

文章编号: 1006-852X(2007)03-0009-06

基于 ANSYS 的组合结构金刚石圆锯片基体离心力效应的分析^{*}

张进生 王志 吴军涛

(山东大学机械工程学院 济南 250061)

(山东省石材工程技术研究中心 济南 250061)

摘要 提出一种切割幅面宽度达到其直径 2/3 的组合结构金刚石圆锯片基体。利用有限元软件 ANSYS 对 $\phi 1800\text{mm}$ 的组合结构金刚石圆锯片进行了变形和应力分析, 分析总结出了组合结构金刚石圆锯片在仅受离心力、锯切力、离心力和锯切力共同作用下的变形和应力分布的特点、规律和相互影响关系。通过正交表设置不同的加工工艺参数, 经过多次有限元分析计算得出组合结构金刚石圆锯片二种最优参数组合: 进给速度 200mm/min 线速度 30m/s 时, 切割深度 $2\sim 2.5\text{mm}$ 为好; 线速度 30m/s 切割深度 1mm 时, 进给速度 500mm/min 为好。

关键词 离心力; 有限元; 组合结构; 金刚石圆锯片; 变形; 应力

中图分类号 TQ164 **文献标识码** A

Analysis by ANSYS for effect of centrifugal force on combined diamond saw blade

Zhang Jinsheng Wang Zhi Wu Juntao

(School of Mechanical Engineering Shandong University Jinan 250061, China)

(Stone Engineering Center of Shandong Province Jinan 250061, China)

Abstract A new combined diamond saw blade is proposed and the cutting breadth can reach two thirds of its diameter with this new blade. The calculation of the deformation and stress of $\phi 1800\text{mm}$ combined diamond saw blade is calculated by means of finite element software ANSYS. The character, rule and correlation of deformation and stress are analyzed when combined diamond saw blade is under the action of centrifugal force, cutting force, and under combined action of the two forces. According to different parameters by orthogonal tables, finite element calculation was done for many times and two optimum parameters of cutting were obtained. The depth of cutting is $2\sim 2.5\text{mm}$ when the feed speed is 200mm/min and circular linear speed is 30m/s ; the feed speed of cutting is 500mm/min when the cutting depth is 1mm and circular linear speed is 30m/s .

Keywords centrifugal force; finite element; diamond saw blade; deformation; stress

1 引言

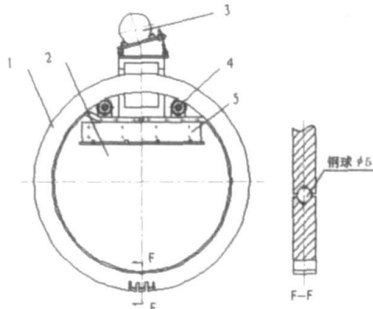
普通金刚石圆锯片在使用中存在一个明显的问题: 由于受圆锯片中心主轴的限制, 切割石材制品幅面的宽度小于锯片的半径, 只能达到锯片直径的 30%~35%。要加工大幅面的石材制品, 一般只能通过增大圆锯片直径的方法来实现, 但这会导致加工成本成倍数的增加。本文突破传统思路的束缚, 在功能分析的基础上, 提出一种不用增大圆锯片直径即可扩大加工幅

面的组合结构金刚石圆锯片基体, 其结构如图 1 所示。把普通圆锯片基体分为切割外环 1 和内盘 2 两大模块, 工作时由电动机 3 带动摩擦轮 4 转动, 通过摩擦驱动切割外环旋转实现切割运动, 整个装置通过安装座 5 固定在锯机上。此结构使圆锯片的切割幅面能够达到其直径的 2/3。

金刚石圆锯片是超薄板在高速旋转锯切过程中, 由于受到离心力、交变锯切力等载荷的作用, 从而使锯片基体内产生周向或径向的应力。当锯片的外缘部分

* 山东省自然科学基金资助项目 (Y2003F11)

在圆周方向存在压应力时,发生变形后呈波浪状;在径向存在压应力时,发生变形后呈蝶状;这两种变形都会造成圆锯片受力不平衡,振动加剧,切缝扩大,噪声变大,加工质量低,导致锯片结块早期破损,锯片寿命降低。因此,有必要认真研究组合结构金刚石圆锯片离心力和锯切力引起的效应。



1.切割外环 2.内盘 3.电动机 4.摩擦轮 5.安装座

图 1 组合结构金刚石圆锯片结构示意图

2 研究方案

本文着重研究 $\phi 1800\text{mm}$ 组合结构金刚石圆锯片在仅受离心力、锯切力、离心力和锯切力共同作用三种受力情况下切割外环的变形和应力分布情况。采用有限元分析软件 ANSYS 来实现对组合结构金刚石圆锯片变形和应力的分析计算和对比。在变形和应力分析中着重分析径向变形、等效应力、第一和第三主应力的分布情况及规律。

3 有限元分析

3.1 ANSYS 计算过程

(1) 单元类型

考虑到金刚石结块与锯片基体厚度的不同,采用实体单元才能表现出其真实结构,符合实际情况,因此单元类型选用三维八节点 SOLID45 号单元。

(2) 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包括两种材料:一种是基体材料为 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见表 1。

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

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

(3) 建模

考虑到在 ANSYS 中直接建模繁琐复杂,本文采用在 PRO/E 中建立模型,然后导入 ANSYS 中。其形状参数见表 2。

表 2 组合圆锯片的形状参数 mm

切割外环 外直径	切割外环 内直径	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
$\phi 1800$	$\phi 1500$	8	25	8	11	20	20

组合结构金刚石圆锯片的切割外环的结构形式同普通金刚石圆锯片基本上是一样的,只不过是前者的内孔直径是后者的 10 倍。这种结构是周期对称结构(循环对称结构)因为该结构绕中心轴旋转一个角度 α , 结构(包括材料常数)与旋转前完全相同。ANSYS 中利用结构的周期对称性,在建立模型和求解时,只须对一个锯齿的基本扇区建模和分析,求解后在后处理中再进行扩展,即得到整个结构的结果。这样能够降低分析的规模,节省计算费用。建立模型如图 2 所示。

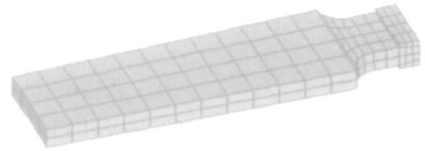


图 2 组合结构金刚石圆锯片的一个基本扇区模型

(4) 网格划分

模型划分网格时采用映射网格划分方法,这样便于控制单元尺寸的大小且使划分网格后的模型看起来整齐有规律性。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,所以这里采用较密的网格尺寸进行划分,以便更精确的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,如图 2 所示。

(5) 确定约束

进行离心力分析时,由于只对切割外环一个锯齿的基本扇区进行建模,所以约束边界条件时,只要在扇区的两个侧面,施加对称边界条件即可;为了防止模型发生刚性移动,约束扇区内环面的节点位移 $U_Z=0$ 。

进行有关锯切力分析时,由于增加了锯切力,破坏了整个结构受力的对称性,所以不能只对一个基本扇区进行建模分析,而要整体建模。此时要约束模型内环面节点的周向位移 $U_Y=0$ 为了防止模型发生刚性移动,要约束模型内环面节点的轴向位移 $U_Z=0$ (柱坐标系下)。

(6) 施加载荷

金刚石圆锯片是在高速旋转中进行工作的, 线速度要求达到 20 ~ 50 m/s。因为组合结构金刚石圆锯片的各项性能比普通圆锯片要低, 所以组合结构金刚石圆锯片的线速度应靠近上述范围的下限选取。根据电动机的转速 n 及摩擦轮与切割外环的尺寸, 经理论计算可以确定切割外环的线速度为 30 m/s。对切割外环进行离心力分析时, 施加的角速度为 33.33 rad/s。

切割外环锯切石材时所受的锯切力可用实验方法获得的经验方程

$$\left. \begin{aligned} F_n &= 0.985 V_f^{0.719} \alpha_p^0 B^{0.889} \\ F_t &= 0.223 V_f^{0.789} \alpha_p^{1.18} B \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

求得。

式中: α_p 为切割深度; V_f 为进给速度; B 为结块宽度

这里采用切深 α_p 为 1 mm, 进给速度 V_f 为 200 mm/min, 结块宽度 B 为 1.1 mm。

并由公式

$$Z = \frac{R}{P} \arccos\left(1 - \frac{\alpha_p}{R}\right) \quad (2)$$

式中: Z 为同时参与切割的齿数; R 为切割外环外半径; α_p 为切割深度; P 为节距。

可求得锯切外力同时作用于 2.85 个齿上, 则可认为是由 2.85 个锯齿承受了所有的压力, 受力面积为金刚石结块的底面和侧面。

3.2 ANSYS 计算结果分析

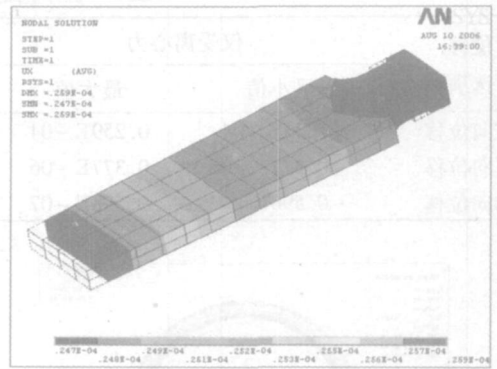
(1) 圆锯片切割外环的变形分析

组合结构金刚石圆锯片空转只受离心力时在径向 X 方向的位移变形分布云图, 如图 3 所示。

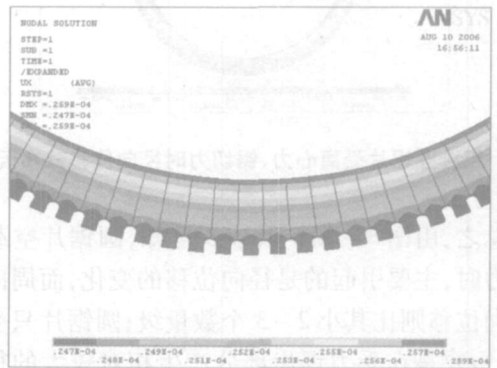
在图 3 中, 虚线框为模型变形前的位置, 而此时模型所在的位置是发生径向位移变形后的位置。由图 3 中可以看出, 模型内环面处径向位移最大为 0.259 E-04 m; 在模型外侧金刚石结块处径向位移最小为 0.247 E-04 m。众所周知, 物体所受离心力的大小与质量、角速度和半径有关, 本文所研究的对象为密度分布均匀、具有同一转速的切割外环, 因此在某一点离心力的大小取决于半径。所以在模型上同一半径处引起的径向位移大小应相等。如图 3b 所示, 模型扩展后得到的是一组组颜色深浅各异的圆环, 所代表径向位移由内到外逐渐变小。

切割外环在只受锯切力及锯切力和离心力共同作用下径向 X 方向的位移变形分布云图, 如图 4、图 5 所示。

图 4 中由于锯切力仅作用于切割外环最下面的 2.85 个齿上, 所以主要在这几个齿上产生相对较大的



(a) 一个扇区位移变形图



(b) 对扇区进行扩展得到的整个结构的径向位移变形图

图 3 组合圆锯片只受离心力时径向位移分布云图

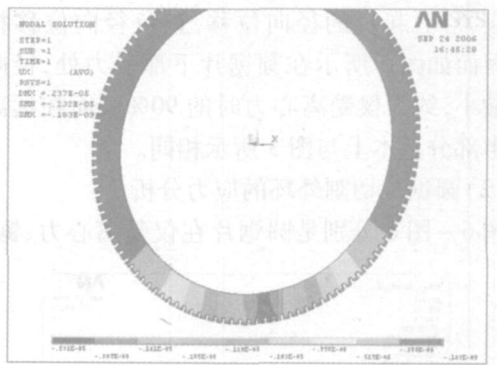


图 4 组合圆锯片仅受锯切力时径向位移分布云图

径向位移, 在切割外环的上半部分则较小, 要小四个数量级。且由于锯切力是对锯齿产生挤压的作用, 所以在切割外环下半部分产生的是负的径向位移。图 4 中最下面颜色较深区域。图 5 则为离心力和锯切力共同作用的结果。

组合结构金刚石圆锯片在不同受力情况下, 切割外环变形最值比较情况见表 3。

表 3 在不同的受力情况下, 锯片变形最值的比较

m

位移选项	仅受离心力		仅受锯切力		离心力 + 锯切力	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
径向位移	0.247E-04	0.259E-04	-0.232E-05	-0.189E-09	0.224E-04	0.259E-04
周向位移	-0.377E-06	0.377E-06	-0.676E-06	0.356E-06	-0.100E-05	0.696E-06
轴向位移	-0.598E-07	0.598E-07	-0.200E-07	0.200E-07	-0.599E-07	0.599E-07

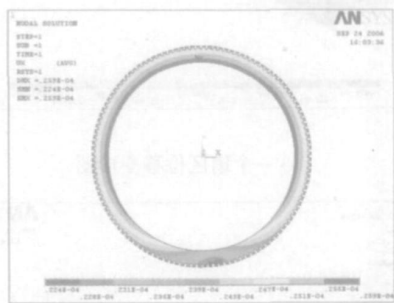


图 5 组合圆锯片受离心力、锯切力时径向位移分布云图

总之, 由图 3~图 5 及表 3 可知, 圆锯片空载只受离心力时, 主要引起的是径向位移的变化, 而周向位移和轴向位移则比其小 2~3 个数量级; 圆锯片只受锯切力时, 主要是在受力锯齿部分产生相对较大的径向或周向位移, 而远离受力部分产生很小的位移变化; 圆锯片受离心力和锯切力共同作用时, 离心力的作用会使圆锯片受拉, 产生拉应力, 引起正的径向位移, 锯齿受到切向和法向的锯切力的作用将会使圆锯片受压, 产生压应力, 引起负的径向位移, 正负径向位移相互抵消。因而如图 5 所示在圆锯片下部受力处, 径向位移变化最小, 约为仅受离心力时的 90%, 而在远离此处的上半部分基本上与图 3 所示相同。

(2) 圆锯片切割外环的应力分析

图 6~图 8 分别是圆锯片在仅受离心力、锯切力、

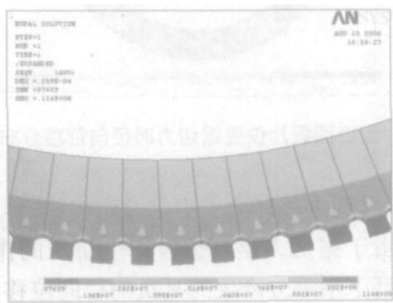


图 6 受离心力的等效应力分布云图

离心力和锯切力作用下所得到的等效应力分布云图。表 4 为组合锯片在不同受力情况下, 等效应力最值的比较情况。从图 6、图 7 中明显可以看出, 圆锯片在仅

受离心力和锯切力时, 最大应力均发生在宽水口圆弧底端 (颜色较深区域)。而在离心力和锯切力共同作用下, 由于它们产生的应力能够相互抵消, 所以从图 8 中可以明显看出, 中间部分的宽水口圆弧底端的所受应力比其他部分的要小, 颜色由深色变浅, 且由表 4 可知, 此时, 最大等效应力值也比仅受离心力的时候要小, 约为 90% 左右。

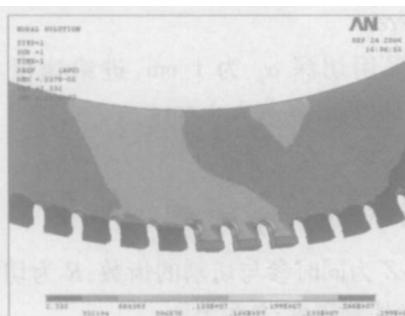


图 7 受锯切力的等效应力分布云图

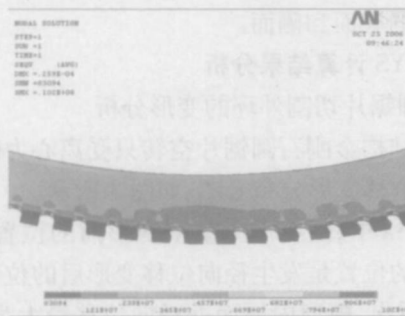


图 8 离心力锯切力下的等效应力分布图

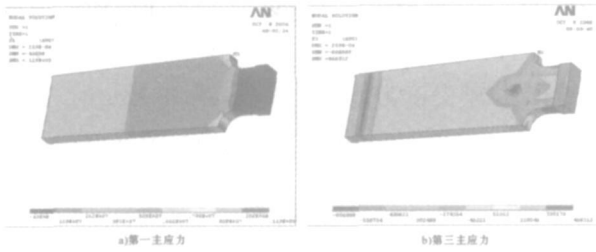
表 4 组合锯片在不同受力情况下, 等效应力最值的比较

Pa

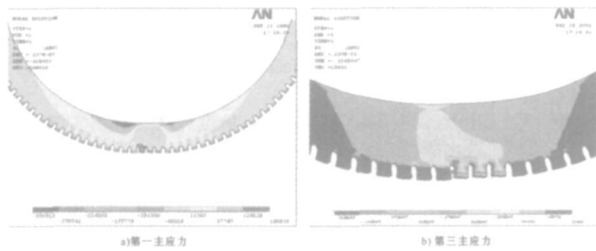
应力选项	仅受离心力		仅受外力		离心力 + 外力	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
等效应力	97659	0.114E+08	2332	0.299E+07	83094	0.102E+08

由于基体材料为 65Mn, 65Mn 抗拉强度为 $\sigma_b = 1200 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 410 \text{ MPa}$, 而许用应力 $[\sigma]$ 为除以它的安全系数 1.5 则 $[\sigma] = \sigma / 1.5$, 约为 270 MPa , 根据第三强度理论, $[\sigma] = \sigma_1 - \sigma_3 \leq 270 \text{ MPa}$, 圆锯片在锯切过程中, 所受的应力不能超过这个许用应力。所以研

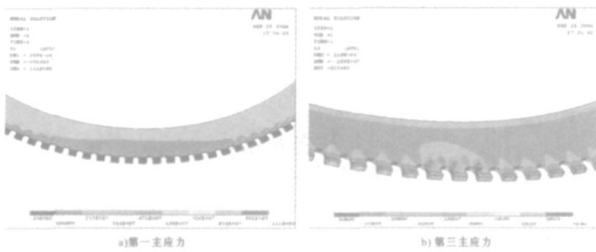
究组合结构金刚石圆锯片所受到的第一、第三主应力大小以及应力集中的情况, 能够判断锯片的优劣。组合结构金刚石圆锯片在不同受力情况下的第一、第三主应力分布云图见图 9 第一、三主应力最大值见表 5。



(1) 组合圆锯片仅受离心力时的主应力分布云图



(2) 组合圆锯片仅受锯切力时的主应力分布云图



(3) 组合圆锯片在离心力和锯切力共同作用下的主应力分布云图

图 9 组合圆锯片主应力分布云图

表 5 组合锯片在不同受力情况下的主应力最大值比较 Pa

应力选项	仅受离心力		仅受锯切力		离心力+锯切力	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
第一主应力	-40598	0.119E+08	-326923	180510	-378999	0.111E+08
第三主应力	-686888	644312	-0.224E+07	13410	-0.269E+07	522488

由得到的主应力分布云图可以得知, 组合锯片在不同受力情况下, 主应力绝对值的最大值均发生在宽水口圆弧底端部分, 说明水槽底端虽有过渡圆弧的保护, 但仍然会发生应力集中的情况。由表 5 的数据计算可得组合锯片在仅受离心力、外力、离心力和外力下, 许用应力 $[\sigma] = \sigma_1 - \sigma_3$ 分别为 12.6 MPa、2.42 MPa、13.8 MPa。此应力远远小于由第三强度理论计算得到的许用应力 $[\sigma]$ 为 270 MPa。

经过上述分析, 我们可以认为切割外环最大等效应力, 主要集中在宽水口圆弧底端处, 且锯切力产生的压应力能够抵销一部分由离心力引起的拉应力。从图 8 中能够明显看出, 由于受到锯切力的影响, 宽水口圆弧底端的等效应力变小, 图中对应的颜色变浅了, 大小只有原先的 90%。理论上讲当由离心力引起的拉应力和由锯切力引起的压应力相等时, 切割外环处于最佳状态。因此合理选择切割外环线速度和切割参数, 对减小组合结构金刚石圆锯片所受应力、提高圆锯片工作寿命及加工效率是十分重要的。

以上分析都是在线速度 $V = 30 \text{ m/s}$ 切深 $\alpha_p = 1 \text{ mm}$ 进给速度 $V_f = 200 \text{ mm/min}$ 的切割参数下进行的。经过分析可知, 此时的参数并不是最理想的情况, 离心力引起的拉应力较大, 而锯切力产生的压应力较小, 二者不能够最大程度的相互抵消。为了使切割外环处于最佳切割状态, 可以通过改变锯切参数, 使其处于最优状态。

锯切参数主要包括锯切深度、进给速度和切割线速度。由于切割外环的线速度由电动机的转速及摩擦轮、切割外环的尺寸确定, 不宜改动, 所以一般只能改变锯切深度和进给速度这两个参数。根据正交试验的设计方法, 确定为 4 水平 2 因素实验。列出因素水平表如表 6 所示。

表 6 切削参数因素水平表

试验号	列号		试验号	
	1	2	1	2
1	1	1	2	250
2	3	2	4	500
3	2	1.5	4	500
4	4	2.5	2	250
5	1	1	3	350
6	3	2	1	200
7	2	1.5	1	200
8	4	2.5	3	350
9	1	1	1	200
10	3	2	3	350
11	2	1.5	3	350
12	4	2.5	1	200
13	1	1	4	500
14	3	2	2	250
15	2	1.5	2	250
16	4	2.5	4	500

根据正交表中的参数变化, 经过 16 次有限元分析可知, 当切割深度为 2 ~ 2.5 mm, 进给速度为 250 mm/min 切割深度为 1 mm, 进给速度为 500 mm/min 时, 切割外环处于最佳状态。图 10 为此时的等效应力分布云图。

从图 10 a、10 b 中我们可以看出, 处于最优参数下

的等效应力,图中宽水口圆弧底端的等效应力值都变小了,颜色也都变浅了,高应力区的范围也逐渐变小了,甚至消失了;圆弧底端处的应力也分布均匀,变化缓慢。这都说明了此时组合结构圆锯片处于最佳切割状态。

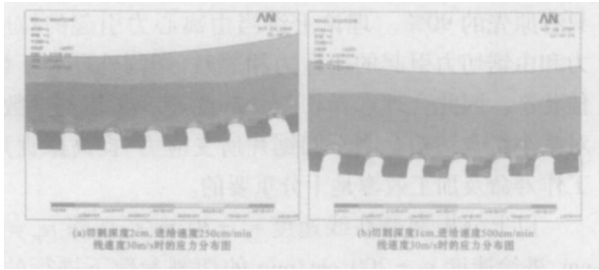


图 10 最优参数下的等效应力分布云图

4 结论

(1)采用 ANSYS有限元软件分析表明:组合结构金刚石圆锯片由于受到离心力的作用会产生较大的径向位移,比周向和轴向位移大 2~3 个数量级;锯切力的作用会使组合结构金刚石圆锯片产生负方向的位移,能够抵消由于受离心力而引起的位移变化,从而能够减小组合结构金刚石圆锯片整体位移变形量。

(2)组合结构金刚石圆锯片在不同受力情况下产生的应力主要都集中在宽水口圆弧底端部分,这是由于此处产生了应力集中现象;由于离心力能够使组合圆锯片产生拉应力,而锯切力则对圆锯片产生压应力,两种应力方向相反、相互抵消,能够减小宽水口圆弧底端部分的应力。因此,合理确定组合结构金刚石圆锯片的转速、切深及进给速度,对减小应力集中,改善锯片的应力分布,对保护锯片基体、提高锯片的使用寿命有着积极的作用。

(3)根据第三强度理论计算,组合结构金刚石圆锯片在使用过程中产生的应力 $[\sigma] = \sigma_1 - \sigma_3$ 远远小于锯片基体的许用应力 270 MPa。

(4)根据多次有限元分析计算结果表明,当线速度为 30 m/s 进给速度为 200 mm/min 时,切削深度为 2~2.5 mm 时,组合结构金刚石圆锯片具有最佳切割参数;当切削深度为 1 mm 线速度为 30 m/s 时,进给速度为 500 mm/min 时,组合结构金刚石圆锯片具有最佳切割参数。

参考文献

- 张进生,王志.一种金刚石圆锯片[P].中国,发明专利,02110005.5
- 汤宏群,王成勇,胡映宁.抗冲击金刚石圆锯片结构的有限元分析[J].工具技术,2003,37(6):9~11
- 王志,张进生,王学礼.新型组合式金刚石圆锯片性能研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2005,6
- Webb S W, Jackson W E. Analysis of blade forces and wear in diamond stone cutting[J]. Journal of manufacturing science and engineering 1998 (2): 84-92
- 胡仁喜,王庆五,闫石等. ANSYS 8.2 机械设计高级应用实例[M].北京:机械工业出版社,2005
- AbaYakoon S B S, Lan F. Finite element analysis of saw blade vibrations under in-plane and lateral loading[J]. Journal of the Institute of Wood Science, 2001, 15 (5): 253~260
- 王忠义,张云才,洪余才等.影响金刚石圆锯片切割因素的探讨[J].石材,2002,09,31~33
- 刘会宁,胡映宁,王成勇等.结块延伸结构金刚石圆锯片的有限元分析[J].金刚石与磨料磨具工程,2005,4,4~10
- 李远,黄辉,徐西鹏等.花岗岩锯切过程中的锯切力特征[J].金刚石与磨料磨具工程,2002,4(130):15~19
- 王志,张进生,王学礼.组合式金刚石圆锯片创新及优化设计[J].金刚石与磨料磨具工程,2005,4

作者简介

张进生,男,1962年出生,山东大学(济南,250061)机械工程学院教授。主要从事制造过程自动化、新型建材与建设机械和石材工程技术方面的研究开发,取得成果 20 余项、专利 8 项,获省部级奖励 10 余项。出版著作 9 部,发表论文 70 余篇。
E-mail: zhangj@sdu.edu.cn

收稿日期:2007-01-08

(编辑:张慧)

新书征订

应广大读者要求,由行业多年生产实践经验的专家许晓旺撰写的行业新书《金刚石工具制造工艺与配方》已经出版。本书系作者结合自己多年的企业生产经验、试验资料以及教授超硬材料制品理论知识的经年积累,并参考国内外大量相关文献资料编写而成。

全书共 16 章,以烧结金属结合剂金刚石工具为主线,系统介绍了金刚石工具的制造原理、制造工艺和配方设计方法,并首次公开了大量实用性配方;针对具体产品的结构设计、原材料选择、操作规范、稳定和提高质量的措施提出了很多实用性的建议和观点;在后面三章,还论述了电镀金属结合剂金刚石工具、树脂金刚石与 cBN 磨具、陶瓷金刚石与 cBN 磨具的制造原理、工艺以及实用性配方。本书内容丰富、通俗易懂,注重实用性和新技术、新工艺,同时也兼顾了理论与工艺的联系。欲购从速。

请联系: 0371-67640348 传真: 0371-67661785 E-mail: diamond@371.net

地址:郑州市华山路 121 号《金刚石与磨料磨具工程》杂志社 邮编: 450013