

# 岩石材料的金刚石锯切研究进展\*

徐西鹏

(华侨大学石材加工研究重点实验室 泉州 362011)

摘要: 使用金刚石工具的锯切加工是切割天然岩石材料的最主要方式。在过去的 50 年中, 伴随着人造金刚石的诞生和规模化生产, 人类在石材的金刚石锯切技术研究和开发方面取得了显著成就。回顾了金刚石锯切石材的两个历史阶段; 总结了金刚石节块技术、锯切机理以及机床方面的研究成果; 讨论了金刚石锯切技术的发展趋势。

关键词: 岩石材料 金刚石工具 锯切 研究进展

中图分类号: TG506

## 0 前言

天然岩石质地坚硬耐磨、色泽古朴自然, 从古到今一直是高档建筑装饰材料。岩石材料从岩体上开采下来到变成石材制品要经历切割、磨平、抛光和倒边等多道机械加工工序。其中以切割所占份额最重。尽管目前有传统大砂锯切割、金刚石工具切割、磨料水射流切割、高压水射流切割以及激光切割等多种技术, 使用金刚石工具的锯切加工仍然是最主要的石材切割方式, 而且成为消耗人造金刚石最多的工业领域。

金刚石锯切石材主要有圆锯片切割、框架锯切和绳锯切割三种方式(参见图 1)。虽然工具和运动形式不同, 但是其本质都是金刚石磨料在金属结合剂的把持下对岩石材料的磨削过程。相对于大量关于陶瓷材料磨削加工的研究成果, 金刚石锯切石材的研究要少得多。事实上, 天然石材的锯切在国际

上属于一项机理研究长期落后于生产因而其潜力尚未被完全开发的加工工艺。

## 1 金刚石锯切石材的两个历史阶段

### 1.1 天然金刚石锯切

尽管 1854 年就有金刚石圆锯片锯切石材的记录, 但是, 真正有效的金刚石圆锯片在 30 年后才由法国人 Jacquinin 设计成功, 14 年后首次用于实际切割石材<sup>[1,2]</sup>。当时使用的磨料全部是天然金刚石(钻石)。起初是用手工方法将大颗粒的天然金刚石镶嵌到铸钢插块内, 再将插块连接到锯片基体上进行切割。但是效果并不满意。19 世纪 30 年代后期, 将金属粉末与金刚石混合并进行烧结的金刚石节块粉末冶金制造技术得到发展, 金刚石锯片的切割技术有了较大的进步。

### 1.2 人造金刚石锯切

1953 年, 第一颗人造金刚石在瑞典诞生<sup>[3]</sup>, 人类在探索使用金刚石的历程上迈入新的阶段。1959 年, 人造金刚石正式进入规模化生产。在此后的 44 年时间里, 伴随着金刚石圆锯片切割技术的不断完善, 金刚石框架锯和金刚石串珠锯先后问世并在技术水平和应用领域等方面取得了突破性进展。

1963 年, 中国继瑞典、美国、苏联、日本和英国之后, 第六个独立生产出人造金刚石<sup>[4]</sup>。但是, 中国人造金刚石及其应用技术真正的发展始于 20 世纪 80 年代末期。从那时起, 我国金刚石工业得到超常的发展, 人造金刚石年产量已雄居世界第一。

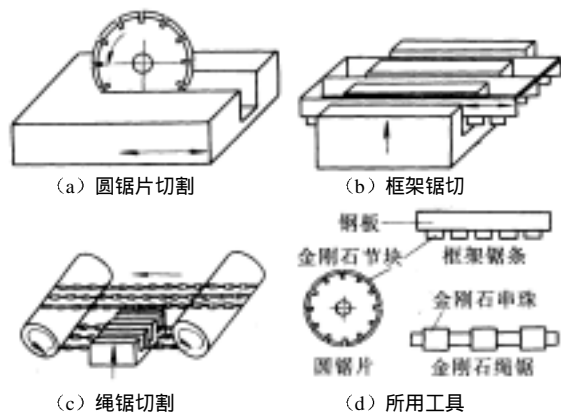


图 1 三种典型的锯切形式

## 2 锯切加工研究的主要进展

在过去的 40 多年时间里, 国内外学者围绕岩石材料的金刚石锯切加工进行了广泛而深入的研究。但是概括起来看, 研究的核心问题主要集中在

\* 纪念《机械工程学报》创刊 50 周年——“机械工程技术的历史、进展与展望”主题征文。国家自然科学基金(50175030)和福建省自然科学基金(F0110002)资助项目。20030707 收到初稿, 20030730 收到修改稿

金刚石节块技术、锯切机理以及机床装备三大方面。

## 2.1 金刚石节块技术

### 2.1.1 提高结合剂对金刚石把持能力的研究

在圆锯片切割、框架锯切以及绳锯切割中,对岩石材料的去除都是由固结在结合剂中的金刚石磨粒的切削作用来完成。由于金刚石与常用的结合剂金属之间有高的界面能,二者之间很难形成比较稳定的化学结合,结合剂对金刚石把持力不足,切割过程中金刚石磨粒容易脱落,既缩短金刚石工具寿命,又影响切割效率。因此,除了保证结合剂具有和金刚石磨粒相匹配的耐磨性之外,提高结合剂对金刚石把持能力的研究长期以来都是金刚石锯切工具研究的核心问题。

为了改善金刚石与金属结合剂之间的结合状态,从 20 世纪 60 年代开始至今,国内外学者一直坚持不懈地进行着探索<sup>[5~11]</sup>。为了改善金属结合剂对金刚石的湿润性,一种方法是直接采用可以和金刚石形成碳化物的金属作为主要结合剂成分,但是应用范围较窄。另外一种方法是在金属结合剂中添加 Ti、Cr 和 W 等强碳化物形成元素。通过这些元素在金刚石表面富集并形成碳化物来实现金属结合剂与金刚石的化学键合。但是,许多研究都发现,作为生产锯切用金刚石节块最常用的热压工艺的实际烧结时间很短,很难保证强碳化物形成元素向金刚石表面富集。同时,如果用量添加不当还有可能引起结合剂韧性下降<sup>[10]</sup>。因此,人们又先后提出了化学镀附、物理气相沉积、物理冶金镀附以及真空微蒸发镀等多种在金刚石磨粒表面预先涂覆金属层的方法,有效地解决了金刚石与结合剂之间的键合问题。

金刚石表面金属化可以有效改善金刚石与结合剂之间的结合状况,提高结合剂对金刚石颗粒的把持能力,进而提高金刚石节块的抗弯强度。但是,表面金属化对实际锯切性能的贡献在很大程度上还决定于金刚石在切割过程中的具体失效方式以及结合剂与金刚石耐磨性的匹配程度。因此,尽管有很多文献都试图建立节块抗弯强度与其实际锯切性能的对对应关系,但是,到目前尚没有一种完善的节块性能评价体系用于预先判断金刚石节块的实际使用性能虽然粉末冶金烧结工艺是目前生产锯切用金刚石工具的主要方式,但是,粉末冶金烧结式节块本身具有磨料在结合剂中随机分布的固有弊端,会造成不同区域金刚石和结合剂的不均匀磨损,导致大量金刚石由于过早脱落而失效。为此,我国台湾学者提出了利用钎焊工艺制造金刚石锯切工具的技术构想,并在金刚石串珠锯中制造中得到实施<sup>[12]</sup>。试

验结果表明,钎焊不但能够从根本上实现金刚石与结合剂之间的化学冶金结合,使金刚石磨料可以在出露高度高达其自身高度 70% 的情况下正常切割,而且可以实现磨料的均匀排布。尽管目前只有在绳锯中的应用报道,但是,钎焊技术在其他类型金刚石锯切工具制造中的应用前景仍然是可以预见的。

### 2.1.2 节块几何形状设计

除了结合剂和金刚石之外,节块的几何形状是决定其切割性能的又一重要因素。最初的金刚石圆锯片节块在轴向是不分层的。后来发现这样的节块锯切一段时间后两侧边比中间更容易磨损,节块在横截面方向会变成中凸形状,既引起锯片偏摆,又加剧节块磨损。因此,在大直径锯片用节块中出现了两边金刚石浓度高、中间浓度低的三明制结构,以便在锯切中形成中凹截面。后来又相继出现了五层甚至更多层的结构<sup>[13]</sup>。为了减少摩擦,先后还出现了节块侧边开槽、中间开空、中间开槽以及“L”形、“T”形等异形节块<sup>[14~15]</sup>。

尽管人们提出了多种几何形状的金刚石节块,并通过实际锯切证实了其有效性,但是,至今为止尚没有提出关于金刚石节块形状设计的理论依据。和节块几何形状一样重要的还有节块的长度。虽然很早就有学者从理论和试验角度探讨过节块长度的设计及其影响<sup>[16~17]</sup>,但是,能够综合考虑节块磨损、切割效率以及加工成本的金刚石节块长度选择依据还没有问世。在岩石材料锯切用金刚石节块(串珠)的制造方面,从金刚石和结合剂的选择到节块形状和参数的设计,目前更多地还是依靠经验积累,而不是科学的依据。

## 2.2 锯切机理

### 2.2.1 金刚石及结合剂的磨损机理研究

金刚石节块磨损机理的研究与节块制造技术的研究几乎在同步进行。由于节块表面状态是一切影响因素的综合反映,因此,人们一直期望能够通过观察磨损后的金刚石节块表面形貌状态,揭示金刚石失效的本质。20 世纪 70 年代后期,德国学者最早对节块表面金刚石的磨损形态进行了分类<sup>[18]</sup>。在随后的几十年中,国内外学者围绕多种加工条件下金刚石的各种磨损形态比例进行了研究<sup>[19~21]</sup>。英国学者还跟踪了节块表面金刚石磨粒出露高度的变化<sup>[19]</sup>。随着研究的深入,人们逐渐发现,不同学者研究结果之间的可比性太差。金刚石节块的实际锯切性能与金刚石磨损形态的比例也没有很直接的对应关系。出现这种现象的原因一方面可归结于观察统计不同金刚石形态的方法存在主观性和随意性大的缺

点; 但是, 更主要的原因应该归结于锯切过程中金刚石节块表面状态本身的复杂性。事实上, 从图 2 给出的金刚石节块磨损表面状态图不难看出, 一个简单的金刚石失效形态比例不可能全面反映金刚石节块的实际工作状态。节块表面的磨粒容屑空间、磨粒的出刃高度分布以及实际参与切削的有效磨粒数都是与节块工作状态密切相关的参量。但是, 长期以来, 由于受研究手段的制约, 无法对上述参数进行有效的量化测量与评价。随着计算机视频监测技术的发展, 有学者已经开始采用新的手段对金刚石节块表面的磨粒状况和出刃状况进行研究<sup>[22, 23]</sup>。借鉴磨削领域在砂轮磨粒测量与评价方面的研究进展, 采用新的检测手段、新的评价指标体系对节块表面状态进行定量评价近期将成为金刚石节块磨损机理研究的一个热点。

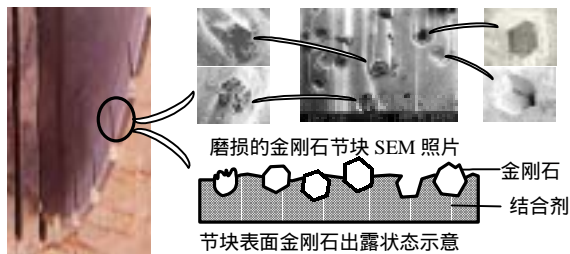


图 2 磨损后的金刚石节块表面状态

### 2.2.2 锯切过程参量变化特征研究

通过研究金刚石节块的磨损状况虽然可以推测磨损机理, 但是并没有支撑这种推断的直接依据。因此, 锯切过程中的力、比能以及温度等过程参量的变化很快成为机理研究的重点。

早在 20 世纪 70 年代, 德国学者 Buettner 和 Mamalis 就对锯切力进行了试验研究<sup>[17, 24]</sup>。在随后的几十年中, 一直有学者陆续发表不同条件下锯切力和锯切功率的试验结果<sup>[25~28]</sup>。在这些研究中, 人们一方面试图通过研究不同条件下的锯切力和功率变化特征揭示锯切机理并建立力和功率与锯切参数之间的对应关系; 一方面试图建立锯片切割性能与锯切力、锯切功率的对应关系。美国学者研究揭示了锯切过程中弧区合力作用点位置随参数变化而变化这一重要特征, 并从容屑空间的角度对锯切力和比能的变化进行了分析<sup>[26]</sup>。美国 GE 公司超级磨料部研究了一个新修锐的金刚石锯片从开始锯切到磨损平稳的整个过程中的锯切力变化特征, 并建立了耐磨度与锯切力比之间的单调对应关系<sup>[27]</sup>。

在大量的关于锯切力和锯切功率的研究中, 虽然建立了各种不同条件下的锯切力和功率相对锯切参数的变化关系, 可遗憾的是, 不但没有建立起一

个统一的力和功率与锯切参数的对应关系, 而且不同研究结果之间经常相互矛盾。事实上, 越来越多的研究表明, 除了锯切参数的变化, 锯切力和功率的变化与节块表面状态的关系十分密切<sup>[27, 29]</sup>。但是, 受节块表面状态量化识别与评价技术的限制, 不但难以建立起一个统一的锯切力和功率相对锯切参数的变化关系, 从本质上讲, 不同研究者之间的结果也无法进行相互比较。

除了寻求与锯切参数的对应关系之外, 从 Buettner 开始, 人们就在尝试寻找出一个以单颗磨粒切削几何参数为基础的几何参量用于描述锯切过程, 预测锯切力、比能甚至锯片耐磨度。可是, 这个通用的几何参量到现在也没有找到。目前最常用的几何参量仍然沿用磨削加工中的单颗磨粒最大切削厚度<sup>[21, 28]</sup>。最近的研究发现, 在一定的锯切条件下, 单颗金刚石磨粒承受的平均载荷、锯切比能、以及锯片耐磨度与单颗磨粒最大切削厚度都有一定的对应关系<sup>[28]</sup>。但是, 这些分析的前提是假定金刚石磨粒在节块表面均匀分布。如果要考虑金刚石磨粒在节块表面的实际分布与出露状况还必须依赖于今后对节块状态的量化识别。

尽管很难建立起统一的锯切力和功率与锯切参数的对应关系, 也没有寻找到锯片切割性能随锯切力、锯切功率的通用变化规律, 但是, 通过研究力和功率的变化, 却能够从量化的角度对锯切机理做出解释。我们最近的一项关于锯切与磨削过程中力和能量的研究就从量化的角度揭示了锯切和磨削过程中节块与岩石界面的作用机制, 特别是揭示了锯切中的能量耗散机制<sup>[28]</sup>。

相对于力和功率, 锯切温度的研究要少得多、也晚得多。1999 年, 德国学者通过在金刚石节块中预埋温度传感元件测量了大切深锯切中的弧区温度信号<sup>[30]</sup>。研究表明, 在大切深锯切中, 弧区温度最高不超过 300 °C。这一温度范围在随后的使用工件夹热电偶薄片的温度测量研究中得到进一步证实<sup>[31]</sup>。但是, 这样低的弧区温度无法解释在节块表面所观察到的热磨损现象。为此, 又在弧区温度测量结果的基础上, 通过求解节块与岩石界面的热量传输比例, 从理论上分析了金刚石磨粒所承受的温度。结果表明, 锯切中节块表面有一部分金刚石磨粒的表面温度会超过金刚石的石墨化温度, 并会对金刚石失效机制产生显著影响<sup>[32]</sup>。但是, 由于无法准确地知道锯切过程中金刚石磨粒的实际接触半径, 因此, 用解析方法求解金刚石磨粒表面温度只能是大概估算, 而且只适合于干切削的情况。如果要比较准确地研究各种锯切条件下的磨粒表面温度

特征,还依赖于磨粒表面温度测试方法的突破。

除了力、功率和温度之外,也有少数学者研究过锯切过程中的振动信号和声发射信号的变化特征<sup>[27, 33]</sup>。Meding 研究了单颗磨粒刻划不同石材时的声发射特征,并建立了声发射与石材锯切性之间的对应关系。由于是单颗磨粒试验,与实际情况差距较大。

### 2.2.3 锯切过程仿真

无论是磨损机理研究还是过程参量变化规律的研究,人们最初期望的是建立一系列包括尽可能多的影响参数在内的可用于描述锯切加工过程的理论或者试验模型,实现锯切加工的预测、仿真与优化。

早期的石材加工过程建模由于受试验条件的限制,以纯数学推导方式得到的物理模型为主。前苏联学者用这种方法曾推导过许多描述石材加工过程的模型,但其计算结果与实际相差甚远。随着数据采集与处理技术的提高,试验规模明显加大,人们开始更多地通过试验手段寻找输入参数与输出结果之间的函数表达式。但遗憾的是,花了大量的人力和物力做试验所建立的经验公式往往只能符合极少数特定的试验条件,很难在实际生产中得到应用。天然岩石材料本身随机性大,锯切过程交互影响因素多,许多关系都很难直接用函数关系显式表达。为此,我们在最近的研究中尝试用 BP 神经网络技术对岩石锯切过程中输入与输出参量之间的复杂关系进行分析<sup>[34]</sup>。通过运用大量试验数据对所建神经网络进行训练,得到了可以预测锯切力、锯切功率、以及节块耐磨性能的神经网络模型。研究结果同时表明,石材锯切过程包含的参数多,从精度和收敛速度考虑,基于 Levenberg-Marquardt 算法的神经网络比较适合于石材锯切过程的仿真。和磨削加工过程的研究一样,将已有的众多试验数据综合成为专家库,并在此基础上应用神经网络等先进手段进行过程建模与参数选择应该成为今后发展的方向。

除了传统的建模仿真,也有人尝试应用有限元技术对锯切过程进行仿真<sup>[35]</sup>。考虑到岩石材料本身组织结构的特殊性,美国学者提出使用离散单元技术对岩石材料的切削过程进行仿真,并取得了很好的效果<sup>[36]</sup>。由于该技术的基础是构造不同岩石材料的数字化模型,因此,完全有可能延伸到锯切过程仿真的研究之中。

相对于圆锯片的切割过程,框架锯切和绳锯切割由于试验相对困难,它们的锯切机理以及过程仿真的研究也相应少很多。但是,如果离散单元技术能够在圆锯片切割中应用成功,将有希望用它进行其他两种类型的锯切过程仿真。

## 2.3 机床技术

在提高工具制造技术和研究锯切机理的同时,人类一直没有停止锯切机床技术的发展。金刚石圆锯片切割技术应用多年之后,在一根主轴上同时安装多个锯片的组合锯切技术于 1979 年诞生并很快投入生产,金刚石圆锯片切割技术在切割效率上实现了一次革命。目前,可同时安装 30 多片锯片的组合锯切机床已经相当普及。而就框架锯切而言,其机床技术的变化从问世到现在并不十分明显。

在三类金刚石锯切方式中,最能体现机床技术水平和发展的当属绳锯切割。1968 年,金刚石绳锯技术诞生并在 10 年后被用于大理石开采。随后又开始应用到花岗岩的开采和高强度混凝土切割中。在此之前,对绳锯切割机床的技术要求并不很高。但是,随着计算机技术的发展,特别是 1997 年,基于 CNC 技术的四轴金刚石绳锯切割机械进入商业化,金刚石绳锯开始用于切割复杂的石材异型面<sup>[37]</sup>,为建筑设计注入了无限生机。金刚石绳锯机床也从此成为一种集 CAD—机—电—控制为一体的高技术装备。以绳锯机械为龙头的各种异形石材锯切加工数控机械成为目前锯切机床研究和开发的重点。

## 3 锯切技术的发展趋势

石材的金刚石锯切技术经过半个多世纪的发展,在提高加工效率、降低加工成本以及提高自动化程度等方面均取得了显著的进步。但是伴随着石材使用量的持续增长和人类环保意识的增强,石材的锯切加工技术在不断降低成本和提高效率与自动化程度的同时还必须考虑如何节约石材资源和降低环境污染。

就金刚石圆锯片切割而言,为了降低资源浪费,目前主要有超薄石板锯切和超薄锯片锯切两种发展趋势。前一种的出发点是通过减少石板成品的厚度来提高石材的利用率。而后一种则是通过减少锯缝宽度减少石材浪费。事实上,石材锯切过程中由于锯缝的客观存在,很大一部分岩石材料变成岩屑白白浪费。同时,岩屑的排放已经成为石材加工领域最主要的环境污染。人们在努力解决岩屑处理问题的同时,也在积极地寻求减少岩屑产生的加工技术。德国的 Denkena 最近提出了一种将锯缝宽度减少 43% 的锯切技术,并从锯切力、节块磨损、锯片振动以及锯切噪声等方面对该技术进行了评价,提出了通过提高锯片速度提高锯片基体动刚性的技术设想<sup>[38]</sup>。但是,在投入实际应用之前还

需要解决由于切削速度提高而引发的一系列技术问题。

相对于大理石等软质岩石材料的切割, 切割花岗岩等硬质岩石的锯片的单次切削深度要小得多。为了能在硬质石材的切割中达到大理石切割同样的锯切深度和效率, 德、英、意等欧洲石材加工强国几年前联合开始了超大切割深度下切割花岗岩的可行性研究<sup>[30]</sup>。目前, 欧洲市场对超大切深锯切技术的前景寄予厚望<sup>[39]</sup>。我们于2001年开始也对该项技术进行全面的研 究。研究发现, 单颗金刚石磨粒承受的平均载荷与单颗磨粒最大切削厚度仍然存在较好的单调对应关系, 因此, 为了在增大切削深度的前提下仍然保持较低的单颗磨粒切削厚度, 需要提高锯片的切削速度。从图3给出的有限元分析结果不难看出, 切削速度的提高、切削深度的增加都将引起基体变形显著增加。超大切深锯切在实用化的路程上还会遇到冷却、排屑、润滑、基体刚度和节块性能等一系列挑战。所有这些问题都将成为石材锯切技术领域近期的研究热点。而这方面技术的突破不再取决于某一单方面的研究进展, 而是依赖于加工机理、工具、机械以及加工状态识别与评价等多方面研究的突破。岩石材料的锯切加工正期待着一个具有绿色、智能化、节约资源、节约能耗、高效率、低成本和高响应速度等特征的先进加工技术时代的到来。

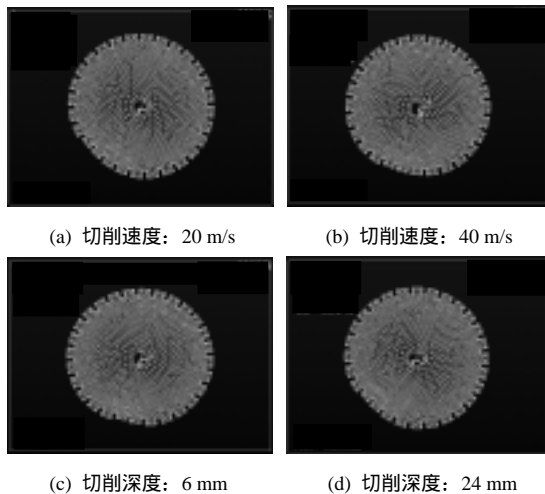


图3 不同锯切条件下的锯片变形分析

## 4 结论

人造金刚石诞生至今的半个世纪里, 岩石材料的金刚石锯切技术得到了极大的发展。大量关于锯切工具、锯切过程以及锯切设备方面的研究积累为石材的金刚石锯切加工技术进步提供了有力的保证。目前, 石材锯切加工正在朝着绿色、节能、节

约资源、智能化、高效率、低成本、以及快速响应等所谓先进加工技术特征的方向发展, 而这一目标的实现依赖于加工机理、工具、机械以及加工状态识别等多方面研究的协同发展。

## 参 考 文 献

- 1 Konstanty J. Production of diamond sawblades for stone sawing applications. *Key Engineering Materials*, 2003, 250: 1~12
- 2 Martin Jennings. Performance factors. *Stone Industries*, 1988, 5: 30~34
- 3 Caveney R. 50th anniversary of the first successful diamond synthesis. *Industrial Diamond Review*, 2003, 63(1): 13~15
- 4 王光祖. 人造金刚石探秘——王光祖论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2001
- 5 Raal F A. The importance of bonding to diamond surfaces in industrial application. In: *Proceedings of Diamond Conference*. Bristol, England, 1968: 485~497
- 6 Evens D. Wetting and bonding of diamonds by copper-tin-titanium alloys. *Industrial Diamond Review*, 1977, 37(9): 306~309
- 7 Bailey M W. Titanized metal bond diamond grit and related investigations into the sawing of stone and concrete. *Industrial Diamond Review*, 1978, 38(1): 8~13
- 8 高巧君. Cu-Ti 合金与金刚石(石墨)界面微区组织的分析研究. *金属学报*, 1983, 19(6): 250~257
- 9 Molinari A. Study of the diamond-matrix interface in hot-pressed cobalt-based tools. *Materials Science & Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 1990, A130(2): 257~262
- 10 Konstanty J. The materials science of stone sawing. *Industrial Diamond Review*, 1991, 51(1): 27~31
- 11 Wang Y H. Properties and applications of Ti-coated diamond grits. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129(1~3): 371~374
- 12 Sung C M. Brazed diamond grid: a revolutionary design for diamond saws. *Diamond and Related Materials*, 1999, 8(8-9): 1 540~1 543
- 13 Buettner H. Diamond saw segments with five zones. *Industrial Diamond Review*, 1986, 46(4): 162
- 14 Silveri P. L-shaped saw segments increase productivity. *Industrial Diamond Review*, 1985, 45(6): 297~298
- 15 Reinhardt K D. New shape of diamond segment for machining natural and artificial stone. *Industrial Diamond Review*, 2003, 63(2): 16~18
- 16 Aleksandrov V A. Determination of the length of a diamond

- disc tool segment. Soviet Journal of Superhard Material, 1989, 6 (1): 48~52
- 17 Mamalis A G. The slotting of blocks of hard rock with a diamond segmented circular saw blade. Industrial Diamond Review, 1979, 39(10): 356~365
- 18 Bailey M W. Sawing in the stone and civil engineering industries. Industrial Diamond Review, 1979, 39(2): 56~60
- 19 Wright D N. Investigations and prediction of diamond wear when sawing. Annals of the CIRP, 1986, 35(1): 239~244
- 20 Luo S Y. Characteristics of diamond sawblade wear in sawing. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1996, 36(6): 661~672
- 21 Tönshoff H K. Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications. Diamond and Related Materials, 2002, 11(3~6): 736~741
- 22 Eyuboglu A S. Statistical and microscopic investigation of disc segment wear related to sawing ankara andesites. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40(3): 405~414
- 23 Jiang B C. Machine vision inspection for the protrusion rate of a diamond tool. Journal of Manufacturing Systems, 2001, 20(5): 357~362
- 24 Buettner A. Diamond tools and stone. Industrial Diamond Review, 1974, 34(3): 89~93
- 25 Aleksandrov V A. A study of force and energy parameters in cutting granite with diamond disc saws. Soviet Journal of Superhard Materials, 1984, 6 (6): 35~39
- 26 Brach K. Grinding forces and energy. ASME Journal of Engineering for Industry, 1988, 110(1): 25~31
- 27 Webb S W. Analysis of blade forces and wear in diamond stone cutting. Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1998, 120(1): 84~92
- 28 Xu X P. Forces and energy in circular sawing and grinding of granite. Transactions of ASME; Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123 (1): 13~22
- 29 Xu X P. The effects of swarf in the diamond sawing of granite. Key Engineering Materials, 2003, 250: 187~193
- 30 Asche J. Deep grinding-a new dimension in cutting granite. Industrial Diamond Review, 1999, 59(2): 110~122
- 31 Xu X P. Thermal aspects for grinding of granite. Transactions of NAMRI/SME, 2002, 30: 271~276
- 32 于怡青, 曾伟民, 徐西鹏. 锯切加工中金刚石节块的热磨损及 Ti-Cr 涂层对热磨损的抑制作用. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 472~476
- 33 Meding M. Analysis of acoustic emission from single-grit scoring. Industrial Diamond Review, 1995, 55(2): 20~22
- 34 张一飞. 石材锯切过程仿真: [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学, 2003
- 35 Jerro H. Finite element analysis of the sawing process for superabrasive diamond tools. In: Proceedings of the 1999 ASME Energy Sources Technology Conference, 1999: 1~5
- 36 Lei S T. Distinct element modeling of rock cutting under hydrostatic pressure. Key Engineering Materials, 2003, 250: 110~117
- 37 Gerlach D. Four-axis wire saw for profiling stone. Industrial Diamond Review, 1997, 57(4): 112~113
- 38 Denkena B. Development of advanced tools for economic and ecological grinding of granite. Key Engineering Materials, 2003, 250: 21~32
- 39 Davis P R. The future of diamond abrasives in stone processing. Industrial Diamond Review, 2001, 61(3): 159~167

## ADVANCES IN THE RESEARCH OF DIAMOND STONE SAWING

*Xu Xipeng*

*(Huaqiao University)*

**Abstract:** Sawing with diamond abrasive tools is the most important method for the processing of natural stone. During the past fifty years, great achievements have been made in the development and research of diamond sawing after the naissance and batch production of synthetic diamond. Two historical stages of diamond sawing are reviewed. The achievements in the research of diamond tools, sawing mechanisms and sawing machines are summarized. The developing trend of diamond sawing is also discussed.

**Key words:** Stone material Diamond tool Sawing  
Research development

作者简介: 徐西鹏, 男, 1965 年出生, 工学博士, 教授, 博士生导师。华侨大学校长助理, 石材加工研究重点实验室主任, 机械制造及其自动化学科教授、博士生导师。主要研究领域为硬脆材料先进加工技术、超硬材料工具技术、加工过程监控以及加工过程摩擦学。主持国家级科研项目 4 项。发表学术论文 100 余篇, 其中被 SCI 和 EI 收录 60 多篇次。在 Elsevier Science 和 TTP 编辑出版学术会议论文集和论文专集 4 部。获省部级科技进步一、二、三等奖共 4 项。享受国务院特殊津贴, 并获福建省劳动模范、福建青年科技奖章、运盛青年科技奖、国际加工技术学术会议杰出成就奖章、中国机械工程学会工作成果奖以及福建省优秀教师奖章等奖励。主要学术兼职有: 国际学术期刊 Key Engineering Materials(瑞士)编委, 《机械工程学报》编委, 《金刚石与磨料磨具工程》编委会副主任, 中国工程机械学会理事、学术委员会委员, 中国仪器仪表学会理事, 国际磨料技术委员会委员, 福建省机械工程学会副理事长。