

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.06.013

废弃风电叶片切割装置设计及破碎料的应用

于雪梅^{1,3},朱晓华¹,刘卫生²,冯立超^{1,2},陈林洋¹

(1. 淮海工学院机械工程学院, 江苏连云港 222005; 2. 江苏省海上风电叶片设计与制造技术重点实验室, 连云港中复连众复合材料集团有限公司, 江苏连云港 222006; 3. 江苏省海洋资源开发研究院, 江苏连云港 222005)

摘要: 针对废弃风电叶片体积大、难以处理、污染环境的关键问题, 将金刚石绳锯切割技术应用于废弃风电叶片的切割处理, 并设计制造了由横向切割部件、纵向切割部件、卷扬机、工作台、导轨、移动小车、冷却系统及控制系统等组成的一种新型高效废弃叶片切割装置, 可将完整的叶片高效切割成块状, 块状切割料经破碎、粉碎后, 将粉碎料引入水泥砂浆, 可明显提高砂浆试块的抗折强度和抗压强度等力学性能, 为未来大量退役废弃风电叶片的处理提供了一个新思路。

关键词: 风电叶片; 切割; 水泥砂浆; 力学性能

中图分类号: TH69 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)06-0060-05

Design of Cutting Device for Wasted Wind Turbine Blades and Application of Debris

Yu Xuemei^{1,3}, Zhu Xiaohua¹, Liu Weisheng², Feng Lichao^{1,2}, Chen Linyang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China;

2. The Key Lab of Jiangsu Marine Wind Turbine Blade Design and Manufacturing Technology, Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composites Group Co. Ltd., Lianyungang 222006, China; 3. Jiangsu Marine Resources Development Research Institute, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Aims at the problems that the wasted wind turbine blade is large amount, hard to dispose, environmental pollution, the diamond wire saw cutting technology was applied to the wasted wind turbine blade cutting, and a cutting device for wasted wind turbine blade was successfully developed. The cutting device was made up of transverse cutting part, longitudinal cutting part, winch, desk, rail, travelling trolley, cooling system and control system. By the cutting device the wasted wind turbine blade were efficiently cut into massive FRP, and the massive FRP were broken and crushed into debris. The mechanical properties of mortar are obviously improved by introducing the debris, which provides a new idea for the disposal of the wasted turbine blade.

Keywords: wind turbine blade; cutting; mortar; mechanical property

我国是风能资源比较丰富的国家, 可开发风能资源总量约为 10 亿千瓦时^[1], 随着环保问题的日益突出, 风能越来越受到人们的关注。风电叶片是风力发电机组的核心部件之一, 研究者们针对其材料组成、气动外形、结构设计、制造工艺以及无损检测等方面开展了较多的研究工作^[2-4], 并取得了一系列的成果。然而关于退役后的废弃风电叶片如何处理研究的较少, 目前的风电叶片大多是采用纤维增强

热固性树脂基复合材料(玻璃钢)制造, 该材料具有比强度高、耐疲劳度高、耐腐蚀性和耐气候性好等诸多优点^[5], 其服役寿命一般为 20~25 年^[6]。热固性塑料第一次受热时会软化, 呈熔融态, 易于成型, 但一经成型固化后, 再次加热不再软化、熔融, 当温度过高时会发生分解, 因此难以进行二次应用^[7], 而且其化学性质极其稳定, 可以几十年甚至上百年不腐。随着时间的推移, 早期装机的风电机组会陆续

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(16KJB430003), 连云港市产学研联合研究项目(CXY1522), 江苏省“333 工程”科研项目(BRA2016294), 江苏省海上风电叶片设计与制造技术重点实验室基金项目(BM2016024), 江苏省产学研联合研究项目(BY2016057-10)

通讯作者: 于雪梅, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事机械装备设计及超精密加工等方面的研究 E-mail: yuxuemei_hit@126.com

收稿日期: 2018-03-14

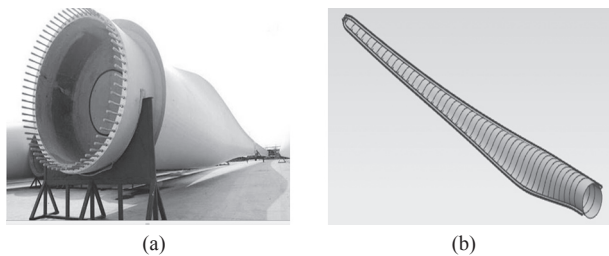
引用格式: 于雪梅, 朱晓华, 刘卫生, 等. 废弃风电叶片切割装置设计及破碎料的应用[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6):60-64.

Yu Xuemei, Zhu Xiaohua, Liu Weisheng, et al. Design of cutting device for wasted wind turbine blades and application of debris[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6):60-64.

退役,将会产生大量废弃风电叶片,目前的废弃叶片主要采取堆放和掩埋的处理方式,这不仅占用大量土地,还会由于苯乙烯等有毒物质的析出而污染土壤和地下水,造成严重环境污染,严重影响人类健康^[8],因此如何进行废弃风电叶片的回收利用已成为亟待解决的难题。

早在 20 世纪八、九十年代开始,美国、日本、德国等一些发达国家就已经开始研究废弃玻璃钢制品的回收处理方法,我国也在 2000 年前后开展了废弃玻璃钢制品的回收再利用方面的相关研究。目前,关于废弃玻璃钢制品的处理方法主要分为:物理回收法、化学回收法、能量回收法等^[9-11]。其中,物理回收法是在不改变废弃玻璃钢制品化学性质的前提下,通过拆除、切割、清洗、破碎、粉碎、分级等一系列处理过程,获得不同规格的粒料和粉料作为填料或燃料使用^[12]。对于物理回收处理工艺来说,关键问题是如何实现废弃风电叶片的高效切割、破碎和粉碎,以及解决处理后物料的大规模应用。已有研究表明,利用高速剪切、冲击、挤压以及颗粒互相碰撞作用,在合适的粉碎工艺参数下,可以使热固性塑料的微观结构和颗粒形貌发生变化,实现热固性塑料的机械粉碎再生利用^[13],粉碎颗粒料可以替代部分原料用于制备玻璃钢板型材,也可部分取代玻璃纤维增强塑料夹砂管中间层的石英砂^[14]。物理回收处理方法工艺简单、处理成本低,德国目前拥有大规模处理废旧叶片工厂,其处理工艺是先将退役的风电叶片切割成小块,然后敲击、碾压成粉末状碎屑,作为燃料燃烧使用,或作为填料使用。

目前的兆瓦级风电叶片长度已达到 50 m,最长的已经超过 80 m,风电叶片外观见图 1。



a—风电叶片实物图;b—风电叶片三维模型图

图 1 风电叶片

由图 1 可见,风电叶片外观狭长,尖部较细且呈扁平状,前端根部附近尺寸较大且呈圆形,这给废弃叶片的回收处理增加了难度,因此如何实现废弃叶片的高效切割以便于后续的运输和破碎是个关键问题。纤维增强热固性树脂基复合材料的结构特性使

得其难以采用常规切削方式进行加工,目前生产中多采用砂轮磨削的方式进行加工,但是由于废弃叶片尺寸很大,最大弦长可达到 4 m 以上,因此传统的砂轮切割设备难以对其进行切割。

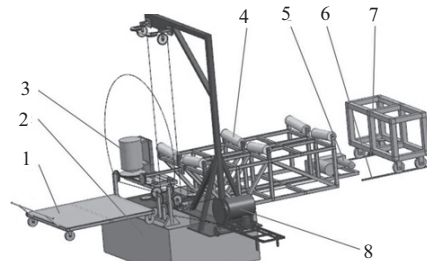
前期本课题组研发了风电叶片生产边角废料的破碎设备与粉碎设备,并初步研究了粉碎料在沥青中的应用^[15]。为此针对完整废弃风电叶片回收处理研发高效的切割设备,并开展粉碎料在建筑材料中的应用研究。

1 废弃风电叶片切割装置研发

1.1 结构设计

金刚石串珠绳锯由于具有全形貌切割、能耗低、不受尺寸约束以及切割效率高等优点,已被广泛应用于矿山、石材切割、大型建筑构件拆除等多个领域^[16]。

笔者提出利用金刚石串珠绳锯切割技术进行废弃叶片切割处理的方法,并研发制造了用于废弃叶片的金刚石绳锯切割设备。图 2 为金刚石绳锯切割设备的三维结构原理图。该设备主要由纵向切割部件、纵向进给部分、横向切割部件、切割料托盘、冷却系统等部分组成。



1—切割料托盘;2—冷却系统;3—纵向切割部件;4—重载托辊;
5—卷扬机;6—导轨;7—移动小车;8—横向切割部件

图 2 金刚石绳锯切割设备原理图

(1) 横向切割部件。

横向切割部件主要包括:金刚石串珠绳、U 型支架及导向轮、横切主电机、进给电机 + 小齿轮、可移动式导轨 + 齿条等。通过理论计算选用规格为 50 mm × 50 mm × 6 mm 的 Q235 方钢管焊接 U 型支架,根据叶片横断面尺寸范围设计导向轮的数量及位置,导向轮中间装配轴承利于其高速旋转,外缘表面根据金刚石串珠绳的直径设计为凹槽结构以确保切割过程平稳。利用导向轮、横切电机主动轮及待切割叶片将金刚石串珠绳撑起,进给电机通过齿轮、齿条机构驱动横切主电机沿着导轨进行横向移动,确保金刚石串珠绳始终贴紧叶片表面,提供足够的张紧力,同时横切主电机带动金刚石串珠绳以

约 30 m/s 的线速度运动,实现对叶片的横向切割。当叶片尺寸规格发生较大变化时,可通过整体移动导轨及横切电机来进行预调整。

(2) 纵向切割部件。

纵向切割部件主要包括:金刚石串珠绳、C型支架、导(换)向轮、纵切主电机、电机安装底座(张紧机构)等。根据待切割的叶片外形尺寸范围设计C型支架的结构尺寸,通过受力分析计算确定C型支架选用规格为 150 mm×150 mm×10 mm、100 mm×100 mm×10 mm 两种规格的 Q235 方钢管,以及 25 mm 厚的 45[#] 钢板,采用机加工、焊接等完成部件制造。C型支架通过底部支撑底板利用预埋地脚螺栓固定在水泥基座上,确保其稳定牢固。利用导(换)向轮及纵切电机主动轮将金刚石串珠绳撑起,将纵切电机安装到底座的条形孔上,通过顶紧螺钉推动电机横移实现金刚石串珠绳的张紧。纵切电机带动金刚石串珠绳以约 30 m/s 的线速度运动,在纵向进给部分的配合下,将叶片沿长度方向切割成 3 部分。

(3) 叶片纵向进给部件。

纵向进给部件主要包括:前端支架、重载托辊、卷扬机、移动小车及导轨等。根据叶片三维模型尺寸,利用三维仿真软件,结合理论计算,确定选用 60 mm×60 mm×5 mm 和 120 mm×60 mm×5 mm 的 Q235 方钢焊接前端支架及移动小车。为了保证叶片沿正确方向顺利送进,在前端支架上设计了 3 对内置圆锥滚子轴承的重载托辊,并且每对托辊轴线之间呈一定夹角以限制叶片在进给时产生较大的横向移动。按叶片质量 20 000~25 000 kg 设计选用了 3 000 kg 的卷扬机来提供叶片纵向进给动力,卷扬机收卷速度可根据纵向切割需要通过变频控制实现。

1.2 控制系统

该设备共采用 4 台电机驱动绳锯和进给系统,实现废旧叶片切割。其中,横向切割包括 1 台主电机和 1 台进给电机。主电机用来驱动绳锯旋转,通过变频器的变频控制,实现切割过程的连续可调恒转速切割,大大提高切割效率。进给电机实现横向切割的进给,通过变频器的矢量控制,实现切割过程的变速恒转矩切割,同时在绳锯出现断裂、滑落或切割完毕时,可瞬间协同主电机停止切割动作。

纵向切割包括 1 台主电机和 1 台进给卷扬机。纵切主电机的功能与横切主电机相同。进给卷扬机

通过变频控制,实现叶片的纵向平滑移动,同时通过矢量控制,在绳锯出现断裂、滑落或切割完毕时,可瞬间协同主电机停止切割动作。

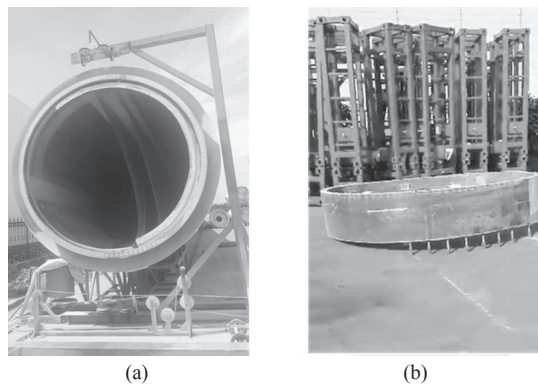
上述 4 台电机变频器具有通信功能,横切主变频器作为通信主站,分配其它 3 台电机的启动时间和关闭时间,避免运行干涉。同时,系统配有淋水系统,起到降温和润滑作用。

1.3 工作原理

该设备工作原理为:将废弃风电叶片吊起后缓慢上料,将叶片根部置于工作台面的托辊上,叶片尖部置于移动小车上,然后用捆绑带将叶片尖部固定在移动小车上,按下纵向切割部件启动按钮,纵向切割绳锯开始工作,同时冷却系统工作,延迟一定时间后,卷扬机自动按设定速度收紧,从而带动小车及叶片向前进给,两根纵向切割绳从叶片端部开始对叶片进行切割,将其切割成三部分,当切割到设定长度后,卷扬机停止收紧,按下纵向切割部件停止按钮使纵向切割部件停止工作,再将横向切割绳置于叶片表面,并确保横向切割绳完全张紧,按下横向切割部件启动按钮,横向切割绳锯开始工作,同时冷却系统工作,横向切割过程中叶片保持不动,而是通过电动机带动齿轮与齿条啮合驱动横向切割主电机沿导轨移动来实现横向切割的进给运动,直至将已被纵向剖切的叶片切断,切割料自由下落到托盘上,如此往复,直至完成整支叶片的切割。需指出的是由于叶片尖部尺寸较小,因此不进行纵向切割,而是利用叉车辅助来完成横向切断。

1.4 叶片切割实验

图 3 为金刚石绳锯切割设备实物图及利用该设备完成切割的风电叶片。



(a) 设备实物图; (b) 被切下的叶片

图 3 设备实物图与被切下的叶片

实践表明,该设备可实现对风电叶片有效切割,可以在 6 h 内完成一支长度在 50 m 左右风电

叶片切割处理,切割效率高,切口平齐,质量好,能够很好地满足未来退役风电叶片切割处理的使用要求。

2 破碎料在水泥砂浆中的应用

2.1 原材料及设备

普通硅酸盐水泥:P•1 42.5,山东山水集团有限公司;

自来水:济南地区;

标准砂:ISO,厦门艾思欧标准砂有限公司;

聚羧酸减水剂:PCE-1,莱阳市宏祥建筑外加剂厂。

2.2 仪器及设备

水泥砂浆搅拌机:JJ-5 型,无锡市建工实验仪器设备有限公司;

水泥恒温恒湿养护箱:SHBY-40B 型,无锡市建工实验仪器设备有限公司;

SANA 抗压抗折一体机:CDT1305-2 型,中科院声学研究所;

超声波清洗器:KQ-50B 型,昆山市超声仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Quanta FEG 250D 型,美国菲达康有限公司。

2.3 实验方法

将前述金刚石绳锯切割机切割风电叶片所获得的FRP块料利用课题组前期研发的破碎设备与粉碎设备处理后可获得直径不大于2 mm的环氧树脂颗粒和长度不大于8 mm的玻璃纤维混合破碎料(见图4)^[15]。采用该混合破碎料作为添加相制备砂浆试样,添加质量分数分别为0%,5%,10%,15%,具体配比见表1。

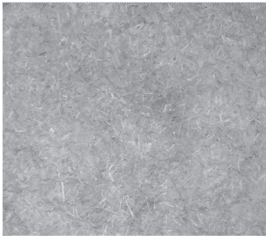


图4 环氧树脂颗粒-玻璃纤维混合破碎料

表1 试样配方

水灰比	水	水泥	砂	减水剂	FRP 破碎料	g
0.4	180	450	1 350	0.675	0	
0.4	180	450	1 350	0.675	22.5	
0.4	180	450	1 350	0.675	45	
0.4	180	450	1 350	0.675	67.5	

首先,利用超声法将FRP混合破碎料进行

分散,使其在砂浆试块中混合均匀。根据GB/T 17671-1999《水泥胶砂强度检验方法》中的方法,制备160 mm×40 mm×40 mm的棱柱体砂浆试样见图5,分别测试其3,7,28 d抗折强度与抗压强度。每一配比制备3个平行试样取其算术平均值作为该配比的强度值。



图5 砂浆试样

2.4 结果及分析

图6和图7分别示出添加不同含量FRP混合破碎料所制备砂浆试样的3,7,28 d抗折强度与抗压强度。

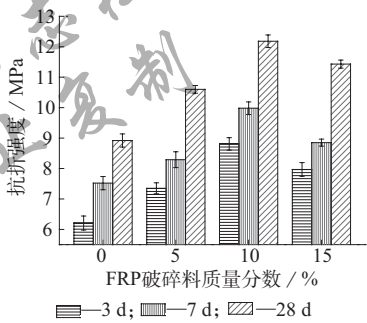


图6 添加FRP混合破碎料的砂浆试件的3,7,28 d抗折强度

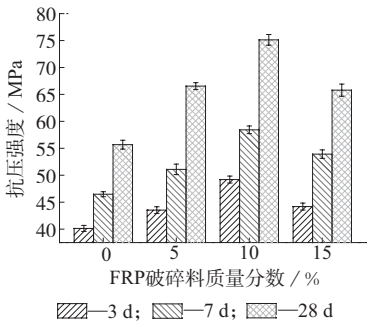


图7 添加FRP混合破碎料的砂浆试件的3,7,28 d抗压强度

由图6及图7可以看出,随着FRP混合破碎料质量分数从0%逐渐增加到10%,砂浆试样的抗折强度和抗压强度都呈现出逐渐增加的趋势,当FRP混合破碎料质量分数为0%时(称为基准试件),砂浆试样的3,7,28 d抗折强度分别为6.21,7.52 MPa和8.92 MPa,而3,7,28 d抗压强度分别为40.13,46.48 MPa和55.68 MPa。当FRP混合破碎料质量分数达到10%时,与基准试样相比,砂浆试样的3 d抗折强度提高了41.8%,7 d抗折强度提高了32.7%,28 d抗折强度则提高了36.5%。相应的其3,

7,28 d 抗压强度也较基准试样分别提高了 22.6%、25.7% 和 34.9%。但当 FRP 混合破碎料质量分数继续增加到 15% 时,砂浆试样的 28 d 抗折强度和 28 d 抗压强度都较质量分数为 10% 的 FRP 混合破碎料所制备的砂浆试样有所降低,分别降低了 6.2% 和 12.4%。由此可知,将 FRP 混合破碎料引入水泥砂浆中,可明显提高其抗折强度和抗压强度等力学性能,但 FRP 混合破碎料添加量存在着一个最佳值,该值为 10%。

3 结论

(1) 借鉴了金刚石串珠绳锯的工作原理,提出利用金刚石串珠绳锯切割技术切割废弃风电叶片的方法,并研发制造了废弃叶片用新型金刚石串珠绳锯切割设备,获得了良好的切割效果。

(2) 一定量的 FRP 混合破碎料引入能够明显提高水泥砂浆材料的抗折强度和抗压强度,证明了将废弃风电叶片切割、破碎后应用到建筑材料中是可行的,对促进废弃风电叶片的回收再利用具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 王野平,高俊,李金东. 风力发电的现状[J]. 机械设计与制造, 2006(5):154-156.
Wang Yeping, Gao Jun, Li Jindong. Present situation of wind power[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006(5):154-156.
- [2] 李启冬,李新梅,舒冠华. 风力发电叶片复合材料性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(1):92-95.
Li Qidong, Li Xinmei, Shu Guanhua. Research in properties of composites for wind turbine blade[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(1):92-95.
- [3] 芦丽丽,祁文军,王良英,等. 2 MW 风机叶片的结构设计及静力学分析[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(3):69-76.
Lu Lili, Qi Wenjun, Wang Liangying, et al. Structural designs and statics analysis of 2 MW wind turbine blade[J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(3):69-76.
- [4] 田松峰,韩强,王美俊,等. 复合材料风电叶片静态无损检测方法研究进展[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(6):137-141.
Tian Songfeng, Han Qiang, Wang Meijun, et al. Research progress in static non-destructive testing methods for wind turbine blades of composite[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6):137-141.
- [5] 常燕,王兆增,崔元胜,等. 风电叶片复合材料的研究进展及其应用[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(4):135-139.
Chang Yan, Wang Zhaozeng, Cui Yuansheng, et al. Research progress and application of wind turbine blades composites[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(4):135-139.
- [6] 唐荆,陈啸,杨科. 风电叶片全寿命周期性能研究[J]. 风能, 2017(1):58-61.
- [7] 洪桂香. 探密热固性工程塑料及其应用与发展[J]. 聚氨酯, 2014(9):74-79.
Hong Guixiang. Application and development of thermosetting engineering plastics[J]. Polyurethane, 2014(9):74-79.
- [8] 贾利,冯利坤. 玻璃钢废弃物的处理与再利用[J]. 河南化工, 2003(6):35-36.
Jia Li, Feng Likun. Reclamation and recycle of wasted fiber-reinforced plastic[J]. Henan Chemical Industry, 2003(6):35-36.
- [9] 安宝山,王慧军,孙利. 未来退役风电叶片的回收和利用[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(6):98-101.
An Baoshan, Wang Huijun, Sun Li. Recycling and using of retirement wind turbine blades in future[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(6):98-101.
- [10] Oliveux G, Bailleul J L, Elg L S. Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(11):1 809-1 818.
- [11] Pickering S J. Recycling technologies for thermoset composite materials-current status[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(8):1 206-1 215.
- [12] 张建川,张前峰,蔡红军. 风力发电复合材料叶片废弃物的几种处理方法分析[J]. 材料科学与工程学报, 2012(3):473-482.
Zhang Jianchuan, Zhang Qianfeng, Cai Hongjun. Analysis on treatment methods of composite blade wastes of wind turbines[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2012(3):473-482.
- [13] 吴仲伟,刘志峰,刘光复,等. 基于机械物理法的热固性塑料粉碎及再生机理研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(14):1 639-1 644.
Wu Zhongwei, Liu Zhifeng, Liu Guangfu, et al. Research on crushing and regeneration mechanism of thermosetting plastic based on mechanical and physical method[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(14):1 639-1 644.
- [14] 钟艳霞,邢洪章,杨勇. 热固性塑料废弃物综合利用及回收设备研究[J]. 节能与环保, 2008(5):33-35.
Zhong Yanxia, Xing Hongzhang, Yang Yong. Study on recycling equipment and application of wasted thermosetting plastics[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2008(5):33-35.
- [15] 畅莹,冯立超,刘卫生. 废弃 FRP 的高效破碎及在沥青中应用[J]. 中国设备工程, 2017(2):170-171.
Chang Ying, Feng Lichao, Liu Weisheng. High-efficient wasted fiber-reinforced plastic crushing and application in asphalt material[J]. China Plant Engineering, 2017(2):170-171.
- [16] 彭锦雯,彭啸,邓卫星. 金刚石串珠绳锯橡胶保护套工作寿命的内因分析[J]. 超硬材料工程, 2016, 28(4):15-19.
Peng Jinwen, Peng Xiao, Deng Weixing. Internal cause analysis of service life of the rubber protective sleeve of diamond wire saw[J]. Superhard Material Engineering, 2016, 28(4):15-19.