

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.009

气凝胶超声铣削圆形刀设计

张云电, 储 瑞, 董昌帅, 陈 健

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对传统机械加工气凝胶出现的粉尘、材料凹陷、破损等问题,对气凝胶材料加工方式、加工刀具等方面进行了研究,提出了以超声铣削方式加工气凝胶材料。对圆形刀进行了结构设计,分析了圆形刀在强迫外力、自身阻尼力、声波作用力下的振动特性以及自由振动时自身的固有频率 f ,建立铣削力方程,从理论角度证明了超声铣削力要小于普通铣削力,利用 ANSYS Workbench 软件对刀具进行了各阶模态分析,并对比了各阶模态振型图和振型位移矢量图。研究结果表明:当 $f=19\,407\text{ Hz}$ 时,振型沿圆形刀径向传递,在刀具边缘时振幅达到最大,是超声铣削加工的理想振型;通过超声铣削方式加工气凝胶材料,能够实现减小铣削力、提高加工质量等功能,加工效率高。

关键词:超声铣削;圆形刀振动;模态分析;铣削力方程

中图分类号:TH113.1;TG54

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1275-04

Design of aerogel ultrasonic milling circular tool

ZHANG Yun-dian, CHU Rui, DONG Chang-shuai, CHEN Jian

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problem of dust, material sag, damage in processing of aerogel with traditional mechanical, the processing method and cutting tool of aerogel was studied. the method of ultrasonic milling was presented. The structure of circular knife was designed and the vibration characteristics of circular knife which is under the external force, damping force and the sound wave and the natural frequency f under free vibration were analyzed, ultrasonic milling force equation was established to improve that the ultrasonic milling force is smaller than the ordinary milling force from the perspective of theory. ANSYS Workbench software was used to get each modal analysis and get a contrast between the modal vibration mode and vector graph. The results indicate that the vibration along the circular knife radial transmission and the amplitude on the edge of knife is maximum when $f=19\,407\text{ Hz}$, it's ideal mode of ultrasonic milling, the method of ultrasonic milling has high processing efficiency and can reduce the milling force, improve the the quality of processing and other functions.

Key words: ultrasonic milling; circular knife vibration; modal analysis; milling force equation

0 引 言

SiO_2 气凝胶材料是一种新型的轻质、纳米、多孔非晶态固体非金属材料,其孔隙率高达 80% ~ 99.8%,常温下导热系数仅为 $0.013\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,属于高温性能保温绝热材料^[1]。目前, SiO_2 气凝胶材料的制备主要采用凝胶技术与超临界干燥技术结合的方式,采用成型技术将凝胶体按照所需零件形状,放置在型腔中干燥成型^[2],这种方式成型设备制定成本高。采用传统的机械加工,考虑到气凝胶材料力学性能差,脆性较大,

缺乏足够的断裂韧性和抵抗变形的能力,加工过程中易出现粉尘大、材料凹陷、破损等问题。因此,超声振动切削方法被引入用于进行气凝胶的加工。

超声切削加工过程类似于剪裁,在加工刀具上迭加了高频的超声波振动能量,刀具对材料产生高频瞬时冲击作用,降低了材料的内部应力,改变了切削性能,缩短了刀具与工件的有效接触时间,减小了刀具与工件之间的摩擦力,易于切削材料^[3]。

杭州电子科技大学翟宇嘉研究了超声车削气凝胶材料加工,介绍了超声车削原理,并结合试验验证了超

声车削加工切削力、加工表面质量的优越性。

本研究主要针对气凝胶进行超声铣削方式加工,分析圆形刀的振动特性以及超声铣削力方程,对圆形刀进行模态分析研究。

1 圆形刀结构

气凝胶材料为非金属材料且脆性大、强度低,对气凝胶的加工关键在于切削气凝胶纤维,材料自身硬度不高,因此对刀具硬度要求不高。综合考虑到刀具的硬度、耐磨度、导热性能以及锋利程度,本研究选取圆形刀材料为高速钢。高速钢主要性能参数如表 1 所示。

表 1 高速钢主要性能参数

参数	数据
材料名称	高速钢 (W18Cr4V)
杨氏模量/pa	2e11
泊松比/MPa	0.3
密度/(g · cm ⁻³)	7.8

圆形刀结构简单,结构图如图 1 所示。

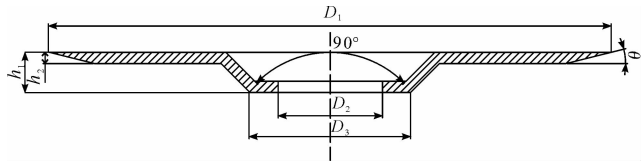


图 1 圆形刀结构图

刀具以很小的楔角构成极锋利的刃口,能够快速切除材料,但是去除的材料余量较少,一般运用于半精加工和精加工中^[4]。圆形刀结构尺寸为: $D_2 = 13\text{ mm}$, $D_3 = 20\text{ mm}$, $h_1 = 4\text{ mm}$, $h_2 = 1.4\text{ mm}$, $\theta = 14^\circ$, $D_1 = 102\text{ mm}$ ^[5]。铣削加工时,刀具与气凝胶之间可以有一定的倾角,刀刃沿着气凝胶的轨迹进行铣削,示意图如图 2 所示。

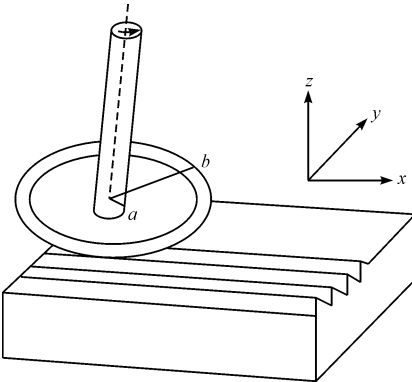


图 2 圆形刀超声铣削加工示意图

2 圆形刀振动方程

圆形刀通过半径为 a 的螺母与变幅杆连接并固定

安装在主轴上,由于凸出部分厚度与刀具直径比值很小,故可以将圆形刀视作半径为 b 的薄板,振动分布在半径 (a, b) 之间的环形区域内(如图 2 所示)。

圆形刀在铣削加工过程中发生振动是由于刀具受到了 3 个力的共同作用:(1) 圆形刀受到的强迫外力(包括圆形刀随主轴旋转时大气湍流的作用和支撑圆形刀加工系统不平衡造成的横向作用力),用 F_α 表示;(2) 刀具本身的阻尼力,用 F_β 表示;(3) 声波场的反作用力,用 F_γ 表示。因此圆形刀沿着半径方向的径向振动方程为^[6-9]:

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial t^2} = \frac{\omega^2}{K^4} \nabla^4 \lambda + \frac{1}{h\rho} [F_\alpha + F_\beta + F_\gamma] \tag{1}$$

考虑到 $F_\alpha \gg F_\beta \gg F_\gamma$,通常情况下会将自身阻尼力和声波场反作用力忽略。其中参数 K^4 为:

$$K^4 = \frac{12\omega^2\rho(1-\sigma^2)}{Eh_1^2} \tag{2}$$

将 K^4 代入式(1),可简化得到振动微分方程:

$$\nabla^4 \lambda = K^4 \left[\lambda + \frac{F_\alpha}{h\rho\omega^2} \right] \tag{3}$$

通过求解诺依曼函数和贝塞尔函数得到圆形刀自由振动时的固有频率 f :

$$f = \frac{B_{ns}h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \tag{4}$$

式中: ω —圆形刀振动频率; λ —圆形刀振幅; B_{ns} —振型常数。

当外界外加频率与圆形刀的固有频率接近一致时,刀具会产生共振。考虑到现实情况中刀具不是理想的薄圆板,本研究会采用模态分析的方式分析刀具的振动模态。

3 圆形刀模态分析

由于圆形刀结构简单,可选择直接在 ANSYS Workbench 中建立模型,进行网格划分之后,将圆形刀与变幅杆以及螺母连接的两个面设为固定约束,本文加载在刀具上频率范围为 15 kHz ~ 25 kHz(本文所选声振系统的频率为 20 kHz),并在这个范围内设置了 10 阶振型,各阶频率以及最大变形量如表 2 所示。

对圆形刀进行模态分析,可以查看到刀具本身的固有频率以及刀具的振型,本文从设置的 10 阶振型中选取 3 阶振型进行分析,对应的振型如图 3 所示。从图 3 中可以看出:最小振幅均分布在中心孔,但各阶模态下的振动形态各不相同。三者相比,四阶模态的振动相对激烈,而五阶与六阶相对缓和,但是各阶振动的最大振幅都是出现在刀的边缘上。

表 2 圆形刀各阶频率与最大变形量

振型阶数	f/Hz	最大变形量 $/\mu\text{m}$
1	15 876	9.546
2	15 886	10.667
3	17 828	12.375
4	17 979	13.449
5	19 407	14.017
6	22 634	10.788
7	23 034	10.674
8	23 054	9.326
9	23 118	8.763
10	23 134	10.786

从图 3(b)、3(d) 分别对应的第五阶模态振型图和位移矢量图中可以看出,刀的振幅是沿着圆形刀的径向分布的,传递到刀刃处时,振幅达到最大。从表中数据可以看出,五阶振型频率接近于声振系统频率 20 kHz,此时超声能量才可以有效传递给加工刀具,使圆形刀能在有负载的情况下进行铣削,并且五阶振型频率与前后阶频率相差较大,避免了邻近振型对它的影响,这是铣削加工中的理想振型。因此,选择该阶的固有频率使得铣削加工能取得最佳加工效果。

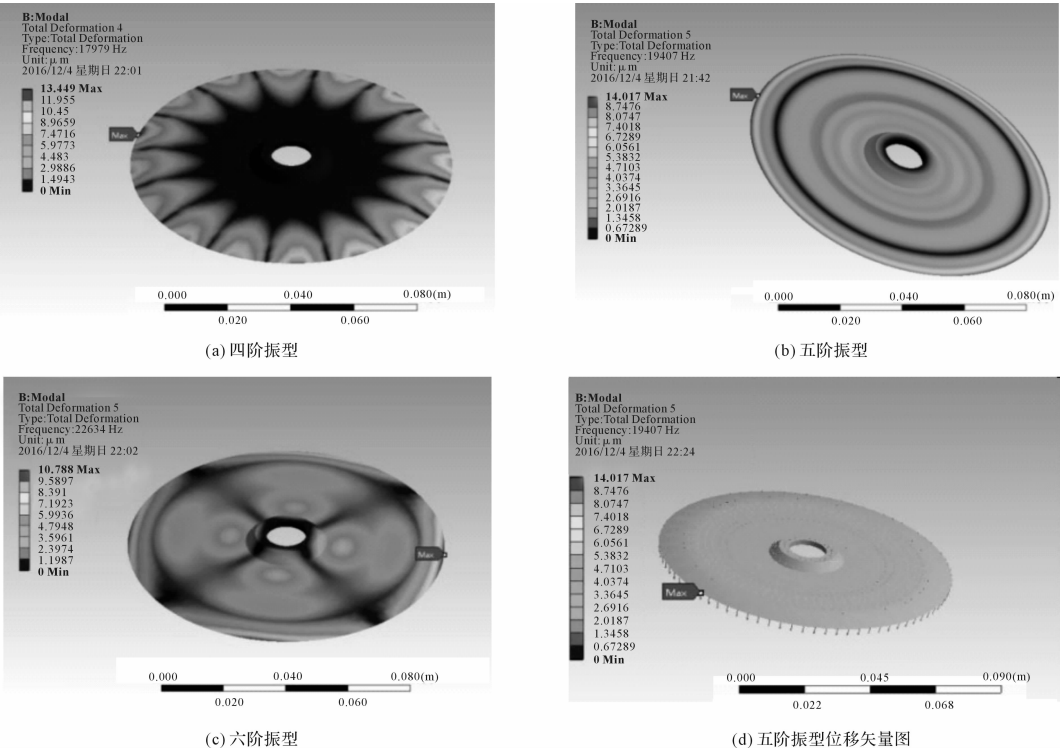


图 3 模态分析结果图

4 气凝胶超声铣削力分析

在宏观上看,超声切削是连续切削;而在微观上看,它却是一种时切时不切的断续切削过程^[10],超声铣削是一种脉冲式切削过程。在一个切削周期内,大于 80% 的时间圆形刀具与工件及切屑都处于分离状态,也直接决定了超声铣削产生较小的摩擦力与铣削力以及较少热量的特性。两种铣削方式产生的铣削力波形简图分别如图 4 所示。

在一个铣削周期内整个铣削长度被划分成大小相同的细小区域,圆形刀对工件的超声铣削加工是依次对每一个细小区域进行瞬时高速冲击铣削的^[5],因此圆形刀与材料接触的时间很少。由此可知超声铣削加工可以有效地降低铣削力。

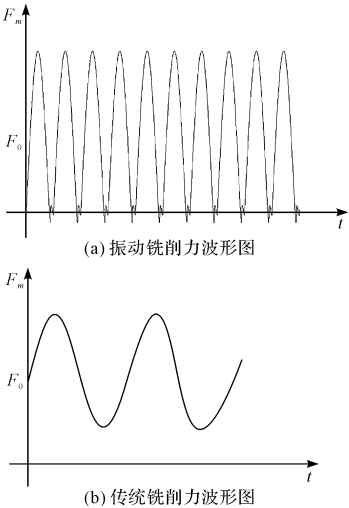


图 4 铣削力波形图

气凝胶材料超声铣削过程中,圆形刀的运动由 3

个分运动组成:(1) 随主轴的高速旋转运动;(2) 圆形刀相对工件沿加工轨迹的进给运动;(3) 高频脉冲下刀具产生的沿刃面径向方向的振动^[11-12],因此超声铣削力由普通铣削力与振动冲击力相加所得。假设圆形刀在加工过程中受力均匀,圆形刀等效质量为 M ,由动量定理可以求出刀具所受的平均冲击力 F_0 :

$$F_0 = Ma = M \frac{v(t_e) - v(t_s)}{t_c} \quad (5)$$

$$v(t_e) = x'(t) |_{t=t_e} = 2\pi f A \cos(2\pi f t_e) \quad (6)$$

$$v(t_s) = x'(t) |_{t=t_s} = 2\pi f A \cos(2\pi f t_s) \quad (7)$$

式中: $v(t_e), v(t_s)$ —对应铣削结束时的合速度和铣削开始时的速度; t_c —有效的铣削时间; A —刀具振幅; f —刀具振动频率。

将式(6,7)代入式(5)中,可得到 F_0 为:

$$F_0 = \frac{2\pi f^2 AM(\cos(2\pi f t_e) - \cos(2\pi f t_s))}{(t_e - t_s)f + 1} \quad (8)$$

设传统加工铣削力为 F_1 ,可以得到超声振动铣削力 F 为普通铣削力与平均冲击力之和,即:

$$F = \frac{2\pi f^2 AM(\cos(2\pi f t_e) - \cos(2\pi f t_s))}{(t_e - t_s)f + 1} + F_1 \quad (9)$$

式(9)中,由于 $\begin{cases} \cos(2\pi f t_e) - \cos(2\pi f t_s) < 0 \\ (t_e - t_s)f + 1 > 0 \end{cases}$,可

以得到 $F < F_1$,说明了超声振动铣削力要小于传统加工铣削力,能够有效减少气凝胶加工过程中的凹陷、破损等问题,获得良好的表面质量,证明了超声加工的优秀性。

5 结束语

(1)本研究从理论角度分析了圆形刀在 3 种不同作用力下振动的合成,推导出了圆形刀自由振动时自身的固有频率公式 f ;

(2)通过对刀具的模态分析,得出 $f = 19\,407\text{ Hz}$ 时,铣削加工效果最佳。该阶振型分布有规律,沿着刀

具径向传递并在刀刃处达到最大。与此同时,此阶振型与邻近振型相差较大,也避免了振型之间的相互干扰;

(3)由动量定理推导出铣削时的平均冲击力,进一步证明了超声铣削力要比普通铣削力小,较小的切削力与切削热能够提高材料加工表面质量。

参考文献(References):

- [1] 翟宇嘉. SiO₂ 气凝胶材料超声车削技术研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学机械工程学院,2016.
- [2] 王伟. 常压制备块体 SiO₂ 气凝胶隔热复合材料的工艺及其性能[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,2010.
- [3] 黄秀秀. NOMEX 蜂窝复合材料直刃刀超声复合切割机理研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学机械工程学院,2015.
- [4] 马中秋. 可自动更换刀具超声波切割主轴的研制[D]. 杭州:杭州电子科技大学机械工程学院,2015.
- [5] 方亮. NOMEX 蜂窝材料超声铣削圆形刀研制[D]. 杭州:杭州电子科技大学机械工程学院,2014.
- [6] 郭兴旺,邹家祥. 圆锯片振动模态分析[J]. 北京科技大学学报,1993,15(6):624-629.
- [7] 章力,沈保罗. 圆锯片振动模态的计算[J]. 声学技术,1987,7(1):22-25.
- [8] 臧勇,李同进,陶登奎等. 圆锯片的有限元模态分析[J]. 重型机械,2002(1):49-52.
- [9] 孔凡亮,何涛,任晓庆. 基于 ANSYS 的弹性支承的悬臂转盘-轴承学院模态分析[J]. 轻工机械,2015,33(4):93-96.
- [10] 张云电. 超声加工及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [11] 罗永新,聂笃伟,赵北辰. 数控车床切削效率与稳定性研究[J]. 机械,2016(2):70-73.
- [12] 吴胜游. 蜂窝复合材料圆盘刀超声切削研究[J]. 杭州电子科技大学学报:自然科学版,2015,35(5):44-47.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

张云电,储瑞,董昌帅,等. 气凝胶超声铣削圆形刀设计[J]. 机电工程,2017,34(11):1275-1278.

ZHANG Yun-dian, CHU Rui, DONG Chang-shuai, et al. Design of aerogel ultrasonic milling circular tool[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(11):1275-1278.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>