

金刚石工具在钢筋混凝土结构修复改造中的应用与研究现状

段隆臣¹, 谭松成^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要:我国正处于钢筋混凝土结构应用与发展的大规模新建与修复改造并重阶段。为对钢混结构进行局部或整体的拆除与修复改造,传统机械破碎与爆破拆除方式存在施工效率低、安全隐患大和环境污染严重等问题,而利用金刚石工具对其进行静力切割拆除的施工方法在近年来得到迅速发展。目前,在钢混结构拆除与修复改造施工中应用最多的金刚石工具为金刚石薄壁钻头、金刚石锯片和金刚石绳锯。本文对上述 3 类金刚石工具在钢混结构修复改造施工中的应用现状、钻进与锯切机理、制造技术和施工工艺等研究现状进行了总结与分析,在此基础上指出了其可能的研究趋势与发展方向。研究成果可为金刚石工具在工民建和部分特殊领域的广泛应用提供技术参考。

关键词:钢筋混凝土;修复改造;金刚石薄壁钻头;金刚石锯片;金刚石绳锯

中图分类号:P634.4;TU746

文献标识码:A

文章编号:1672-7428(2016)06-0034-05

Application and Research Status of Diamond Tools on the Repair and Reconstruction of Reinforced Concrete Structure/DUAN Long-chen¹, TAN Song-cheng^{1,2} (1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Nowadays, building new reinforced concrete structures, repairing or reconstructing old structures are both important in China. To demolish and reconstruct a whole (or part of) reinforced concrete structure, conventional methods of mechanical disruption and blasting demolition have disadvantages of low construction efficiency, big potential security risk and serious environmental pollution. However, the construction method of static cutting demolition by employing diamond tools has developed rapidly in recent years. The most commonly used diamond tools include thin-wall diamond core bit, diamond saw blade and diamond wire saw. The application status, drilling and sawing mechanisms, manufacture technologies, as well as the construction parameters of the above mentioned 3 kinds of diamond tools employed in repair and reconstruction of steel concrete structure are summarized and analyzed in this paper, on the basis of this, the possible research trends and development directions are obtained. The research findings can provide technical reference value for wide application of diamond tools in civil engineering and some special fields.

Key words: reinforced concrete; repair and reconstruction; thin-wall diamond core bit; diamond saw blade; diamond wire saw

0 引言

钢筋混凝土结构目前已广泛应用于建筑、路桥、隧道、矿井、水利和海港等工程领域,然而受其自身耐久性的影响,一般钢筋混凝土结构的设计使用年限为 50 年(纪念性建筑和特别重要的建筑结构为 100 年及以上)。假设钢混结构的生命周期呈正态分布,则大部分钢筋混凝土结构的安全使用寿命仅约为 38 年^[1]。根据钢筋混凝土结构在欧美发达国

家的应用历史可知,其应用与发展可分为大规模新建、新建与修复改造并重,以及重点转向老旧结构修复改造这 3 个阶段。

目前,西方发达国家大都处于第三阶段,而我国正处于新建与修复改造并重的第二阶段。例如根据 ASCE(美国土木工程师协会)2005 年公开的一份调查,美国的 60 万座桥梁中,有 27% 需要进行不同程度的修复改造^[2]。我国自 20 世纪 80 年代初开始大

收稿日期:2016-05-16

基金项目:中央高校基本科研项目(编号:CUG160816)的部分研究内容

作者简介:段隆臣,男,汉族,1967 年生,教授,博士生导师,主要从事金刚石工具与岩石破碎相关教学和研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号,duanlongchen@163.com。

规模兴建钢筋混凝土结构,受当时设计标准、材料质量、使用理念和维护水平等多种条件的限制,正逐步陈旧老化。与此同时,我国也在不断新建大量的钢筋混凝土结构,例如根据国家统计局公布的数据,在建筑行业2014年我国房屋施工面积达到125.02亿 m^2 ,从业人数达到4960.58万人;在交通运输行业截止2014年末,全国铁路运营里程达到11.2万km,公路总里程达446.39万km(其中公路桥梁75.71万座,长4257.89万m,比上年末增加2.18万座、280.09万m)。因此,随着社会经济的发展与人类对生活环境要求的提高,钢筋混凝土结构的修复改造工作量将长期维持在一个非常高的状态,这也可能是未来探矿工程专业服务国民经济建设的一个新的重要领域。

对已有钢筋混凝土结构进行修复改造,需要对目标结构进行局部或整体拆除。现有的钢筋混凝土结构拆除方法包括机械凿除、静力破碎、爆破拆除、静力切割和放电破碎拆除等5种^[3]。其中,静力切割拆除方法是利用金刚石工具对拟拆除的钢混结构进行钻孔(锯切或切割)施工,将原结构拆卸成块状体运走进行二次利用^[4]。静力切割技术是无损性拆除技术的一种,可在满足拆除结构物的前提下,同时保护结构物的局部质量,是近年迅速发展起来的一种环保、高效和安全的施工方法,其常用的金刚石工具包括金刚石薄壁钻头、金刚石锯片和金刚石绳锯。

1 金刚石薄壁钻头

金刚石薄壁钻头在钢筋混凝土结构修复改造中的钻孔应用包括对病危结构的排孔钻进切割、墙壁/楼板的钻孔安装与修复、桥梁/隧道的加固与防护、钢混结构内应力测试评估、建筑基础/大坝等钢混结构的施工与质量检测等,应用范围非常广。薄壁金刚石钻头与钢筋混凝土钻孔机配合使用时具有施工精度高、速度快、孔壁光洁、施工过程振动小、噪声低等优点。目前,在钢筋混凝土结构修复改造施工中应用的常见钻机设备功率为1~5kW,转速100~2000r/min,钻孔直径18~1000mm,钻孔深度一般可达6m^[5-6]。关于钢筋混凝土材料钻孔用金刚石薄壁钻头的研究主要包括钻头产品设计与制作工艺,以及钻头切削机理研究2个方面。

早期的研究主要是从钻头产品设计角度出发,

研究钻头参数与钢筋混凝土的适应性,认为可从提高金刚石品级与粒度、胎体硬度和耐磨性等方面提高钻头机械钻速,延长钻头使用寿命^[7-9]。杨俊德等^[10]考虑到混凝土材料的强研磨性,提出采用混合目数金刚石进行钻头设计的方法,其中高品级大颗粒金刚石用于切割混凝土,而细颗粒金刚石主要用于提高钻头的耐磨性。金刚石薄壁钻头的制作方法可分为电镀法、热压法和钎焊法,邓福铭等^[11]采用新工艺制备金刚石工程薄壁钻头进行钢筋混凝土台架钻进试验,与国内某知名厂家的热压产品进行对比,钻头使用寿命和钻进效率得到了显著提高。

钢筋混凝土结构内部的石子骨料和钢筋在钻进过程中对钻头胎体和金刚石存在冲击破坏作用,因而其钻进过程是一种断续切削过程。同时,金刚石切削钢筋时产生的热量较高易导致金刚石表面碳化,而钢筋切屑对钻头胎体的磨蚀严重,进而影响钻头使用寿命和机械钻速^[12]。为探索金刚石钻头与混凝土结构间切削界面上的相互作用,Abtahi^[13]研究了钻进工艺参数对钻进功率的影响规律;李季阳等^[14]对钻进时轴压力和摩擦力进行了测量,结果表明金刚石与混凝土间的界面动摩擦系数随冲击速度增高而增大,但在每次冲-旋加载过程中基本恒定。随着环境保护要求的提高,传统有冷却液的切割技术受到了一定限制,干式切割技术也开始逐步发展。Moseley等^[15-17]以复合片取心钻头为研究对象,研究了钻进钢筋混凝土时复合片的磨损与破坏机理,认为复合片的磨损主要源于复合片在切削钢筋和混凝土时分别处于受压和局部受拉应力状态,在高回转速度条件下受到持续循环载荷影响而破坏,并基于压入理论提出了复合片钻头钻进模型。

生产实践表明,金刚石钻头在钻遇钢筋时的机械钻速仅约为素混凝土钻进时的1/10,且机械钻速和钻头使用寿命还与钢筋的布筋密度和材质密切相关。因此,为提高金刚石薄壁钻头的钻孔效率,有必要对金刚石钻头在钢筋混凝土非均质材料中钻进时的受力状态及磨损机理进行系统研究,从而指导金刚石钻头结构设计、胎体配方优化和金刚石参数优选,进而促进整个行业的不断发展。此外,为提高金刚石钻头对干钻条件的适应性,还需要研究钻进过程中摩擦热量的传递与消散过程、钻屑的清除与收集方法,以及干钻条件对钻头物理力学性能和制作工艺提出的特殊要求。

2 金刚石锯片

金刚石锯片是钢筋混凝土结构修复改造中应用最普遍的一种金刚石工具,最大的金刚石锯片尺寸可达 $\varnothing 3000$ mm,最大切深可达 1750 mm^[18]。目前国内常用的金刚石锯片直径为 1200 mm(切深 500 mm),用于切割地坪、墙壁,或地基基础。金刚石锯片切割混凝土的理论研究最早始于20世纪70年代,德国汉诺威大学曾先后以单颗粒金刚石和单节块金刚石锯片为切削工具对混凝土的锯切机理进行了初步探索,并提出了单颗粒金刚石切割混凝土的模型^[19]。

早期关于金刚石锯片的研究主要关注的是现场使用效果,包括锯片结合剂体系、金刚石参数、制造工艺与装备、锯片耐磨性与磨损形式,以及锯切参数等。例如,元素六公司(原De Beers公司)在20世纪70年代末即对金刚石锯片切割混凝土路面进行研究,分析了金刚石在锯切混凝土材料过程中的主要磨损破坏形式,并提出锯切参数的选择依据^[20];王秦生等^[21]着重分析了金刚石和金属结合剂对锯片使用性能的影响规律,并针对不同锯切对象推荐了相应的结合剂体系;朱永伟等^[22]认为金刚石表面镀钛可改善金刚石与锯片胎体间的结合强度,提高金刚石的锋利度,进而提高工具使用寿命和锯切效率。

21世纪以来,干式锯切得到迅速发展与应用,研究者们就干切过程中的金刚石锯片切削动态特征监测、切削与失效机理,以及基于ANSYS的切削过程仿真分析等开展了大量的研究工作,并取得了丰富的研究成果^[23-25]。(钢筋/纤维)混凝土的锯切过程为,混凝土首先在锯片的冲击作用下形成裂纹,随后脆性材料在金刚石的微切削作用下断裂形成极细的粉屑,钢纤维直接被金刚石切断或拉断,而钢筋则在金刚石切削作用下发生塑性变形而破坏^[26]。金刚石切削混凝土过程中,两侧的混凝土切屑会飞溅出去或者残留在切削槽两侧,同时金刚石前端也会堆积一些切屑并不断被压实,当堆积到一定体积后再被一次性弹出^[27]。此外,有限元仿真分析结果表明,混凝土被锯切破坏时的金刚石受力值远大于混凝土的屈服强度^[28],且给进速度、切削速度和切削深度对锯片工作时所受应力和变形的影响显著性依次减小^[29]。金刚石锯片在高速锯切加工过程中,金刚石的损坏主要受冲击载荷作用的影响^[18],而锯

齿则因为切削力沿径向成三角形分布(半径越大处切削力越大),从而工作齿根部易形成应力峰值,并在循环周期载荷作用下造成锯齿疲劳断裂^[30]。

金刚石锯片在高速切割过程中往往伴随一定程度的噪声,按噪声来源可分为切削噪声、振动噪声和空气动力学噪声3种,可通过优化锯切参数、改变锯片结构、增加夹盘直径并安装金属橡胶,以及喷水处理等技术方法来减少噪声污染^[31-33]。因切削噪声和振动噪声的动态特征与被切削对象密切相关,郑冬锐等^[34]提出了用切削动态特征信号幅值判断切削区域材料组分的技术方法。此外,在提高金刚石锯片切割混凝土的施工效率方面,有序排列金刚石锯片较之于普通锯片,其使用寿命和切割速度都得到了显著提高^[35-36]。

为进一步促进金刚石锯片在钢筋混凝土结构修复改造施工中的应用,可通过研发具有特殊结构、超大尺寸范围的金刚石锯片拓宽应用领域并降低环境污染、开发新的结合剂体系和制备工艺以提高金刚石锯片切割效率和使用寿命,降低施工成本。此外,应注重开发与金刚石锯片制备与应用相关的配套设备,降低金刚石锯片制作成本,并保证金刚石锯片切割施工过程中的安全、高效和可靠性。

3 金刚石绳锯

英国人于1968年首次提出了用金刚石绳锯切割石材的方法,而后美国GE超硬磨料公司于20世纪80年代开始着手研究绳锯在混凝土切割领域的应用^[20],日本则于21世纪初成功将多功能绳锯应用到建筑物拆除工程^[37]。目前市面上的金刚石绳锯规格以 $\varnothing 11.5$ 、 10.5 、 8.5 和 7.5 mm为主,最大尺寸规格为 $\varnothing 60$ mm,最多可实现超过50条绳锯的同时锯切工作。金刚石绳锯在钢筋混凝土结构修复改造中的主要切割对象包括各种大型钢混建筑、桥梁及墩台基础、地铁站、核电站、港口码头、海洋石油平台、海底管材和沉船与舰艇等,而国产金刚石绳锯与国外产品的差距也主要体现在钢筋混凝土等含金属材料的切割上。

金刚石绳锯由钢丝绳、金刚石串珠和隔离套3部分组成,其中钢丝绳在金刚石绳锯中起骨架作用,一般由7股或9股使用寿命超长的钢芯组成;金刚石串珠是绳锯的切削部件,根据制作方法可分为电镀型、热压烧结型和高温钎焊型3种,目前市面上以

热压烧结型为主;隔离套在绳锯中起支撑、隔离和固定金刚石串珠的作用,可分为注塑型、弹簧型和橡胶注封型3种。根据被切割对象不同,金刚石串珠结构尺寸、每米串珠个数、隔离套类型,以及串珠和钢丝绳的结合方式等都需要进行相应调整。

为研究金刚石绳锯的切割机理,有研究者对金刚石绳锯切割加工过程中的锯切力及其载荷分布进行了测试分析,结果表明:锯切力随着绳锯线速度的增大而减小,随着给进速度增大而增大,且锯切力的垂直分量与水平分量比值约为4.45^[38];锯切载荷在整个切割弧区内从起点至终点呈下降趋势,且随着给进速度的增大,下降趋势越显著,而线速度对弧区载荷分布的影响则不如进给速度显著^[39]。随着加工时间的累积,金刚石串珠受岩屑磨蚀和撞击作用的影响将略呈腰鼓状,且金刚石磨粒的脱落比例和宏观破碎比例也将增加^[40]。

随着金刚石串珠在水下钢结构切割中的发展,有研究表明金刚石串珠对钢材的切割以磨削为主,可分为滑擦、耕犁和切削3个阶段,而其微观磨损形式则分为磨耗磨损、氧化磨损、扩散磨损和热应力破碎磨损等4个类型^[41-43]。滑擦阶段时,被切割对象只是在金刚石的滑擦作用下产生弹性和塑性变形;耕犁阶段时,金刚石将在被加工对象表面犁出“刻线”,金刚石前方和两侧材料将发生挤压变形,并产生少量切屑;切削阶段时,金刚石前方材料发生断裂而形成切屑。在金刚石绳锯切割过程中,因工具表面磨粒众多,金刚石串珠与被加工件接触面上同时进行着滑擦、耕犁和切削加工,且绳锯本身的微旋转运动能起到清除切屑的作用。当垂直磨削力与水平磨削力的比值在0.88~2.05时,绳锯可与被加工件较好地柔性接触,减少绳锯的振动和大幅度降低磨削温度,同时金刚石能保持良好的出刃效果和磨削性能^[42]。

随着金刚石绳锯应用领域的不断拓宽,其可能的研究方向包括但不限于:(1)串珠结构与制作工艺的系统化,不懈地优化制作工艺以提高切割效率和使用寿命,并开发特殊规格绳锯用于异形加工领域和非常规加工领域;(2)金刚石绳锯对不同加工对象的切割机理研究,为金刚石绳锯结构设计和制作工艺改革提供参考,并为锯切参数的选择提供技术支撑;(3)加强金刚石绳锯相关的原材料、生产和加工设备等系统工程开发,包括金刚石、金属结合

剂、制粒机、烧结机和绳锯机等。

4 结论与展望

金刚石工具在工民建和部分特殊领域的应用为其行业发展提供了新的契机,而新兴市场的特殊性将使得单纯依靠低廉价格取胜的粗劣产品不再具有竞争优势。为提高行业的整体竞争实力,应以基础理论研究为指导,不断创新金刚石工具结构设计和制作工艺,试验和改革加工工艺,并加强金刚石工具从原材料、生产制备、实践应用与废旧产品回收利用等系统工程的技术研发,具体包括但不限于:(1)金刚石工具对不同加工对象的钻进/锯切机理研究;(2)金刚石工具的新型结构设计、结合剂体系开发与制备工艺创新;(3)金刚石工具加工工艺的优化与改革,包括其对工具切割效率、使用寿命和环境污染等方面的影响研究;(4)金刚石工具配套相关生产设备与加工设备的研发,在提高工具品质保证的同时,提高生产效率、降低劳动强度和减少环境污染。

参考文献:

- [1] 李俊.南方海港高桩码头钢筋混凝土结构耐久性评估及修复研究[D].浙江杭州:浙江大学,2014.
- [2] Parivallal S, Ravisankar K, Nagamani K, et al. Core-drilling technique for in-situ stress evaluation in concrete structures[J]. Experimental Techniques, 2011, 35(4): 29-34.
- [3] 石江华. 钢筋混凝土支撑的绿色拆除工艺初探[J]. 建筑施工, 2015, (5): 596-598.
- [4] 温斌. 无损性钻切与水力破除技术在交通工程改造中的应用[C]//中国公路学会养护与管理分会二届一次理事会暨公路养护新技术研讨会. 陕西西安:2014.
- [5] 张许红,侯俊彦,王成军,等. 金属结合剂强度和微形变对薄壁工程钻性能的影响(上)[J]. 超硬材料工程, 2015, (6): 14-17.
- [6] 张毅,杨光值. 金刚石无损钻切技术在西关环岛桥梁改造中的应用[J]. 施工技术, 2013, (S1): 424-427.
- [7] 贾美玲. 提高薄壁钻头性能的技术途径[J]. 地质装备, 2000, (1): 11-12.
- [8] 李焰,王生福. 金刚石钻头参数与钢筋混凝土的适应性研究[J]. 探矿工程, 1999, (2): 37-38.
- [9] 王智慧,谢志刚,郭桦,等. 钢筋混凝土金刚石薄壁钻头用结合剂及金刚石的研究[J]. 超硬材料工程, 2006, (5): 11-14.
- [10] 杨洪武,杨俊德,杨怀宙. 钻进钢筋混凝土金刚石钻头的试验研究[J]. 珠宝科技, 2003, (3): 4-7.
- [11] 邓福铭,王博,邓雯丽,等. 国内金刚石工程薄壁钻台架对比钻进实验研究[J]. 超硬材料工程, 2015, (1): 1-5.
- [12] 罗文来,蒋为荣,何锋,等. 新型钢筋混凝土钻进用金刚石钻头的研制[J]. 超硬材料工程, 2005, (1): 43-45.

- [13] Abtahi A, Butt S, Molgaard J, et al. Wear analysis and optimization on impregnated diamond bits in vibration assisted rotary drilling (VARD) [C]// 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, USA, 2011.
- [14] 李季阳, 谭卓英, 李文, 等. 冲击旋转加载下金刚石钻头-岩面动摩擦特性试验模拟研究[J]. 振动与冲击, 2015, (22): 210-214.
- [15] Moseley S G, Bohn K P, Goedickemeier M. Core drilling in reinforced concrete using polycrystalline diamond (PCD) cutters: Wear and fracture mechanisms[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 27(2): 394-402.
- [16] Moseley S G, Bohn K P, Goedickemeier M. Core drilling in reinforced concrete using polycrystalline diamond (PCD) cutters: performance modelling [C]// Intertech 2008 (International Technical conference on Diamond, Cubic Boron Nitride and their Applications), Orlando, Florida, USA, 2008.
- [17] Moseley S G, Aky z D A. System Development of Tools and Core Bits for Improved Drilling Performance in Reinforced Concrete [C]// 2nd International Industrial Diamond Conference (Diamond at Work 2), Rome, Italy, 2007.
- [18] 王江涛. 水泥混凝土切割机作业动力学及作业参数选取方法研究[D]. 陕西西安: 长安大学, 2015.
- [19] Bailey M W, Bullen G J. Sawing in the stone and civil engineering industries[J]. Industrial Diamond Review, 1979 (FEB): 56-60.
- [20] Denkena B, de Leon L, Seiffert F. Process influences in the wire cutting of concrete[J]. Advanced Materials Research, 2010, 126-128: 70-76.
- [21] 王秦生, 宋诚, 左宏森. 金刚石锯片使用性能影响因素系统分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2001, (5): 40-44.
- [22] 朱永伟, 张新明, 谢光灼. 金刚石表面镀钛对金刚石锯片性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, (2): 258-263.
- [23] Hu S S, Wang C Y, Chen B D, et al. Dry-Cutting Concrete Study of Diamond Saw Blade with Different Segment Width[J]. Materials Science Forum, 2006, 532-533: 321-324.
- [24] Hu Y N, Wang C Y, Ding H N, et al. Wear Mechanism of Diamond Saw Blades for Dry Cutting Concrete[J]. Key Engineering Materials, 2006, 304-305: 315-319.
- [25] Wang C Y, Hu Y N, Ding H N. Cutting Forces in Sawing Process of Reinforced Concrete [J]. Materials Science Forum, 2004, 471-472: 292-297.
- [26] 丁海宁. 金刚石锯片干切削混凝土研究[D]. 广西南宁: 广西大学, 2004.
- [27] 王智伟. 混凝土加工机理及单节块锯切混凝土研究[D]. 广西南宁: 广西大学, 2006.
- [28] 高扬. 基于 ANSYS 的圆锯片切削过程三维仿真研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
- [29] 胡映宁, 陈成刚, 胡珊珊. 特殊结构金刚石圆锯片的瞬态动力学分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, (4): 1-9.
- [30] 何志坚. 金刚石圆锯片锯齿疲劳寿命分析及优化实验研究[D]. 广西南宁: 广西大学, 2008.
- [31] Wang C Y, Hu Y N, Wang Z W, et al. Noise and vibration of diamond sawblade for concrete dry cutting[J]. Key Engineering Materials, 2005, 291-292: 103-108.
- [32] 陈邦道. 降噪减振金刚石圆锯片的动态特性及锯片微观失效机理实验研究[D]. 广西南宁: 广西大学, 2007.
- [33] 孙宗升, 陆鹏震, 戴勇, 等. 混凝土锯切机锯片噪声产生机理与改进措施[J]. 建设机械技术与管理, 2015, (4): 70-72.
- [34] 郑冬锐, 胡珊珊, 王成勇, 等. 金刚石圆锯片干切素混凝土切削动态特征的多尺度分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, (3): 40-45.
- [35] Pyun S. P., Lee H. W., Park J. H., 等. 金刚石有序排列锯片切削性能的研究[J]. 超硬材料工程, 2007, 19(1): 45-50.
- [36] 杨仙. 有序排布金刚石锯片的研究[D]. 湖南长沙: 中南大学, 2008.
- [37] Jennings M. Versatility of diamond wire saws in the construction industry[J]. Industrial diamond review, 2004(3): 16-18.
- [38] 卢元新, 李岩, 黄辉. 金刚石绳锯切割混凝土的锯切力实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, (6): 47-50.
- [39] 裴峰丽. 金刚石绳锯加工弧区载荷分布的研究[D]. 福建泉州: 华侨大学, 2011.
- [40] 赵如意. 金刚石绳锯加工花岗岩岩屑形成机理及其对串珠磨损影响的研究[D]. 福建泉州: 华侨大学, 2014.
- [41] Cao L, Meng Q, Wang L, et al. Research on Underwater Diamond Wire Saw [C]. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, China, 2006.
- [42] 崔海. 水下金刚石绳锯磨削技术及机理研究[D]. 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [43] Denkena B, K hler J, Ermisch A. Wire cutting tool concepts for steel machining[J]. Advanced Materials Research, 2011, 325: 238-243.