

组合结构金刚石圆锯片的有限元模态分析^{*}

张进生 王志 吴军涛 鞠修勇

山东大学

摘要: 提出新型组合结构圆锯片基体, 为锯切大幅面制品提供了可能的有效途径。针对金刚石圆锯片在锯切加工过程中出现的振动问题, 利用有限元软件 ANSYS 对普通圆锯片和组合结构圆锯片进行了模态分析, 得到了各自低阶固有振动频率及主振型图并进行对比。结果表明: 组合结构圆锯片和普通圆锯片的低阶振型都明显有节圆和节直径的特点, 且都为少节圆或无节圆振型; 前 12 阶扩展模态分布具有一定的规律性, 在初始 5 阶模态状态时频率波动较小, 从第 6 阶模态以后分布波动较大, 且波动幅度最大约为 30Hz。

关键词: 组合结构, 有限元, 模态分析, 圆锯片

Finite Element Mode Analysis of Combined Diamond Saw Blade

Zhang Jinsheng Wang Zhi Wu Juntao *et al*

Abstract: The new combined saw blade is presented to offer a possible effective way of machining stone products with wide breadth. Pointing to the vibration of the diamond saw blade in machining process, the modes of common diamond saw blade and combined diamond saw blade are analyzed by the finite element software ANSYS to get the intrinsic frequencies and the vibration modes. The result indicates that their low vibration modes both have the characters of cirque and diameter obviously, and they are the vibration modes of little or none cirque. The vibration modes of first 12 have some orderliness; the frequencies slightly fluctuate in the first 5. From the 6th vibration mode, they acutely fluctuate and the most fluctuate swing is about 30 Hz.

Keywords: combined structure, finite element, mode analysis, circular saw blade

1 引言

金刚石圆锯片广泛应用于大理石、花岗石、陶瓷墙地砖及混凝土制品的切割, 是石材、建材行业重要

且广泛使用的加工工具。由于其径厚比超过 200 且在高速旋转及高速送进的条件下工作, 故在锯切加工过程中普遍存在着严重的振动问题。这不仅会缩短锯片的使用寿命, 而且会降低锯切质量。因此在实际使用过程中, 锯片的振动和稳定性是一个普遍存在且不容忽视的问题, 有必要对其振动特性进行研究^[1]。

^{*}山东省自然科学基金资助项目(项目编号: Y2003F11, Z2007F07)
收稿日期: 2008年3月

- 8 姬舒平, 孙贤会, 马玉林. 一种基于制造环境的统计公差分析方法. 中国机械工程, 1999, 10(3): 249~253
- 9 邵锦文, 马玉林等. 基于选配法的统计公差设计. 机械设计, 2002(12): 46~49
- 10 王瑜, 马玉林等. 加工工艺误差的分布对公差统计分析的影响. 机械研究与应用, 2004, 16(2): 23~24
- 11 张宇, 张洪潮. 一种基于质量目标的统计公差和统计公差带表达. 工程设计, 2004(4): 8~10
- 12 陈冰冰, 方红芳等. 公差分析技术的综述. 中国纺织大学学报, 2002, 26(1): 116~119
- 13 周志革, 黄文振等. 数论方法在统计公差分析中的应用. 机械工程学报, 2000, 36(3): 69~72
- 14 王太勇, 雄越东等. 蒙特卡洛仿真法在尺寸及公差设计中的应用. 农业机械学报, 2005, 36(5): 101~104
- 15 David H, Evans. Statistical Tolerancing: the state of the art, Part I, background. Journal of Quality Technology, 1974, 6(4): 188~195
- 16 David H, Evans. Statistical Tolerancing: the state of the art, Part II, methods for estimating moments. Journal of Quality Technology, 1975, 7(1): 1~12
- 17 Roberto E Altschul, Frisdrich W Scholz. Case study in statistical

- tolerancing. Manufacturing Review, 1994, 7(1): 52~56
 - 18 Vijay Srinivasan, Michael A O' Connor. On interpreting statistical tolerancing. Manufacturing Review, 1994, 7(4): 304~311
 - 19 E E Lin, H C Zhang. Theoretical tolerance stackup analysis based on tolerance zone analysis. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2001, 17: 257~262
 - 20 H Vasseur, T R Kurfess and J Caga. Use of a quality loss function to select statistical tolerances. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(3): 410~416
 - 21 A Shan, R N Roth, R J Wilson. A new approach to statistical geometrical tolerance analysis. Int. J Adv. Manuf. Technol, 1999, 15: 222~230
 - 22 Hongchao Zhang. Advanced tolerancing techniques a wily-interscience publication. John Wiley & Sons INC., 1997
 - 23 Y S Hong, T C Chang. A comprehensive review of tolerancing research. Int. J. Prod. Res., 2002, 40(11): 2425~2459
- 第一作者: 王平, 教授, 博导, 天津科技大学机械工程学院, 300222 天津市
Author: Wang Ping, Professor, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin, 300222, China

为了解决目前普通圆锯片加工范围不能超过其半径的问题,本文提出了一种新型组合结构的圆锯片基体,使其切割加工幅面范围可达到其直径的 $2/3$,不用增大锯片直径就可实现较大幅面制品的切割(如一个直径为 $\phi 1800\text{mm}$ 的组合结构圆锯片可以切割石材的宽度达到 1200mm 左右)。

由于上述原因同样需要对组合结构圆锯片进行振动特性研究,主要包括固有频率和振型。它是系统的动态特性之一,对系统的动态响应、动载荷的产生与传递及系统的振动形式等都具有重要的影响^[2]。所以,需要对组合结构圆锯片进行模态分析,提取各阶固有频率及主振型,研究其动力学特性。

2 有限元模型

组合结构金刚石圆锯片的结构如图1所示^[3]。通过功能分析、应用模块化设计技术,将普通圆锯片基体分为切割外环1和支撑导向体2两大功能模块,工作时由电机3带动驱动摩擦轮4转动,通过摩擦驱动切割外环1旋转切割外环上焊接刀头,整个装置通过安装座5固定在锯机上。此结构使金刚石圆锯片的切割幅面达到其直径的 $2/3$,实现了不加圆锯片直径即可进行大幅面制品的切割加工。

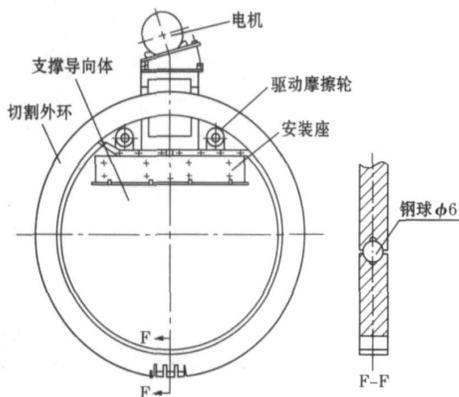


图1 组合结构金刚石圆锯片结构示意图

圆锯片的振动形式实际上是三种振动形式的合成,即横向振动、扭转振动及径向振动。其中,横向振动最为关键,集中了锯片振动的主要能量。而锯片的横向振动能量主要受低频范围对锯片结构动态特性的影响,低阶的振型决定了结构的动态特性,因此应着重分析研究圆锯片的低阶振动频率和振型(文中对组合结构圆锯片和普通圆锯片进行模态分析时取前12阶模态^[4-7])。

2.1 定义单元类型

考虑到组合结构金刚石圆锯片中的金刚石结块与基体厚度的不同,为了能够更真实地反映实际情况,选用三维8节点SOLID45号实体单元。

2.2 定义单元材料参数

组合结构金刚石圆锯片的切割外环同普通金刚石圆锯片一样主要包括两种材料:一种是基体的材料65Mn,另一种就是金刚石结块的材料。这两种材料的具体性质参数如表1所示。

表1 组合结构金刚石圆锯片基体及金刚石结块的材料性质参数

材料	ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)	μ
65Mn(基体)	7800	2.1×10^{11}	0.3
金刚石结块	8100	5.6×10^{11}	0.25

2.3 建立三维模型

考虑到在ANSYS中直接建模较繁琐复杂,选用在PRO/E中建立模型,然后导入ANSYS中。其形状参数如表2所示,建立模型如图2所示。

表2 组合结构圆锯片切割外环的形状参数 (mm)

外径	内径	基体厚度	结块长度	结块高度	结块厚度	水口宽度	底端圆弧直径
1800	1500	8	25	8	11	20	20

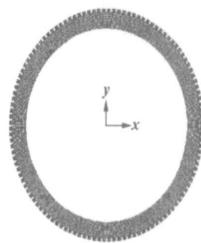


图2 组合结构圆锯片有限元模型

2.4 划分网格

圆锯片三维模型划分网格时采用映射网格划分方法,便于控制单元尺寸的大小且使划分网格后的模型看起来较整齐有规律性。在切割外环的水口处及金刚石结块处是应力集中敏感区和微小尺寸处,故采用较密的网格尺寸进行划分,以便更精确地反映出整个有限元模型的状态,提高计算精度;而其余部分则采用较疏的网格尺寸进行划分,以减少计算量,这样共将组合结构圆锯片划分为5760个单元。其划分网格后的有限元模型如图3所示。

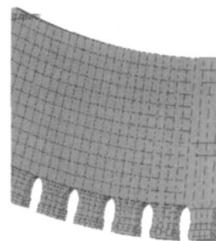


图3 组合结构圆锯片网格划分示意图

2.5 加载约束并求解

在典型的模态分析中唯一有效的载荷是零位移约束。对于组合结构圆锯片来说,切割外环内环面的节点摩擦轮处周向位移 U_Y 及整体轴向位移 U_Z 皆为零;而对于普通圆锯片,则只限于在圆锯片中心孔处进行全约束。按照 Block-lanczos 方法(分块兰索斯法)从 0Hz 到 1000Hz 中选取 12 阶模态,并提取 12 阶模态(即圆锯片的前 12 阶固有频率)。

3 模态分析结果

分别对 $\phi 1800\text{mm}$ 的普通圆锯片和组合结构圆锯片进行模态分析,得到各阶振动频率及主振型图,并进行对比。

3.1 普通圆锯片的各阶固有频率及主振型

经过有限元 ANSYS 分析计算,得出普通圆锯片的固有频率和主振型图:表 3 为普通圆锯片前 12 阶固有频率,图 4 为普通圆锯片前 12 阶主振型图。

表 3 普通金刚石圆锯片各阶频率 (Hz)

阶次	1	2	3	4	5	6
频率	12.853	12.853	13.630	16.648	16.648	31.295
阶次	7	8	9	10	11	12
频率	31.295	53.534	53.534	81.392	81.392	85.982

由图 4 可知,普通圆锯片的各阶振型明显地表示了节圆和节直径,对于中心孔夹紧的普通圆锯片,各阶振型对应的节圆和节直径数分别为(0, 1)、(0, 1)、(0, 0)、(0, 2)、(0, 2)、(0, 3)、(0, 3)、(0, 4)、(0, 4)、(0, 5)、(0, 5)和(1, 0)。可见,普通圆锯片低阶振动主要是无节圆或少节圆的振型。上述振型的形态和节圆及节直径的分布和理论分析结果^[8]与实验测得的结果^[9]是一致的,这表明了上述分析的合理性。

由表 3 可看出,普通圆锯片的频率在前 5 阶变化不大,最多相差 4Hz 左右;从第 6 阶以后随着阶次的增加,振动频率也逐渐增大,且增大的幅度也逐渐增加,最大约为 30Hz。由表 3 还可发现普通圆锯片的第 1 子步和第 2 子步的频率相同,同为 12.853Hz,这可以看成是振动方程解的重根,它们的振动方向正交,对应的振型图为图 4 中的 1、2,其中一阶振型为圆锯片绕 y 轴摆动,其中摆动的最大位置在圆锯片的顶部,最大位移为 0.19mm;二阶振型为圆锯片绕 x 轴摆动,摆动的最大位置在圆锯片的侧面,摆动的最大位移也是 0.19mm。同样由表 3 还可以发现子步 4 和 5、6 和 7、8 和 9、10 和 11 具有相同的频率,都是振动方程解的重根,振动方向都相互正交。在前 3 阶时圆锯片只是出现轻微摆动及侧向弯曲,从 4 阶开始圆锯片开始出现多次弯曲,并随着频率

的增加,其振动加大,且弯曲次数也依次增加,这给锯片的复焊和平整都带来一定的困难,在锯割过程中应尽量减小外界对锯片的冲击、减小变形,以提高锯片的使用寿命。

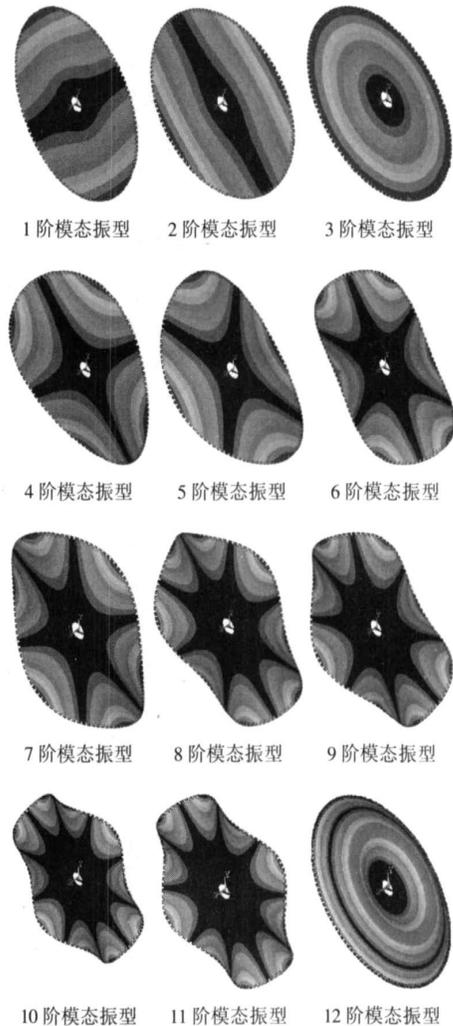


图 4 普通圆锯片前 12 阶固有频率的主振型图

3.2 组合结构金刚石圆锯片的各阶固有频率及主振型

组合结构金刚石圆锯片的前 12 阶固有频率及主振型图分别如表 4 和图 5 所示。

表 4 组合结构圆锯片各阶频率 (Hz)

阶次	1	2	3	4	5	6
频率	26.166	38.182	38.488	38.728	62.187	62.403
阶次	7	8	9	10	11	12
频率	90.087	90.104	108.89	120.43	120.45	153.14

由图 5 可以发现,组合结构圆锯片和普通圆锯片一样有着明显的节圆和节直径的特点,其中以第 1、2、3、5、6、7、8、10、11、12 阶模态振型的节圆和节直径比较明显,节圆和节直径数分别为(0, 0)、(0, 1)、

(0, 1)、(0, 2)、(0, 2)、(0, 3)、(0, 3)、(0, 4)、(0, 4)和(0, 5)。将图 5 和图 4 进行比较, 会发现它们之间的主振型图有着如下相似的变化规律:

(1) 在前 4 阶时组合结构圆锯片只是出现轻微摆动及侧向弯曲, 从 5 阶开始圆锯片出现多次弯曲, 并随着阶次和频率的增加, 其振动加大且组合结构圆锯片弯曲扭转的次数及节直径数也依次增加;

(2) 两图中均呈现节圆与节直径数相同、振动方向正交的振型图。



图 5 组合结构圆锯片前 12 阶固有频率的主振型图

表 4 列出了组合结构圆锯片前 12 阶固有频率。观察表中的数据, 可以发现里面的数据也存在着与普通圆锯片相似的规律:

(1) 前 4 阶的频率相差不大, 从 5 阶以后, 随着阶次的增加, 频率也逐渐增大, 且各阶次之间增大的幅度也逐渐增加;

(2) 比较子步 2 和 3、5 和 6、7 和 8、10 和 11 的频率数值, 发现它们的值非常相近, 最大的才相差 0.3Hz 左右, 因此也可以看成是振动方程解的重根,

它们的振动方向也是正交的。

4 结语

(1) 通过 ANSYS 软件对普通圆锯片和组合结构圆锯片进行了有限元动力学模态分析, 求出了各自的低阶固有频率和对应的主振型, 得到较为精确直观的结论。为了避免圆锯片在使用中发生共振现象, 应尽量使外界激励响应的频率避开圆锯片的固有频率;

(2) 组合结构圆锯片和普通圆锯片的主振型图均明显拥有节圆和节直径的特点, 它们的低阶振型图都是无节圆或少节圆振型, 且都具有重根解, 对应的各自振型图相互正交, 说明它们动态性能的相近性。但就同阶模态固有频率而言, 组合结构圆锯片要优于普通圆锯片, 这说明组合结构圆锯片的动态性能要好于普通圆锯片的动态性能;

(3) 组合结构圆锯片和普通圆锯片前 12 阶扩展模态分布具有一定的规律性, 在初始 4 阶状态时频率增加值小, 从 5 阶扩展模态以后频率增长较快, 随阶次增加振动频率逐渐增大, 增大幅度最大接近 30Hz, 而此时振动的强度和弯曲扭转的次数也逐渐增大。

参考文献

- 1 杨久霞, 张建宇. 圆锯片的模态分析. 冶金设备, 2003(1): 31~34
- 2 叶友东, 周哲波. 基于 ANSYS 直齿圆柱齿轮有限元模态分析. 机械传动, 2006, 30(5): 63~65
- 3 张进生, 王志等. 一种金刚石圆锯片. 发明专利说明书(专利号 ZL02110005.5), 2004
- 4 王志, 张进生, 王学礼. 新型组合式金刚石圆锯片性能研究. 金刚石与磨料磨具工程, 2005(6): 38~40
- 5 Hu Y N, Wang C Y, Ding H N. The mechanical performance of diamond saw blades with special structure. Key Engineering Materials 2004(259,260): 141~145
- 6 胡仁喜, 王庆五, 闫石等. ANSYS8.2 机械设计高级应用实例. 北京: 机械工业出版社, 2005
- 7 Abayakoon S B S, Lam F. Finite element analysis of saw blade vibrations under in-plane and lateral loading. Journal of the Institute of Wood Sciences, 2001, 15(5): 253~260
- 8 郭兴旺. 金属热切圆锯片振动和噪声的研究. 北京科技大学博士论文, 1994. 36~59
- 9 王正, 何继龙, 黄飞. 木工圆锯片固有频率测试方法研究. 木工加工机械, 2006(3): 31~33
第一作者: 张进生, 教授, 博士生导师, 山东大学机械工程学院, 250061 济南市
Author: Zhang Jinsheng, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China