文章编号：1001-4888(2024)04-0485-10

金刚石串珠绳锯切割受载煤体试验装置的研制及受力分析*

钱运来[1]，李树清[1,2,3]，吕晨辉[1]，黄飞[1,2,3]，王晨[1]

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院，湖南湘潭 411201；2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室，湖南湘潭 411201；3. 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)

摘要：为解决传统金刚石串珠绳锯切割试验系统难以同时满足试件受载和锯切力测量的问题，研制了一种金刚石串珠绳锯切割受载煤体的试验装置。该装置可对受载试件实现垂直向下连续切割(进给速度 0～20mm/min、线速度 0～10m/s、侧向加载系统可对受载试块施加 0～500kN 的载荷)。通过分析该试验装置切割前及切割过程中串珠绳锯的受力特点，给出了金刚石串珠绳锯加工过程中串珠绳锯绳长和张紧力的计算公式，建立了绳锯切割受载煤体的锯切力模型，经过验证，该锯切力模型得到的锯切力与传统装置测量的锯切力基本吻合。通过对该装置进行测试，结果表明：使用初始绳长为 5666mm、直径分别为 4.0mm 和 7.3mm 的串珠绳锯以进给速度 5mm/min、线速度 4m/s 对受载煤体进行切割时，串珠绳锯的张紧力分别为 609.0N、1270.2N，法向锯切力分别为 33.4N、187.6N，切向锯切力分别为 20.8N、108.0N。

关键词：串珠绳锯切割；受载煤体；试验装置；受力分析；锯切力

中图分类号：TD40　　**文献标识码**：A　　DOI：10.7520/1001-4888-23-218

0　引言

随着煤炭资源的不断开采，中深部煤炭开采已经成为常态，但中深部煤层普遍存在地应力高、透气性低、瓦斯抽采困难以及煤与瓦斯突出频繁等问题[1-4]。金刚石串珠绳锯切割技术作为一种有效的增强瓦斯抽采措施，在煤层割缝卸压增透方面得到了广泛应用[5-6]。近年来，国内外学者对金刚石串珠绳锯技术开展了大量的理论研究和试验研究，根据串珠绳锯切割的特点，采用相应的数学和物理方法，建立了绳锯切割弧区的温度场理论模型、绳锯切割过程中磨削力的经验公式、轴向运动弦线的振动力学方程[7-9]。卢元新等[10]研究了锯切力随线速度、进给速度和试件长度的变化规律，结果表明，切割混凝土过程中法向锯切力与水平锯切力之比约为 4.45。谭昭怡等[11]利用串珠绳锯对不同硬度的重混凝土开展模拟切割试验，研究了切割线速度、张紧力对切割进给速度的影响。TURCHETTA 等[12]通过试验研究了串珠绳锯切割石材过程中的复合力，得出了切削力与能量的线性函数关系。

目前多数学者在进行绳锯切割试验及建立锯切模型时，只考虑到线速度、进给速度、试件长度以及试件硬度对锯切力的影响，当开展绳锯切割煤层实践时，煤岩体受到地应力的影响，与传统测试零受载试件锯切力不同，还需考虑试件的受载情况。本文在线速度、进给速度、试件长度以及试件硬度的基础上增加了试件受载条件，通过横向加载系统[13]对型煤试块进行加载以模拟深部煤层的受载状况；通过

* **收稿日期**：2023-10-20；**修回日期**：2023-12-10

基金项目：国家自然科学基金项目(51974121，51804115)；湖南省自然科学基金项目(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项目(E21723)

通信作者：李树清(1970－)，男，教授，博士，博导。主要研究领域：矿井瓦斯治理、巷道围岩控制。Email：lsq_hnust@163.com

绳锯切割试验,分析串珠绳锯的切割特点和串珠绳锯的受力情况,建立了绳锯切割受载煤体的锯切力模型,以期为金刚石串珠绳锯切割受载煤体损伤成缝试验提供理论和技术装备方面的参考。

1 受载煤体切割试验装置

金刚石串珠绳锯切割受载煤体的试验装置由绳锯切割系统、横向加载系统和数据收集系统 3 部分组成,如图 1 所示。

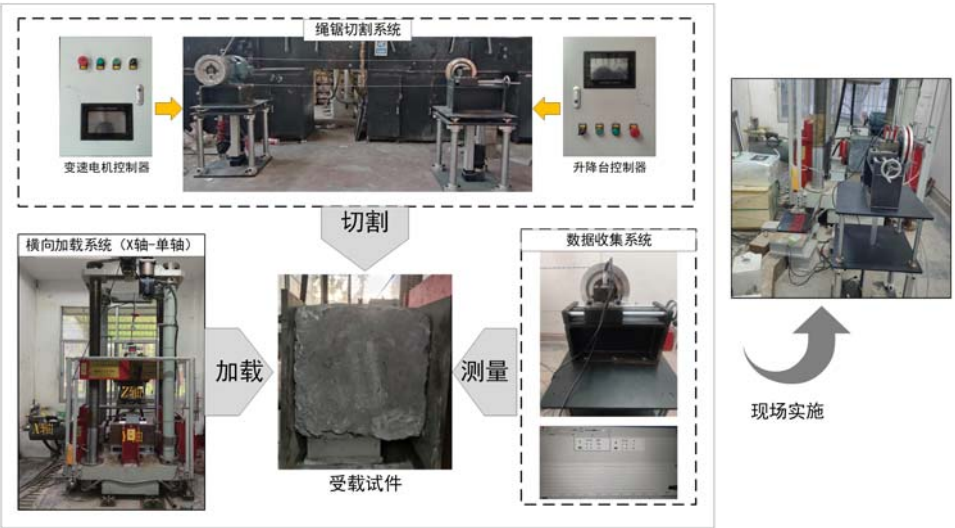


图 1 金刚石串珠绳锯切割受载煤体试验装置

Fig. 1 Test device of diamond beaded wire saw cutting loaded coal

绳锯切割系统由升降平台、电机支架、电机轴套、电机、主动轮、金刚石串珠绳锯、从动轮、穿轴式传感器、调节组件、旋转手柄、调节组件架构成,如图 2 所示。主动轮与从动轮在升降平台、电机支架和调节组件架的固定下处于同一高度;绳锯切割系统的动力由变速电机提供,电机采用 1 套无极调速器控制主动轮的转速 n,使用非接触测速仪监测主动轮 O_1 的转速 n,利用公式 $v_s=2\pi Rn/60$ 计算串珠绳锯的线速度 v_s,其中,R 为主动轮 O_1 的直径,n 为主动轮 O_1 的转速;顺(逆)时针旋转手柄可以使从动轮向右(向左)移动对串珠绳锯起绷紧(松弛)作用。升降平台由 0.75kW 伺服电机带刹车+驱动器+三速比减速器、三轴触屏控制器和电控箱组成,2 台升降平台通过三轴触屏控制器实现同步升降,同时带动绳锯切割系统对受载试件定速切割。横向加载系统为受载试块提供侧向静态加压(可施加静态载荷为 0～500kN),由于受载试块横切面尺寸为 400mm×400mm,为避免侧向静态加压压板尺寸不适配受载试块尺寸导致的受力不均,故在两侧各增加一块 400mm×400mm 夹板。从动轮的轴上装有穿轴式张力传感器(以下称为传感器),用来测量绳锯切割受载煤体过程中从动轮对转动轴产生的水平力 F_v 和垂直力 F_h。

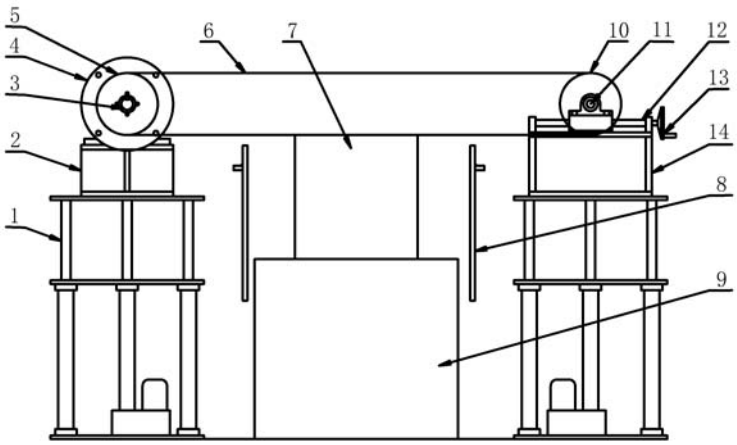
为满足绳锯切割受载煤体试验要求,试验装置应达到以下技术指标:(1)绳锯切割受载材料垂直进给速度为 0～300mm;(2)绳锯切割受载材料水平长度为 400mm;(3)电机的功率为 15kW;(4)串珠绳线速度为 0～10m/s;(5)垂直进给速度为 0～20mm/min;(6)左右升降平台水平误差值小于 0.1mm;(7)侧向静态加压为 0～500kN。

2 串珠绳锯受力分析

2.1 初始状态

串珠绳锯切割受载试块前,通过调节旋转手柄使串珠绳锯具备一定的初始张紧力,在初始张紧力的作用下串珠绳锯处于绷直状态,如图 3(a)所示。图中:F_{v0} 为串珠绳锯初始状态下传感器水平方向检测受力,N;T_0 为串珠绳锯初始张紧力,N;R_1、R_2 为主动轮 O_1 与从动轮 O_2 的半径,mm;l_1、l_2 为主动轮 O_1 和从动轮 O_2 与下水平线切点和上水平线切点之间的距离,mm;d_w 为金刚石串珠的外径,mm;v_s 为串珠

绳锯的线速度，m/s；v_f为串珠绳锯的进给速度，mm/min。



1. 升降平台；2. 电机支架；3. 电机轴套；4. 电机；5. 主动轮；6. 金刚石串珠绳锯；7. 受载试块；8. 夹板；9. 横向加载系统；10. 从动轮；11. 穿轴式传感器；12. 调节组件；13. 旋转手柄；14. 调节组件架

图 2　串珠绳锯切割受载煤体试验装置结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of beaded wire saw cutting loaded coal test device

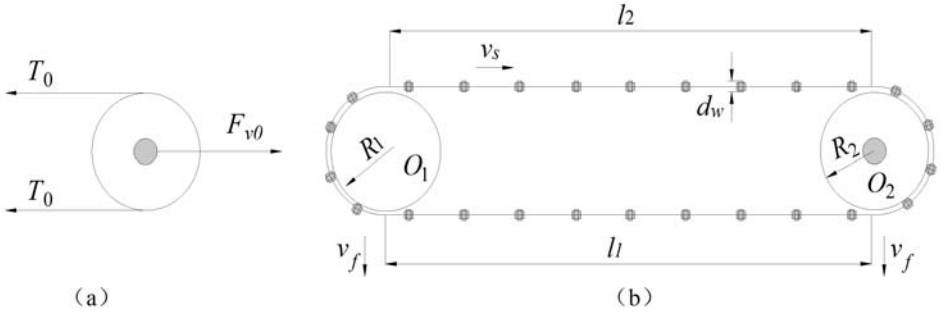


图 3　初始状态下串珠绳锯受力分析模型

Fig. 3　Force analysis model of beaded wire saw under initial state

串珠绳锯初始张紧力 T_0为

$$T_0 = \frac{F_{v0}}{2} \tag{1}$$

试验装置中，由于主动轮 O_1与从动轮 O_2等高且同径，故 $R_1 = R_2 = R$、$l_1 = l_2$，如图 3(b)所示。绷直状态下串珠绳锯总长 L_0为

$$L_0 = 2\pi(R + \frac{1}{2}d_w) + 2l_2 \tag{2}$$

2.2　进给状态

高速运转的串珠绳锯切割受载试块时，串珠绳锯会受到受载试块给予的水平方向阻力和垂直方向阻力，与此同时，主动轮 O_1端的串珠绳锯和从动轮 O_2端的串珠绳锯与水平线逐渐形成弓角 α 和 β，如图 4(a)所示，此过程中从动轮 O_2受力分析如图 4(b)所示。图中：x 为主动轮 O_1中心点到受载试块的距离，mm；D 为受载试块的长度，mm；L_b为金刚石串珠的长度，mm；T_1为串珠绳锯切割受载试块过程中绳锯的张紧力，N。

串珠绳锯切割受载试块过程中传感器水平方向检测受力 F_v为

$$F_v = T_1(1 + \cos\beta) \tag{3}$$

串珠绳锯切割受载试块过程中传感器在垂直方向的检测受力 F_h为

$$F_h = G - T_1\sin\beta \tag{4}$$

式中：G 为辊轮自重(本试验装置 G=42N，试验过程中 G 置零)，N。

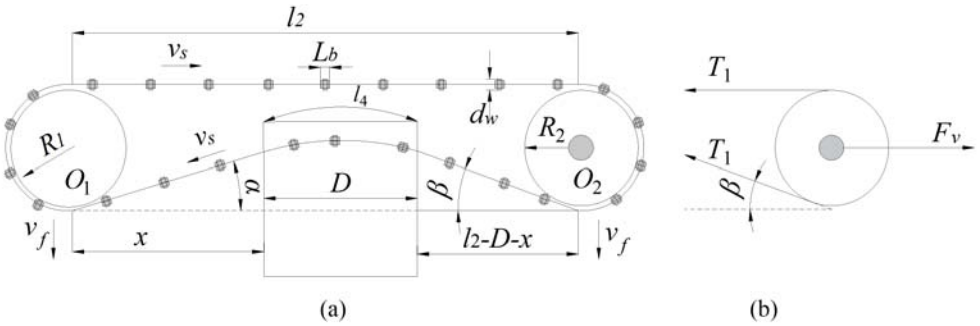


图 4 进给状态下串珠绳锯受力分析模型

Fig. 4 Force analysis model of beaded wire saw in feed state

将式(3)、式(4)变形得

$$T_1 = \frac{F_v}{1+\cos\beta} = \frac{G - F_h}{\sin\beta} \tag{5}$$

金刚石串珠绳锯是一种具有弹性的连续体,绳锯切割受载试块过程中,绳锯与受载试块表面相接触,接触点的串珠绳锯受到进给方向的阻力,形成一条光滑的“锯切曲线”,也称为“弓角”[14-15]。

由图 4(a)的几何关系可知,串珠绳锯在张紧力的作用下发生弹性形变后的总长度 L_1 为

$$L_1 = L_0 + \frac{T_1 - T_0}{k} \tag{6}$$

由胡克定律可知,串珠绳锯的刚度系数 k 为

$$k = \frac{EA}{L_0} \tag{7}$$

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

将式(1)、式(5)、式(7)代入式(6)得

$$L_1 = L_0 + \frac{L_0}{EA}\left(\frac{F_v}{1+\cos\beta} - \frac{F_{v0}}{2}\right) \tag{8}$$

串珠绳锯切割受载试块的轨迹长度 l_4 可近似表示为

$$l_4 = \frac{T_1 - T_0}{k} + l_2 - \frac{x}{\cos\alpha} + \frac{l_2 - D - x}{\cos\beta} \tag{9}$$

将式(1)、式(5)、式(7)式代入式(9)得

$$l_4 = \frac{L_0}{EA}\left(\frac{F_v}{1+\cos\beta} - \frac{F_{v0}}{2}\right) + l_2 - \frac{x}{\cos\alpha} - \frac{l_2 - D - x}{\cos\beta} \tag{10}$$

3 串珠绳锯锯切力分析

3.1 串珠绳锯锯切力模型

金刚石串珠绳锯主要由多股缠绕的钢丝绳、隔离套和串珠(串珠上镶嵌金刚石磨粒)构成,固定方式有弹簧、注塑、注胶 3 种,如图 5 所示。由于金刚石串珠绳锯属于柔性切割,故切割物体时切割区域会形成切割弧区,串珠上有效金刚石磨粒的出刃高度、绳锯的进给速度和切割轨迹长度对受载试块的去除率会产生重要影响,磨粒高度可用平均切削深度来反映,它与串珠绳锯的线速度、进给速度、串珠表面单位面积磨粒数、磨粒有效参与切削系数、受载试块底部夹角等因素都有关,单颗串珠上瞬时有效切削的金刚石磨粒数为[16-17]

$$N_e = \frac{1}{2}\eta\pi d_w C_b L_b \tag{11}$$

式中:η 为串珠绳锯切割区域金刚石磨粒的有效系数,一般取 1/4;L_b 为单个串珠的长度;C_b 为串珠绳锯单位表面积上的金刚石磨粒数,本文试验所用串珠绳锯金刚石磨粒直径为 0.01mm~0.5mm。

金刚石串珠瞬时有效参与的切割磨粒数 N_{l4} 和切割研磨总数 N_g 分别为[18]

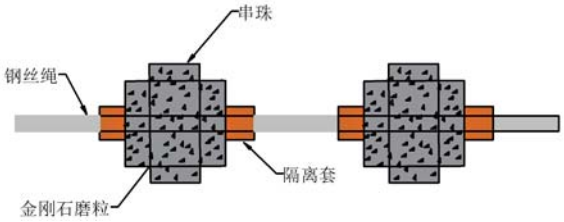


图 5　金刚石串珠绳锯结构

Fig. 5　Structure of diamond beaded wire saw

$$N_{l4} = N_e n_d l_4 \tag{12}$$

$$N_g = N_e n_d v_s \tag{13}$$

式中：n_d为单位长度上金刚石串珠的个数；v_s是串珠绳锯的线速度，m/s。

根据锯切力理论[12]分析，单颗金刚石串珠上磨粒的法向锯切力 F_{in}和切向锯切力 F_{it}分别为

$$F_{in} = k_n h_{av}^{v_n} \tag{14}$$

$$F_{it} = k_t h_{av}^{v_t} \tag{15}$$

式中：h_{av}为平均切深，mm；k_n为法向切削力系数；k_t为切向切削力系数；v_n、v_t为常数。

串珠绳锯的材料去除率 Q 为[19]

$$Q = d_w l_4 v_s \tag{16}$$

根据体积不变原理[12]，在单位时间内，金刚石串珠绳锯的材料去除率与切屑未变形时的总体积相等，即

$$d_w l_4 v_f = N_g V_g = \frac{1}{2}\eta\pi d_w C_b L_b n_d v_s \xi h_{av}^2 D \tag{17}$$

式中：V_g为切割未变形的总体积，mm^3；v_f为串珠绳锯的进给速度，m/s；ξ为金刚石串珠的形状系数，ξh_{av}^2为金刚石串珠绳锯横截面的平均切割面积，mm^2。

串珠绳锯平均切深 h_{av}为

$$h_{av} = \left(\frac{2 l_4 v_f}{\eta\pi C_b L_b n_d v_s \xi D}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{18}$$

将式(18)代入式(14)、式(15)中可求出单颗金刚石串珠的法向锯切力 F_{ins}和切向锯切力 F_{its}分别为

$$F_{ins} = N_e k_n h_{av}^{v_n} = k_n N_e \left(\frac{2 l_4 v_f}{\eta\pi C_b L_b n_d v_s \xi D}\right)^{\frac{v_n}{2}} \tag{19}$$

$$F_{its} = N_e k_t h_{av}^{v_t} = k_t N_e \left(\frac{2 l_4 v_f}{\eta\pi C_b L_b n_d v_s \xi D}\right)^{\frac{v_t}{2}} \tag{20}$$

因为金刚石串珠绳锯在同一时刻有效参与切割磨粒数为 N_{l4}，所以金刚石串珠绳锯的理论法向锯切力 F_n和切向锯切力 F_t分别为

$$F_n = N_{l4} k_n h_{av}^{v_n} = \frac{1}{2} d_w k_n (\eta\pi C_b L_b n_d)^{1-\frac{v_n}{2}} (l_4)^{1+\frac{v_n}{2}} \left(\frac{2 v_f}{v_s \xi D}\right)^{\frac{v_n}{2}} \tag{21}$$

$$F_t = N_{l4} k_t h_{av}^{v_t} = \frac{1}{2} d_w k_t (\eta\pi C_b L_b n_d)^{1-\frac{v_t}{2}} (l_4)^{1+\frac{v_t}{2}} \left(\frac{2 v_f}{v_s \xi D}\right)^{\frac{v_t}{2}} \tag{22}$$

3.2　串珠绳锯锯切力模型验证

采用传统锯切力测量装置[20]的试验测试结果对串珠绳锯锯切力模型进行分析验证，选取试验进给速度为 0.6m/h、锯切长度 L 为 500mm，表 1 为试验中串珠绳锯的物理参数，表 2 为不同线速度下锯切力的大小，实际法向锯切力 F'_n 和切向锯切力 F'_t 通过动态测力仪(Kistler-9257)测量得到，理论法向锯切力 F_n 和切向锯切力 F_t 根据式(21)、式(22)计算得出。

表 1 串珠绳锯的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of beaded wire saw

串珠绳锯类型	d_w/mm	L_b/mm	C_b/mm^{-2}	n_d/m^{-1}	A/mm^2	ξ
烧结注塑	8.7	6.5	40	37	2.049	1.05

表 2 锯切力数值对比

Tab. 2 Numerical comparison of sawing force

v_s/(m/s)	F'_n/N	F_n/N	F'_t/N	F_t/N
10	83	91	50	49
15	72	77	43	41
20	70	69	36	35
25	60	63	28	31
30	55	58	27	29
35	50	54	25	27

如图 6 所示,通过对实际锯切力和理论锯切力对比分析发现,实际法向锯切力与理论法向锯切力的最大误差率为 9.6%,实际切向锯切力与理论切向锯切力的最大误差率为 10.7%,由此可说明该锯切力模型通过串珠绳锯的 d_w、L_b、C_b、n_d、A、ξ、l_4、v_f、v_s等参数可以有效计算锯切力。

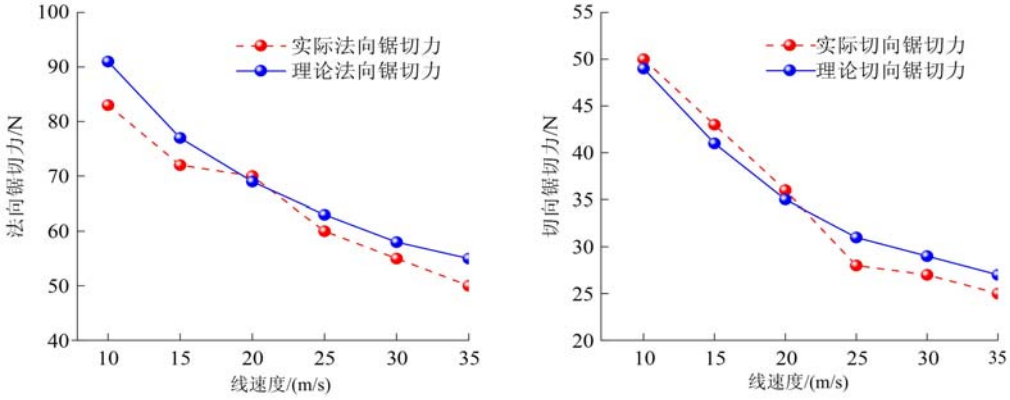


图 6 锯切力比较曲线

Fig. 6 Comparison curve of sawing force

4 试验装置测试

4.1 试验准备

在工程实践中,串珠绳锯张紧力一般为 2000N～5000N,相似模拟试验中取串珠绳锯张紧力的相似比为 1∶10,则试验过程中串珠绳锯的张紧力应为 200N～500N(绳锯接头的最大承受力 2300N)。本文试验用的串珠绳锯基本物理参数见表 3,钢丝的弹性模量取 $E=98.1$GPa,串珠绳锯初始绳长 $L_0=5666$mm。

表 3　试验用串珠绳锯物理参数

Tab. 3　Physical parameters of beaded wire saw fortest

串珠绳锯类型	d_w/mm	L_b/mm	C_b/mm^{-2}	n_d/m^{-1}	A/mm^2	ξ
烧结注塑	4.0	5	25	44	0.848	0.624
烧结注塑	7.3	15	45	38	1.197	0.382

在对 400mm×400mm×400mm 的受载试块施加 100kN 载荷的条件下，分别使用直径为 4.0mm、7.3mm 的串珠绳锯以进给速度 v_f=5mm/min、线速度 v_s=4m/s 进行切深 40mm 时，获得的相关参数见表 4。

表 4　测量参数

Tab. 4　Measurement parameters

d_w/mm	l_2/mm	x/mm	L_0/mm	α/(°)	β/(°)
4.0	2450	820	5666	8.9	5.8
7.3	2450	820	5676	14.3	9.8

4.2　锯切力测量

试验调试过程中测得的传感器检测信号如图 7 所示。由图 7(a)、(c)可以看出，随着串珠绳锯对受载煤体进行切割，从动轮 O_2 上的传感器检测受力先升高后降低最后趋于稳定状态。

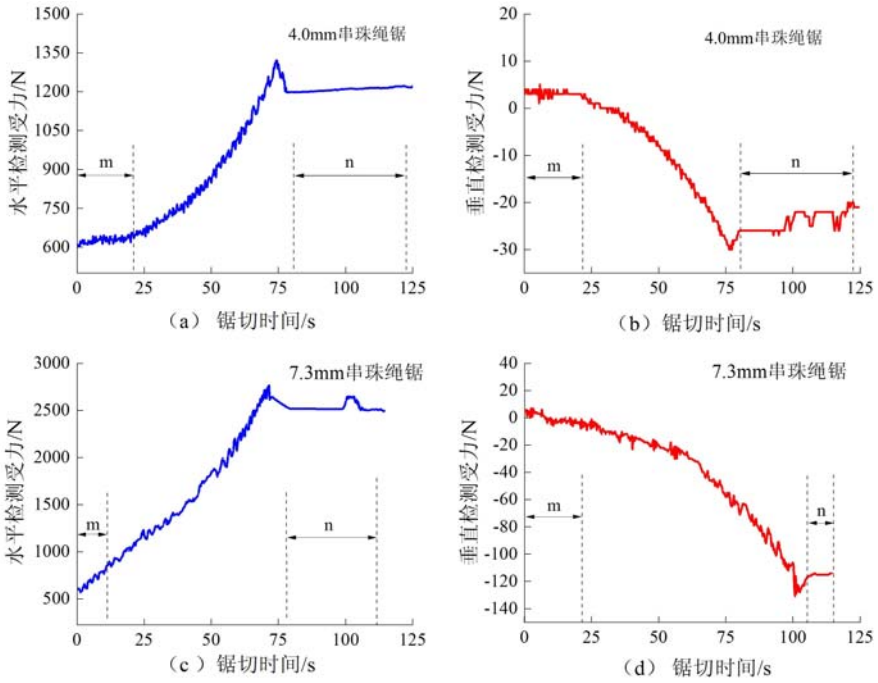


图 7　绳锯切割过程中张力传感器的检测信号曲线

Fig. 7　Detection signal curve of tension sensor in wire saw cutting process

在分析不同直径串珠绳锯切割受载试块传感器检测受力的变化时，采用各个力信号净增值的平均值，即图 7 中取 m 段信号作为串珠绳锯未切割时传感器检测受力，n 段信号的平均值作为受载试块弧形区域切割平整时传感器检测受力，传感器平均检测受力结果见表 5。

表 5　传感器平均检测受力

Tab. 5　Average detection force of sensor

d_w/mm	F_{v0}/N	F_v/N	F_{h0}/N	F_h/N
4.0	636.4	1215.7	2.3	−27.8
7.3	635.4	2521.9	3.7	−115.4

根据金刚石串珠绳锯切割受载煤体锯切力求解流程图(图 8)可获得相关数据,见表 6。

表 6 串珠绳锯切割完毕后相关参数的变化

Tab. 6 Changes of related parameters after beaded wire saw cutting

d_w/mm	T_0/N	T_1/N	L_1/mm	l_4/mm	l_2-D-x/mm	F_n/N	F_t/N
4.0	314	609.0	5675.8	406.1	1230	33.4	20.8
7.3	314	1270.2	5698.6	414.3	1230	187.6	108.0

由表 6 可知,当使用直径为 4.0mm 和 7.3mm 的串珠绳锯分别以进给速度 5mm/min、线速度 4m/s、侧向载荷 100kN,对硬度为 3.02MPa 的受载试块进行切割,切深到 40mm 时,4.0mm、7.3mm 的串珠绳锯张紧力分别为 609.0N、1270.2N,法向锯切力分别为 33.4N、187.6N,切向锯切力分别为 20.8N、108.0N。

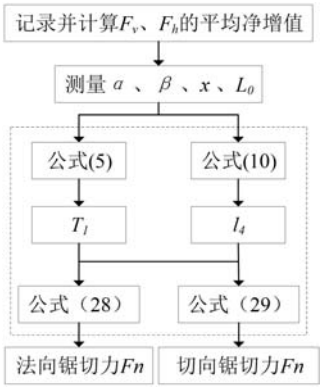


图 8 金刚石串珠绳锯切割受载煤体锯切力求解流程图

Fig. 8 Flow chart of diamond beaded wire saw cutting loaded coal

5 结论

(1) 研制了一种金刚石串珠绳锯切割受载煤体的试验装置,该装置结构简单、易操作、在垂直方向串珠绳锯可实现垂直连续切割(进给速度 0～20mm/min、线速度 0～10m/s 可调),侧向载荷加载系统可对受载试件施加 0～500kN 的载荷,解决了传统串珠绳锯切割试验系统难以同时满足试件受载和锯切力测量的问题。

(2) 根据串珠绳锯的进给方式和绕绳特点,对串珠绳锯和从动轮进行了受力分析,推导出了不同状态下串珠绳锯绳长和张紧力计算公式,并建立了锯切力模型,通过分析验证,表明锯切力模型与传统装置测量的锯切力基本吻合。

(3) 通过对试验装置进行测试,测试结果表明:选用初始绳长为 5666mm,直径分别为 4.0mm 和 7.3mm的串珠绳锯以进给速度 5mm/min、线速度 4m/s、侧向载荷 100kN 对 3.02MPa 的受载试块切深 40mm 时,4.0mm、7.3mm 的串珠绳锯张紧力分别为 609.0N、1270.2N,法向锯切力分别为33.4N、186.6N,切向锯切力分别为 20.8N、108.0N。

参考文献:

[1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5):1283－1305 (XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5):1283－1305 (in Chinese))

[2] 唐巨鹏, 任凌冉, 潘一山, 等. 深部煤与瓦斯突出孕育全过程声发射前兆信号变化规律研究[J]. 实验力学, 2021, 36(6):827－837 (TANG Jupeng, REN Lingran, PAN Yishan, et al. Study on the variation rule of acoustic emission precursor signal of deep coal and gas outburst process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(6):827－837 (in Chinese))

[3] 郭欢欢，胡家喻，邱黎明. 突出煤层孤岛工作面多场演化规律及瓦斯灾害防治技术[J]. 西安科技大学学报，2022，42(2)：227－236 (GUO Huanhuan，HU Jiayu，QIU Liming. Overburden behavour change and gas control of isolated working face of outburst coal seam[J]. Journal of Xi′an University of Science and Technology，2022，42(2)：227－236 (in Chinese))

[4] 尹万蕾，潘一山，李忠华，等. 深部煤层瓦斯对煤力学性质影响规律研究[J]. 实验力学，2016，31(6)：858－865 (YIN Wanlei，PAN Yishan，LI Zhonghua，et al. On the effect of deep coal seam gas to coal mechanical properties [J]. Journal of Experimental Mechanics，2016，31(6)：858－865 (in Chinese))

[5] 李树清，汤铸，黄飞，等. 低渗透煤层金刚石串珠绳锯切割卸压增透机理及应用[J]. 煤炭科学技术，2021，49(5)：83－90 (LI Shuqing，TANG Zhu，HUANG Fei，et al. Application and mechanism on pressure relief and permeability enhancement of diamond beaded wire saw cutting in low-permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology，2021，49(5)：83－90 (in Chinese))

[6] 汤铸，李树清，黄飞，等. 金刚石串珠绳锯切缝煤层实验装置的研制[J]. 矿业工程研究，2021，36(3)：34－39 (TANG Zhu，LI Shuqing，HUANG Fei，et al. Development of experiment device for slitting coal seam with diamond string saw[J]. Mineral Engineering Research，2021，36(3)：34－39 (in Chinese))

[7] 国宁，黄辉，徐西鹏. 金刚石串珠绳锯切温度的理论研究[J]. 中国机械工程，2010，21(9)：1106－1110 (GUO Ning，HUANG Hui，XU Xipeng. Theoretical research on temperature in diamond wire sawing[J]. China Mechanical Engineering，2010，21(9)：1106－1110 (in Chinese))

[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)：920－923 (GUO Libin，CUI Hai，WANG Liquan，et al. Research on grinding force of under water diamond wire saw based on uniform design[J]. Journal of Harbin Engineering University，2007(8)：920－923 (in Chinese))

[9] RAO G V. Linear dynamics and active control of an elastically supported travelling string[J]. Computers & Structures，1992，43(6)：1041－1049.

[10] 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 (LU Yuanxin，LI Yan，HUANG Hui. Study on sawing forces of diamond wire saw in concrete cutting[J]. Diamond & Abrasives Engineering，2011，31(6)：47－50 (in Chinese))

[11] 谭昭怡，李烨，苏容波，等. 金刚石绳锯模拟切割反应堆重混凝土试验研究[J]. 混凝土，2012(3)：32－34 (TAN Zhaoyi，LI Ye，SU Rongbo，et al. Simulated cutting experimental research of heavy concrete from reactor by diamond bead wire saw[J]. Concrete，2012(3)：32－34 (in Chinese))

[12] TURCHETTA S，POLINI W. Cutting force in stone lapping[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2011，57(5)：533－539.

[13] 樊宝杰，赵伏军，刘永宏，等. 新型多功能静载和冲击扰动岩石试验系统及应用[J]. 矿业工程研究，2022，37(4)：16－23 (FAN Baojie，ZHAO Fujun，LIU Yonghong，et al. A new multifunctional testing system for static and impact disturbance of rock and its application[J]. Mineral Engineering Research，2022，37(4)：16－23 (in Chinese))

[14] 刘宝昌，张祖培，孙友宏，等. 金刚石绳锯的锯切轨迹及锯切机理研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2002(6)：17－20 (LIU Baochang，ZHANG Zupei，SUN Youhong，et al. Study on cutting trajectory and sawing mechanism of diamond wire saw[J]. Diamond & Abrasives Engineering，2002(6)：17－20 (in Chinese))

[15] 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 (JIN Shanshan，ZOU Hang，GUO Hua. Research on static measuring method of wire saw deflection angle[J]. Chinese Journal of Engineering Design，2016，23(4)：309－315 (in Chinese))

[16] 王飞. 金刚石串珠绳锯解过程中动力学特性及振动控制的研究[D]. 济南：山东大学，2015 (WANG Fei. Research on vibration dynamics and control of diamond beaded rope during sawing process[D]. Jinan：Shandong University，2015 (in Chinese))

[17] ROMANSKI A. Factors affecting diamond retention in powder metallurgy diamond tools[J]. Archives of Metallurgy and Materials，2010，55：1073－1081.

[18] 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)：112－117 (HUANG Hui，HUANG Guoqin，GU Hua，et al. Wear characteristics of diamond beads in wire sawing granite [J]. Journal of Mechanical Engineering，2008(8)：112－117 (in Chinese))

[19] 汤铸. 金刚石串珠绳锯切割煤层卸压增透试验研究[D]. 湘潭:湖南科技大学, 2021 (TANG Zhu. Experimental study on pressure releasing and permeability improvement of seam slitting with diamond wire saw[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2021 (in Chinese))

[20] WANG F, XU C. Dynamic modeling and experimental validation of vibration for diamond beaded rope during granite cutting[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021,159:107825.

Development and force analysis of diamond beaded wire saw cutting loaded coal test device

QIAN Yunlai[1], LI Shuqing[1,2,3], LÜ Chenhui[1], HUANG Fei[1,2,3], WANG Chen[1]

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Work Safety Key Laboratory on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult for the traditional diamond beaded wire saw cutting test system to satisfy loading and sawing force measurement at the same time, a test device for diamond beaded wire saw cutting loaded coal has been developed. The device can realize vertical downward continuous cutting on the loaded specimen (feed speed 0～20mm/min, line speed 0～10 m/s, lateral loading system can apply load of 0～500kN to the coal). By analyzing the force characteristics of the beaded wire saw before and during the cutting process of the test device, the calculation formulas of the wire length and tension of the beaded wire saw during the processing of the diamond beaded wire saw were proposed. The sawing force model of the wire saw cutting the loaded coal body was established. After verifying the sawing force model, the sawing force obtained is basically consistent with the sawing force measured by the traditional device. Through the test of the device, the results show that when using the beaded wire saw with an initial wire length of 5666mm and a diameter of 4mm or 7.3mm to cut the coal specimen block with a feed speed of 5mm/min and a linear speed of 4m/s. The tension force of the beaded wire saw is 609.0N and 1270.2N, the normal sawing force is 33.4N and 187.6N, and the tangential sawing force is 20.8N and 108.0N.

Keywords: beaded wire saw cutting; loaded coal; test device; force analysis; sawing force