

金刚石串珠绳锯锯切技术研究现状与发展^{*}王 飞^{1,2}, 张进生^{1,2}, 王 志^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061)

(2. 山东省石材工程技术研究中心, 济南 250061)

摘要 简要回顾了金刚石串珠绳锯的发展。根据金刚石串珠锯加工原理及特点, 总结金刚石串珠绳的制备工艺及分类, 分析金刚石串珠锯切机理。分析了串珠的磨(破)损、锯切力与加工参数的关系, 认为单载荷作用时串珠磨损取决于金刚石出刃、串珠组分与锯切参数; 锯切力随着进给速度与锯切长度增大而增大, 随着串珠绳线速度增加而降低。最后, 指出金刚石串珠绳锯亟待解决的问题, 并对该领域的发展提出自己的观点。

关键词 金刚石串珠绳; 多绳锯; 串珠; 锯切机理

中图分类号 TG58; TG74 **文献标志码** A **文章编号** 1006-852X(2013)01-0036-07

Current situation and development of diamond wire saw cutting technology

WANG Fei^{1,2}, ZHANG Jin-sheng^{1,2}, WANG Zhi^{1,2}

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

(2. Stone Engineering Technology Research Center of Shandong Province, Jinan 250061, China)

Abstract The history of the diamond wire saw was briefly reviewed. The classification and manufacturing technology of string bead wires were summarized according to its processing principle and characteristics. The sawing mechanism of diamond wire saw was analyzed. The relationships between bead wear (or breakage), cutting force and processing parameters of wire saw were analyzed. The results showed that under single load, the bead wear was determined by diamond protrusion, bead components and cutting parameters; the sawing force increased with the increase of feed velocity and cutting length, and decreased with linear velocity increasing. In the end, the burning issues and the development trend of diamond wire saw were discussed.

Key words diamond wire saw; multi-wire diamond saw; string bead; sawing mechanism

金刚石串珠绳是集金刚石高硬度与钢丝绳高柔性为一体的绳锯机加工工具。因其加工技术具有资源利用率高、环境影响小、加工效率高、施工简单等一系列优点, 能实现各种异形面加工、大型土建拆迁、管道施工等工程领域高效切割, 被国际石材加工领域确定为 21 世纪最优发展的高新技术领域^[1-3]。

1968 年英国人浦劳斯提出将高硬度金刚石和高柔性钢丝绳相结合, 制备刚柔相济的金刚石串珠绳;

1978 年意大利 APUAN 石材矿山成功进行第一条金刚石串珠绳锯割实验; 1990 年第一台数控串珠锯投入生产, 标志着串珠绳锯进入新的时代^[4]; 1997 年数控四轴金刚石串珠锯和 Falcon600 多绳金刚石串珠锯在意大利诞生并应用于实际生产^[5,6]。

目前, 国产金刚石绳锯机有了相应的发展, 但绳锯切割机理的研究远落后于生产应用, 且国内尚未有应用于花岗石大板锯切的多绳金刚石串珠锯。因而, 金

^{*} 基金项目: 山东省科技发展计划(2010GGX10405); 山东省自然科学基金重点项目(2012ZRE27238)。

金刚石绳锯加工工艺尚未被完全开发^[7]。

1 金刚石串珠绳锯锯切工艺分析

1.1 金刚石串珠锯加工原理

金刚石串珠绳锯机已在矿山开采、大型土建拆迁、桥梁、板材切割、金属构件及石材异形品加工等方面得到成功应用。其锯切加工是由“柔性”工具——金刚石串珠绳和锯机共同完成,其系统原理如图1所示。

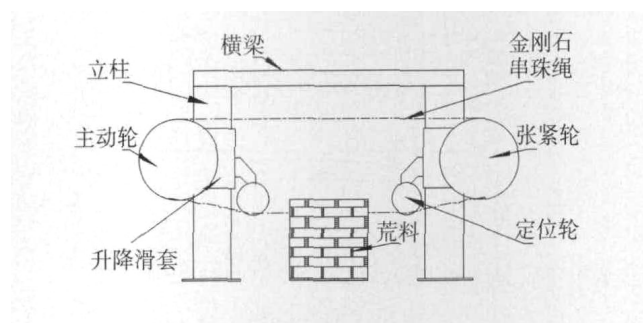


图1 金刚石串珠锯的加工原理示意

通过调整张紧轮,得到合适的张紧力。加工时,张紧在绳锯机轮组上的串珠绳,在驱动轮的带动下,串珠绳作高速运动,并在定位轮的导向下,实现串珠的高速磨削加工。

1.2 金刚石串珠绳制造工艺及分类

串珠绳主要由金刚石串珠、钢丝绳、隔离套三部分组成,如图2所示,串珠主要是固结金刚石磨粒并在锯切中实现高效磨削加工;隔离套主要起到固定串珠以及增强冷却效果作用;钢丝绳则是整个串珠的载体。

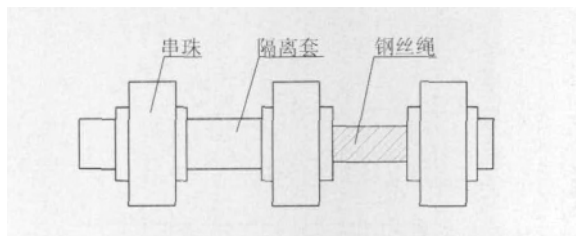


图2 金刚石串珠绳示意图

依据制作工艺不同,金刚石串珠分为电镀串珠、热压烧结串珠、钎焊串珠。电镀串珠工艺简单,金刚石颗粒露出度大,锋利但不耐磨,用于软质材料的加工;烧结型串珠工艺复杂,颗粒露出度小,耐磨度高,使用寿命长,用于较硬质材料的加工;钎焊串珠是台湾学者1998年提出的使用钎焊技术制备串珠的方法,高温钎

焊串珠中金刚石排布规则,直径小且性能优越,提高了金刚石的把持力,克服了传统制作工艺的不足^[8,9]。

在开采切割大理石、石灰石软质石材时,为了降低成本选用弹簧型串珠绳,但为了保证安全生产,则要选择烧结或电镀串珠、注塑型串珠绳;在开采切割花岗岩等硬质石材时,采用烧结串珠的注塑型串珠绳,每米长度至少要安装38~42个串珠。虽然金刚石串珠绳锯切技术得到了发展,但串珠绳高昂的制造成本以及其相应的低寿命,成为金刚石串珠绳锯技术发展的主要瓶颈。因此,研发低成本、高寿命的串珠绳制备工艺技术成为亟待解决的问题。

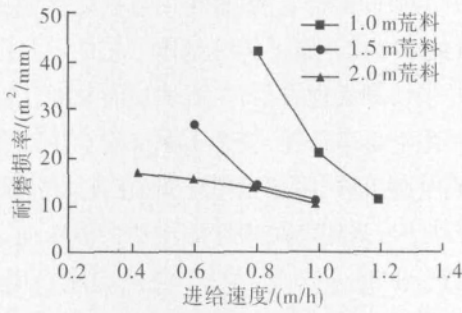
2 单绳金刚石串珠锯锯切机理的研究

金刚石绳锯在自动化程度、效率、应用等方面得到飞跃的发展,但与排锯、金刚石圆盘锯等非柔性加工工具相比,串珠绳的高成本、低寿命成为推广的主要瓶颈。为了提高使用寿命,研究者主要从金刚石的表面处理 and 结合剂的组分等方面进行了广泛的研究^[10]。目前,锯切机理主要以单绳锯机为研究对象,采用单载荷研究串珠磨(破)损、锯切力及锯切参数对加工的影响。

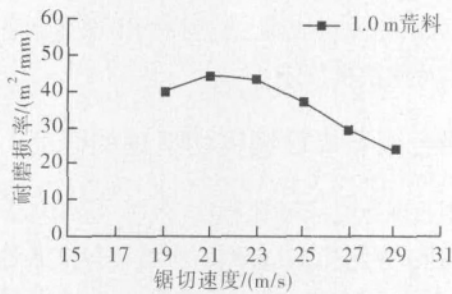
2.1 金刚石串珠绳磨、破损机理的研究

串珠绳采用的大断续比加工方式及超长锯切弧区,使得串珠绳加工条件更为恶劣。加工过程中会出现串珠剥离、磨粒脱落、锥度化磨损等问题^[11,12]。W. Ertinshausen最早提出对串珠磨损的研究^[13]; P. W. Butler-Smith^[14]通过自设计的样机,采用砂轮和串珠互磨,对单颗串珠的磨损与外力变化关系进行研究^[14],但因实验条件与实际生产的环境相差较大,因此实验数据不能良好地反应磨损与锯切之间的关系。

张进生等^[15]通过实验揭示了金刚石串珠绳锯切大板材锯切速度、进给速度与串珠绳磨损的关系。当锯切速度恒定,采用不同进给速度锯切三种长度的荒料。图3为串珠耐磨率与锯切参数的关系。随着进给速度增加,串珠绳的耐磨率下降;加工较短荒料时,随着进给速度增加,串珠绳寿命下降得更快,如图3a所示。当锯切速度较低时,锯切温度较低,冲击也较小,串珠的磨损形式为机械磨损;对于一定长度的荒料(1 m),在一定的进给速度下存在着一个最佳锯切速度,可使串珠绳磨损最小,锯切率最高,如图3b所示。



(a) 耐磨损率与进给速度的关系



(b) 耐磨损率与锯切速度的关系

图 3 串珠耐磨率与锯切参数的关系

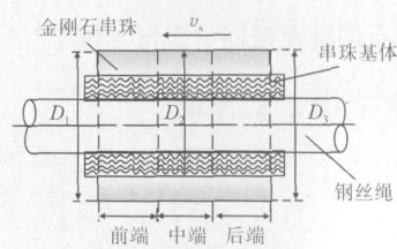
郭桦^[14]通过串珠直径变化及金刚石磨粒的磨损形式进行了金刚石失效研究;张岚、郭黎滨等^[17,18]对水下金刚石绳锯机锯切进行了一系列的研究,并对切割海底石油管道时串珠的磨损情况进行了研究。

黄辉^[9]采用对单颗金刚石串珠进行分段处理方法,跟踪串珠锯切花岗石过程中串珠直径磨损及表面金刚石磨粒的磨损情况,得到串珠前端的磨损量大于串珠中、后端磨损量,串珠后端的磨损也略大于串珠中端的磨损,串珠呈现腰鼓状磨损,如图 4 所示。

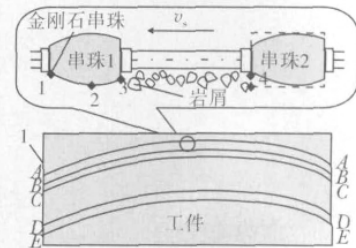
2.2 串珠绳锯切过程的研究

P. W. Butler-Smith^[14]采用在压紧轮下方安装测力器,测量出绳锯锯切压紧时的力,笼统的代替锯切时所受的总力。张进生等^[13]采用固定串珠锯切速度,锯切三种不同长度荒料,得到锯切力与进给速度之间的关系,如图 5 所示。随着进给速度的增大,作用在串珠绳上的锯切力也增大;荒料长度越长,锯切力增大的斜率也越大。

裴峰丽^[20]采用对加工区分段方法,对每段进行锯切力的测量。图 6、图 7 分别为锯切力 F_x 、 F_z 随线速度变化在加工区的分布。当线速度与进给速度较小时,加工区锯切力的波动较小,如图 6a,7a 所示;当线速度和进给速度增大时,加工区的锯切力波动随之变大,如

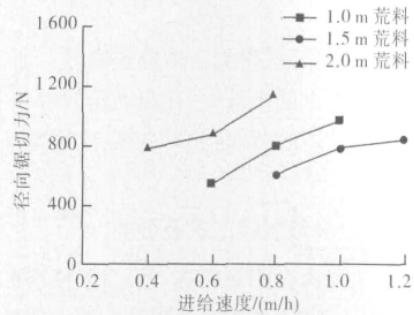


(a) 单颗串珠分段示意图

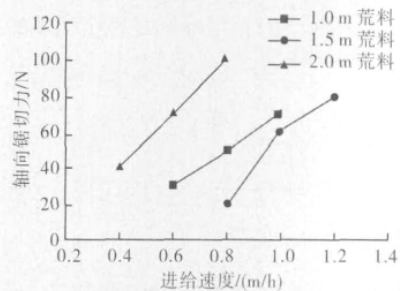


(b) 串珠磨损图

图 4 串珠分段磨损模型示意图



(a) 径向力与进给速度

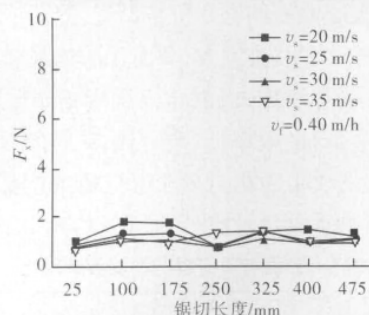


(b) 轴向力与进给速度

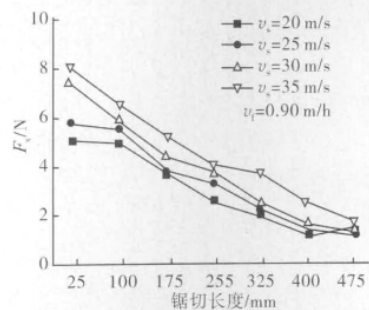
图 5 锯切力与进给速度的关系

图 6b,7b 所示。由图 6,7 得知,线速度和进给速度对锯切力 F_x 的影响要大于对 F_z 分布的影响,且进入端的锯切力要大于离开端的锯切力。

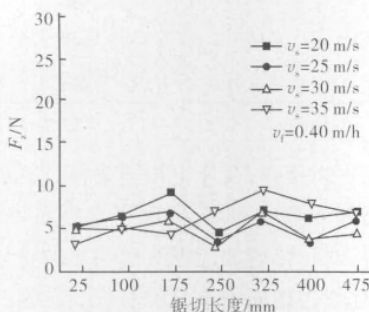
翁霏霏^[21]对烧结串珠绳锯切花岗石过程中锯切力进行了跟踪检测,如图 8 所示。在切削相同材料时,单颗磨粒的切削厚度减小,单颗磨粒所需要的切向力



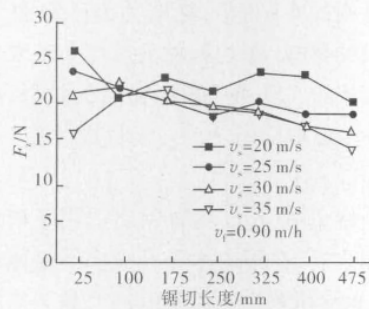
(a) 进给速度为 0.40 m/h



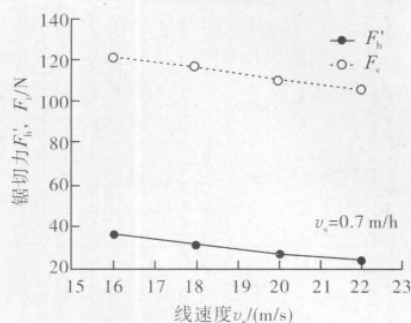
(b) 进给速度为 0.90 m/h

图 6 锯切力 F_x 随线速度变化在加工区的分布

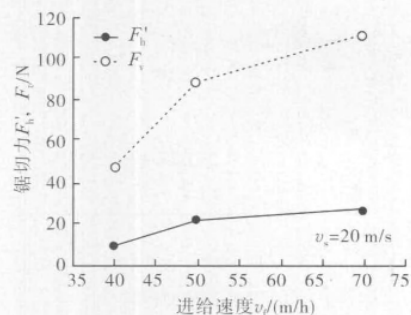
(a) 进给速度为 0.40 m/h



(b) 进给速度为 0.90 m/h

图 7 锯切力 F_y 随线速度变化在加工区的分布

(a) 锯切力与线速度



(b) 锯切力与进给速度

图 8 锯切力与速度的关系

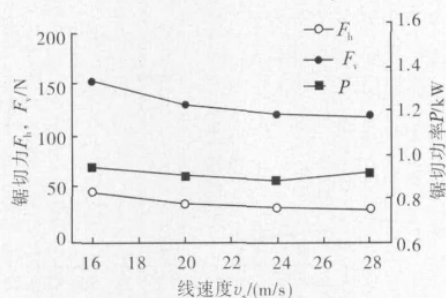
8a 所示。当锯绳线速度一定时,随着进给速度的增大, F_h 和 F_v 都有所增大,而 F_v 增加的幅度明显大于 F_h ,如图 8b 所示。

黄国钦^[2]采用单因素和正交法进行锯切参数对锯切力和锯切能耗影响的实验时,建立串珠绳锯切弧区内单颗磨粒平均切削深度与锯切参数间理论关系,进给率对锯切力和功率的影响比线速度和锯切长度都要明显,如图 9 所示。 F_h 和 F_v 都随着锯切线速度 v_s 的增大呈微降趋势,而随锯切进给率 v_f 或锯切长度 L 的增加则呈明显增大趋势。

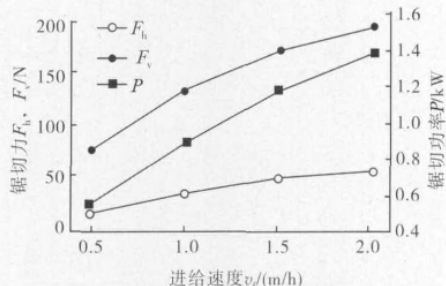
3 多绳金刚石串珠锯锯切工艺分析

20 世纪末,一种可以在一台设备上安装多根金刚石串珠绳的金刚石串珠锯机(简称多绳锯)在意大利问世。目前多绳金刚石串珠锯可同时安装 5~25 根串珠绳,最多安装 70 根串珠绳。图 10 所示为意大利 BIDESIEIMPIANTI 公司生产的 Gold 60 型 60 绳串珠锯。该多绳锯为闭式门架结构,采用待加工物固定、串珠绳升降的锯切运动方式。目前,在国内尚未有企业生产出 10 根以上的多绳金刚石串珠锯,处于研发起步阶段。

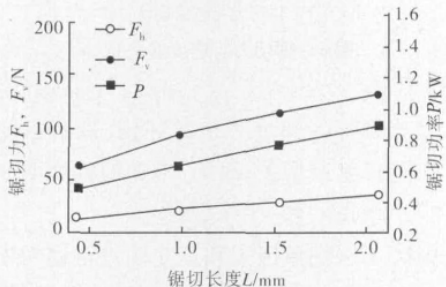
和法向力也相应减小,接触弧区内的有效参与切削磨粒总量不变,故总锯切力 F_h 和 F_v 均呈下降趋势,如图



(a) 线速度的影响



(b) 进给速度的影响



(c) 锯切长度的影响

图 9 锯切力受到锯切参数单因素影响的关系

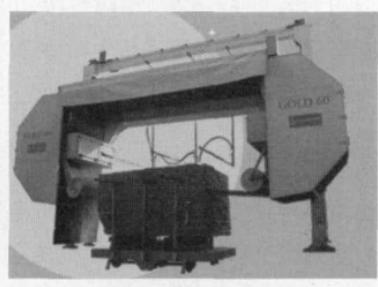


图 10 Gold 60 多绳金刚石串珠锯

花岗石大幅面板材的传统加工方式主要是采用圆盘锯和花岗石砂锯^[23]。采用金刚石圆锯片来加工花岗石板材,从技术上来说,圆锯片很难做得很大。国内已经能制造出 $\phi 5\text{ m}$ 的圆锯片,但圆锯片的加工幅面一般为直径的 $1/3$,若增加加工幅面,需增加锯片尺

寸,这样巨型金刚石圆锯片价格昂贵,配套锯机要求很高,而且运输和安装难度大,从而无法体现圆盘锯的优势。砂锯设备体积庞大,需建立配套钢砂循环池和供砂系统,安装麻烦、效率低、废弃物多、表面质量差,后续加工量大。表 1 为花岗石砂锯与多绳金刚石串珠锯两种设备的性能参数对比^[24]。

表 1 砂锯与多绳锯的性能参数对比

设备参数	新式 标准 120 砂锯	60 绳 多绳串珠锯
荒料尺寸 $\text{m} \times \text{m} \times \text{m}$	$3.35 \times 3.55 \times 1.7$	$3.35 \times 3.7 \times 1.7$
平均落锯速度/ (cm/h)	3	30
月产量/ m^2	6 400	36 940
设备投资/万元	183.2	373.5
单位面积电耗 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$	12	3
日平均辅助时间/ $(\text{h}/\text{天})$	7.2	2
落锯速度/ (cm/h)	2~7	30~70
锯缝宽度/ mm	7~8	7~8
废物量/ (kg/h^2)	≥ 3	0.01
小时产量/ (m/h^2)	4.2	42
加工板材最大尺寸/ m	长度 3.5 宽度 2.2	长度 4.5 宽度 3

从表 1 可以推知,在加工相同荒料时,虽然金刚石串珠绳设备和刀具成本高,但由于金刚石串珠绳锯本身结构优势,对比传统加工方法有明显的优势:进给速度快;基本建设占地面积小,且性价比高;锯缝较小,加工材料损失小,成荒率高,环境友好性好;加工效率是同等规模砂锯的 6~8 倍,耗电约为砂锯的 $1/4$,锯切时间减少大约 90%,锯切板材的厚度公差 0.5 mm,表面粗糙度相当于 120 目磨料磨抛后的效果,减少后续磨抛的时间,成本降低 30%,板材成才率高,节约资源。

我单位继 2000 年成功研制出适用于矿山开采的单绳串珠锯之后,在国内率先开展多绳金刚石串珠锯的研制,并相继研制出两轮、四轮、六轮等多绳串珠锯系列样机,如图 11 所示。

该多绳锯采用国际上先进的多通道冗余控制技术,保证设备运行全方位的安全,一次性可同时安装 42 根串珠绳,最大加工荒料规格 $3.2\text{ m} \times 2.2\text{ m} \times 2.3\text{ m}$,切割效率是传统砂锯切割的 10~15 倍。

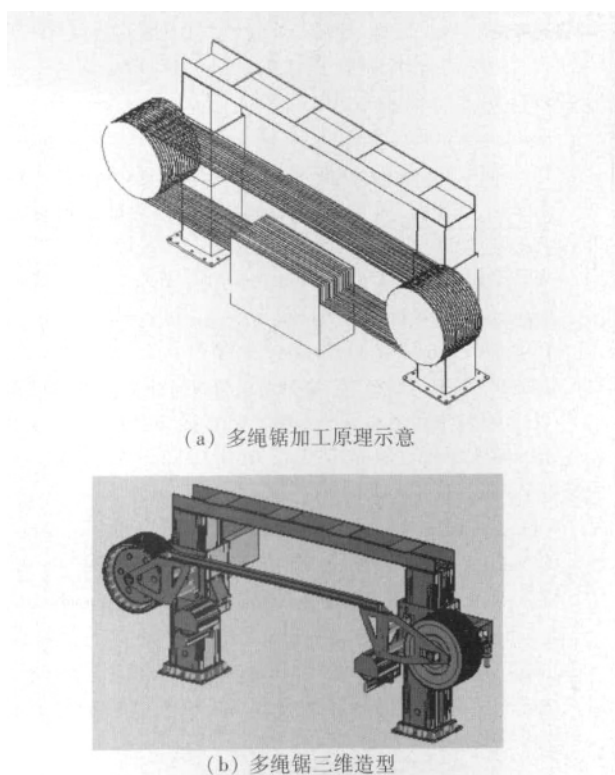


图 11 两轮多绳锯 CAD 三维模型

4 多绳金刚石串珠绳锯研究关键技术

多绳锯的研究在国内处于起步阶段,笔者根据前期的研究成果,将多绳金刚石串珠锯研究的关键问题总结如下:

(1) 多绳耦合高效锯切技术。目前针对单绳的受力、磨损和锯切弧线有了一定研究,而多绳锯高效耦合锯切技术尚未有文献报道。通过理论分析和实验研究相结合的方式,综合多载荷耦合作用,建立金刚石串珠锯多绳耦合锯切理论体系。

(2) 多绳金刚石串珠锯系列产品的研发必须通过整机框架、轮系布置、进给托板垂直方向的运动精度、张紧器等结构创新来实现串珠锯设备性能的改进,保证各绳有均匀的磨破损,克服加工中锯机振动,从而保证加工精度,降低制造难度和成本。

(3) 高效锯切工艺参数的研究。合理的加工工艺参数对生产成本至关重要,对于不同的石材、不同的串珠绳,所采用的加工参数也不同。因此,应当综合分析常用石材品种的可加工性影响因素,分析研究石材板材高效锯切工艺匹配性;研究不同等级石材的高效锯切工艺参数最佳组合方案。

5 展望

金刚石串珠锯凭着刚柔相济的结构及其节能、环

保的优势,应用将会越来越广。其发展呈现以下几点趋势:

(1) 采用高温钎焊技术制作金刚石串珠。钎焊技术能提高焊料对金刚石的把持力,提高串珠的切削性能。

(2) 研制强度和抗疲劳性能更好、直径更小的串珠绳和钢丝绳,小直径金刚石串珠绳在环境保护、节约能源和材料方面意义巨大。

(3) 针对锯切机理的研究,目前主要是单绳单载荷作用下实验模拟研究,忽略振动、锯切力、岩屑摩擦及温度耦合作用对加工的影响,尚未有关于多绳金刚石串珠锯的锯切机理研究报道。

(4) 目前,多绳锯在国外应用的较广,国内还无企业涉足。随着数控技术的推广,多绳金刚石串珠锯会向着更加自动化、高效、环保的方向发展。

参考文献:

- [1] WRIGHT D N, ENGELS J A. The environmental and cost benefits of using diamond wire for quarrying and processing of natural stone [J]. Industrial Diamond Review, 2003(4): 16-24.
- [2] TONSHOFF H K, TRIEMUTH T, HILLMANN-APMANN H, 等. 金刚石绳锯锯切金属构件的研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2002(3): 16-20.
- TONSHOFF H K, TRIEMUTH T, HILLMANN-APMANN H, et al. Diamond tools for wire sawing metal components [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2002(3): 16-20.
- [3] DAVIS P R. The future of diamond abrasives in stone processing [C]. An International Technical Conference on Diamond, Cubic Boron Nitride and their Applications (INTERTECH2000), Vancouver, Canada, 2000(7): 1-14.
- [4] 廖原时. 金刚石串珠锯在饰面石材生产中的应用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- LIAO Yuanshi. Application technology of diamond wire-saw in facing stone production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [5] GERLACH D. Four-axis wire saw for profiling stone [J]. Industrial Diamond Review, 1997, 57(4): 112-113.
- [6] DAVIS P R. Falcon600-wired for success in granite slabbing [J]. Industrial Diamond Review, 1997, 57(2): 34.
- [7] 徐西鹏. 岩石材料的金刚石锯切研究进展 [J]. 机械工程学报, 2003(9): 21-26.
- XU Xipeng. Advances in the research of diamond stone sawing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003(9): 21-26.
- [8] SUNG C M. Brazed diamond grid: a revolutionary design for diamond saws [J]. Diamond and Related Materials, 1999(8): 1540-1543.
- [9] JPNINRS M. Diamond wire sawing provides the power [J]. IDR, 2008(1): 14-15.
- [10] FANG N, LIU K, ZUO D W. Influence of processing conditions on properties of beads of diamond wire saws [J]. Journal of Materials

- Science Letters, 1998, 17: 69–71.
- [1] OZCDIK Y, BAYRAM F. Optical investigations of bead wear in diamond wire cutting [J]. Industrial Diamond Review, 2004, 3: 60–65.
 - [2] FRATINI L, LIGUORI V, ORITI B. On the slabbing of stones through diamond wire cutting operations [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224: 143–148.
 - [3] ERTINGSHAUSEN W. Wear process in sawing hardstone [J]. IndustrialDiamond Review, 1985, 45(5): 18–24.
 - [4] BUTLER-SMITH P W, GRYZAGORIDIS J. A single bead test for assessing diamond wire performance [J]. Industrial Diamond Review, 1999, 59(2): 93–101.
 - [5] ZHANG J S, HUANG B, WANG Z. The experiment research of diamond wire saw in quarrying granite with high efficiency [J]. Materials Science Forum, 2004, 471–472: 117–121.
 - [6] 郭桦. 金刚石强锯的研制与性能评价 [D]. 厦门: 华侨大学, 2006.
GUO Hua. Development and performance evaluation of diamond strong saw [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2006.
 - [7] 张岚, 孟庆鑫, 王立权, 等. 金刚石串珠失效形式的实验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005(4): 112–116.
ZHANG Lan, MENG Qingxin, WANG Liquan, et al. Experiment and study on the failure mode of diamond string bead [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005(4): 112–116.
 - [8] 郭黎滨, 崔海, 王立权, 等. 基于均匀设计的水下金刚石绳锯磨削力研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007(8): 84–87.
GUO Libin, CUI Hai, WANG Liquan, et al. Research on grinding force of underwater diamond wire saw based on uniform design [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007(8): 84–87.
 - [9] 黄辉, 黄国钦, 郭桦, 等. 锯切花岗石过程中金刚石串珠的磨损特性 [J]. 机械工程学报, 2008(8): 118–123.
HUANG Hui, HUANG Guoqin, GUO Hua, et al. Wear characteristics of diamond beads in wire sawing granite [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008(8): 118–123.
 - [20] 裴峰丽, 黄辉, 郭桦. 金刚石绳锯加工弧区锯切力分布的研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(4): 62–65.
PEI Fengli, HUANG Hui, GUO Hua. Research on forces distribution in the cutting arc zone during diamond wire sawing [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(4): 62–65.
 - [21] 翁菲菲, 黄国钦, 黄辉, 等. 烧结金刚石串珠绳锯切花岗石的锯切力研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(1): 25–27.
WENG Feifei, HUANG Guoqin, HUANG Hui, et al. Study on sawing forces of sintered diamond wire-saw in granite cutting [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2007(1): 25–27.
 - [22] 黄国钦, 黄辉, 郭桦, 等. 串珠绳锯切花岗石过程中锯切参数对锯切力和能耗的影响 [J]. 机械工程学报, 2009(3): 240–245.
HUANG Guoqin, HUANG Hui, GUO Hua, et al. Influences of sawing parameters on forces and energy in wire sawing of granite [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009(3): 240–245.
 - [23] OLICEIRA L J, BOBROVNITCHII G S, FILFUEIRA M. Processing and characterization of impregnated diamond cutting tools using a ferrous metal matrix international [J]. International Journal of Refractory Metal and Hard Material, 2007, 25(4): 328–335.
 - [24] 廖原时. 花岗石砂锯与多绳金刚石串珠锯主要技术性能比较 [J]. 石材, 2002(12): 6–12.
LIAO Yuanshi. Main technical performance comparison between granite sand saws and multi-rope diamond beaded saw [J]. Stone, 2002(12): 6–12.

作者简介

王飞,男,1984年生,博士研究生。主要研究方向: 硬脆材料(石材)高效加工。

E-mail: wangfei8402@163.com

张进生,男,教授、博士生导师。主要研究方向: 硬脆材料(石材)高效加工及设备。

E-mail: zhangjs@sdu.edu.cn

(修回日期: 2012–12–08)

(上接第 35 页)

烧结性较差容易崩刃, TiC/Al 比例较小时, 韧性明显提高, 抗冲击性得到改善, S3 刀片在断续实验中也表现良好。

参考文献:

- [1] 朱俊芳, 董企铭, 彭进, 等. 碳氮化钛对 PCBN 复合片性能的影响 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(2): 66–69.
ZHU Junfang, DONG Qiming, PENG Jin, et al. Effect of Ti(C, N) on properties of PCBN compact [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(2): 66–69.
- [2] MAEWJA K, CORNISH L A, CAN N. Annealing behaviour of sub-stoichiometric Ti(C, N)-W mechanical alloy powders [J]. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2011(29): 445–451.
- [3] 谢辉, 谷盟森, 马姗姗, 等. 不同黏结剂组分整体 PCBN 烧结及性能研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(8): 13–20.

XIE Hui, GU Mengsen, MA Shanshan, et al. The sintering mechanism and properties of PCBN with different binders [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30(8): 13–20.

- [4] RONG X Z, TSURUMI T, FUKUNAGA O, et al. High-pressure sintering of CBN-TiN-Al composite for cutting tool application [J]. Diamond and Related Materials, 2002(11): 280–286.
- [5] BENKO E, STAIN J S, KROLICKA B, et al. CBN-TiN, CBN-TiC composites chemical equilibria, microstructure and hardness mechanical investigations [J]. Diamond and Related Materials, 1999(8): 1838–1846.

作者简介

谢辉,男,1983年生,硕士。主要从事 PCBN 及 PCD 等超硬聚晶材料及其工具的研究开发。

E-mail: xiehui9019@126.com

(修回日期: 2012–11–15)