behavior variations in the stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin-walled structure milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27:638-644.

[8] CAMPA F J, LÓPEZ De Lacalle, LVIS N. Avoiding instability on the milling of parts with thin features[J]. Materials Science Forum, 2006, 526(3):37-42.

[9] 刘军壮. 高压水射流在再制造清洗中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2012.

LIU Junzhuang. Application of high pressure water jet in cleaning of re manufacture[D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[10] 林府进, 夏永军, 周卫东. 高压水射流冲击压力分布规律的研究[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(1):8-10.

LIN Fujin, XIA Yongjun, ZHOU Weidong. Study on the distribution law of high pressure water jet impact pressure[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2008, 35(1):8-10.

[11] 张师帅. 计算流体动力学及其在应用—CFD 软件的原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.

ZHANG Shishuai. The principle and application of CFD software—CFD and its application[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011.

(责编 海山 冬月)

(上接第 96 页)

过程,清除焊口水分或油渍及其他污染;在焊接装配和调试检测过程中,配置专用抓取工装,避免手套接触焊接区域,减少焊口焊缝的污染。

(2) 提高酸洗后真空烘干的温度,缩短酸洗处理后至焊接的存放时间;避免焊口焊缝的氧化膜形成。

(3) 焊前的焊口打磨处理要注意保持焊接接头直角形式,避免钛合金壳体母材表面的“缺肉”凹陷产生。保证 X 射线探伤缺陷评判的准确度。

(4) 适当的调整焊接参数(如聚焦电流、焊接速度),改变焊缝的形貌,增加熔池停留时间,促使焊接过程中氢等气体从熔池中的逸出从而避免气孔的产生。

(5) 在保证焊缝熔深的前提下,采用负虚焦点的焊接参数,增加焊缝的宽度,减小焊缝的深宽比,调整焊接参数如表 3 所示。

通过以上改进措施,避免了未熔合缺陷,提高了焊缝质量的稳定性。后续焊接 5 只贮箱均通过 X 光探伤检查,符合国军标 GJB1718A,同批抽检一只,顺利通过鉴定级的振动、离心、疲劳、压力声发射和爆破等一系列环境力学试验,证明所采取的焊接工艺满足产品的要求。

#### 参考文献

[1] 李晓延, 巩水利, 关桥. 大厚度钛合金结构电子束焊接制造基础研究[J]. 焊接学报, 2010(2):107-113.

LI Xiaoyan, GONG Shuili, GUAN Qiao. Fundamental research on electron beam welding of heavy section titanium alloy structures[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010(2):107-113.

[2] 刘昕, 巩水利, 雷永平. TC4 钛合金电子束焊接接头相变的热力学特征[J]. 焊接学报, 2010(2):57-62.

LIU Xin, GONG Shuili, LEI Yongping. The rmodynamic character of phase transformation of TCA titanium alloy electron beam welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010(2):57-62.

[3] 付鹏飞, 刘昕. 基于接头形状分析的电子束焊接接头性能研究[J]. 焊接, 2010(2):66-69.

FU Pengfei, LIU Xin. Properties of EBW joints based weld shape analysis[J]. Welding & Joining, 2010(2):66-69.

(责编 海山 冬月)