

工艺参数对圆锯片动态稳定性影响研究^{**}

李丽萍^{①②} 卓丽云^{①②} 王君超^{①②}

(^①厦门工学院机械科学与电气工程学院, 福建 厦门 361021;

^②柔性制造装备集成福建省高校重点实验室(厦门工学院), 福建 厦门 361021)

摘要:采用有限元分析法研究金刚石圆锯片在加工时的应力状态、固有频率和临界载荷受转速、夹紧盘直径、锯片厚度以及锯片直径的影响规律,以此探究工艺参数与锯片加工稳定性的关系。分析表明,锯片转速、夹紧盘直径、锯片厚度和锯片直径等工艺参数均与圆锯片的动态稳定性有紧密关系。综合上述工艺参数的影响规律及实验测量结果,应尽可能选择较高的锯片转速、较大的夹紧盘直径、厚度较大及直径较小的锯片,以获取较小的应力值、较大的固有频率和临界载荷,以提升锯片动态稳定性。

关键词:工艺参数;应力状态;固有频率;临界载荷;加工稳定性

中图分类号:TH162 文献标识码:A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.10.023

Research on the influence of process parameters on dynamic stability of circular saw blade

LI Liping^{①②}, ZHUO Liyun^{①②}, WANG Junchao^{①②}

(^①College of Mechanical Science and Electrical Engineering, Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361021,

CHN; ^②The Higher Educational Key Laboratory for Flexible Manufacturing Equipment Integration of Fujian

Province(Xiamen Institute of Technology), Xiamen 361021, CHN)

Abstract: The stress state, natural frequency and critical load of diamond circular saw blades are studied by finite element analysis method, which are influenced by the rotation speed, diameter of clamping disk, thickness and diameter of saw blade, so as to explore the relationship between process parameters and blade processing stability. The analysis shows that the dynamic stability of circular saw blade is closely related to the process parameters such as blade speed, clamping disk diameter, blade thickness and blade diameter. In order to improve the dynamic stability of the saw blade, the saw blade with higher speed, larger diameter of clamping disk, larger thickness and smaller diameter were selected based on the influence of the process parameters and experimental measurement results to obtain a smaller stress value, a larger natural frequency and a critical load.

Keywords: process parameters; state of stress; natural frequency; critical load; processing stability

金刚石圆锯片具有非常明显的薄板结构特点,锯切加工时极易发生变形^[1],影响加工时的动态稳定性。分析金刚石圆锯片的动态稳定性,主要从加工时圆锯片承受的应力状态、固有频率和临界载荷等指标入手^[2-3]。影响上述指标的工艺参数较多,例如锯片转速、夹紧法兰盘直径、锯片厚度、锯片直径和锯切深度等^[4-5]。现从市场选定某一系列常用的高性价比金刚石圆锯片,通过改变关键工艺参

数,应用有限元分析法和极差分析法得出关键工艺参数对圆锯片应力状态、固有频率及临界载荷的影响程度,探究优化关键工艺参数来提升锯片动态稳定性的理论依据。

1 锯片有限元分析模型

选用目前市面上性价比较高的金刚石圆盘锯片作为分析对象,其结构参数见表1,材料特性见表2。

* 福建省中青年教育科研项目(JAT210567);厦门工学院校级科研基金项目(柔性制造装备福建省高校重点实验室专项)(KYZX2021001);厦门工学院智能制造优化科研创新团队(KYTD202102)

金刚石圆锯片具有直径远远大于厚度的典型特征，故选择平面应力的分析方法最为合适。根据上述数据指派材料，按花岗岩锯切时的切削温度 260 ℃ 进行设置^[6]，并使用平面网格自动划分功能，得到网格模型如图 1 所示。

表 1 金刚石圆锯片的结构参数

外径 D_1/mm	内径 D_2/mm	厚度 t/mm	齿数 $Z/\text{个}$	节块长度 L_1/mm	节块高度 h/mm	水槽宽度 L_2/mm
368	50	3.2	34	28	14	4

表 2 金刚石圆锯片的材料特性

锯片对应部位	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
锯片基体 (65Mn)	7 800	210	0.3
金刚石节块	8 100	560	0.25

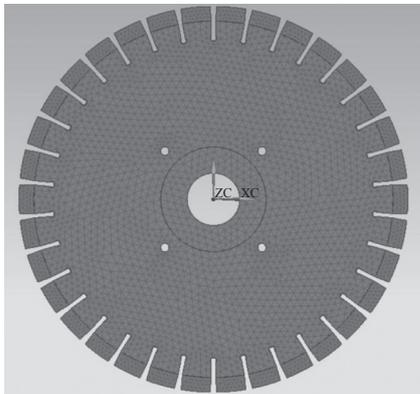


图 1 锯片有限元分析模型

采用顺切方式，假设锯切深度为 10 mm，为了确定圆锯片切削力作用区域，在锯片有限元模型加载载荷前，根据式 (1)^[7] 计算得出某个瞬间作用于花岗岩的锯齿齿数，确定这个瞬间加载切削力的锯切区域。

$$Z = \frac{R}{L} \arccos\left(1 - \frac{a_p}{R}\right) \quad (1)$$

其中：R 为圆锯片半径，L 为锯齿齿距（节块长度

与水槽宽度之和）， a_p 为锯切深度。

将圆锯片的相应参数代入式 (1)，得 $Z=1.9$ 。

根据上述计算结果圆整为 $Z=2$ ，即在任意瞬间相当于有 2 个锯齿参与锯切工作，其锯切工况如图 2 所示，故切削力加载区域即为图 2 中锯片与石材接触圆弧区。

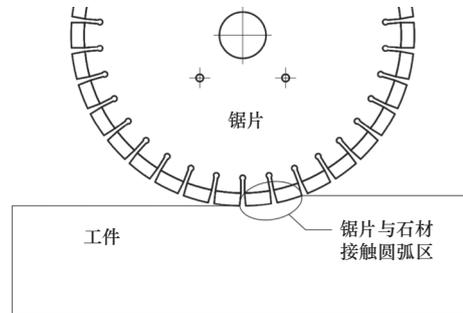


图 2 锯切工况图

2 工艺参数对锯片应力影响的有限元分析

选取的这款金刚石圆锯片在锯切深度为 10 mm 的任意加工瞬间，与花岗岩材料接触的 2 个锯齿上承受的切削力分布情况经测量和计算得其径向分力约 350 N，切向分力约 50 N，单个锯齿的受力模型如图 3 所示。

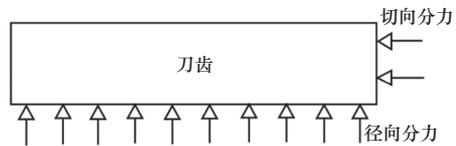


图 3 锯齿受力模型

2.1 锯片转速对锯片应力的影响

选用直径 100 mm 的夹紧法兰盘对锯片施加完全约束作用，参考金刚石圆锯片在锯切花岗岩材料时的线速度范围 30~55 m/s^[9]，得到其角速度范围 163~299 rad/s。当圆锯片的回转速度分别取值 170 rad/s、230 rad/s 和 290 rad/s 时，经有限元分析得到锯片单元节点应力在不同转速下的数值如图 4 所示

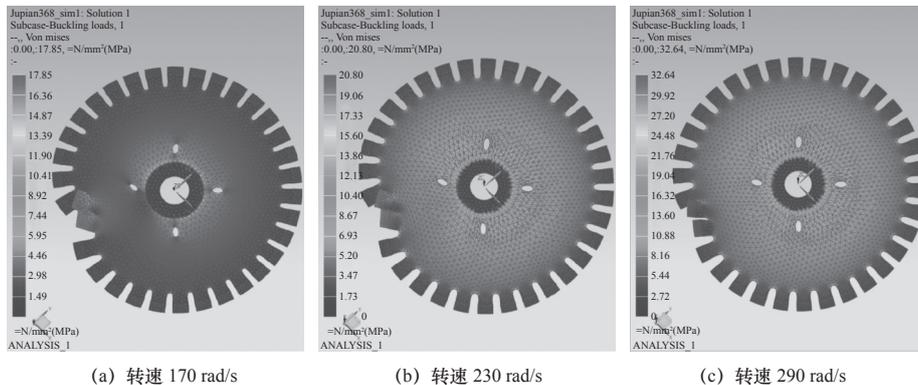


图 4 锯片不同转速对应的单元节点应力

(因篇幅有限,仅展示不同锯片转速对应的有限元分析图片)。不同锯片转速对应的结果分析如图 5a 所示,随着锯片转速的增大,锯片的单元节点应力迅速增大,且在高转速区间,应力增长率更大。

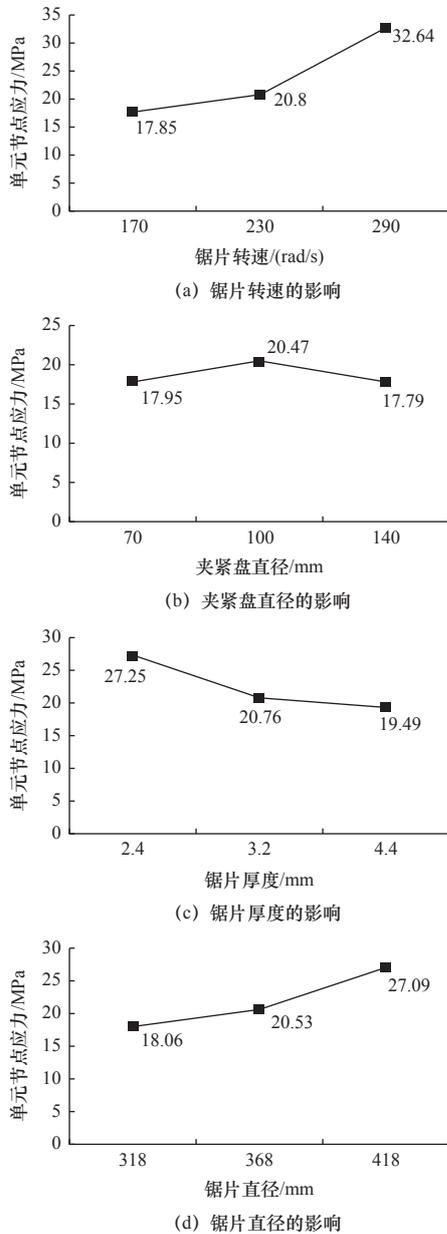


图 5 工艺参数对锯片应力的影响

2.2 夹紧盘直径对锯片应力的影响

当圆锯片转速选定为 230 rad/s 时,夹紧盘直径分别取值 70 mm、100 mm 和 140 mm,经有限元分析得到锯片的单元节点应力在不同夹紧盘直径约束下的状态,如图 5b 所示。随着夹紧盘直径的增大,锯片的单元节点应力随之增大;但当夹紧盘的约束范围覆盖锯片上的 4 个降噪孔时^[10-12],应力值反而随着夹紧盘直径的增大而减小。

2.3 锯片厚度对锯片应力的影响

当圆锯片转速选定为 230 rad/s 且选用直径 100 mm 的夹紧盘对锯片施加完全约束作用时,改变锯片厚度,分别对锯片厚度为 2.4 mm、3.2 mm 和 4.4 mm 的单元节点应力状态进行有限元分析,其单元节点应力的变化趋势如图 5c 所示。随着锯片厚度的增加,锯片单元节点应力明显减小。

2.4 锯片直径对锯片应力的影响

锯片转速选定为 230 rad/s,选用直径 100 mm 的法兰盘对锯片施加完全约束作用,锯片厚度为 3.2 mm 时,改变锯片直径,分别对锯片直径为 318 mm、368 mm 和 418 mm 的单元节点应力状态进行有限元分析,其单元节点应力的变化趋势如图 5d 所示。在恒线速的锯切模式中,随着锯片直径的增大,锯片单元节点应力明显增大。

上述工艺参数对锯片应力影响的极差分析如表 3 所示。综合工艺参数的变化率和表 3 对应的应力极差值可知,锯片转速对锯片单元节点应力的影响最大,锯片直径和锯片厚度的影响次之,夹紧盘直径的影响最小。锯片加工稳定性与应力之间的关系是:锯片承受的应力值越小,锯片的加工稳定性越好。从降低单元节点应力提升锯片加工稳定性来看,降低锯片回转速度、增大锯片厚度或在恒线速切削状态下减小锯片直径均能提升锯片的动态稳定性;夹紧盘直径则以是否覆盖降噪孔为边界,在降噪孔外锯片加工稳定性随着夹紧盘直径增大而上升,在降噪孔内则相反。

表 3 工艺参数对应力的极差分析

应力	工艺参数			
	锯片转速	夹紧盘直径	锯片厚度	锯片直径
单元节点应力极差/MPa	14.79	2.68	7.76	9.03

3 工艺参数对锯片固有频率影响的有限元分析

锯片的固有频率也是衡量锯片加工稳定性的一个重要指标,锯片的固有频率增大,意味着在一定范围内减少了固有频率的数量,因此降低了共振发生的概率^[13],从而提高锯片工作时的稳定程度。

3.1 锯片转速对锯片固有频率的影响

取前述 2.1 中锯片的 3 种转速状态,即 170 rad/s、230 rad/s 和 290 rad/s,经有限元分析取约束模态下对应的前十阶固有频率,如图 6 所示。其影响趋势如

图 7a 所示，与锯片三级转速对应的第一阶固有频率分别是：147.2 Hz、150.2 Hz、154.1 Hz。圆锯片各阶固有频率随着锯片转速的提高略有增大，但是

各阶固有频率的改变幅度不大，说明锯片转速对锯片固有频率的影响不大。

3.2 夹紧盘直径对锯片固有频率的影响

取前述 2.2 中 3 种不同直径夹紧法兰盘，即 70 mm、100 mm 和 140 mm，取约束模态分析的前十阶固有频率，其影响趋势如图 7b 所示，与夹紧盘三级直径对应的第一阶固有频率分别是：119.8 Hz、150.3 Hz、209.8 Hz。在低阶状态时，圆锯片的固有频率随着夹紧盘直径的增大而增大；但阶次越高，固有频率改变的幅度越小，到第 10 阶时，不同夹紧盘直径对应的固有频率基本一致。

3.3 锯片厚度对锯片固有频率的影响

取前述 2.3 中 3 种不同的锯片厚度，即 2.4 mm、3.2 mm 和 4.4 mm，取约束模态分析的前十阶固有频率，其影响趋势如图 7c 所示，与锯片三级厚度对应的第一阶固有频率分别是：114.5 Hz、150.2 Hz、203.4 Hz。圆锯片的固有频率随着锯片厚度的增大迅速增大，且高阶影响趋势明显高于低阶影响趋势。

3.4 锯片直径对锯片固有频率的影响

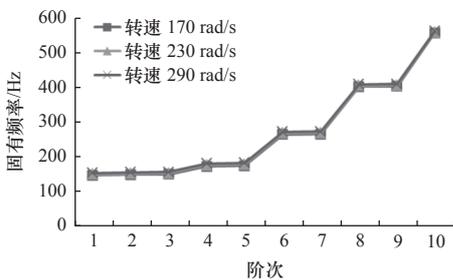
取前述 2.4 中 3 种不同的锯片直径，即 318 mm、368 mm 和 418 mm，对应约束模态分析的前十阶固有频率，其影响趋势如图 7d 所示，与锯片三级直径对应的第一阶固有频率分别是：225.3 Hz、150.1 Hz、108.8 Hz。在恒线速锯切加工模式中，圆锯片的固有频率随着锯片直径的增大而减小，且各阶变化幅度基本相同。

上述工艺参数对锯片固有频率影响的极差分析如表 4 所示。综合分析工艺参数的变化率和表 4 对

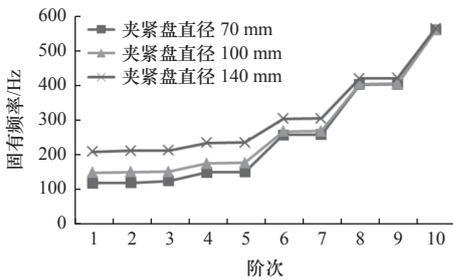
后处理导航器		后处理导航器		后处理导航器	
名称		名称		名称	
jupian368_sim1		jupian368_sim1		jupian368_sim1	
Solution 1		Solution 1		Solution 1	
+ 亚结构		+ 亚结构		+ 亚结构	
+ Subcase - Statics 1		+ Subcase - Statics 1		+ Subcase - Statics 1	
+ Subcase - Eigenvalue Method 1		+ Subcase - Eigenvalue Method 1		+ Subcase - Eigenvalue Method 1	
+ 模态 1, 147.195 Hz		+ 模态 1, 150.227 Hz		+ 模态 1, 154.058 Hz	
+ 模态 2, 148.7 Hz		+ 模态 2, 151.737 Hz		+ 模态 2, 155.594 Hz	
+ 模态 3, 149.962 Hz		+ 模态 3, 152.655 Hz		+ 模态 3, 156.099 Hz	
+ 模态 4, 173.206 Hz		+ 模态 4, 176.743 Hz		+ 模态 4, 181.237 Hz	
+ 模态 5, 174.614 Hz		+ 模态 5, 178.128 Hz		+ 模态 5, 182.594 Hz	
+ 模态 6, 265.344 Hz		+ 模态 6, 268.52 Hz		+ 模态 6, 272.593 Hz	
+ 模态 7, 266.106 Hz		+ 模态 7, 269.274 Hz		+ 模态 7, 273.337 Hz	
+ 模态 8, 402.793 Hz		+ 模态 8, 405.447 Hz		+ 模态 8, 408.871 Hz	
+ 模态 9, 403.504 Hz		+ 模态 9, 406.154 Hz		+ 模态 9, 409.572 Hz	
+ 模态 10, 557.529 Hz		+ 模态 10, 559.78 Hz		+ 模态 10, 562.692 Hz	

(a) 转速 170 rad/s (b) 转速 230 rad/s (c) 转速 290 rad/s

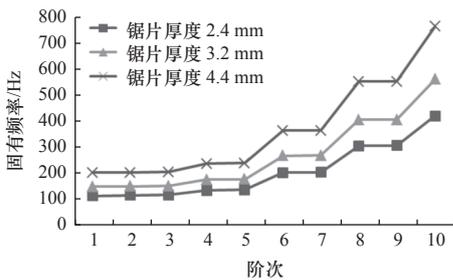
图 6 锯片不同转速对应的固有频率



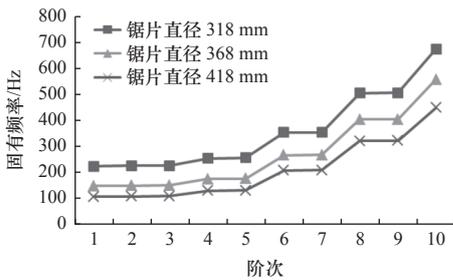
(a) 锯片转速的影响



(b) 夹紧盘直径的影响



(c) 锯片厚度的影响



(d) 锯片直径的影响

图 7 工艺参数对锯片固有频率的影响

表 4 工艺参数对固有频率的极差分析 Hz

阶数	工艺参数			
	锯片转速/(rad/s)	夹紧盘直径/mm	锯片厚度/mm	锯片直径/mm
1	6.9	90	88.9	116.5
2	6.9	91.7	86.5	117.5
3	6.1	87.5	88	116.6
4	8	84.7	101.9	124.3
5	8	84.8	102	125.8
6	7.3	46.1	159.9	145.1
7	7.2	46.1	159	145.4
8	6.1	17.5	245.3	183.6
9	6.1	17.5	244.8	184
10	5.2	5.2	340.9	225.3
平均值	6.8	57.1	161.7	148.4

锯片各阶临界载荷随着锯片厚度的增大迅速增大，前六阶增长速率基本相同，与锯片三级厚度对应的第一阶临界载荷分别是 2.04 kN、3.63 kN、6.85 kN。尽管增加锯片厚度能迅速提高锯片的临界载荷，但是增加锯片厚度就意味着给加工带来的切削力和切削功率均剧烈增长，而且较大锯缝的切削加工明显降低了石材利用率，并将产生更多的粉尘等环境污染物。

4.4 锯片直径对锯片临界载荷的影响

取前述 2.4 中 3 种不同的锯片直径，即 318 mm、368 mm 和 418 mm，对应线性屈曲分析的前十阶特征值，其相应临界载荷的影响趋势如图 9d 所示。在恒线速锯切加工时，各阶临界载荷随着锯片直径增大而减小，各阶变化率较接近，与锯片三级直径对应的第一阶临界载荷分别是 7.77 kN、3.62 kN、1.89 kN。大直径锯片有较高的加工效率，但其临界载荷值较低，加工稳定性较差。

上述工艺参数对锯片临界载荷影响的极差分析如表 5 所示。综合分析工艺参数的增长率和表 5 对应的临界载荷极差值可知：锯片厚度对锯片临界载荷的影响最大，锯片直径和锯片转速的影响次之，夹紧盘直径的影响最小。分析表明：提高锯片回转速度、增大夹紧盘直径、增加锯片厚度或在恒定线速度状态下减小锯片直径，均能提高锯片临界载荷，提升锯片的动态稳定性。

5 圆锯片固有频率实验分析

本实验采用单点激振单点拾振法^[14-15]对前述 2.4 中 3 种不同直径的金刚石圆锯片，即直径 318 mm、368 mm 和 418 mm，进行固有频率实验测试，实验原理如图 10 所示。

利用底端带有力传感器的力锤敲击安装加速度传感器的金刚石圆锯片基体，将传感器上采集的信号经电荷放大器传递到动态分析仪。因单次激振易丢失部分模态信息，这里采用多次激振多次拾振取均值的方法完成实验。实验测得 3 种不同直径的金刚石圆锯片的前 10 阶固有频率如表 6 所示。

表 5 工艺参数对临界载荷的极差分析

kN

阶数	工艺参数			
	锯片转速/(rad/s)	夹紧盘直径/mm	锯片厚度/mm	锯片直径/mm
1	4.35	3.31	4.81	5.88
2	4.43	3.33	4.96	6.03
3	4.68	3.40	4.95	6.27
4	4.83	3.27	5.29	6.24
5	7.11	3.46	6.21	8.15
6	6.60	2.96	8.62	7.66
7	7.96	4.03	9.13	8.85
8	9.41	2.72	17.32	9.58
9	15.11	3.75	17.57	14.07
10	12.55	0.42	28.98	10.22
平均值	7.70	3.07	10.78	8.30

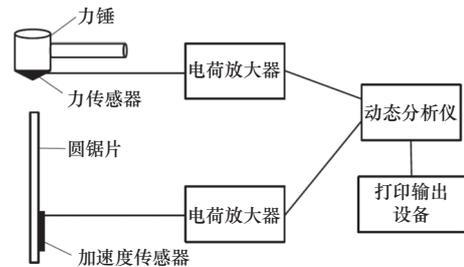


图 10 测量圆锯片固有频率实验

将上述实验结果与有限元分析结果进行对比，如图 11 所示。从图 11 可知，相同直径的金刚石圆锯片经实验测得的固有频率与有限元分析结果高度一致，说明金刚石圆锯片的有限元分析过程及结果符合实际情况。

6 结语

(1) 从锯片转速的改变对应力、固有频率及临界载荷的影响规律来看，锯片转速的升高能较好地提高锯片加工稳定性，并提高加工效率；但是锯片的应力在高速区间增长率明显大于低速区间增长率，如本例中单元节点应力在低速段增长率为 16.5%，

表 6 圆锯片固有频率实验值

Hz

直径/mm	阶次 1	阶次 2	阶次 3	阶次 4	阶次 5	阶次 6	阶次 7	阶次 8	阶次 9	阶次 10	与理论值的最大偏差
318	210.7	213.2	216.3	239.8	256.9	352.8	367.6	493.7	530.8	701.5	4.5%
368	139.6	140.2	140.9	180.8	190.1	290.9	293.6	418.5	423.6	560.1	9.1%
418	90.2	92	102.8	119.6	120.2	230.5	230.1	319.8	350.6	483.6	9.7%

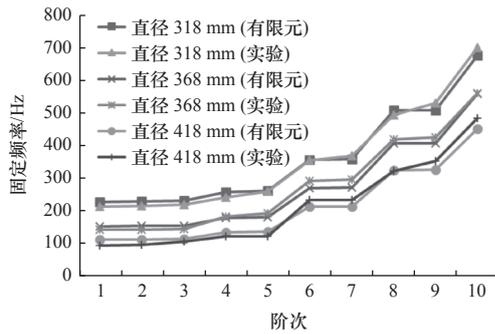


图 11 各阶固有频率实验结果与有限元分析结果对比

而在高速段增长率为 56.9%。因此，从保证动态稳定性来看，锯片转速应尽可能选择中速到高速段区间为宜。

(2) 从夹紧盘直径的改变对应力、固有频率及临界载荷的影响规律来看，当夹紧盘直径从 70 mm 增大到 140 mm 时，锯片的应力波动不明显，固有频率平均增长率 37.7%，临界载荷平均增长率 73.3%。因此，从提高动态稳定性来看，在许可范围内应选择直径较大的夹紧法兰盘。

(3) 从锯片厚度的改变对应力、固有频率及临界载荷的影响规律来看，当锯片厚度从 2.4 mm 增大到 4.4 mm 时，锯片的应力降低了 28.5%，固有频率平均增长率 77.1%，临界载荷平均增长率 249.5%。因此，在保证石材利用率和加工效率的前提下，应选择较厚的锯片以提升动态稳定性。

(4) 从锯片直径的改变在恒线速状态下对应力、固有频率及临界载荷的影响规律来看，当锯片的直径从 318 mm 增加到 418 mm 时，锯片的应力增加了 50%，固有频率平均降低率 43.9%，临界载荷平均降低率 68.2%。因此，从提高动态稳定性来看，应尽可能选择小直径锯片。

综上，在石材的锯切加工中，从提升动态稳定性兼顾加工效率及石材利用率的角度出发，工艺参数应选择较高的锯片转速、较大的夹紧盘直径、厚

度较大及直径较小的锯片。

参 考 文 献

- [1] 李阳, 王砚军, 秦可. 基于 ANSYS Workbench 金刚石圆锯片的力学分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(2): 41-45.
- [2] 田永军. 金刚石圆锯片动态特性分析及减振降噪优化设计研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [3] 杨秀鲁. 圆锯片基体的动态特性分析及降噪设计 [D]. 济南: 济南大学, 2019.
- [4] 邱陆一, 王秋燕, 白硕伟, 等. 金刚石薄圆锯片基体的磨削工艺参数优化[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(5): 84-88.
- [5] 李仁德, 柯建军, 张明松. 锯切参数对圆锯片动态稳定性的影响及优化[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2012, 34(1): 65-68, 84.
- [6] 仇君, 黄伟, 高军永, 等. 金刚石干切圆锯片的热应力分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2006, 153(3): 20-23.
- [7] 郎希影. 金刚石圆锯片切割石材动力学研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
- [8] 郑春英, 张进生, 王志, 等. 金刚石圆锯片锯解花岗岩切削力及参数优化的实验研究[J]. 工具技术, 2010, 44(7): 12-16.
- [9] 何志坚, 史秋. 锯片应力分布与失效分析[J]. 湖南文理学院学报: 自然科学版, 2007, 19(2): 59-62.
- [10] 赵磊, 胡欢, 孙爽. 基于有限元理论分析掏孔对金刚石圆锯片刚度的影响[J]. 石材, 2020(7): 22-24, 46.
- [11] 鞠军伟. 开圆形降噪孔金刚石圆锯片振动噪声研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [12] 钟锦华, 王文华, 汪祺, 等. 夹持对金刚石圆锯片基体稳定性和刚度的影响[J]. 石材, 2021(6): 29-32.
- [13] 袁哲, 曹瑞元, 盖瑞波. 金刚石圆锯片频率可靠性分析[J]. 现代制造工程, 2014(1): 1-4, 130.
- [14] 田永军, 徐国胜, 张翔宇, 等. 多约束条件下金刚石圆锯片结构优化研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 260-267.
- [15] 范勇, 李波, 徐凯, 等. 金刚石圆锯片结构与其模态频率的关联性研究[J]. 机械设计与制造, 2019(4): 13-16.

第一作者/通信作者: 李丽萍, 女, 1981 年生, 硕士, 副教授, 研究方向为数控加工技术及石材粗加工设备, 已发表论文 13 篇。E-mail: 10099369@qq.com

(编辑 高扬)

(收稿日期: 2022-06-29)

文章编号: 20221023

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。