

偏心加载对吸能玻璃钢锚杆力学性能影响的研究

唐治^{1,2} 贾敦炜² 吴志伟² 吕进国² 常得志²

(1. 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院, 鄂尔多斯 017004)

(2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 阜新 123000)

摘要:【目的】针对煤矿巷道支护中锚杆受偏心载荷作用导致性能下降的问题,探究偏转角对吸能玻璃钢锚杆力学性能的影响规律,确定其正常工作角度范围,为同类巷道支护设计提供参考。【方法】首先,通过力学分析推导了吸能玻璃钢锚杆最大偏转角与玻璃钢杆体的应力-应变柔度矩阵关系,明确了偏心载荷下锚杆受力特性与适用判定准则;其次,通过万能试验机拉伸试验,测定了玻璃钢杆体关键力学参数,为数值模拟提供基础数据;然后,基于Hashin失效准则编写了Vumat子程序,采用Abaqus有限元软件建立了常规与吸能玻璃钢锚杆数值模型;最后,对比分析了静载与不同冲击参数动载作用下锚杆的核心力学指标。【结果】结果表明,静载作用下,两类锚杆的破断力、延伸率、吸能量均随偏转角增大成非线性衰减,确定吸能玻璃钢锚杆适用偏转角不大于4°;在4°偏转角工况下,该锚杆动态力学指标显著优于常规锚杆,吸能量约为常规锚杆的12倍,具备优异的抗冲击与吸能特性;不同冲击工况下,4°偏转角的该锚杆各项指标均满足预设适用准则。

关键词: 吸能玻璃钢锚杆; 偏心加载; 冲击能量; 冲击速度; 抗冲击性能

中图分类号: TD353 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.04.011

0 引言

锚杆支护作为一种简便、经济、高效的主动支护方式,已在我国煤矿巷道工程中得到广泛应用^[1-5]。煤矿地下工程领域中,螺纹钢锚杆凭借施工便捷、强度高优势,长期占据巷道支护材料的主流地位,但工程实践中存在3类固有缺陷。①螺纹钢锚杆在潮湿环境中易腐蚀。例如,2004—2010年间,澳大利亚Saraji、Goonyella Riverside等矿出现了锚杆因腐蚀而导致锚杆过早失效的问题^[6];2005年,焦作冯营矿锚杆腐蚀面积达83%^[7];2017年,山西省新丰煤矿发生锚杆应力腐蚀失效事故^[8]。②螺纹钢锚杆与采煤机摩擦容易产生火花,导致瓦斯爆炸等严重事故。例如,2020年8月20日,山东梁宝寺煤矿因采煤机截割过程中滚筒截齿与中间巷锚杆锚索等摩擦产生火花,导致煤尘爆炸;2021年10月20日,山西潞安集团左权阜生煤业公司因金属支护材料相互摩擦产生火花,引起瓦斯爆炸。③螺纹钢锚杆容易划伤运煤皮带,增加生产成本,影响生产效率。例如,2010年4月21日,河南平宝煤业公司某矿因锚杆划破运输皮带,导致皮带撕裂80 m,影响了正常生产。

相较于螺纹钢锚杆,玻璃钢(Fiber Reinforced

Plastic, FRP)锚杆具备耐腐蚀、与采煤机摩擦无火花、不划伤运煤皮带等优势,国内外学者对其进行了大量的研究,取得了诸多成果。李国宸等^[9]通过拉伸试验与数值模拟,对比分析了FRP锚杆与螺纹钢锚杆的力学性能及支护效果。曾新芳^[10]以FRP锚杆为研究对象,研发了锦纶-玻纤、涤纶-玻纤2种新型FRP锚杆。杨波涛^[11]设计了高强度玻璃钢锚杆。张建民^[12]将玻纤中空注浆锚杆应用于井下支护试验,取得了良好的支护效果。高瑞等^[13]综合分析可知,在使用过程中新型玻璃钢锚杆的性能优越,经济效益、支护效果良好。王福海等^[14]提出了玻璃钢锚杆杆体材质及锚杆尾部结构改进方案,进行了沿空巷道采煤帮支护工业性试验。姜琦^[15]通过数值模拟表明,现有的玻璃钢锚杆与钢筋锚杆支护效果相当,满足当前回采巷道的支护需求。NGO等^[16]通过试验验证了FRP锚杆可在非冲击地压巷道中有效替代螺纹钢锚杆。但是,常规FRP锚杆存在延伸率低、抗冲击性能差的固有缺陷,属于刚性支护材料,不利于冲击地压巷道支护。TANG等^{[17][18]}⁶⁷²⁶为了克服玻璃钢锚杆现有的缺点,设计研发了一种吸能玻璃钢锚杆,研究表明,该锚杆具有可重复的变形破坏模式和恒定的屈服力。

实际工程中,由于托盘的中心孔直径略大于锚杆

收稿日期: 2024-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52474224); 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院校地科技合作培育项目(YJY-XD-2023-001); 辽宁省教育厅基本科研项目(重点项目)(LJ212410147001)

作者简介: 唐治,男,1983年生,云南宣威人,博士,教授; 主要研究方向为矿山灾害力学; E-mail: tangzhi0127@163.com。

贾敦炜(通信作者),男,1999年生,山西大同人,硕士研究生; 主要研究方向为矿山灾害力学; E-mail: 15524895019@163.com。

引用格式: 唐治,贾敦炜,吴志伟,等. 偏心加载对吸能玻璃钢锚杆力学性能影响的研究[J]. 机械强度,2026,48(4):91-102.

TANG Zhi, JIA Dunwei, WU Zhiwei, et al. Study on the influence of eccentric loading on the mechanical properties of energy-absorbing FRP bolts anchor[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(4): 91-102.



免费获取

的直径,锚杆会发生一定角度的偏转,并且岩壁或煤壁不平整等导致锚杆尾部经常受偏心载荷的作用,均对锚杆的力学性能产生一定影响^[19],吸能玻璃钢锚杆会因偏转角过大而无法正常工作。因此,本文通过理论分析明确偏心载荷下锚杆的受力特性与理论最大偏转角,提出吸能FRP锚杆的性能有效性判定准则;通过拉伸试验测定玻璃钢杆体的关键力学参数;采用数值模拟方法,系统分析静载与冲击动载作用下,偏转角对吸能FRP锚杆破断力、延伸率、吸能量、抗冲击时间等核心指标的影响规律,明确锚杆正常工作的偏转角适用范围,为吸能FRP锚杆的井下工程应用提供支撑。

1 吸能玻璃钢锚杆及偏转角定义

1.1 吸能玻璃钢锚杆

吸能FRP锚杆主要由玻璃钢杆体、尾部连接杆、托盘、吸能套筒、扩径圆台、螺母等部件组成^{[18]6726},整体横截面如图1所示。玻璃钢杆体右端加工有外螺纹,托盘、吸能套筒依次穿入杆体后,通过螺母旋紧实现锚固。

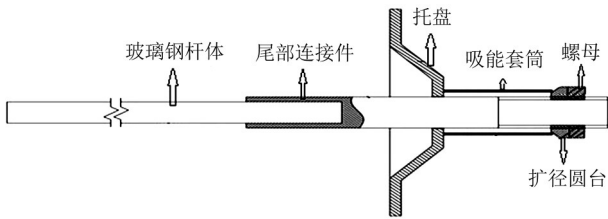


图1 吸能玻璃钢锚杆整体横截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall cross-section of an energy-absorbing FRP bolt

玻璃钢杆体为吸能玻璃钢锚杆的主体部分,能够承受一定的拉力和压力。托盘为吸能玻璃钢锚杆的支撑部分,能够承受锚固力的传递和分散。吸能套筒为锚杆的核心吸能防冲部件,采用薄壁金属圆管结构,设计长度为80~150 mm,可通过塑性变形吸收冲击地压等动载产生的冲击能量,提升锚杆的工作稳定性与安全性,其设计承载力取玻璃钢杆体轴向破断力的85%^{[18]6726}。扩径圆台左段为圆台形、右段为圆柱形,圆台细端直径略小于吸能套筒内径,粗端直径与圆柱段直径一致,且大于吸能套筒内径;螺母为锚杆的紧固部件,用于将托盘、吸能套筒紧固于杆体,防止装配部件松动、脱落。

1.2 吸能玻璃钢锚杆最大偏转角定义

理想情况下,锚杆应垂直打入围岩或煤壁,此时锚杆偏角为 0° ,定义中心孔允许锚杆发生偏转的最大角度为最大偏转角。当偏转角超过该限值时,托盘与承载面无法紧密贴合,在预紧力作用下托盘将使杆体发生弯曲甚至剪断,导致吸能FRP锚杆失效。

为明确吸能FRP锚杆的理论最大偏转角,对偏心

载荷作用下的锚杆尾部开展受力分析。为简化计算,假定锚杆尾部处于纯偏心载荷工作状态,且载荷以集中力形式作用于螺母内切圆周线上^[20]。受力分析模型如图2所示,锚杆尾部截面圆周载荷分布曲线如图3所示。

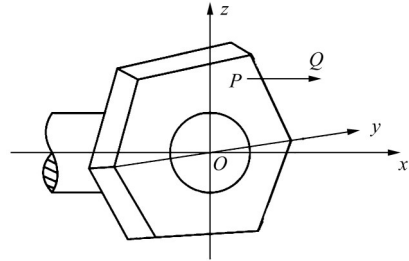


图2 锚杆尾部偏心载荷力学分析模型

Fig. 2 Mechanical analysis model of the eccentric load at bolt tail

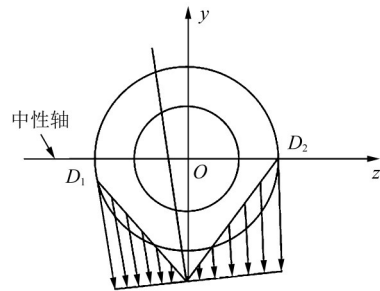


图3 锚杆尾部截面圆周载荷分布曲线

Fig. 3 Circumferential load distribution curves of the bolt tail section

以锚杆轴线为 x 轴,截面的两个形心主惯性轴为 y 轴、 z 轴。设偏心拉力 Q 平行于杆体轴线,其在截面上的作用点 P 位于第一象限,坐标为 (y_Q, z_Q) ,如图2所示。

先将偏心拉力 Q 向 y 轴上的点 $(y_Q, 0)$ 简化,再向形心 $(0, 0)$ 简化,得到作用在 xz 平面内的弯矩 M_y^0 为

$$M_y^0 = Qz_Q \quad (1)$$

作用在 xy 平面内的弯矩 M_z^0 为

$$M_z^0 = Qy_Q \quad (2)$$

在上述载荷作用下,锚杆尾部发生轴向拉伸与双向纯弯曲的组合变形,各横截面的轴向力与弯矩保持恒定,即轴向力 $N = Q$,弯矩 $M_y = M_y^0 = Qz_Q, M_z = M_z^0 = Qy_Q$ 。

由材料力学理论可知,杆横截面上任意一点 (y, z) 所受的应力 σ 为

$$\sigma = \frac{Q}{A} + \frac{M_y z}{I_y} + \frac{M_z y}{I_z} = \frac{Q}{A} \left(1 + \frac{z_Q z}{i_y^2} + \frac{y_Q y}{i_z^2} \right) \quad (3)$$

式中, A 为锚杆尾部的有效横截面积; I_y, I_z 分别为横截面对 y 轴、 z 轴的惯性矩; i_y, i_z 分别为横截面对 y 轴、 z 轴的惯性半径。

令正应力 $\sigma = 0$,可得中性轴方程为

$$1 + \frac{z_Q z}{i_y^2} + \frac{y_Q y}{i_z^2} = 0 \quad (4)$$

式(4)所表示的中性轴为1条不通过截面形心 O

的直线。在式(4)中分别令 $z = 0$ 和 $y = 0$, 可求得中性轴在 y 轴、 z 轴上的截距为

$$\begin{cases} a_y = -\frac{i_z^2}{y_0} \\ a_z = -\frac{i_y^2}{z_0} \end{cases} \quad (5)$$

在 yz 平面内, 过点 $(0, \frac{i_y^2}{z_0})$ 作中性轴的垂线, 可得

锚杆尾部截面圆周载荷分布曲线(图 3), 进而确定截面圆周上的高应力点 D_1, D_2 。

为求出锚杆尾部横截面上最危险点的正应力, 假设拉力 Q 作用在 z 轴上且在螺母内切圆周上, 如 P' 点处。因锚杆尾部圆截面周界上的点均为危险点, D 点为最危险点, 则 $y = 0$ 。由式(3)可得 D 点的正应力 σ_D 为

$$\sigma_D = \frac{Q}{A} + (Q \frac{s}{2} \frac{d}{2}) / (\frac{\pi d^4}{64}) = \frac{Q}{A} (1 + \frac{4s}{d}) \quad (6)$$

式中, s 为螺母内切圆的直径; d 为锚杆尾部螺纹的公称直径。

s/d 一般为 1.5, 则 $\sigma_D = 7\sigma_{尾}$ 。若不计参数 s 的影响, 则 $\sigma_D = 5\sigma_{尾}$ 。结果表明, 在集中力简化的偏心载荷作用下, 锚杆尾部最危险点的正应力可达轴向受拉状态下的 5~7 倍, 说明偏心载荷不利于锚杆尾部的工作状态。

尽管玻璃钢杆体具有抗拉强度高的特点, 但由于 FRP 材料不具有塑性变形能力, 延伸率低, 当锚杆尾部受偏心载荷作用后, 锚尾局部点应力急剧升高, 在高应力作用下, 会引起锚杆尾部圆截面应力最大处首先出现裂纹, 裂纹逐渐扩展至整个截面, 最终导致锚杆尾部断裂失效。

为充分发挥杆体的轴向拉伸性能, 对托盘-杆体装配结构的理论最大偏转角开展几何分析。锚杆与托盘的位置关系简化如图 4 所示。图 4 中, θ 为锚杆的偏转角, 由几何关系可得

$$\frac{22}{\cos \theta} + 10 \tan \theta = 25 \quad (7)$$

解得 $\theta = 13.4^\circ$ 。

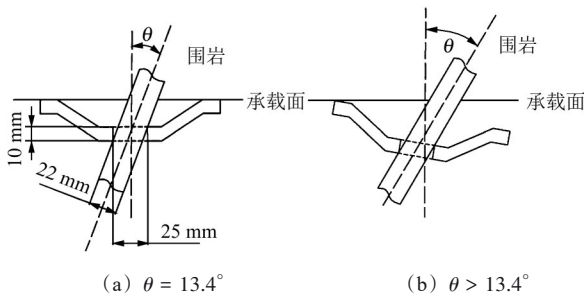


图 4 托盘与杆体几何位置关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the geometric position relation between tray and rod body

由图 4 可知, 杆体与托盘中心孔的理论最大偏转角为 13.4° [图 4(a)], 当偏转角度小于 13.4° 时, 托盘可与承载面紧密贴合; 当偏转角度大于 13.4° 时, 托盘与承载面无法完全贴合 [图 4(b)], 直接影响了托盘与承载面之间的接触效果。

为保证偏心载荷作用下, 吸能 FRP 锚杆可充分发挥其性能, 提出以下性能有效性判定准则, 锚杆需同时满足全部准则方可判定为有效:

- 1) 偏载作用下, 吸能套筒变形过程中的承载力为杆体轴向拉伸破断力的 85%~95%。
- 2) 偏载作用下, 吸能玻璃钢锚杆的破断力应不小于其轴向拉伸破断力的 85%。
- 3) 偏载作用下, 吸能玻璃钢锚杆的吸能量应高于其轴向拉伸时吸能量的 75%。
- 4) 偏载作用下, 吸能玻璃钢锚杆的延伸率应高于其轴向拉伸时延伸率的 80%。

2 静载下偏心加载模拟

2.1 玻璃钢杆体本构模型

玻璃钢杆体为正交各向异性材料, 存在 3 个互相正交的材料性能对称平面, 对应 3 个互相正交的材料主轴。沿材料主方向的坐标系中的应力-应变关系为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} & 0 & 0 & 0 \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为沿材料 3 个互相正交的主方向(1、2、3 方向)的正应力; $\tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{12}$ 分别为作用在 2-3、3-1、1-2 平面内的切应力; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为沿材料 1、2、3 主方向的正应变; $\gamma_{23}, \gamma_{31}, \gamma_{12}$ 分别为在 2-3、3-1、1-2 平面内的工程切应变; D_{ij} 为正交各向异性材料的刚度矩阵元素, $i, j = 1, 2, \dots, 6$ 。

由式(8)可知, 正应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 和切应变 $\gamma_{23}, \gamma_{31}, \gamma_{12}$ 之间无耦合作用(例如 $D_{14} = 0$)。同样地, 切应力和正应变之间也无耦合作用。

同样地, 可用柔度矩阵表示应变-应力关系, 即

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, C_{ij} 为正交各向异性材料的柔度矩阵元素, $i, j = 1, 2, \dots, 6$ 。

采用工程常数(弹性模量、泊松比、剪切模量)表

示的柔度矩阵物理意义更明确,其表达式为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, E_1, E_2, E_3 分别为 1、2、3 方向上的弹性模量; ν_{ij} 为应力在 i' 方向作用时 j' 方向横向应变的泊松比; G_{23}, G_{31}, G_{12} 分别为 2-3、3-1、1-2 平面的剪切模量。

正交各向异性材料的柔度矩阵为对称矩阵,即

$$C_{i'j'} = C_{j'i'} \quad (11)$$

把工程常数代入式(11)可得

$$\frac{\nu_{i'j'}}{E_{i'}} = \frac{\nu_{j'i'}}{E_{j'}}, \quad i', j' = 1, 2, 3 \quad (12)$$

在实际应用中,玻璃钢杆体的厚度方向上的尺寸与其他方向上的尺寸相比很小,可简化为平面应力状态进行应变-应力分析。即取 $\sigma_3 = 0, \tau_{23} = 0, \tau_{31} = 0$, 可得 $\varepsilon_3 = C_{13}\sigma_1 + C_{23}\sigma_2, \gamma_{23} = 0, \gamma_{31} = 0$ 。

同时,应变-应力关系可简化为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $C_{11} = \frac{1}{E_1}, C_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, C_{22} = \frac{1}{E_2}, C_{66} = \frac{1}{G_{12}}$ 。

由式(13)可知,简化后吸能 FRP 锚杆的应变-应力关系仅与泊松比(ν_{12}, ν_{21})、弹性模量(E_1, E_2)、剪切模量(G_{12})有关,因此数值模拟中仅需考虑上述参数。

复合材料中常用的宏观失效准则为:①基于比较单一应力和对应强度来判断材料失效的准则,如最大应力准则;②考虑复合材料失效机制的准则,如 Hashin 失效准则^[21]、Hashin-Shokrieh 失效准则等。Hashin 失效准则考虑了复合材料在不同方向上的各向异性,并区分了复合材料失效模式,因而得到广泛应用。

选用 Hashin 失效准则来预测玻璃钢材料的性能表现,判断失效的模式共有 4 种,分别是纤维拉伸、压缩失效和基体拉伸、压缩失效。

1) 纤维拉伸失效模式:

$$e_{ft} = \left(\frac{\sigma_1}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1, \sigma_1 \geq 0 \quad (14)$$

2) 纤维压缩失效模式:

$$e_{fc} = \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 \geq 1, \sigma_1 < 0 \quad (15)$$

3) 基体拉伸失效模式:

$$\begin{cases} e_{mt} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_1^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \\ \sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

4) 基体压缩失效模式:

$$\begin{cases} e_{mc} = \frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \\ \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \\ \sigma_{22} + \sigma_{33} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中, e_{ft} 为纤维拉伸失效损伤指数; e_{fc} 为纤维压缩失效损伤指数; e_{mt} 为基体拉伸失效损伤指数; e_{mc} 为基体压缩失效损伤指数; X_1 为纵向抗拉强度; X_c 为纵向抗压强度; Y_1 为横向抗拉强度; Y_c 为横向抗压强度; S_{12}, S_{13}, S_{23} 分别为材料在 1-2、1-3、2-3 平面内的剪切强度。

2.2 杆体参数测定

采用微机屏显式液压万能试验机开展玻璃钢杆体轴向拉伸试验,试验机主要由加载系统、控制系统与显示系统 3 部分组成。选取 3 段玻璃钢杆体加工为试件并进行拉伸试验,玻璃钢杆体如图 5 所示,具体尺寸如表 1 所示。



图 5 玻璃钢杆体试件

Fig. 5 FRP rod specimen

表 1 玻璃钢杆体试件几何尺寸

Tab. 1 Geometric dimensions of the FRP rod specimens

编号	直径/mm	长度/mm
试件 1	22	68
试件 2	22	68
试件 3	22	68

为保证试件的一致性,试验所用的原材料是同一根直径为 22 mm 的玻璃钢杆体。玻璃钢杆体横向抗压强度较低,为避免试验过程中夹持部位先于标距段发生压溃失效,试验前将试件两端与钢管胶接加固。

试验在室温环境下进行,正式试验前单独用 1 个试件对万能试验机进行测试,确认设备运行正常后开始正式试验。采用位移控制模式施加轴向载荷,根据试件尺寸设置拉伸速率为 6 mm/min。当试件发生断裂或载荷从峰值快速下降时,试验机自动停止加载,全程记录载荷-位移曲线。试验前试件如图 6 所示,试验后

试件破坏形态如图 7 所示,试验结果如表 2 所示。

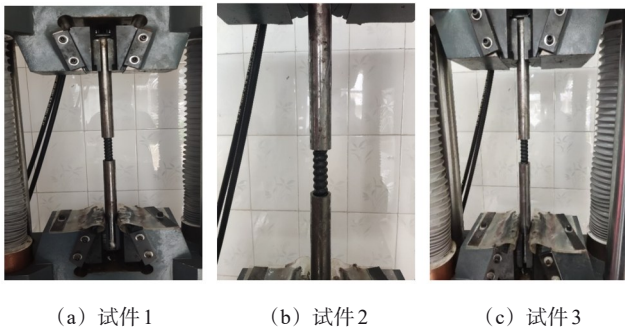


图 6 拉伸试验前玻璃钢杆体试件

Fig. 6 FRP rod specimens before the tensile test



图 7 拉伸试验后玻璃钢杆体试件破坏形态

Fig. 7 Failure modes of the FRP rod specimens after the tensile test

表 2 玻璃钢杆体拉伸试验结果

Tab. 2 Tensile test results of the FRP rod

编号	破断载荷/ kN	延伸率/%	抗拉强度/ MPa	应变	弹性模量/ GPa
试件 1	220.1	1.45	579.0	0.014 5	39.9
试件 2	215.7	1.57	567.4	0.015 7	36.1
试件 3	220.7	1.49	580.6	0.014 9	39.0

吸能 FRP 锚杆的破断载荷取平均值 218.8 kN,由设计原则可得吸能套筒承载力大小为 190.4 kN。根据薄壁圆管承载力与内径、壁厚的关联关系^[22],计算吸能套筒和扩径圆台尺寸,具体尺寸如表 3 所示。

表 3 吸能套筒与扩径圆台几何尺寸

Tab. 3 Geometric dimensions of energy-absorbing sleeve and expanding round platform

参数	值
吸能套筒内径/mm	40
吸能套筒壁厚/mm	4
扩径圆台锥度/(°)	26.5
扩径圆台高度/mm	35
扩径圆台细端直径/mm	30
扩径圆台粗端直径/mm	50

2.3 锚杆建模与边界设定

基于 Hashin 失效准则,利用 Abaqus 有限元软件,编写 Vumat 子程序对玻璃钢锚杆进行有限元分析计算。分别建立常规玻璃钢锚杆和吸能玻璃钢锚杆有限元模型,研究吸能 FRP 锚杆在静力拉伸下的力学

性能。

常规 FRP 锚杆模型包含杆体、托盘、螺母 3 个核心部件。其中,杆体长为 2 400 mm,直径为 22 mm;托盘尺寸为 150 mm×150 mm×10 mm;托盘中心圆孔直径为 25 mm;螺母边长为 18.5 mm,厚度为 18 mm。吸能 FRP 锚杆模型主要部件包括杆体、托盘、吸能套筒、扩径圆台、螺母。其中,杆体、托盘、螺母的几何尺寸与常规 FRP 锚杆模型相同,吸能套筒、扩径圆台尺寸如表 3 所示。采用显式算法模拟拉伸过程。两个模型的杆体均为 FRP 材料,密度为 2.2 g/cm³,具体力学参数如表 4 所示。

表 4 FRP 杆体材料力学性能参数

Tab. 4 Mechanical property parameters of the FRP rod material

参数	值
X 方向弹性模量/GPa	38
Y 方向弹性模量/GPa	10
X-Y 平面泊松比	0.32
Y-X 平面泊松比	0.32
X-Y 平面剪切模量/GPa	3.3

FRP 杆体采用 3D Hashin 损伤准则^[23-24],损伤模型参数如表 5 所示。托盘、扩径圆台、螺母、吸能套筒的材料均为钢材,密度为 7.85 g/cm³;弹性模量为 210 GPa;泊松比为 0.3;屈服强度为 400 MPa。

表 5 玻璃钢杆体 Hashin 损伤模型参数

Tab. 5 Hashin damage model parameters for the FRP rod

参数	值	参数	值
纵向抗拉强度/MPa	576	纵向拉伸断裂能/(kJ/m ²)	150
纵向抗压强度/MPa	500	纵向压缩断裂能/(kJ/m ²)	20
横向抗拉强度/MPa	322	横向拉伸断裂能/(kJ/m ²)	4.5
横向抗压强度/MPa	80.6	横向压缩断裂能/(kJ/m ²)	4.5
纵向抗剪切强度/MPa	54.5		
横向抗剪切强度/MPa	161.2		

吸能套筒表面设置自接触,其余部件接触面均设置为面-面接触,接触算法采用罚函数法,摩擦因数取 0.3。模型的边界条件为:杆体左端完全固定,螺母端仅允许轴向位移。采用 1 块直径大于杆体直径的带孔刚性板从托盘左侧向右位移 150 mm。在网格模块中,将杆体网格尺寸设置为 3,托盘网格尺寸设置为 5,薄壁圆管网格尺寸设置为 3;单元类型采用 C3D8R,即 8 节点 6 面体线性缩减积分单元。设置沙漏控制为刚度,设置单元删除。

2.4 模拟结果及分析

分别对偏心角度为 3°、4°、5°、8°、12°的常规玻璃钢锚杆和吸能玻璃钢锚杆进行静载拉伸数值模拟。12°偏转角下,常规 FRP 锚杆静载拉伸的应力云图如图 8 所示,吸能 FRP 锚杆静载拉伸的应力云图如图 9

所示。

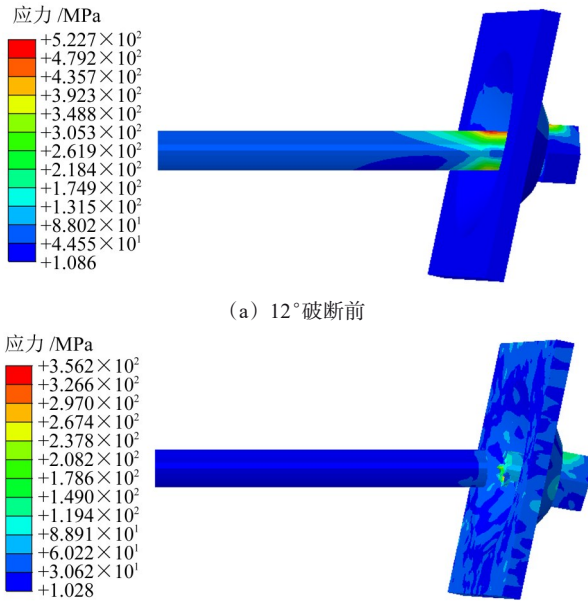


图8 12°偏转角下常规玻璃钢锚杆静载拉伸应力云图

Fig. 8 Stress contour plots of the conventional FRP bolt under static tension at the deflection angle of 12°

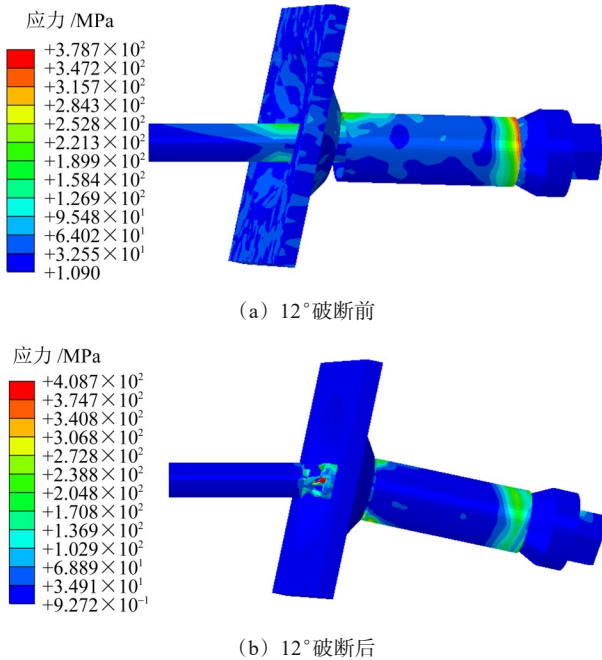


图9 12°偏转角下吸能玻璃钢锚杆静载拉伸应力云图

Fig. 9 Stress contour plots of the energy-absorbing FRP bolt under static tension at the deflection angle of 12°

偏转角为0°时,锚杆仅发生轴向拉伸变形,无附加弯曲变形。偏转角为3°~12°时,锚杆托盘至螺母段发生轴向拉伸与弯曲的组合变形。偏心载荷作用下,锚杆尾部出现明显的应力集中现象,应力峰值区率先发生损伤失效,裂纹逐渐扩展至整个截面,最终导致锚杆整体破断。结果表明,偏转角的存在使锚杆的变形模式从单向轴向拉伸转变为“拉伸+弯曲”的组合变形。

不同偏转角下,常规FRP锚杆的力-位移曲线如图

10所示,吸能FRP锚杆的力-位移曲线如图11所示;常规FRP锚杆的能量-位移曲线如图12所示,吸能FRP锚杆的能量-位移曲线如图13所示。不同偏转角下,常规FRP锚杆与吸能FRP锚杆的静载力学性能分别如表6、表7所示。

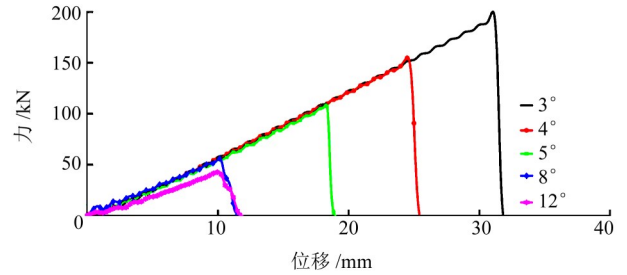


图10 不同偏转角下常规玻璃钢锚杆力-位移曲线

Fig. 10 Force-displacement curves of the conventional FRP bolt under different deflection angles

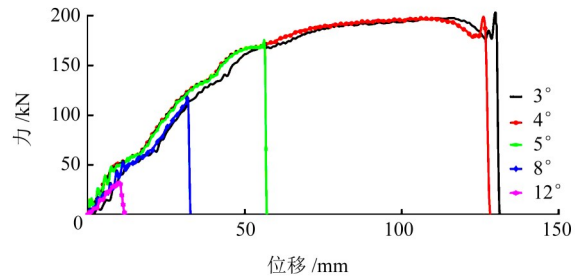


图11 不同偏转角下吸能玻璃钢锚杆力-位移曲线

Fig. 11 Force-displacement curves of the energy-absorbing FRP bolt under different deflection angles

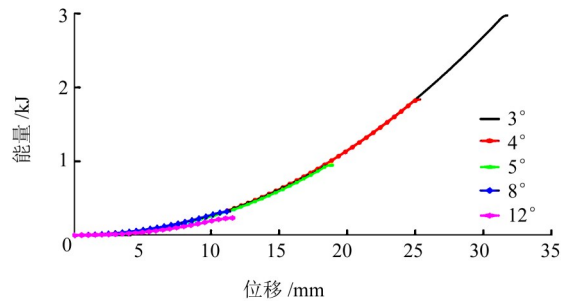


图12 不同偏转角下常规玻璃钢锚杆吸能量-位移曲线

Fig. 12 Energy absorption-displacement curves of the conventional FRP bolt under different deflection angles

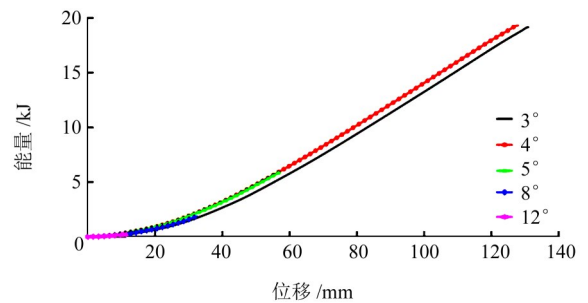


图13 不同偏转角下吸能玻璃钢锚杆吸能量-位移曲线

Fig. 13 Energy absorption-displacement curves of the energy-absorbing FRP bolt under different deflection angles

表6、表7中,力下降速度为破断力的平均变化速度,延伸率下降速度为延伸率的平均变化速度,能量

下降速度为吸收能量的平均变化速度。

分析图 10~图 13、表 6~表 7 可得到以下结论:

1) 当偏转角为 3°、4°、5°、8°、12° 时, 常规 FRP 锚杆的破断力分别为 200.1、154.9、109.2、56.1、42.6 kN, 延

伸率分别为 1.295%、1.021%、0.762%、0.423%、0.415%, 吸能量分别为 2.97、1.84、0.95、0.32、0.23 kJ。在 0°~12° 内, 随着偏转角的增加, 常规 FRP 锚杆的破断力、延伸率、吸能量均成非线性减小。

表 6 不同偏转角下常规玻璃钢锚杆静载力学性能

Tab. 6 Static mechanical properties of the conventional FRP bolt under different deflection angles

角度/(°)	破断力/kN	吸能量/kJ	延伸率/%	力下降速度/[kN/(°)]	延伸率下降速度/%	能量下降速度/[kJ/(°)]
0	220.9	3.95	1.541	—	—	—
3	200.1	2.97	1.295	6.9	0.082	0.327
4	154.9	1.84	1.021	45.2	0.274	1.130
5	109.2	0.95	0.762	45.7	0.259	0.890
8	56.1	0.32	0.423	17.7	0.113	0.210
12	42.6	0.23	0.415	3.4	0.002	0.023

表 7 不同偏转角下吸能玻璃钢锚杆静载力学性能

Tab. 7 Static mechanical properties of the energy-absorbing FRP bolt under different deflection angles

角度/(°)	破断力/kN	吸能量/kJ	延伸率/%	力下降速度/[kN/(°)]	延伸率下降速度/%	能量下降速度/[kJ/(°)]
0	221.6	21.34	5.617	—	—	—
3	203.4	19.15	5.408	6.1	0.070	0.730
4	199.0	19.02	5.250	4.4	0.158	0.130
5	175.5	5.84	2.342	23.5	2.908	13.180
8	117.5	1.85	1.320	19.3	0.341	1.330
12	33.0	0.20	0.422	21.1	0.225	0.413

2) 当偏转角不大于 4° 时, 吸能套筒具有完整的变形过程, 且变形过程中承载力保持在 189~196 kN。当偏转角度大于 5° 时, 吸能套筒未发生充分塑性变形, 锚杆已发生破断失效。

3) 当偏转角分别为 3°、4°、5°、8°、12° 时, 吸能玻璃钢锚杆的破断力分别为 203.4、199.0、175.5、117.5、33.0 kN, 分别为其轴向拉伸破断力的 91.8%、89.8%、79.2%、53.0%、14.9%。

4) 当偏转角分别为 3°、4°、5°、8°、12° 时, 吸能 FRP 锚杆的延伸率分别为 5.408%、5.250%、2.342%、1.320%、0.422%, 分别为其轴向拉伸时延伸率的 96.3%、93.5%、41.7%、23.5%、7.5%。

5) 当偏转角分别为 3°、4°、5°、8°、12° 时, 吸能 FRP 锚杆的吸能量分别为 19.15、19.02、5.84、1.85、0.20 kJ, 分别为其轴向拉伸时吸能量的 89.7%、89.1%、27.4%、8.7%、0.9%。

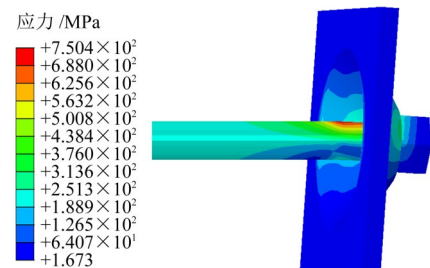
综上, 根据偏心载荷下吸能 FRP 锚杆的性能有效性判定准则, 当偏转角不大于 4° 时, 锚杆各项性能指标可同时满足全部准则要求。

3 动载下偏心加载模拟

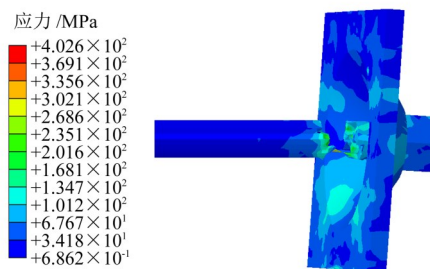
基于静载偏心加载模拟结果, 选取 4° 偏转角工况, 采用 Abaqus 有限元软件开展冲击加载数值模拟。采用 1 个具有质量和速度的刚体模拟围岩冲击能量, 锚杆参数设置与静载时相同, 将刚体与托盘之间的夹角设置为 4°。

3.1 冲击能量影响分析

设置冲击速度为 2 m/s, 冲击能量分别为 30、100、300 kJ, 对偏转角为 4° 的常规玻璃钢锚杆和吸能玻璃钢锚杆进行冲击加载模拟。常规玻璃钢锚杆部分应力云图如图 14 所示(以 300 kJ 为例), 吸能玻璃钢锚杆部分应力云图如图 15 所示(以 300 kJ 为例)。2 种锚杆的力-位移曲线分别如图 16、图 17 所示, 力学性能如表 8 所示。



(a) 300 kJ 破断前



(b) 300 kJ 破断后

图 14 300 kJ 冲击能量下常规玻璃钢锚杆应力云图

Fig. 14 Deformation contour plots of the conventional FRP bolt at the impact energy of 300 kJ

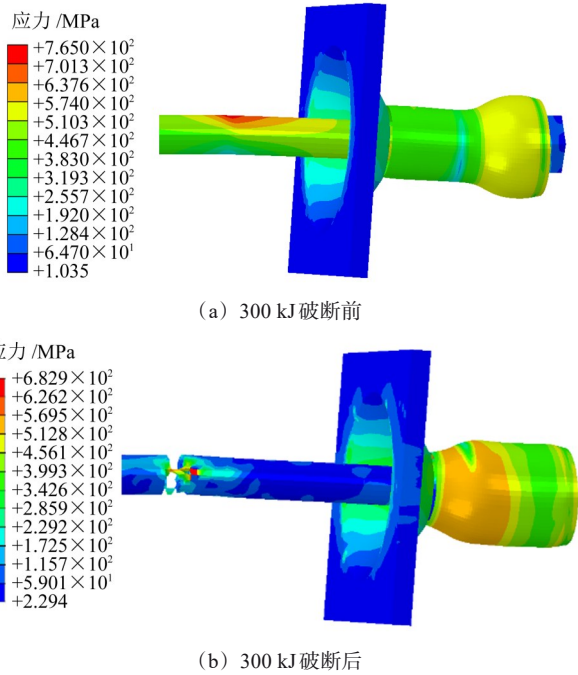


图 15 300 kJ 冲击能量下吸能玻璃钢锚杆变形云图

Fig. 15 Deformation contour plots of the energy-absorbing FRP bolt at the impact energy of 300 kJ

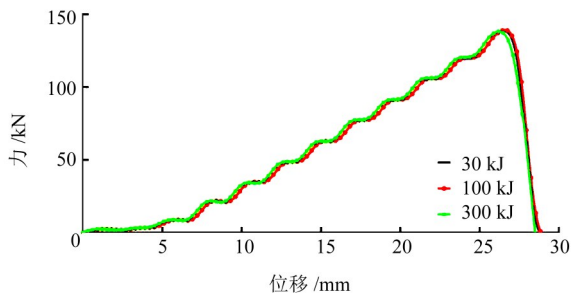


图 16 不同冲击能量下常规玻璃钢锚杆力-位移曲线

Fig. 16 Force-displacement curves of the conventional FRP bolt under different impact energies

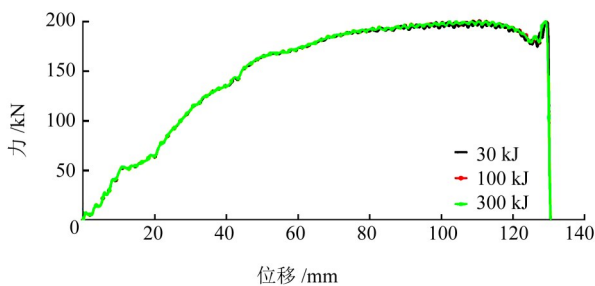


图 17 不同冲击能量下吸能玻璃钢锚杆力-位移曲线

Fig. 17 Force-displacement curves of the energy-absorbing FRP bolt under different impact energies

数值模拟中充分考虑了纤维拉伸、基体拉伸等损伤模式。由于FRP锚杆由玻璃纤维与树脂基体复合而成,受拉过程中树脂基体率先发生屈服,后续载荷主要由玻璃纤维承担,锚杆应力呈缓慢增长趋势。受纤维与树脂基体缠绕成型工艺的影响,杆体各处树脂基体不会同步屈服,因此力-位移曲线中出现多段缓慢增长阶段。

表 8 不同冲击能量下两种锚杆力学性能对比

Tab. 8 Comparison of mechanical properties of two bolt types under different impact energies

锚杆	冲击能量/kJ	破断位移/mm	延伸率/%	破断载荷/kN	吸能量/kJ
常规玻璃钢锚杆	30	26.6	1.108	138.3	1.62
	100	26.6	1.108	139.1	1.63
	300	26.2	1.092	138.2	1.64
吸能玻璃钢锚杆	30	129.6	5.400	199.3	19.46
	100	129.3	5.388	199.4	19.55
	300	129.1	5.379	200.6	19.55

常规玻璃钢锚杆的吸能量-位移如图 18 所示;吸能玻璃钢锚杆的吸能量-位移如图 19 所示。

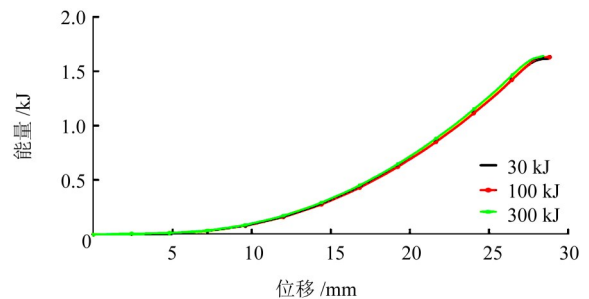


图 18 不同冲击能量下常规玻璃钢锚杆吸能量-位移曲线

Fig. 18 Energy absorption-displacement curves of the conventional FRP bolt under different impact energies

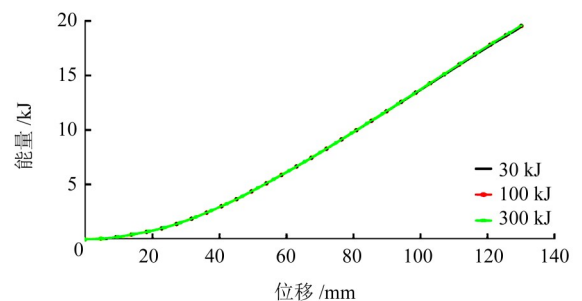


图 19 不同冲击能量下吸能玻璃钢锚杆吸能量-位移曲线

Fig. 19 Energy absorption-displacement curves of the energy-absorbing FRP bolt under different impact energies

分析图 14~图 19、表 8 可得到以下结论:

1)在 30、100、300 kJ 冲击作用下,吸能套筒变形充分,且承载力始终保持在 190~198 kN。根据偏载作用下吸能 FRP 锚杆的适用准则,满足对吸能套筒的要求。

2)在 30、100、300 kJ 冲击作用下,吸能 FRP 锚杆的破断力分别为 199.3、199.4、200.6 kN,为其轴向拉伸破断力的 89.9%、90.0%、90.0%。根据偏载作用下吸能玻璃钢锚杆的适用准则,满足对破断力的要求。

3)在 30、100、300 kJ 冲击作用下,吸能 FRP 锚杆的吸能量分别为 19.46、19.55、19.55 kJ,为其轴向拉伸时吸能量的 91.2%、91.6%、91.6%。根据偏载作用下

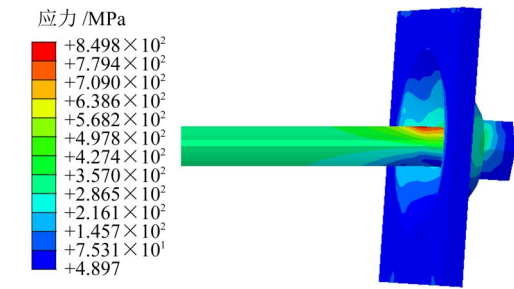
吸能FRP锚杆的适用准则,满足对吸能量的要求。

4)在30、100、300 kJ冲击作用下,吸能FRP锚杆的延伸率分别为5.400%、5.388%、5.379%,为其轴向拉伸时延伸率的96.1%、95.9%、95.8%。根据偏载作用下吸能玻璃钢锚杆的适用准则,满足对延伸率的要求。

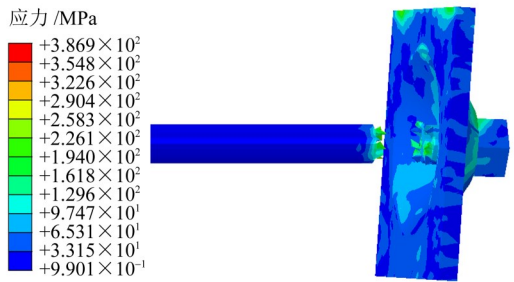
3.2 冲击速度影响分析

设置冲击能量为30 kJ,冲击速度为2、3、4、5、6 m/s,对偏转角度为4°的吸能FRP锚杆进行冲击加载模拟。

常规FRP锚杆应力引起的变形情况如图20所示(以冲击速度5 m/s为例),吸能FRP锚杆应力引起的变形情况如图21所示(以冲击速度5 m/s为例);常规FRP锚杆的力-时间曲线如图22所示,吸能FRP锚杆的力-时间曲线如图23所示;常规FRP锚杆的力-位移曲线如图24所示,吸能FRP锚杆的力-位移曲线如图25所示;常规FRP锚杆的吸能量-位移曲线如图26所示,吸能FRP锚杆的吸能量-位移曲线如图27所示。2种锚杆力学性能如表9所示。



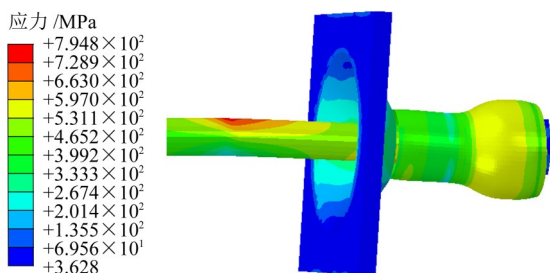
(a) 5 m/s 破断前



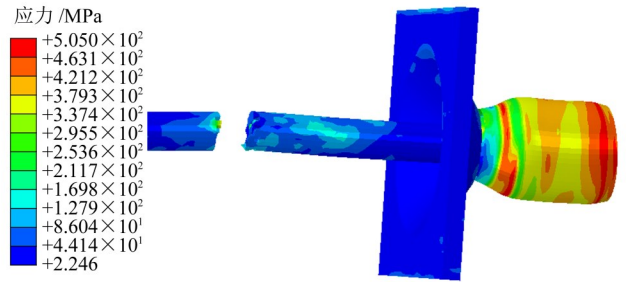
(b) 5 m/s 破断后

图 20 5 m/s 冲击速度下常规玻璃钢锚杆应力云图

Fig. 20 Deformation contour plots of the conventional FRP bolt at the impact velocity of 5 m/s



(a) 5 m/s 破断前



(b) 5 m/s 破断后

图 21 5 m/s 冲击速度下吸能玻璃钢锚杆应力云图

Fig. 21 Deformation contour plots of the energy-absorbing FRP bolt at the impact velocity of 5 m/s

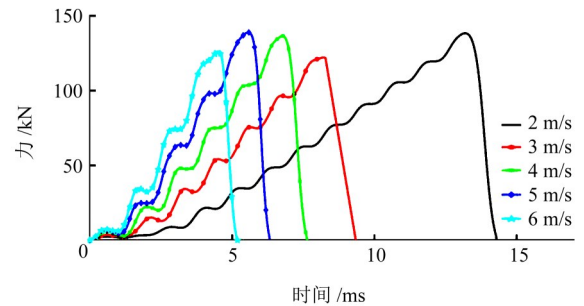


图 22 不同冲击速度下常规玻璃钢锚杆力-时间曲线

Fig. 22 Force-time curves of the conventional FRP bolt under different impact velocities

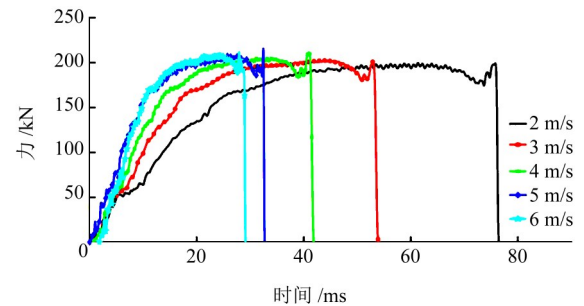


图 23 不同冲击速度下吸能玻璃钢锚杆力-时间曲线

Fig. 23 Force-time curves of the energy-absorbing FRP bolt under different impact velocities

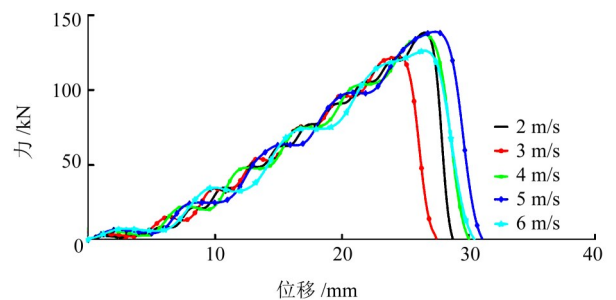


图 24 不同冲击速度下常规玻璃钢锚杆力-位移曲线

Fig. 24 Force-displacement curves of the conventional FRP bolt under different impact velocities

由图20~图27、表9分析,得到以下结论:

1)冲击速度为2、3、4、5、6 m/s时,吸能套筒变形充分且承载力始终保持在190~199 kN。根据偏载作用下吸能FRP锚杆的适用准则,满足对吸能套筒的要求。

2)冲击速度为2、3、4、5、6 m/s时,吸能FRP锚杆的破断力分别为199.2、202.0、211.5、202.0、211.7 kN,为

其轴向拉伸破断力的 89.9%、91.2%、95.4%、91.2%、95.5%。根据偏载作用下吸能 FRP 锚杆的适用准则, 满足对破断力的要求。

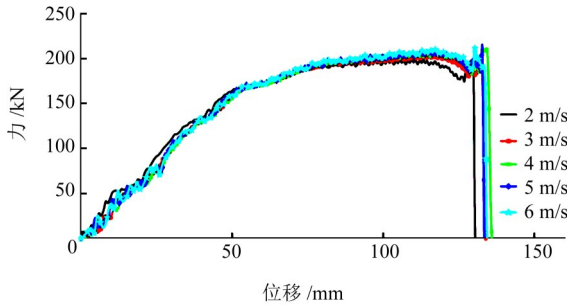


图 25 不同冲击速度下吸能玻璃钢锚杆力-位移曲线

Fig. 25 Force-displacement curves of the energy-absorbing FRP bolt under different impact velocities

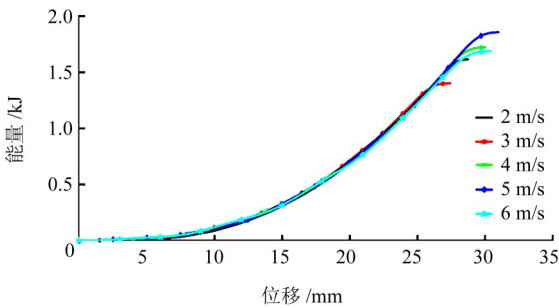


图 26 不同冲击速度下常规玻璃钢锚杆吸能量-位移曲线

Fig. 26 Energy absorption-displacement curves of the conventional FRP bolt under different impact velocities

3) 冲击速度为 2、3、4、5、6 m/s 时, 吸能 FRP 锚杆的吸能量分别为 19.46、19.75、20.25、20.06、20.29 kJ, 为其轴向拉伸时吸能量的 91.2%、92.5%、94.9%、

94.0%、95.1%。根据偏载作用下吸能 FRP 锚杆的适用准则, 满足对吸能量的要求。

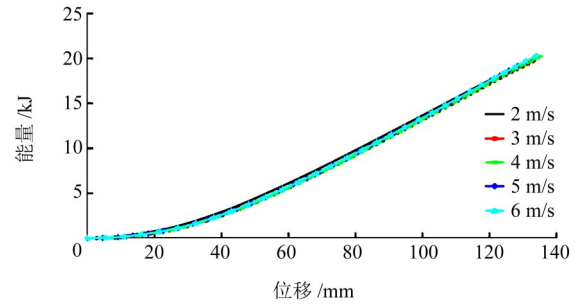


图 27 不同冲击速度下吸能玻璃钢锚杆吸能量-位移曲线

Fig. 27 Energy absorption-displacement curves of the energy-absorbing FRP bolt under different impact velocities

4) 冲击速度为 2、3、4、5、6 m/s 时, 吸能 FRP 锚杆的延伸率分别为 5.400%、5.513%、5.583%、5.513%、5.433%, 为其轴向拉伸时延伸率的 96.1%、98.1%、99.4%、98.1%、96.7%。根据偏载作用下吸能 FRP 锚杆的适用准则, 满足对延伸率的要求。

5) 冲击速度为 2、3、4、5、6 m/s 时, 吸能 FRP 锚杆的抗冲击时间分别为 75.80、52.97、41.00、32.44、27.89 ms, 分别为常规玻璃钢锚杆的 5.74 倍、6.41 倍、6.05 倍、5.80 倍、6.21 倍, 说明吸能 FRP 锚杆的抗冲击性能更优。

6) 冲击速度为 2、3、4、5、6 m/s 时, 吸能 FRP 锚杆的吸能量分别为 19.46、19.75、20.25、20.06、20.29 kJ, 分别为常规 FRP 锚杆的 12.01 倍、14.11 倍、11.77 倍、10.78 倍、12.01 倍, 说明吸能 FRP 锚杆具有最佳的吸能能力。

表 9 不同冲击速度下 2 种锚杆力学性能对比

Tab. 9 Comparison of mechanical properties of two bolt types under different impact velocities

锚杆	冲击速度/(m/s)	破断位移/mm	延伸率/%	破断力/kN	抗冲击时间/ms	吸能量/kJ
常规玻璃钢锚杆	2	26.56	1.107	138.3	13.20	1.62
	3	24.57	1.024	122.1	8.26	1.40
	4	26.65	1.110	136.5	6.78	1.72
	5	27.36	1.140	138.9	5.59	1.86
	6	26.53	1.105	126.3	4.49	1.69
吸能玻璃钢锚杆	2	129.6	5.400	199.2	75.80	19.46
	3	132.3	5.513	202.0	52.97	19.75
	4	134.0	5.583	211.5	41.00	20.25
	5	132.3	5.513	202.0	32.44	20.06
	6	130.4	5.433	211.7	27.89	20.29

4 结论

通过试验确定了吸能 FRP 锚杆的主要力学参数, 并通过数值模拟评估偏转角对吸能 FRP 锚杆抗冲击时间、破断力、延伸率、吸能量的影响, 确定了吸能 FRP

锚杆正常工作的角度范围, 分析了锚杆受偏心动、静载荷下吸能 FRP 锚杆的力学性能。得出如下主要结论:

1) 推导了偏心载荷作用下锚杆尾部最危险点的正应力表达式, 并提出偏载作用下吸能玻璃钢锚杆的

适用准则。在偏载作用下,吸能套筒变形过程中的承载力为杆体轴向拉伸破断力的85%~95%;吸能玻璃钢锚杆破断力应不小于其轴向拉伸破断力的85%,吸能量应高于其轴向拉伸时吸能量的75%,延伸率应高于其轴向拉伸时延伸率的80%。同时满足以上各项准则,即表明其性能表现符合预期,可视为有效。

2)在0~12°时,常规FRP锚杆与吸能FRP锚杆的破断力、延伸率、吸能量均随偏转角增大呈非线性衰减;结合有效性判定准则,确定吸能FRP锚杆的适用偏转角不大于4°。

3)当偏转角为4°时,在30、100、300 kJ冲击能量作用时,吸能FRP锚杆的平均延伸率、平均破断力、平均吸能量分别为常规FRP锚杆的4.87倍、1.44倍、12.01倍,说明在冲击能量作用下,吸能FRP锚杆具有良好的延伸性能、较大的承载力和较高的吸能量。

4)当偏转角为4°时,冲击速度为2、3、4、5、6 m/s时,吸能FRP锚杆的平均延伸率、平均破断力、平均吸能量分别为常规玻璃钢锚杆的4.88倍、1.44倍、12.01倍,说明在冲击速度作用下,吸能FRP锚杆具有良好的延伸性能、较大的承载力和较高的吸能量。

参考文献(References)

- [1] 张自政,柏建彪,王襄禹,等.我国沿空留巷围岩控制技术研究与展望[J].煤炭学报,2023,48(11):3979-4000.
ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Review and development of surrounding rock control technology for gob-side entry retaining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3979-4000. (In Chinese)
- [2] 潘一山,齐庆新,王爱文,等.煤矿冲击地压巷道三级支护理论与技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1585-1594.
PAN Yishan, QI Qingxin, WANG Aiwen, et al. Theory and technology of three levels support in bump-prone roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1585-1594. (In Chinese)
- [3] LIN H, LEI D X, ZHANG C S, et al. Deterioration of non-persistent rock joints: a focus on impact of freeze-thaw cycles[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 135: 104515.
- [4] YANG H T, LIN H, CHEN Y F, et al. Influence of wing crack propagation on the failure process and strength of fractured specimens[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(1): 71.
- [5] 李英明,石建军,马念杰,等.新型玻璃钢锚杆及其在煤帮支护中的应用研究[J].中国煤炭,2009,35(7):41-43.
LI Yingming, SHI Jianjun, MA Nianjie, et al. A novel glass fiber bolt and its application in coal rib support[J]. China Coal, 2009, 35(7): 41-43. (In Chinese)
- [6] CRAIG P, SERKAN S, HAGAN P, et al. Investigations into the corrosive environments contributing to premature failure of Australian coal mine rock bolts[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(1): 59-64.
- [7] 赵健,冀文政,张文巾,等.现场早期砂浆锚杆腐蚀现状的取样研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(增刊1):1157-1162.
ZHAO Jian, JI Wenzheng, ZHANG Wenjin, et al. Sampling investigation of on situation early anchor corrosion in-situ[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(Suppl. 1): 1157-1162. (In Chinese)
- [8] 潘继良,李鹏,席迅,等.地下工程锚固结构腐蚀耐久性研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(9):1-13.
PAN Jiliang, LI Peng, XI Xun, et al. Research progress on corrosion durability of anchorage structures in underground engineering[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 1-13. (In Chinese)
- [9] 李国宸,高峰.马道头矿玻璃钢锚杆煤帮支护分析[J].现代工业经济和信息化,2022,12(12):27-30.
LI Guochen, GAO Feng. Experimental study on tensile strength of FRP bolt in Madaotou Mine[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(12): 27-30. (In Chinese)
- [10] 曾新芳.新型玻璃钢锚杆的试验研究[D].北京:北京化工大学,2009:21-30.
ZENG Xinfang. Experimental study on a new type FRP bolt[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009: 21-30. (In Chinese)
- [11] 杨波涛.高强度预应力玻璃钢锚杆支护技术研究[J].煤,2015,24(8):10-13.
YANG Botao. High strength and prestress fiber reinforce plastic cable supporting technology[J]. Coal, 2015, 24(8): 10-13. (In Chinese)
- [12] 张建民.玻璃纤维中空注浆锚杆支护在煤矿中的应用[J].科技创新与应用,2014,4(8):100.
ZHANG Jianmin. Application of glass fiber reinforced plastic hollow grouting bolt support in coal mine[J]. Technology Innovation and Application, 2014, 4(8): 100. (In Chinese)
- [13] 高瑞,黄栋梁,于兴.新型玻璃钢锚杆支护在东怀煤矿的应用[J].科学技术创新,2020(32):151-153.
GAO Rui, HUANG Dongliang, YU Xing. Application of new FRP bolt support in Donghuai coal mine[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(32): 151-153. (In Chinese)
- [14] 王福海,杨永刚,杨张杰,等.新型高强玻璃钢锚杆研究及应用[J].煤炭技术,2022,41(11):78-81.
WANG Fuhai, YANG Yonggang, YANG Zhangjie, et al. Research and application of new type of high strength FRP bolt[J]. Coal Technology, 2022, 41(11): 78-81. (In Chinese)
- [15] 姜琦.玻璃钢锚杆支护性能的数值分析[J].山东煤炭科技,2016,34(10):13-14.
JIANG Qi. Research on numerical simulation analysis of glass fiber reinforced plastic bolt in tunnel support[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2016, 34(10): 13-14. (In Chinese)
- [16] NGO T T, PHAM T M, HAO H, et al. Performance of monolithic and dry joints with GFRP bolts reinforced with different fibres and GFRP bars under impact loading[J]. Engineering Structures, 2021, 240: 112341.

- [17] TANG Z, WU H, LV J G, et al. Study on mechanical characteristics of energy-absorbing and anti-scour bolts [J]. *Complexity*, 2021, 2021: 8876517.
- [18] TANG Z, CHANG D Z, CAI X Q, et al. Design of pressure energy-absorbing FRP anchors and numerical analysis of mechanical properties[J]. *Sustainability*, 2023, 15(8): 6726.
- [19] 郭金刚, 李耀晖, 何富连, 等. 基于残余剪切强度的全长黏结锚杆拉拔模拟[J]. *岩土力学*, 2021, 42(11): 2953-2960.
- GUO Jingang, LI Yaohui, HE Fulian, et al. Pullout simulation on fully grouted rock bolts based on residual shear strength[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(11): 2953-2960. (In Chinese)
- [20] 李英明, 马念杰. 玻璃钢锚杆尾部新结构及工程应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010: 15-20.
- LI Yingming, MA Nianjie. New structure of FRP anchor tail and its engineering application[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010: 15-20. (In Chinese)
- [21] HASHIN Z, ROTEM A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 1973, 7(4): 448-464.
- [22] 唐治. 自移式吸能防冲巷道支架研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014: 60-68.
- TANG Zhi. Study on self-moving energy absorption and anti-impact roadway support[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014: 60-68. (In Chinese)
- [23] RAHIMIAN KOLOOR S S, KARIMZADEH A, YIDRIS N, et al. An energy-based concept for yielding of multidirectional FRP composite structures using a mesoscale lamina damage model[J]. *Polymers*, 2020, 12(1): 157.
- [24] WANG F J, JIN X H, WANG X N, et al. Numerical investigation on the influences of processing conditions on damage in the CFRTP cutting using a novel elastic-plastic damage model [J]. *Applied Composite Materials*, 2022, 29(5): 2063-2094.

Study on the influence of eccentric loading on the mechanical properties of energy-absorbing FRP anchor bolts

TANG Zhi^{1,2} JIA Dunwei² WU Zhiwei² LÜ Jinguo² CHANG Dezhi²

(1. Erdos Research Institute, Liaoning Technical University, Erdos 017004, China)

(2. School of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problem of performance degradation of bolts under eccentric loading in coal mine roadway support, the influence law of deflection angle on the mechanical properties of energy-absorbing FRP bolts was investigated, and the normal working angle range was determined to provide reference for similar roadway support design. [Methods] Firstly, the maximum deflection angle of energy-absorbing fiber reinforced plastic (FRP) bolts and the stress-strain compliance matrix relationship of FRP rod body were derived through mechanical analysis, and the stress characteristics and applicable judgment criteria of bolts under eccentric loading were clarified; Secondly, the key mechanical parameters of FRP rod body were measured by tensile test with universal testing machine to provide basic data for numerical simulation; Subsequently, the Vumat subroutine was compiled based on Hashin failure criterion, and the numerical models of conventional and energy-absorbing FRP bolts were established by Abaqus finite element software; Finally, the core mechanical indexes such as elongation, breaking force and energy absorption of bolts under static load and dynamic load with different impact parameters were compared and analyzed. [Results] Under static load, the breaking force, elongation and energy absorption of the two types of bolts decrease nonlinearly with the increase of deflection angle, and the applicable deflection angle of energy-absorbing FRP bolts is determined to be no more than 4° ; Under the working condition of 4° deflection angle, the dynamic mechanical indexes of the bolt are significantly better than those of conventional FRP bolts, and its energy absorption is about 12 times that of conventional bolts, which has excellent impact resistance and energy absorption characteristics; Under different impact conditions, all indexes of the bolt with 4° deflection angle meet the preset applicable criteria.

Key words: Energy-absorbing FRP anchor bolt; Eccentric loading; Impact energy; Impact velocity; Impact resistance

Corresponding author: JIA Dunwei, E-mail: 15524895019@163.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (52474224); Erdos Research Institute of Liaoning Technical University Local Science and Technology Cooperation Incubation Project (YJY-XD-2023-001); Basic Scientific Research Project of Liaoning Provincial Department of Education (Key Project) (LJ212410147001)

Received: 2024-07-08

(编辑: 李立)