

# 采煤机移动软电缆机械特性研究

赵丽娟<sup>1,2</sup> 白忠健<sup>1\*</sup> 谢波<sup>3</sup> 林国聪<sup>1</sup> 王天翔<sup>1</sup> 高峰<sup>3</sup> 刘子峰<sup>3</sup>

1. 辽宁工程技术大学机械工程学院, 阜新, 123000

2. 辽宁省大型工矿装备重点实验室, 阜新, 123000

3. 山东兖矿集团长龙电缆制造有限公司, 济宁, 273522

**摘要:**为研究采煤机电缆的机械特性, 构建了 MCP-0.66/1.14 3 \* 95+1 \* 25 型电缆的实体模型并依据电缆实际运动状态设计了一种电缆弯曲装置。通过拉伸试验得到电缆股线的材料参数作为数值模拟的初始条件, 并对不同成缆节径比、捻制方向及控制单元截面积的电缆进行数值模拟。结果表明: 电缆受力随着成缆节径比的增大而增大, 考虑制造成本与机械特性, 该型电缆成缆节径比为 6 时更优; 以 R 为右向、L 为左向捻制进行捻制描述, 不同捻制方向下电缆所受应力从大到小依次为 RLR、RRL、RLL、RRR, 而三层同向捻制工作时容易出现散股的情况, 故 RLL 捻制时电缆的机械特性最佳; 控制单元导体在直线移动阶段, 疲劳寿命随着截面积的增大而增大; 在弯曲阶段, 疲劳寿命随着截面积的增大而减小。通过弯曲试验机对电缆进行弯曲试验, 试验结果与仿真分析结果基本一致, 验证了数值模拟的准确性。研究结果为电缆复杂的绞合结构设计与分析提供了新的思路, 并为提高电缆机械性能和使用寿命提供了理论支撑。

**关键词:**采煤机电缆; 绞合结构; 拉伸试验; 显式动力学; 试验验证

**中图分类号:** TD421

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.019

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Study of Mechanical Characteristics of Soft Electrical Cables in Mining Machines

ZHAO Lijuan<sup>1,2</sup> BAI Zhongjian<sup>1\*</sup> XIE Bo<sup>3</sup> LIN Guocong<sup>1</sup> WANG Tianxiang<sup>1</sup>  
GAO Feng<sup>3</sup> LIU Zifeng<sup>3</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning, 123000

2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Large-Scale Mining Equipment, Fuxin, Liaoning, 123000

3. Shandong Yankuang Group Changlong Cable Manufacture Co., Ltd., Jining, Shandong, 273522

**Abstract:** To investigate the mechanical properties of mining machine cables, a physical model of the MCP-0.66/1.14 3 \* 95+1 \* 25 cable was constructed, and a cable bending device was designed based on the cable's actual movement conditions. Tensile tests provided the material parameters for the cable strands, which served as the initial conditions for numerical simulations. The simulations covered cables with different stranding pitch ratios, twisting directions, and control unit cross-sectional areas. The results show that the cable stress increases with the stranding pitch ratio. Considering manufacturing costs and mechanical properties, a pitch ratio of 6 is optimal for this cable type. For twisting directions, where R denotes right-hand and L denotes left-hand twists, the stress order is RLR>RRL>RLL>RRR. Three-layer parallel twisting tends to cause strand dispersion, making the RLL twisting method optimal for mechanical properties. The fatigue life of the control unit conductor increases with the cross-sectional area during linear movement but decreases with the cross-sectional area during bending. Bending tests conducted with a bending machine corroborated the simulation results, validating the accuracy of the numerical simulations. These findings offer new insights into the design and analysis of complex cable stranding structures and provide theoretical support for enhancing cable mechanical performance and lifespan.

**Key words:** mining machine cable; stranded structure; tensile test; explicit dynamics; experimental validation

### 0 引言

采煤机电缆作为采煤机电力与信号传输的关键设备<sup>[1]</sup>, 在采煤机拖拽下会频繁出现弯曲工况、

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51674134); 企业委托项目(22-2387)

极为复杂的应力状态和特殊的绞合结构, 使得其模型复杂、动态特性研究困难, 在一定程度上影响了采煤工作面智能化发展的进程。因此, 研究采煤机电缆的机械特性并提高其使用寿命意义重大。

郭娟娟<sup>[2]</sup>通过理论推导、数值模拟相结合的方式, 发现就多级电缆而言, 各级电缆绞距越长, 对应的弯曲刚度越大, 且改变高级电缆绞距比改变低级电缆的绞距对电缆弯曲刚度值的影响更大。胡玉娇<sup>[3]</sup>建立了三芯海缆钩挂、锚砸、扭转的有限元模型, 分析了各结构层应力与光单元应变的变化关系, 并对其内部结构的应力、应变进行拟合, 得到了相应的函数关系, 进而分析了三芯海缆在不同工况下的机械性能变化规律。鞠森<sup>[4]</sup>通过模拟海底电缆在不同影响因素下的机械弯曲, 获取各结构的应力数据以及光单元应变数据, 建立了以光单元应变为自变量、各结构应力为因变量的关系函数。刘天怡<sup>[5]</sup>基于均匀化理论和细杆理论, 预测了电缆多级子缆等效弹性模量理论模型, 研究了多级子缆轴向应变与股线最大正应力的关系, 分析了多级子缆螺旋角对股线最大正应力的影响。李志杰<sup>[6]</sup>研究了一级、二级扭绞结构在拉伸和扭转载荷下的线弹性和弹塑性力学响应。de MENEZES 等<sup>[7]</sup>通过梁单元、实体单元、显式动力学模型三种电缆建模方式的对比, 发现显式动力学模型可以准确地描述电缆的全局行为, 使得构建更复杂的电缆成为现实。蒋丽宾<sup>[8]</sup>建立了卢瑟福型超导电缆在基本变形模式下的力学分析模型, 分析摩擦因子、股线缠绕角度、缆芯等因素对电缆力学行为的影响。YAN 等<sup>[9]</sup>选择三种形状截面的导体进行弯曲试验, 并分析了它们的迟滞曲线, 发现压缩圆形导体的截面能量耗散最大。HOSEINIE 等<sup>[10]</sup>通过大量电缆失效数据分析, 发现幂律函数能很好地拟合电缆系统失效数据, 并基于分析结果确定采煤机电缆系统的可靠性维护周期为 125 h。BRUSKI<sup>[11]</sup>利用梁有限元和实体有限元建立了钢丝绳绞合结构的两个非线性三维数值模型, 并通过数值模拟与实验结果进行对比, 确定了钢丝绳力矩-曲率间的关系。孟凡明等<sup>[12]</sup>对椭圆股和三角股钢丝绳进行参数化建模求解, 发现弯曲时三角股比椭圆股钢丝绳更容易达到应力屈服。

以上学者通过理论推导、实验验证和数值模拟等方式对不同类型绞合结构的机械性能进行了分析, 但对采煤机移动软电缆的分析未见报道, 采煤机电缆机械特性的研究仍为煤矿智能化发展的短板。本文在对电缆各单元股线进行拉伸试验、

得到其基本力学参数的基础上, 构建电缆有限元模型, 并基于实际工况设计了一种电缆弯曲装置对采煤机电缆系统进行数值模拟, 对电缆各单元导体的应力状态进行分析, 研究采煤机移动软电缆的机械特性。

### 1 电缆建模基础

以 MCP-0.66/1.14 3 \* 95+1 \* 25 型号的采煤机电缆为工程对象。它主要由动力单元导体、动力单元绝缘、控制单元导体、控制单元绝缘、控制单元包覆层、地线芯导体、外护套等组成, 电缆截面示意图见图 1。

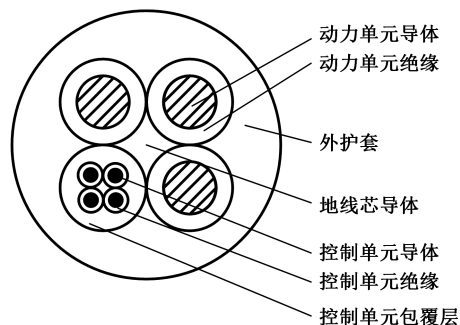


图 1 采煤机电缆截面

Fig.1 Coal miner cable cross-section

应用 Creo 软件建立电缆各层结构时, 为提高建模效率及模型准确性, 需要确定各结构之间的相对位置, 电缆各单元定位关系如图 2 所示。

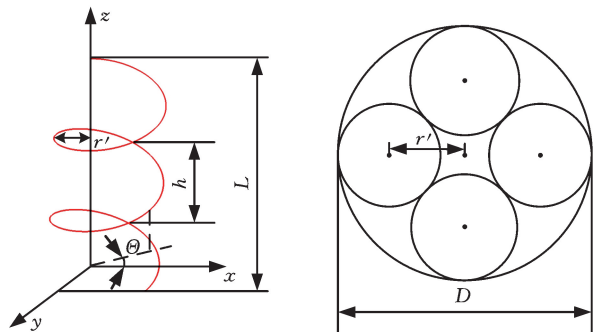


图 2 电缆结构定位关系

Fig.2 Cable structure positioning relationships

建立柱坐标系, 通过曲线方程确定各单元中心的螺旋轨迹方程:

$$\left. \begin{aligned} r &= r' \\ \Theta &= 360tL/h \\ z &= Lt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$h = Dm \quad (2)$$

式中:  $r$  为电缆导体螺旋轨迹半径, mm;  $r'$  为常数, mm;  $\Theta$  为柱坐标系原点与直角坐标系原点连线与  $x$  轴夹角, °;  $L$  为电缆总长度, mm;  $t$  为从 0 到 1 变化的自变量;  $h$  为成缆绞合节距, mm;  $D$  为成缆绞合外径, mm;  $m$  为成缆节径比。

使用 trajpar 函数<sup>[13]</sup>, 在轨迹端点的法平面绘

制扫描截面,使截面沿着轨迹扫描的同时围绕轨迹旋转,以此来完成导体绞合结构的绘制,即

$$s_d = P_{tra} 360h / (Dm) \quad (3)$$

式中: $s_d$ 为截面绕扫描轨迹的旋转角度,°; $P_{tra}$ 为扫描轨迹参数,代表扫出特征占轨迹长度的百分比。

按照电缆制造工艺并以上述推导的中心螺旋轨迹方程作为其各单元导体的扫描轨迹,使用 *trajpar* 函数绘制扫描截面,其建模过程如图 3 所示。

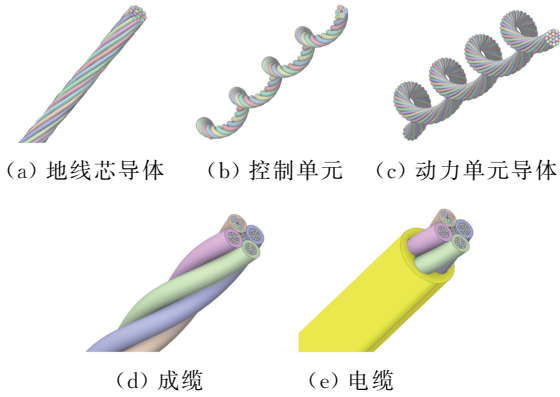


图 3 电缆建模过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of the cable modeling process

## 2 弯曲状态下电缆数学模型的构建

工作过程中电缆在采煤机拖曳下往复运动,会频繁发生弯曲。为研究其受到弯曲载荷下的行为,建立了电缆弯曲模型,如图 4 所示,其中: $M$ 为弯矩; $R$ 为动力单元导体半径; $\rho$ 为曲率半径。

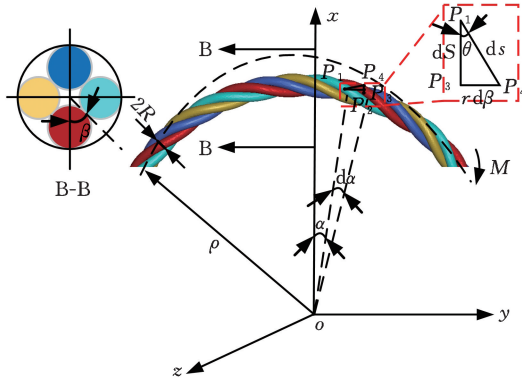


图 4 电缆弯曲示意图

Fig.4 Schematic diagram of cable bending

建立笛卡儿坐标系  $\{x, y, z\}$ ,同时令  $\{i, j, k\}$  为坐标系相应的三个标准正交基,当电缆受到  $xoy$  平面的弯曲后,其坐标方程为<sup>[14]</sup>

$$\mathbf{R}(S) = \rho \cos \alpha i + \rho \sin \alpha j \quad (4)$$

式中: $S$ 为变形后电缆的弧长; $\alpha$ 为电缆中心线上任意一点与  $x$  的夹角。

则沿圆弧曲线切线方向、法线方向与副法线方向的单位向量分别为

$$\mathbf{T}(S) = \frac{\mathbf{R}'(\alpha)}{|\mathbf{R}'(\alpha)|} = -\sin \alpha i + \cos \alpha j \quad (5)$$

$$\mathbf{N}(S) = \frac{\mathbf{R}''(\alpha)}{|\mathbf{R}''(\alpha)|} = -\cos \alpha i - \sin \alpha j \quad (6)$$

$$\mathbf{B}(S) = \mathbf{T}(S) \times \mathbf{N}(S) = k \quad (7)$$

当电缆中心线为圆弧时,动力单元中心线坐标方程为

$$\mathbf{r}(s) = \mathbf{R}(S) + r \cos \beta \mathbf{N}(S) + r \sin \beta \mathbf{B}(S) \quad (8)$$

式中: $s$ 为动力单元导体的弧长; $\beta$ 为动力单元中心线的螺旋缠绕角。

如图 4 所示,取一段侧股微元  $ds(P_1P_4)$  缠绕成直线段  $dS(P_1P_3)$ ,其夹角为  $\theta$ ;股线  $dS$  在弯矩  $M$  的作用下弯曲成一微段弧  $P_1P_2$ ,  $\alpha$  的增量为  $d\alpha$ 。由图 4 可得以下参数之间的关系:

$$\frac{dS}{d\alpha} = \rho \quad (9)$$

$$\tan \theta = \frac{r d\beta}{dS} = \frac{r d\beta}{\rho d\alpha} \quad (10)$$

则动力单元弧长  $s$  与电缆弧长  $S$  的关系如下:

$$\frac{ds}{dS} = \frac{1}{\rho} \sqrt{(\rho - r \cos \beta)^2 + r^2 \left(\frac{d\beta}{d\alpha}\right)^2} \quad (11)$$

由此可推导出电缆中动力单元导体的坐标方程:

$$\mathbf{r}(s) = (\rho - r \cos \beta)(\cos \alpha i + \sin \alpha j) + r \sin \beta k \quad (12)$$

## 3 各单元股线拉伸试验

电缆内部股线为绞合结构,在外载荷作用下,绞线通过股与股之间的相互接触挤压呈现出不同的应力应变分布趋势。为得到电缆各单元股线材料参数,取 MCP-0.66/1.14 3 \* 95+1 \* 25 型号的电缆,分别剥离其动力单元导体和 KA4、KA6、KA10 控制单元导体。截取 4 组长度相同的试件并将其置于室温条件下 24 h。采用万能拉伸试验加载试验,载荷大小采用试验机内置传感器测量并由计算机采集,试件通过试验机专用夹具夹紧,原始标距长度为 100 mm<sup>[15]</sup>,对其进行拉伸试验,如图 5 所示。随着载荷的不断增加,单根铜丝开始断裂,直到大部分铜丝发生断裂,如图 6 所示,试验机停止加载。完全稳定状态下,整合得到电缆股线试件载荷、位移等数据,并对数据进行处理<sup>[16-17]</sup>,得到应力-应变曲线,如图 7 所示。由图 7



图 5 拉伸试验示意图

Fig.5 Schematic diagram of the tensile test

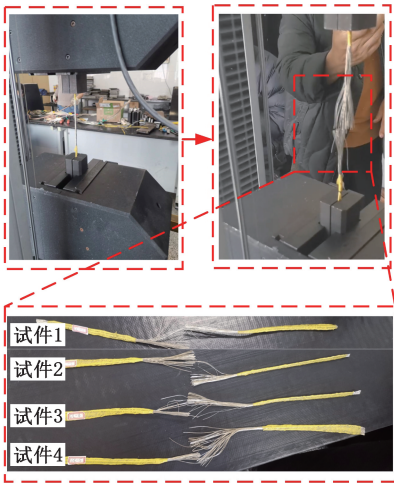
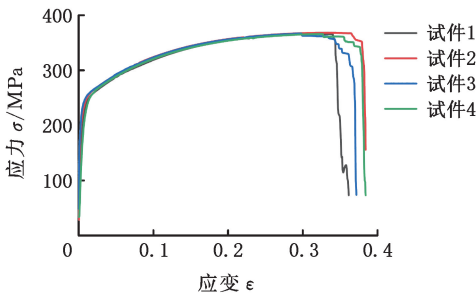
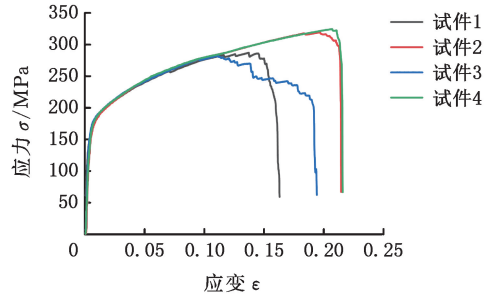


图 6 试件断裂过程示意图

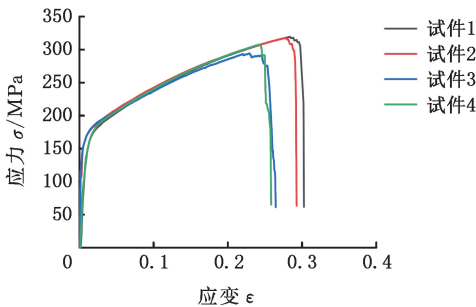
Fig.6 Schematic diagram of the fracture process of the specimen



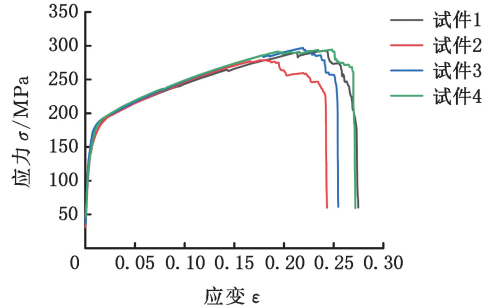
(a) 动力单元导体应力应变曲线



(b) 控制单元导体 KA4 应力应变曲线



(c) 控制单元导体 KA6 应力应变曲线



(d) 控制单元导体 KA10 应力应变曲线

图 7 股线应力应变曲线

Fig.7 Stress-strain curve of strand

表 1 各单元导体基本力学参数

Tab.1 Basic mechanical parameters of each unit conductor

股线类型	试件编号	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa
动力单元股线	1	36.442	230.05
	2	34.708	228.69
	3	40.703	233.47
	4	36.775	241.43
控制单元股线 KA4	1	14.761	158.94
	2	15.434	160.34
	3	14.124	153.21
	4	13.865	167.97
控制单元股线 KA6	1	15.970	173.63
	2	16.052	172.03
	3	18.733	177.07
	4	19.025	177.33
控制单元股线 KA10	1	19.948	178.76
	2	26.360	191.51
	3	25.816	190.49
	4	19.366	182.03

可知,拉伸时第一阶段体发生弹性变形;第二阶段导体在达到屈服值之后,斜率比第一阶段小,导体发生塑性变形。

结合试验数据,可以得到各个试件的弹性模量和屈服强度作为数值模拟的材料参数,见表 1。

#### 4 数值模拟与结果分析

##### 4.1 求解方法选择及边界条件设置

采煤机电缆在工作中频繁弯折,是导致电缆断芯的主要原因之一。根据煤炭行业标准 MT818.4—2009《煤矿用电缆》第 4 部分<sup>[18]</sup>:额定电压 1.9/3.3 kV 及以下采煤机金属屏蔽软电缆规定,电缆实际工作时最小弯曲半径为电缆直径的 6 倍。对电缆在上述工况下的受力情况进行分

析,运用相对运动的原理,设计了电缆弯曲模拟装置,如图 8 所示。选择 MCP-0.66/1.14 3 × 95 + 1 × 25 型号电缆长度为 1500 mm,将电缆装配到电缆夹内,电缆夹与牵引块固定,牵引块随着滚轮以采煤机实际运行速度 7 m/min 匀速转动,以滚轮旋转角度由 0°到 180°来模拟电缆由进入弯曲到脱离弯曲的运动状态。本研究选用适合解决非线性、多接触、大变形问题的 LS-DYNA 软件<sup>[19]</sup>来进行求解。选取用于显式分析的三维实体单元 SOLID 164<sup>[20]</sup>,该单元可以很好地模拟采煤机电缆工作过程,划分电缆网格数量为 941 669,设置导体与导体、导体与和绝缘之间均为摩擦接触,静摩擦因数为 0.4,动摩擦因数为 0.3。

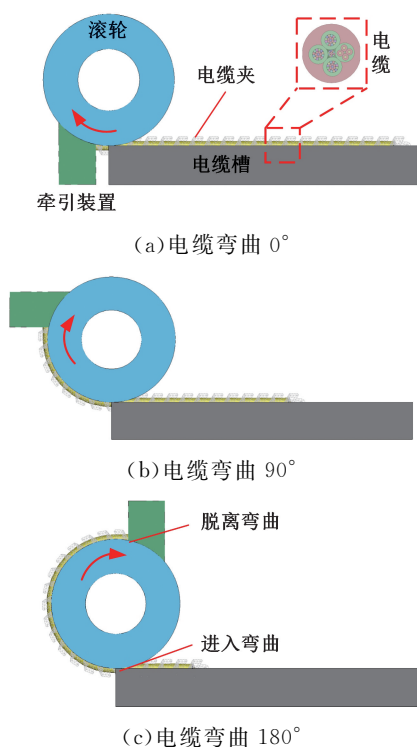


图 8 电缆弯曲装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of the cable bending device

#### 4.2 成缆节径比对电缆机械特性的影响

以成缆节径比分别为 4、5、6、7 建立多组电缆实体模型,将其装配到图 8 所示电缆弯曲装置中,并对其施加相同的边界条件进行数值模拟,来研究成缆节径比对电缆机械特性的影响。电缆所受等效应力是最终影响电缆服役性能的关键指标,提取动力单元股线在弯曲状态下的等效应力如图 9 所示。

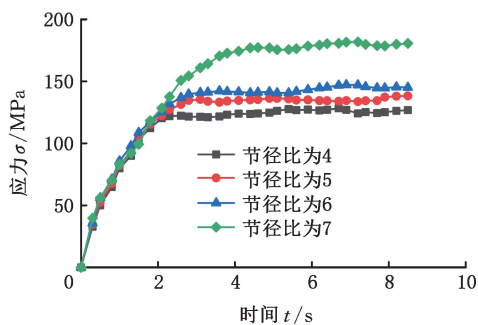


图 9 动力单元等效应力-时间变化曲线

Fig.9 Equivalent stress-time variation curve for the power unit

由图 9 可见,四种节径比的电缆动力单元股线最大等效应力分别为 139、142、151、180 MPa。随着电缆弯曲程度的增加,动力单元股线所受应力随之增大,当电缆达到指定弯曲半径时,动力单元股线受力趋于平稳,最终达到稳定值。当电缆以相同的弯曲半径、行进速度弯曲时,随着成缆节径比的增大,应力稳定值也增大。其中,当成缆节

径比为 4、5、6 时,动力单元股线应力水平较为接近;而当成缆节径比为 7 时,动力单元股线的应力水平较高。这是因为成缆节径比越小,电缆各单元缠绕越紧密,有利于减小弯曲所产生的应力。此外,电缆在工作过程中会发生抖动,导致其所受应力值存在一定的波动。

图 10 为不同成缆节径比下电缆动力单元股线等效应力云图,由图 10 可见,电缆进入弯曲时,动力单元第三层股线应力水平较高。因此,提取动力单元三层股线在不同成缆节径比下的等效最大应力,如图 11 所示。由图 11 可见,当电缆在受到弯曲载荷时,动力单元三层股线受力均随着成缆节径比的增大而增大,且越靠近外层,动力单元股线受到的应力值越大。综合考虑成缆节径比与成本,得出结论如下:弯曲工况下成缆节径比为 6 时,MCP-0.66/1.14 3 \* 95 + 1 \* 25 型号电缆兼具良好的经济性与机械特性。

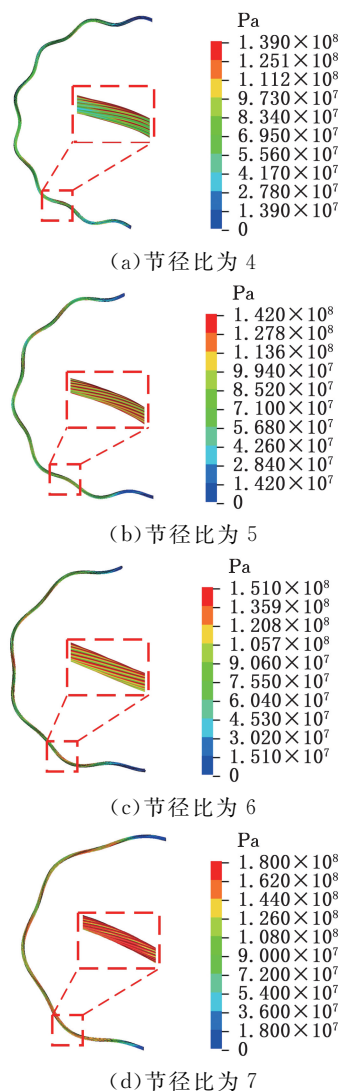


图 10 不同节径比下动力单元股线等效应力云图  
Fig.10 Equivalent stress contour map of power unit strands under different pitch ratios

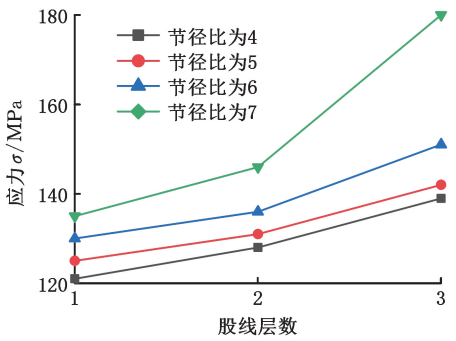


图 11 不同节径比下动力单元等效最大应力

Fig.11 Equivalent maximum stress of power unit under different diameter ratio

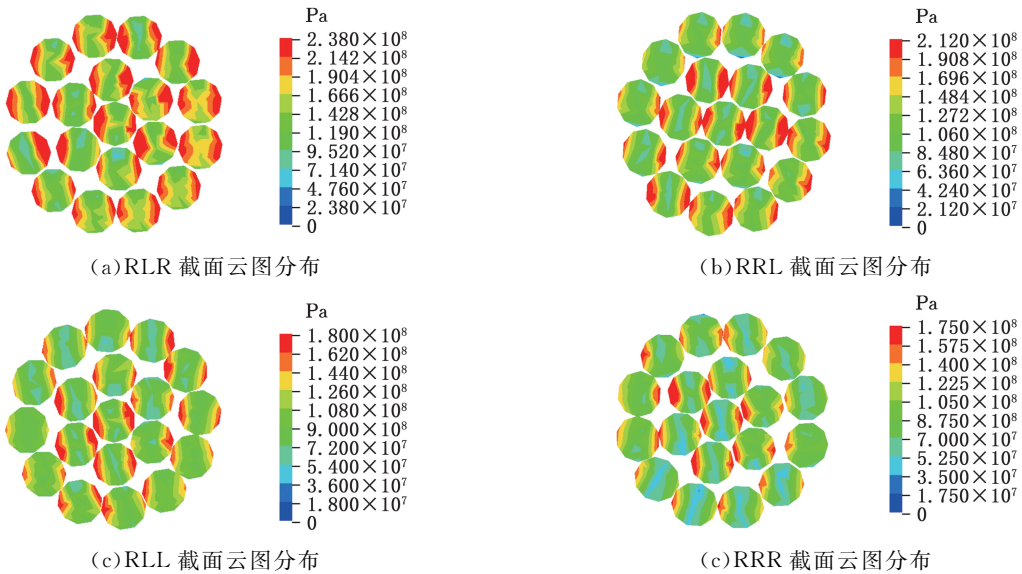


图 12 不同捻制方向下动力单元股线截面等效应力云图

Fig.12 Equivalent stress contour map of strand cross section of power unit under different twist directions

因为电缆在受到弯曲载荷时,股线之间存在空隙,导致彼此之间相互挤压、滑动。

为进一步探究不同捻制方向对动力单元三层股线的影响,分别提取动力单元三层股线的最大等效应力,如图 13 所示。由图 13 可见,股线最大等效应力由内层向外层逐渐增大;对于第三层股

### 4.3 动力单元捻制方向对电缆机械特性的影响

为研究捻制方向对电缆机械特性的影响,分别建立动力单元股线右-左-右(RLR)、右-右-左(RRL)、右-右-右(RRR)、右-左-左(RLL)四种捻制情况的电缆模型,并对其进行弯曲数值模拟。四种捻制方向的动力单元股线截面等效应力云图如图 12 所示,由图 12 可见,四种捻制方向的动力单元股线等效最大应力从大到小依次为 RLR、RRL、RLL、RRR(即 238、212、180、175 MPa)。股线应力呈现出对称分布,股线应力分布主要集中在股线与股线、股线与绝缘接触的位置。这是

线,RRR 与 RLL 捻制方式受力较小且较 RLR 与 RRL 所受应力水平相差较大。这是因为二、三两层股线之间捻制方向相同,使得股线整体较为柔软。RRR 这种捻制方式虽然受力较小,但它容易松散且承载后伸长率大;而 RLL 捻制方式受力虽略大于 RRR 捻制方式,但其综合性能较 RRR 捻制方式更优。

### 4.4 控制单元导体截面积对电缆机械特性的影响

为了研究控制单元导体截面积对电缆机械特性的影响,选取三种控制单元导体截面积分别为 4 mm<sup>2</sup>(KA4)、6 mm<sup>2</sup>(KA6)、10 mm<sup>2</sup>(KA10)的电缆,其工作状态如图 14 所示,电缆工作时分为直线阶段与弯曲阶段,基于实际工况分别对其进行数值模拟。采煤机工作时通过电缆夹拖动电缆移动,使用 LS-DYNA 软件对不同截面积控制单元导体的电缆进行直线阶段数值模拟。图 15 所示为直线阶段不同截面积控制单元导体应力-时间变化曲线,当电缆处于直线移动阶段时,KA4、

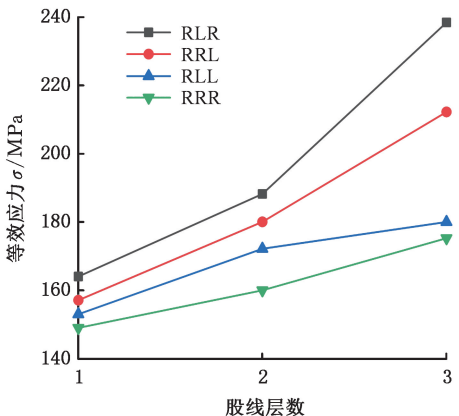


图 13 不同捻制方向下动力单元等效最大应力

Fig.13 Equivalent maximum stress of the power unit under different twist directions

KA6、KA10 三种控制单元导体刚开始所受应力随时间增大；当电缆随采煤机匀速运动时最大应力值分别稳定在 66.7、60.7、54.6 MPa，可见三种控制单元导体在直线移动工况下截面积越大，受到的等效应力越小，且均小于各自的屈服强度。

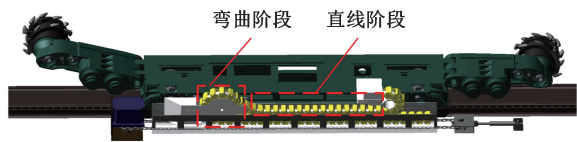


图 14 采煤机电缆工作状态示意图

Fig.14 Schematic diagram of the operating status of mining machine cables

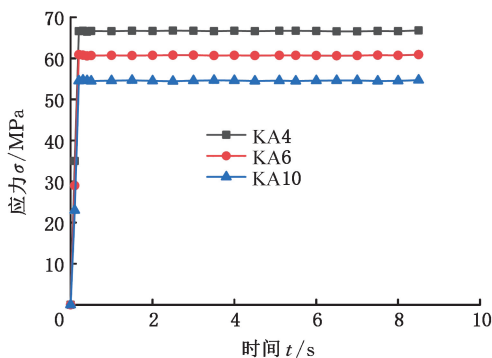


图 15 直线阶段控制单元导体应力-时间变化曲线

Fig.15 Stress-time variation curve for conductor control units in the linear phase

对 KA4、KA6、KA10 控制单元导体的电缆进行弯曲数值模拟，弯曲半径为电缆直径的 6 倍，采煤机行走速度为 7 m/min。如图 16 所示，随着电缆弯曲程度的增加，控制单元导体所受应力随之增大，当达到指定弯曲半径时，控制单元导体受力在稳定值上下波动，这是由导体本身的绞合结构引起的。随着控制单元导体截面积的增加，应力水平也提高。三种截面积控制单元导体最大应力分别为 83.6、96.1、140.8 MPa。

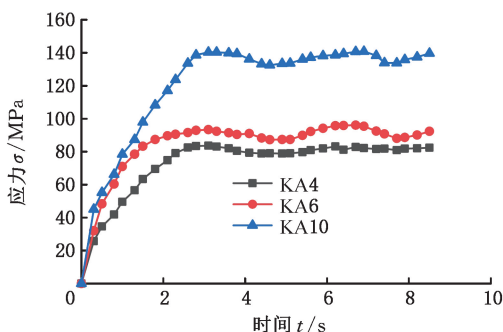
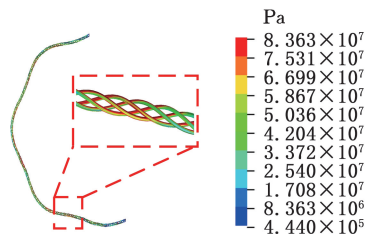


图 16 弯曲阶段控制单元导体应力-时间曲线

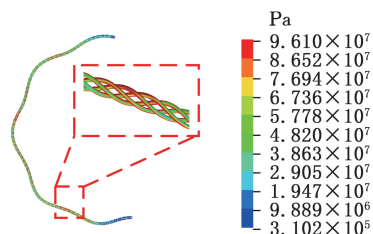
Fig.16 Stress-time variation curve for conductor control units in the bending phase

图 17 为弯曲阶段不同截面积控制单元导体等效应力云图，由图 17 可见，应力水平较高的点集中在电缆刚开始进入弯曲的位置，三种截面导

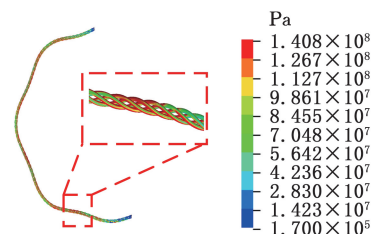
体受力从小到大依次为 KA4、KA6、KA10。电缆在随采煤机工作过程中受到拉伸与弯曲载荷的共同作用，为分析三种截面导体的机械特性，需分别求出三种截面导体电缆在直线阶段与弯曲阶段的疲劳寿命并以此来评价其机械特性。



(a)KA4 受力云图



(b)KA6 受力云图



(c)KA10 受力云图

图 17 弯曲阶段不同截面积控制单元导体等效应力云图

Fig.17 Equivalent stress contour map for conductor control units with varying cross-sectional areas in the bending phase

分别对三种控制单元导体的电缆直线移动阶段与弯曲阶段疲劳寿命进行分析。将前述数值模拟生成的 d3plot 结果文件导入 Ansys nCode DesignLife 软件中，并进行材料与载荷映射<sup>[21]</sup>，经过疲劳仿真分析得到直线移动阶段三种控制单元导体的疲劳寿命云图见图 18。由图可见，KA4、KA6、KA10 三种控制单元导体疲劳循环次数分别为  $2.439 \times 10^7$ 、 $2.650 \times 10^7$ 、 $2.857 \times 10^7$ 。弯曲阶段三种控制单元导体的疲劳寿命云图见图 19，由图可见，在弯曲载荷下 KA4、KA6、KA10 三种控制单元导体疲劳循环次数分别为 78 930、71 230、60 460。

综合分析，三种控制单元导体在直线阶段寿命较大，且截面积越大，疲劳寿命越大，均达到  $10^7$  以上；弯曲阶段控制单元导体截面积越大，疲劳寿命越小，KA4 控制单元导体进入弯曲至脱离

弯曲寿命较 KA6、KA10 控制单元导体分别提高 7700 次和 18 470 次。

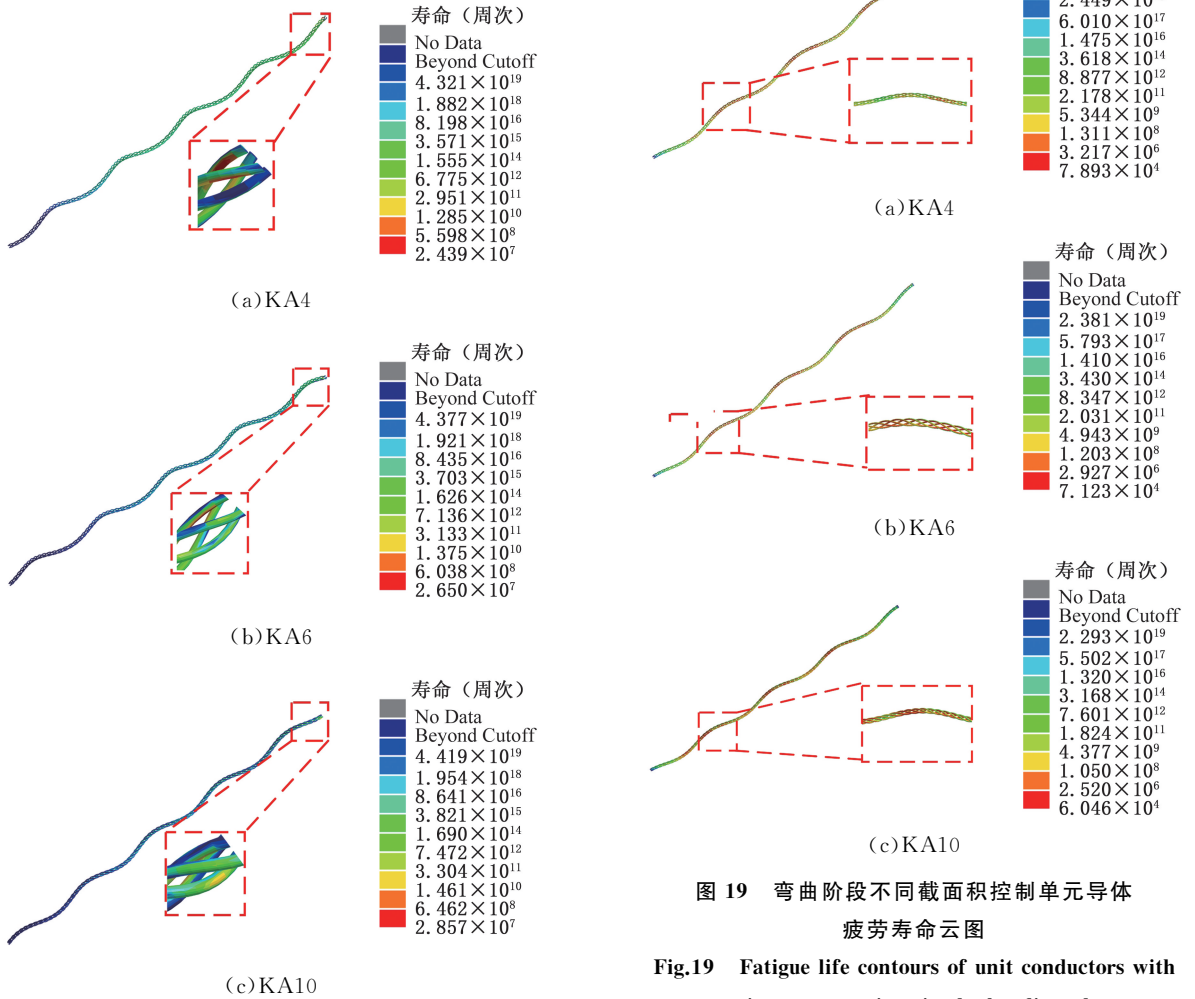


图 18 直线阶段不同截面控制单元导体疲劳寿命云图

Fig.18 Fatigue life contours of unit conductors with varying cross-sections in the linear phase

#### 4.5 弯曲试验

为验证数值模拟的准确性,选择成缆节径比为 6、捻制方向为 RLL、控制单元导体为 KA4 的电缆进行弯曲实验,如图 20 所示。设置其弯曲半径为 6 倍电缆直径,移动速度为 7 m/min,移动端带动电缆往复弯曲运动并自动记录运转次数,当电缆发生断路时,试验机发出警报并停止加载。试验结束时读取其弯曲次数为 76 264,有限元计算其寿命为 78 930,误差为 3.496%,二者较为吻合。剥离其护套与绝缘,如图 21 所示,可知动力单元出现断股情况,最外层股线断股比较严重,且动力单元绝缘内壁出现磨损现象。这是因为外层股线受力较大,且高应力多集中在股线与股线、股线与绝缘接触的位置。试验结果与前述数值模拟结果一致,验证了数值模拟的准确性。

图 19 弯曲阶段不同截面控制单元导体疲劳寿命云图

Fig.19 Fatigue life contours of unit conductors with varying cross-sections in the bending phase

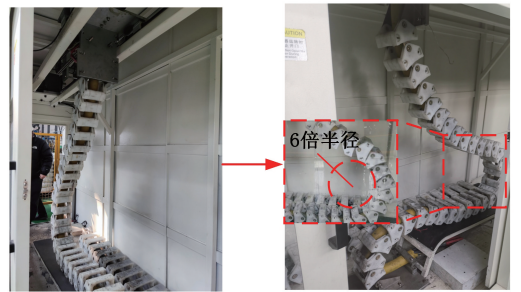


图 20 电缆弯曲试验

Fig.20 Cable bending test

#### 5 结论

1) 弯曲工况下动力单元股线越靠近外层,受到的应力值越大。随着成缆节径比的增大,等效应力也随之增大,成缆节径比为 4、5、6 时,电缆应力较为接近,分别为 139、142、151 MPa;而成缆节径比为 7 时,动力单元股线的应力水平较高,为 180 MPa。综合考虑, MCP-0.66/1.14 3 \* 95 + 1 \* 25 型号电缆成缆节径比为 6 时最为适宜。

2) 弯曲工况下动力单元股线等效最大应力从

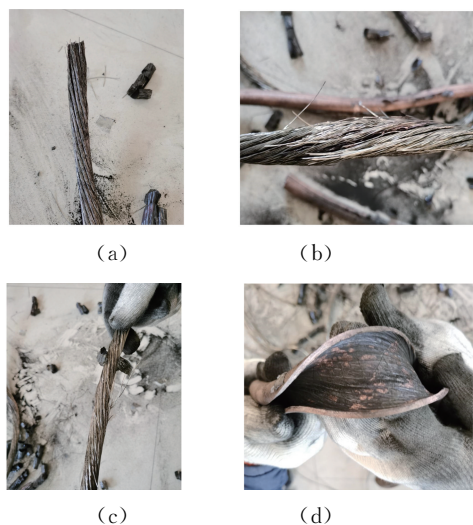


图 21 弯曲试验结果

Fig.21 Bending test results

大到小依次为 RLR、RRL、RLL、RRR (即 238、212、180、175 MPa)。RRR 这种捻制方式虽然受力较小,但它容易松散且承载后伸长率大;而 RLL 捻制方式虽受力略大于 RRR,但其综合性能较 RRR 捻制方式更优。

3)KA4、KA6、KA10 三种控制单元导体在直线阶段寿命较大,且截面积越大,疲劳寿命越大,均达到  $10^7$  以上;弯曲阶段控制单元导体截面积越大,疲劳寿命越小,KA4 控制单元导体进入弯曲至脱离弯曲寿命较 KA6、KA10 两种截面分别提高 7700 次和 18 470 次。

4)通过弯曲试验,发现弯曲次数与有限元结果较为吻合,动力单元最外层股线断股比较严重且动力单元绝缘内壁出现磨损现象,与数值模拟结果一致,验证了数值模拟的准确性。

#### 参考文献:

- [1] 金鑫. 采煤机电缆抗弯曲特性及检测方法研究[J]. 中国高科技, 2023(17):75-77.  
JIN Xin. Research on Bending Resistance and Testing Methods of Shearer Cables[J]. China High-Tech, 2023(17):75-77.
- [2] 郭娟娟. CICC 多级超导电缆弯曲性质研究[D]. 兰州:兰州大学, 2022:31-41.  
GUO Juanjuan. Study on Bending Properties of CICC Multistage Superconducting Cable [D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2022:31-41.
- [3] 胡玉娇. 光纤复合海底电缆机械行为的有限元模型研究[D]. 北京:华北电力大学, 2018:22-37.  
HU Yujiao. Study on Mechanical Behavior of Optical Fiber Composite Submarine Cable by Finite Element Model[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2018:22-37.

- [4] 鞠森. 基于光纤应变的海底电缆弯曲特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017:26-37.  
JU Sen. Study on Bending Characteristics of Submarine Cable Based on Optical Fiber Strain[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2017:26-37.
- [5] 刘天怡. CICC 股线等效模量及力学性能分析[D]. 兰州:兰州大学, 2019:20-31.  
LIU Tianyi. Equivalent Modeling and Mechanical Property Analysis of CICC Strands[D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2019:20-31.
- [6] 李志杰. 多级扭绞结构的弹塑性力学行为研究[D]. 兰州:兰州大学, 2021:38-52.  
LI Zhijie. Study on Elastoplastic Mechanical Behavior of Multi-level Twisted Structure[D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2021:38-52.
- [7] de MENEZES E A W, MARCZAK R J. Comparative Analysis of Different Approaches for Computing Axial, Torsional and Bending Stiffnesses of Cables and Wire Ropes[J]. Engineering Structures, 2021, 241:112487.
- [8] 蒋丽宾. 两类绳缆型结构的力-电行为研究[D]. 兰州:兰州大学, 2022:53-70.  
JIANG Libin. Study on the Force-electric Behavior of Two Types of Rope-cable Type Structures[D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2022:53-70.
- [9] YAN Jun, HU Haitao, LU Hailong, et al. Experimental Study on the Influence of Cross-section Type of Marine Cable Conductors on the Bending Performance[J]. China Ocean Engineering, 2022, 36(4):629-637.
- [10] HOSEINIE S H, ATAEI M, KHALOKAKAIE R, et al. Reliability Analysis of the Cable System of Drum Shearer Using the Power Law Process Model[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2012, 26(4):309-323.
- [11] BRUSKI D. Determination of the Bending Properties of Wire Rope Used in Cable Barrier Systems [J]. Materials, 2020, 13(17):3842.
- [12] 孟凡明, 何敬, 陈原培, 等. 椭圆股和三角股钢丝绳扭转及弯曲性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(3):8-16.  
MENG Fanming, HE Jing, CHEN Yuanpei, et al. Analysis of Torsional and Bending Performances between Spiral Oval and Spiral Triangular Strand Ropes[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(3):8-16.
- [13] 兰贤辉, 李会武, 王锦群, 等. Pro/E 轨迹参数 trajpar 的应用[J]. 机械工程师, 2015(9):102-103.

- LAN Xianhui, LI Huiwu, WANG Jinqun, et al. Application Summary and Discussion of Pro/E's Trajectory Parameter Trajpar[J]. Mechanical Engineer, 2015(9):102-103.
- [14] 韩潇然. 编织钢丝绳弯曲状态下力学与摩擦磨损性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2021:25-41.  
HAN Xiaoran. Research on the Mechanical and Friction and Wear Properties of Braided Steel Wire Rope under Bending Condition[D]. Jinan: University of Jinan, 2021:25-41.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [16] 艾建光, 姜峰, 言兰. TC4-DT 钛合金材料动态力学性能及其本构模型[J]. 中国机械工程, 2017, 28(5):607-616.  
AI Jianguang, JIANG Feng, YAN Lan. Dynamic Mechanics Behavior and Constitutive Model of TC4-DT Titanium Alloy Materials[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(5):607-616.
- [17] 朱传敏, 顾鹏, 刘丁豪, 等. 包含颈缩失稳的中厚钢板应力-应变关系[J]. 中国机械工程, 2020, 31(9):1037-1042.  
ZHU Chuanmin, GU Peng, LIU Dinghao, et al. Strain-stress Relation of Medium-thickness Steel Plates Including Necking Stages[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(9):1037-1042.
- [18] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿用电缆 第4部分: 额定电压 1.9/3.3kV 及以下采煤机金属屏蔽软电缆: MT/T 818.4—2009[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.  
State Administration of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Cables for Coal Mine—Part 4: Flexible Cables with Metallic Screen for Use with Coal Cutters of Rated voltages up to and Including 1.9/3.3 kV: MT/T 818.4—2009[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010.
- [19] 胡志伟. 海缆电气和机械故障对光纤温度/应变影响的建模分析和特征提取[D]. 北京: 华北电力大学, 2019:38-44.  
HU Zhiwei. Modeling Analysis and Feature Extraction of the Influence of Submarine Cable Electrical and Mechanical Faults on Optical Fiber Temperature/Strain[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019:38-44.
- [20] 柳小花. 光纤复合海底电缆扭转与磨损特性的有限元分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017:12-24.  
LIU Xiaohua. Finite Element Analysis of Torsion and Wear Characteristics of Optical Fiber Composite Submarine Cable [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017:12-24.
- [21] 张雯玥. 高铁施工装备用液压盘式制动器极值预测及疲劳寿命分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023:54-62.  
ZHANG Wenyue. Extreme Value Prediction and Fatigue Life Analysis of Hydraulic Disc Brake for High-speed Rail Construction Equipment[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023: 54-62.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 赵丽娟, 女, 1964年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为工矿装备自动化与智能化、机械系统动力学分析与控制、机电液一体化系统的仿真与应用。E-mail: zlj2120@163.com。  
白忠健\* (通信作者), 男, 1997年生, 博士研究生。研究方向为工矿装备自动化与智能化。E-mail: xb19971030@163.com。

**本文引用格式:**

赵丽娟, 白忠健, 谢波, 等. 采煤机移动软电缆机械特性研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(2): 359-368.

ZHAO Lijuan, BAI Zhongjian, XIE Bo, et al. Study of Mechanical Characteristics of Soft Electrical Cables in Mining Machines [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2): 359-368.

(上接第 358 页)

(编辑 陈 勇)

作者简介: 王永青, 1969年生, 男, 教授、博士研究生导师。研究方向为测量-加工一体化制造理论与技术、装备, 在机测量理论与技术等。E-mail: yqwang@dlut.edu.cn。李 特\* (通信作者), 1987年生, 男, 副教授、博士研究生导师。研究方向为仿生机器人、特种加工机器人、机器人化智能制造等。E-mail: teli@dlut.edu.cn。

**本文引用格式:**

王永青, 艾靖超, 李特, 等. 顾及刚度特性的管内机器人高精度焊缝打磨方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(2): 351-358.

WANG Yongqing, AI Jingchao, LI Te, et al. High Precision Weld Grinding Method of In-pipe Robots Considering Stiffness Characteristics[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2): 351-358.