

金刚石串珠绳锯切缝煤层实验装置的研制

汤铸^{1,3,4}, 李树清^{1,2*}, 黄飞^{1,2}, 朱颜平^{1,3}, 杨党震^{1,3}

(1. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制国家安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

4. 六盘水师范学院 矿业与土木工程学院, 贵州 六盘水 553004)

摘要:为解决传统绳锯实验机具与采矿相似模拟台架难匹配的问题,研制一种金刚石串珠绳锯切缝煤层的实验装置,用于绳锯连续割缝煤层卸压机理的研究。根据绳锯切缝煤层现场布置方式及结构特点,设计并改装绳锯切缝煤层相似模拟实验装置,经多次实验证明,该装置结构简单、绕绳方式灵活、操控方便,可实现煤层水平连续切缝。基于该实验装置的绕绳方式和串珠绳的线弹性,分析实验中绳锯进给状态时串珠绳受拉后弹性形变的总长,据此给出串珠绳张紧力的计算方法。研究表明:该装置选用初始总长6 000 mm直径2 mm的串珠绳进行实验,弓角18°时串珠绳总长6 014 mm,张紧力为0.197 kN,可以满足绳锯连续切缝煤层相似模拟实验的要求。

关键词:金刚石串珠绳锯;煤层切缝;张紧力;实验装置

中图分类号:TD823

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)03-0034-06

Development of Experiment Device for Slitting Coal Seam with Diamond String Saw

TANG Zhu^{1,3,4}, LI Shuqing^{1,2}, HUANG Fei^{1,2}, ZHU Yanping^{1,3}, YANG Dangzheng^{1,3}

(1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology,

Xiangtan 411201, China;

4. School of Mining & Civil Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China)

Abstract: Experimental research is a common method to analyze mining engineering problems. In order to solve the problem that the traditional wire saw cutting experimental equipment is difficult to match with the mining similar simulation bench, an experimental device is developed, which can be used for the study of pressure relief mechanism of continuous cutting seam coal seam by diamond string bead wire saw. According to the on-site layout and structural characteristics of wire saw cutting coal seam, a similar simulation experimental device for wire saw cutting coal seam is designed and refitted. It has been proved by several experiments that the device has the advantages of simple structure, flexible winding method and convenient operation, and can realize continuous cutting seam horizontally. Based on the winding method of the experimental device and the linear elasticity, the total length of elastic deformation of the string rope after pulling is analyzed when the rope saw is in

收稿日期:2021-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974121;51804115);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40083);南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室开放基金资助项目(E21723)

*通信作者, E-mail: lsq_hnust@163.com

the feeding state, and the calculation method of the string rope tension force is obtained accordingly. Results show that the device selects the bead rope with an initial length of 6 000 mm and a diameter of 2 mm to carry out the experiment. The total length of the string rope is 6 014 mm and the tension force is 0.197 kN at the deflection angle of 18° , which proves that the device can meet the requirements of similar simulation experiment of the continuous cutting seam of the rope saw.

Keywords: diamond wire saw; seam cutting; tension; experimental device

割缝卸压是释放煤层高地应力的有效方法^[1-5],针对传统割缝方法单次割缝深度较小,煤层断续切割区域卸压难的问题,探索了一种金刚石串珠绳锯(简称绳锯)连续切缝煤层区域卸压方法.目前,绳锯割缝已被成功应用于井下盐溶矿溶解裂缝的大面积切割^[6-7]、极薄矿体开采^[8-9]等矿业工程的实践中,并取得较好的技术经济指标.自2012年以来,笔者所在的项目组开展绳锯切缝煤层的研究工作,与开滦集团公司联合研制可应用于煤矿井下的绳锯机及其辅助装置,提出单、双槽多种形式煤层绳锯割缝工艺,并进行井下工程实践,获得较好的煤层割缝效果.尽管绳锯切缝煤层的工艺技术与现场装备已开始研发,但绳锯连续切缝煤层割煤力学机理和煤层卸压规律等,还需借助实验装置和进一步的研究工作来逐步揭示.已有理论研究及前期工程实践表明^[10-14],绳锯切割对象和作业环境对绳锯切割机具和切割效果会产生较大影响,绳锯切割应用于煤矿井下,除受高地应力环境影响外,其切割对象也发生了改变,故绳锯切缝煤层的机具和切割效果均不同于地面石材、建筑物、水下金属管道的切割.为解决现有绳锯切割机具无法匹配相似模拟实验台的问题,本文以现有理论研究和绳锯切割实验机具为基础,对原有平面相似模拟实验平台进行增设绳锯切缝装置的改装,并对该装置在进给状态时串珠绳的张紧力进行分析,以为后续研究提供实验装置保证.

1 绳锯切缝煤层现场布置方式

开滦矿区某矿进入深部开采后,受高地应力和遗留残存煤柱的影响,煤岩动力灾害严重.为安全经济地降低或消除残存煤柱的高地应力威胁,在该矿 T3150 风道与 T2051 北掘进巷道 2 号之间的煤柱中开展绳锯切缝煤层的工程试验.切缝试验地点的煤层厚 3 m,煤层伪顶为深灰色泥岩,直接顶为较坚硬的条带状灰色粉砂岩、中粒砂岩;直接底为砂质泥岩或粉砂岩,老底为坚硬的细、中粒砂岩,本次实现了 1 500 m² 的煤层围割面积.绳锯切缝煤层现场位置及系统布置如图 1 所示.

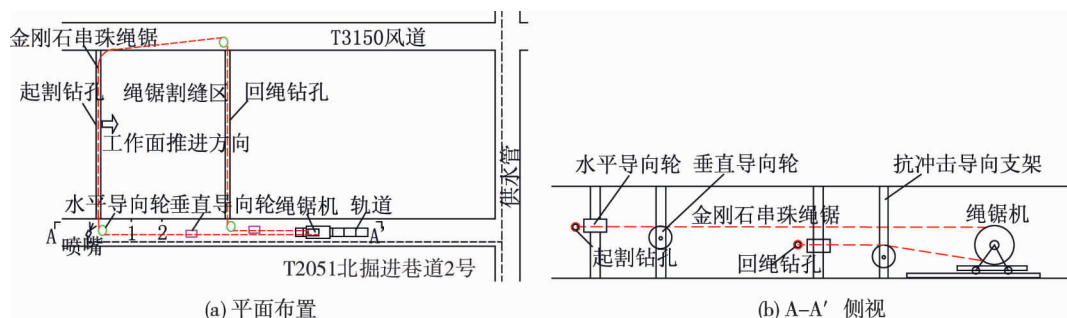
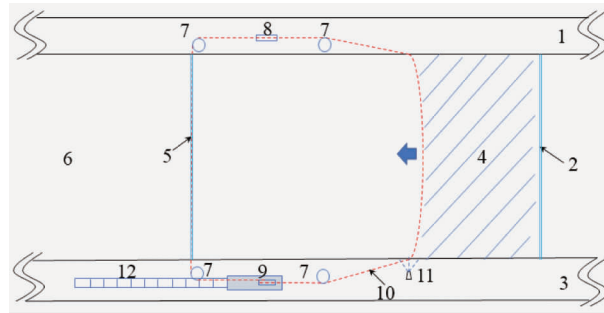


图1 绳锯切缝煤层现场位置及系统布置

绳锯系统一般由绳锯机、导向装置、串珠绳、控制与辅助系统组成.绳锯应用于煤矿井下,可通过在巷道内向煤层中施工起割钻孔和回绳钻孔构建绳锯切缝工作面^[15].绳锯切缝煤层现场布置方案如图 2 所示,在一侧巷道内布置水平导向轮和垂直导向轮,另一侧巷道内布置水平导向轮和绳锯机,在煤层中施工起割钻孔和回绳钻孔,将串珠绳穿过钻孔后依次绕过导向轮和绳锯机的主动轮,调节好串珠绳的初始张紧力并用接头接牢.绳锯切缝煤层时,启动绳锯机并调整主动轮的转速,主动轮带动串珠绳高速跑动,开启辅助系统喷水降温 and 降尘.绳锯切缝煤层后,在绳锯切缝工作面的后方形成了一个类似采空区的狭长缝槽.

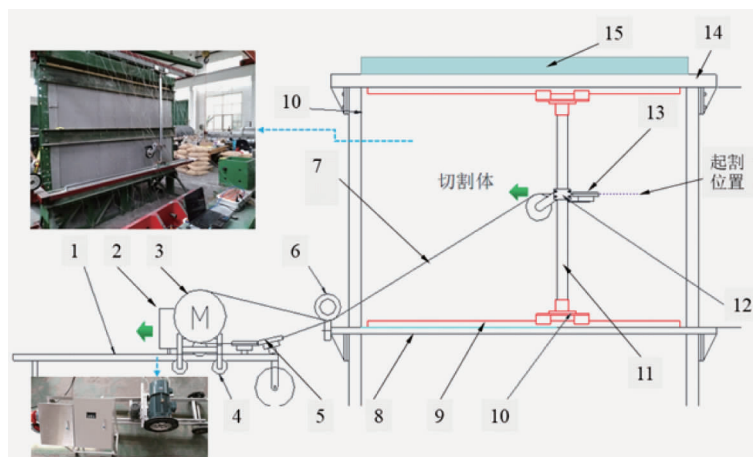


1.巷道;2.起割钻孔;3.巷道;4.缝槽;5.回绳钻孔;6.煤层;7.水平导向轮;8.竖直导向轮;9.绳锯机;10.串珠绳;11.辅助系统;12.绳锯机行走轨道。

图2 绳锯切缝煤层现场布置方案

2 绳锯切缝煤层实验装置结构

根据绳锯切缝煤层现场布置方式及结构特点,设计并改装绳锯切缝煤层相似模拟实验装置,改装后的实验装置主要由平面相似实验台架^[16]、小型绳锯切割系统、实验数据采集系统3部分组成。其中,平面相似实验台架和小型绳锯切割系统实验装置结构如图3所示。为充分利用相似实验台的模型空间,减小增设装置对二维相似模型铺设操作、数据观测的影响,并保证实验装置整体结构刚度、强度、稳定性,在现有相似模拟实验台底座上部和杠杆加载装置下部,采用100 mm×50 mm 槽钢搭建2个尺寸为1 064 mm×2 760 mm的可拆卸平行金属外框,下部外框上表面和上部外框下表面铺装长度为2 400 mm的绳锯切割水平进给支撑导轨,上下水平滑轨间安装 $\Phi 80$ mm×1 540 mm 钢质竖向滑轨及固定座,竖向滑轨上装设可调节绳锯切割位置的锁紧件及万向轮组(竖直导向轮+水平导向轮),下部外框端头安装有定向轮。绳锯切割系统中主动轮的动力由小型绳锯机主电机提供,绳锯机在轨道上的进给动力由辅助电机提供,设计采用2套无极调速器分别独立控制主动轮的转速和绳锯的进给速度,采用微型土压力传感器及其配套的静态应力应变测试分析系统,监测模型中各测点的压应力变化情况,使用全站仪测定各测点位移的变化情况。



1.行走导轨;2.行走电机;3.主动轮;4.行走齿轮;5.水平变向轮;6.垂直变向轮;7.串珠绳;8.下部金属外框;9.水平进给支撑导轨;10.固定座;11.竖向滑轨;12.锁紧件;13.万向轮组;14.上部金属外框;15.加载系统。

图3 绳锯切缝煤层平面相似模拟实验装置

为满足绳锯切缝煤层相似模拟研究及实验要求,增设的绳锯切缝装置应具备以下技术指标:(1)绳锯切割水平进给50~2 450 mm;(2)绳锯切割竖向高度225~1 575 mm;(3)小型绳锯机主电机的功率15 kW;(4)串珠绳线速度0~25.5 m/s;(5)水平进给速度0~0.5 m/s;(6)支撑导轨的水平误差值小于0.1 mm。

3 实验装置中串珠绳的张紧力分析

为满足所需条件内的绳锯切缝煤层相似模拟实验要求,防止实验中过大的张紧力拉断串珠绳接头,确保该实验装置的安全可靠运行,下面根据实验装置结构和串珠绳的绕绳方式,分析该装置在进给状态时串珠绳的张紧力。

3.1 初始状态

初始状态时串珠绳绕绳方式及绳长分析模型如图4所示.实验装置中的绳锯在未切割煤层之前,绳锯割煤工作面处轮 O_1 和轮 O_2 之间有一段绳长为 L_0 的串珠绳,此时绳锯受自身轴向初始张力为 T_0 。

绳锯切割实验系统初始状态时串珠绳总长 L 为

$$L = L_0 + D_1 + D_2 + \alpha_1 r_1 + \alpha_2 r_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + \alpha_3 r_3 + \alpha_4 r_4 + \alpha_5 r_5 + \alpha_6 r_6 + \alpha_7 r_7. \quad (1)$$

式中: D_1 为轮 O_1 与轮 O_3 圆心间的水平距,m; D_2 为轮 O_2 与轮 O_7 圆心间的水平距,m; r_i 为轮 O_i 的半径($i=1,2,\dots,7$),m; α_i 为初始状态时串珠绳与轮 O_i 的包角($i=1,2,\dots,7$); L_3, L_4, L_5, L_6 为初始状态时轮间切线段长,m。

实验装置中水平导向轮组 O_1, O_2 和竖直导向轮组 O_3, O_7 及 O_4, O_6 始终等高且对称,各导向轮等径,即

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_6 = r_7 = r, \alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{2}, D_1 = D_2, L_3 = L_6, \text{ 故:}$$

$$L = L_0 + 2(D_1 + L_3) + (\pi + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_6 + \alpha_7)r + L_4 + L_5 + \alpha_5 r_5. \quad (2)$$

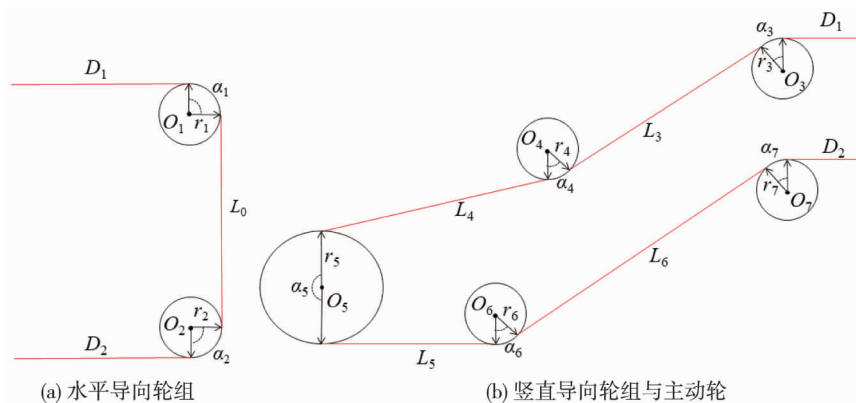


图4 初始状态时串珠绳绕绳方式及绳长分析模型

3.2 进给状态

进给状态时串珠绳受力及绳长分析模型如图5所示.当绳锯装置开始切割时,绳锯机在轨道上进给并带动万向轮组沿水平方向做切割运动.由于绳锯是一种接触式切割^[17-18],切割过程中串珠绳与锯切材料之间存在接触力 F ,绳锯割煤工作面处的串珠绳受到进给方向的阻力,形成线弓角^[19-20]。

由图5a的几何关系可知,锯切弧区的串珠绳长 l 为

$$l = \frac{\theta D_0}{\sin \theta}. \quad (3)$$

式中: θ 为进给状态时串珠绳的线弓角; D_0 为锯切材料的宽度,m。

绳锯切割实验系统进给状态时串珠绳总长 L' 为

$$L' = L_1 + L_2 + \alpha_1' r_1 + \alpha_2' r_2 + D_1 + D_2 + L_3' + L_4' + L_5' + L_6' + \alpha_3' r_3 + \alpha_4' r_4 + \alpha_5' r_5 + \alpha_6' r_6 + \alpha_7' r_7 + l. \quad (4)$$

式中: L_1 为进给状态时轮 O_1 侧的串珠绳弓长,m; L_2 为进给状态时轮 O_2 侧的串珠绳弓长,m; α_i' 为进给状态时串珠绳与轮 O_i 的包角($i=1,2,\dots,7$); L_3', L_4', L_5', L_6' 为进给状态时轮间切线段长,m。

绳锯切割进给过程中,竖直导向轮组 O_4, O_6 的位置是固定的.绳锯机在轨道上行走,主动轮由 O_5 行走

d m 后至 O_5' 位置,绳锯机行走带动万向轮组 O_1, O_2 和 O_3, O_7 沿水平方向进给 s m 后,分别至 O_1', O_2' 和 O_3', O_7' 位置.由实验装置的行走进给运动和各部件几何位置关系可知: $L_1 = L_2, L_3' = L_6', \alpha_1' = \alpha_2' = \frac{\pi}{2} - \theta,$

$\alpha_3' = \alpha_4' = \alpha_6' = \alpha_7',$ 故:

$$L' = 2(D_1 + L_1 + L_3') + (\pi - 2\theta + 4\alpha_7')r + L_4' + L_5' + \alpha_5'r_5 + L. \quad (5)$$

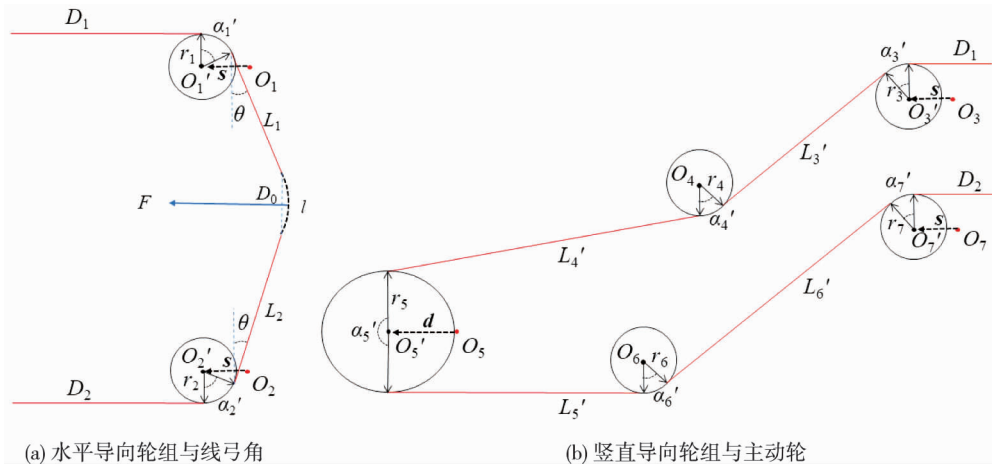


图5 进给状态时串珠绳受力及绳长分析模型

考虑串珠绳的线弹性,串珠绳在张紧力 T 作用下变形伸长后的总长度,可近似表示为

$$L' = L + \frac{T}{k}. \quad (6)$$

式中: k 为串珠绳的刚度系数.

由虎克定律可知:

$$k = \frac{EA}{L}. \quad (7)$$

式中: E 为串珠绳的弹性模量, GPa; A 为串珠绳的有效横截面积, m^2 .

由式(6)和式(7)得到进给状态时实验装置中串珠绳的张紧力 T 为

$$T = EA \left(\frac{L'}{L} - 1 \right). \quad (8)$$

本装置通过调节绳锯机行走速度和单次行走距离 d ,可控制绳锯割煤工作面的进给距离 s .在实验装置的调试过程中,将测得的弓角、包角、切线夹角等绳锯系统参数代入式(5),可得进给状态时串珠绳受张紧力 T 的拉伸作用发生弹性形变后的总长 L' ,根据实验中所选串珠绳的物理力学参数,由式(8)可计算出串珠绳的张紧力 T .

以上述绳锯切缝煤层的工程实践为原型,采用本次研制的实验装置进行绳锯切缝煤层的相似模拟实验.工程实践中绳锯切割煤层进给时串珠绳张紧力为 1.96 kN (约 200 kg),相似实验中若取力的相似比为 1:10,则该实验装置中串珠绳进给状态时的张紧力应为 0.196 kN.考虑选用直径 2 mm 的串珠绳(其内部由 6 股直径 0.3 mm 钢丝捻制而成,等效横截面积取 0.424 mm^2),钢丝的弹性模量取 200 GPa,串珠绳初始总长 6 000 mm,经实验装置调试及根据式(5)和式(8)计算后得出,弓角 18°时串珠绳总长为 6 014 mm,张紧力为 0.197 kN,可满足绳锯连续切缝煤层相似模拟实验的要求.

4 结论

1) 在平面相似模型实验台上增设绳锯切割系统,该装置结构简单、绕绳方式灵活、操控方便.经过多次绳锯水平切缝煤层的相似模拟实验,证明该装置可解决传统绳锯切割实验机具与采矿相似模拟台架难以

匹配的问题.

2)分析绳锯切缝煤层实验装置中串珠绳的绕绳方式和受拉后弹性形变,得出该实验系统在初始和进给状态时串珠绳总长的表达式和串珠绳张紧力的计算方法.模拟计算验证该装置能满足绳锯连续切缝煤层相似模拟实验的要求.

由于受已有相似实验平台的限制,目前该实验装置只能实现煤层水平连续切缝,对于倾斜煤层绳锯切缝方法和不同角度切缝煤层实验机具的研制,有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 窦林名,何学秋.冲击矿压防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [2] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].北京:中国矿业大学出版社,2010.
- [3] 林柏泉,杨威,吴海进,等.影响割缝钻孔卸压效果因素的数值分析[J].中国矿业大学学报,2010,39(2):153-157.
- [4] 卢义玉,李瑞,鲜学福,等.地面定向井+水力割缝卸压方法高效开发深部煤层气探讨[J].煤炭学报,2021,46(3):876-884.
- [5] 张永将,陆占金.超高压水力割缝煤层增透成套装置研制及应用[J].煤炭科学技术,2020,48(10):97-104.
- [6] 朱文志.金刚石切割法在塔儿沟钨矿应用前景探讨[J].中国矿山工程,2014,43(2):1-4.
- [7] 梁发,潘晓锋,陆安丛,等.某钨镍矿缓倾斜极薄矿体开采方法优化[J].现代矿业,2018,34(4):55-57.
- [8] 罗文来,杨理清,张延军,等.盐类矿溶解裂缝切割施工方法:201210032593.0[P]. 2012-07-11.
- [9] 黄国胜.绳锯切割矿石在湖南衡阳七里井芒硝矿地下开采的实践与运用[J].当代化工研究,2020(11):59-61.
- [10] 杨理清.浅谈在盐溶矿开采中金刚石绳锯的制备及应用[J].超硬材料工程,2019,31(2):45-48.
- [11] 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,2011,31(6):47-50.
- [12] 徐向明.金刚石串珠绳锯高速开采大理石矿的特点[J].石材,2004(8):26.
- [13] 曹立文,孟庆鑫.海底石油管道切割绳锯机的设计及其试验研究[J].机械科学与技术,2006(11):1338-1342.
- [14] 王海波,张岚,孟庆鑫,等.水下金刚石绳锯机切割管道特性参数研究[J].机床与液压,2018,46(11):115-118.
- [15] 任梅青,张军,朱顺华,等.煤层底板绳锯切缝区域防突措施:201511026615.2[P]. 2016-03-16.
- [16] 廖泽,冯涛,姚琦,等.急倾斜煤层开采平面相似模拟实验装置的研制[J].矿业工程研究,2018,33(2):18-22.
- [17] Ito S, Murata R. Study on machining characteristics of diamond abrasive wire[J]. Journal of Mechanical Engineering Lab, 1987,41(5):236-244.
- [18] Wu Q, Liu Z D, Shen L D, et al. Test research on wire deflection detection of a diamond wire saw[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017,91:1347-1354.
- [19] 金闪闪,邹航,郭桦.绳锯线弓角静态测量方法的研究[J].工程设计学报,2016,23(4):309-315.
- [20] 郑茜元.基于进给速度及力耦合控制的绳锯机设计及切削性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.