偏心锚固过程锚固剂搅拌状态及锚杆反扭矩响应特征研究

付孟雄[1,2,3],刘嘉润[1],刘少伟[1,3],贺德印[1,3],贾后省[1,3],姚丙傲[4],席晓龙[4]
(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000;2. 河南理工大学 地质资源与地质工程博士后科研流动站,河南 焦作 454000;3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心,河南 焦作 454000;
4. 河南省新郑煤电有限公司,河南 新郑 451100)

摘要: 锚固剂搅拌过程是树脂锚杆良好锚固力形成的关键阶段. 锚固偏心作为锚杆常见的锚固缺陷,偏心程度可能对锚固剂的搅拌状态及锚杆的受力特征产生影响. 因此,本文利用理论分析、数值模拟及实验室试验方法,探究了锚固偏心条件下锚固剂的搅拌状态,分析了锚杆反扭矩在不同锚固偏心度下的响应特征. 结果表明:偏心锚固会影响锚固剂搅拌状态,导致树脂锚固剂封袋破碎程度降低,树脂锚固剂分布不均,锚固剂固化结构致密性及完整性下降,进而影响搅拌过程锚杆的反扭矩响应特征,固化结构稳定性更差,会削弱锚固系统的承载能力. 搅拌过程锚杆反扭矩-时间曲线呈现出先显著上升后趋于平稳的趋势,分段特征明显. 在锚固剂穿透阶段,锚杆反扭矩变化率的均方根值、波峰因子、方差均随着偏心度的增加而增加. 在锚杆抵达孔底后的锚固剂搅拌阶段,锚杆反扭矩均值随着锚杆偏心度的增加而增加. 以锚固剂搅拌过程中锚杆反扭矩变化率特征值及反扭矩均值作为识别锚杆偏心度的指标,提出了基于锚杆反扭矩的锚固偏心度识别设想. 研究结论可为实现锚杆锚固质量无损、快速识别提供理论参考.

关键词: 锚杆支护;偏心锚固;锚固剂搅拌;锚杆反扭矩;无损检测
中图分类号: TD 353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2026)01-0104-14

Study on the mixing state of resin cartridge and characteristics of bolt reaction torque during eccentric anchoring process

FU Mengxiong[1,2,3], LIU Jiarun[1], LIU Shaowei[1,3], HE Deyin[1,3], JIA Housheng[1,3], YAO Bing'ao[4], XI Xiaolong[4]
(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Postdoctoral Station of Geological Resource and Geological Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 4. Xinzheng Coal Electricity, Zhengzhou Coal Industry Group, Xinzheng, Henan 451100, China)

Abstract: The mixing process of resin is a critical stage for the formation of adequate anchoring force of bolts. As a common anchoring defect of bolt, the degree of eccentricity may affect the mix-

收稿日期: 2025-08-15 **修回日期:** 2025-10-13 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250330
基金项目: 中原科技创新领军人才项目(244200510013);中国博士后科学基金面上项目(2025M771779);河南理工大学杰出青年基金项目(J2025-1)
第一作者: 付孟雄(1989—),男,河北省保定市人,副教授,硕士生导师.
通信作者: 刘少伟(1977—),男,辽宁省锦州市人,教授,博士生导师. E-mail: lswxll@126.com
引用格式: 付孟雄,刘嘉润,刘少伟,等. 偏心锚固过程锚固剂搅拌状态及锚杆反扭矩响应特征研究[J]. 中国矿业大学学报,2026,55(1):104-117.
FU Mengxiong, LIU Jiarun, LIU Shaowei, et al. Study on the mixing state of resin cartridge and characteristics of bolt reaction torque during eccentric anchoring process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 104-117.

ing state of resin and the mechanical characteristics of bolt. Therefore, this paper uses theoretical analysis, numerical simulation and laboratory test methods to explore the mixing state of anchoring under the condition of anchoring eccentricity, and analyzes the response characteristics of bolt reaction torque under different anchoring eccentricity. The results show that eccentric anchoring adversely affects the mixing state of the resin. This leads to reduced breakdown of the resin pouches, uneven distribution of the resin mixture, and decreased compactness and integrity of the cured anchoring structure. Consequently, the reaction torque response characteristics of bolt during mixing are affected, resulting in poorer stability of the cured structure and ultimately weakening the load-bearing capacity of the anchoring system. The reaction torque-time curve of the bolt during mixing exhibits a distinct segmented characteristic, initially showing a significant rise followed by a tendency to stabilize. When the bolt passing through the resin cartridge, the root mean square(RMS) value, crest factor and variance of the change rate of bolt reaction torque increase with the eccentricity. In the mixing stage after the bolt reaches the bottom, the mean value of bolt reaction torque increases with the bolt eccentricity. Taking the characteristic value of bolt reaction torque change rate and the mean value of reaction torque during the mixing process of resin as the index to identify the bolt eccentricity, a tentative idea of identifying the anchoring eccentricity based on bolt reaction torque was proposed. The research conclusions provide a theoretical reference for the future realization of non-destructive and rapid assessment of bolt anchoring quality.

Key words: roof bolting; eccentric anchoring; resin cartridge mixing; bolt reaction torque; non-destructive testing

锚杆支护技术是矿山、岩土工程中应用最为广泛的支护技术，与传统被动支护技术相比，具有显著的技术及经济优势[1-3]. 树脂锚固剂作为锚杆与围岩的主要黏结剂，是树脂锚杆发挥高强度主动支护力的关键. 树脂锚固剂由树脂与固化剂2个部分组成，固化剂与树脂分别通过塑料封袋分开封装. 锚杆施工时，高速旋转的锚杆会将塑料封袋破碎，搅拌树脂与固化剂，使两者混合发生固化反应，从而完成锚固过程[4-6]. 相关研究表明，树脂锚固剂于锚固孔内的分布状态对于锚杆锚固质量具有显著影响[7-8].

树脂锚固剂搅拌是锚杆安装的关键步骤，搅拌效果直接影响着锚固质量. 文献[9-12]开展了一系列锚杆锚固试验，发现锚固剂搅拌时长、锚固孔参数、锚固剂环形厚度等因素均会对锚杆锚固质量产生影响. 文献[13-14]发现锚杆偏心是锚杆施工过程中的常见问题，会削弱锚固系统的承载能力，据此设计了一种锚杆锚固纠偏装置，可显著提高锚固质量. 文献[15]发现软弱破碎围岩锚固时，树脂锚固剂会快速流入孔壁裂隙，造成树脂流失，缩短了锚固长度，据此研发了一种锚固孔壁修复强化装置，可有效阻止树脂流失，提高锚固质量. 文献[16-19]开展了一系列锚杆端部形状优化试验，发现倒棱结构及双楔形结构锚杆具有较好的树脂搅拌效果. 此外，研究发现软弱破碎围岩条件下，通过锚固孔扩孔可在有限锚固长度内提高锚固系统承载能力[20-22].

基于锚杆、树脂锚固剂及锚固质量的紧密关系，有关学者尝试通过分析锚杆在外部激励作用下的响应特征信息间接判别锚固系统工况. 文献[23-25]认为可通过爆破振动冲击作用下锚杆的动态及静态响应特征无损检测锚杆-树脂-围岩界面的完整程度，这也是锚杆工况无损检测概念的首次提出. 此后，文献[26-28]提出了基于沿杆体传播的应力波、超声导波及电磁波等信号特征判别锚杆锚固质量及杆体缺陷的无损检测方法. 锚杆无损检测数据主要通过导波的相位谱分析、小波分析等方法进行处理，判断锚固缺陷及底端反射位置[29-31]. 近年，神经网络、深度学习逐步应用于锚杆无损检测信号的处理，在一定程度上提高了信号处理效率与准确性[32-34].

据前所述，锚杆与锚固剂的相互作用过程是良好锚固力形成的关键阶段，锚杆锚固质量往往取决于锚固剂的分布状态、密实度以及与锚杆的相互作用状态. 锚固偏心是锚杆锚固过程中的常见缺陷，锚固剂搅拌时，不同的锚杆姿态会直接影

响锚固结构的形态，从而造成锚固剂的搅拌状态与锚杆受力特征的差异．因此，本文利用理论分析、数值模拟及实验室试验方法，探究了锚固偏心条件下锚固剂的搅拌状态，分析了锚杆反扭矩在不同锚固偏心度下的响应特征，研究成果旨在揭示锚杆偏心锚固缺陷对锚固剂分布状态的影响，为实现基于锚杆反扭矩的锚固质量无损、实时识别提供一定理论参考．

1 树脂锚固剂搅拌状态与锚杆反扭矩的理论关系

1.1 锚固过程锚杆反扭矩计算

锚固剂搅拌过程可分为2个阶段：锚杆旋转穿透锚固剂阶段以及锚杆到达孔底后的搅拌阶段．分别对2个阶段建立理论模型，由于锚固剂封袋厚度极低(0.05～0.2 mm)，其对锚杆的阻力显著低于树脂对锚杆的作用力，同时为了简化模型，便于计算，做出以下假设：1)锚杆穿透锚固剂阶段，锚杆与树脂锚固剂的轴心始终与锚固孔的轴心平行；2)锚杆各处在穿透阶段中受锚固剂剪切阻力均相同；3)整个过程中，锚杆旋转速度及轴向进给速度均为定值；4)忽略锚固剂封袋对锚杆的阻力作用．力学模型如图1所示．

如图1a所示，锚杆旋转速度为ω、轴向进给速度为v，受到的轴向推力为P，锚杆刺破锚固剂封袋后与树脂、固化剂接触，杆体受到的剪切阻力为τ_{M1}，τ_{M1}，其合力则形成反扭矩M_1，存在沿锚杆轴向的扭矩平衡方程：

$$T-M_1=0, \tag{1}$$

式中　T为钻机对锚杆施加的扭矩．

锚杆进入锚固剂封袋内后，以锚杆轴心为旋转中心，杆体与锚固剂封袋组成的环形间隙中的树脂与固化剂随着锚杆快速转动，转速同样为ω，半径为r及$r+\mathrm{d}r$两层间的剪切应力为τ_{r1}，剪切速率为D_{r1}，表达式[35]分别为

$$\begin{cases}\tau_{\mathrm{r1}}=\eta(t)D_{\mathrm{r1}},\\ D_{\mathrm{r1}}=r\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}r},\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\eta(t)$为树脂与固化剂混合物的动力黏度，可视为搅拌时长t的函数．

同时，τ_{r1}可由两层间的扭矩$M_{1\mathrm{r}}$表示

$$\tau_{\mathrm{r1}}=\frac{F}{s}=\frac{M_{1\mathrm{r}}}{r\times 2\pi r}\mathrm{d}x, \tag{3}$$

式中：F为锚杆表面受力；s为锚杆周长；$\mathrm{d}x$为树脂锚固剂液面厚度．

联立式(2)和(3)可得

$$r\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}r}=\frac{M_{1\mathrm{r}}}{2\pi r^2\mathrm{d}x\eta(t)}. \tag{4}$$

两边积分可得

$$\int_0^{\omega}\mathrm{d}\omega=\frac{\mathrm{d}M_1}{2\pi r^2\mathrm{d}x\eta(t)}\int_{R_{\mathrm{b}}}^{R_{\mathrm{r}}}\frac{1}{r^3}\mathrm{d}r, \tag{5}$$

式中：$\mathrm{d}M_1$为长度为$\mathrm{d}x$的锚杆杆体所受的反扭矩；R_{r}为锚固剂药卷半径；R_{b}为锚杆半径．

$\mathrm{d}M_1$可进一步表示为

$$\mathrm{d}M_1=4\pi\omega\eta(t)\frac{R_{\mathrm{b}}^2R_{\mathrm{r}}^2}{R_{\mathrm{r}}^2-R_{\mathrm{b}}^2}\int_0^t v\mathrm{d}t. \tag{6}$$

则t时刻锚杆穿透阶段中所受反扭矩M_1为

$$M_1=4\pi\omega\eta(t)\frac{R_{\mathrm{b}}^2R_r^2}{R_{\mathrm{r}}^2-R_{\mathrm{b}}^2}vt. \tag{7}$$

同理，如图1b所示，锚杆到达孔底后长度为$\mathrm{d}x$的锚杆杆体所受的反扭矩$\mathrm{d}M_2$可表示为

$$\mathrm{d}M_2=4\pi\omega\eta(t)\frac{R_{\mathrm{b}}^2R_{\mathrm{h}}^2}{R_{\mathrm{h}}^2-R_{\mathrm{b}}^2}\int_0^{L_{\mathrm{r}}}\mathrm{d}x, \tag{8}$$

式中：R_{h}为锚固孔半径；L_{r}为锚固长度．

则t时刻，锚杆所受反扭矩M_2可表示为

$$M_2=4\pi\omega\eta(t)\frac{R_{\mathrm{b}}^2R_{\mathrm{h}}^2}{R_{\mathrm{h}}^2-R_{\mathrm{b}}^2}L_{\mathrm{r}}. \tag{9}$$

由式(7)及式(9)可知，锚固居中条件下，当锚固孔尺寸、锚杆及树脂锚固剂规格、锚杆转速及轴向进给速度为定值时，锚杆反扭矩主要与$\eta(t)$，L_{r}及t有关．

如图1a所示，偏心锚固条件下，半径为r及$r+\mathrm{d}r$两层间的剪切应力为τ'_{r1}，可表示为

$$\tau'_{\mathrm{r1}}=\frac{M'_{1\mathrm{r}}}{r\cdot S(n,r)\mathrm{d}x}, \tag{10}$$

式中：$M'_{1\mathrm{r}}$为两层间扭矩；$S(n,r)$为以锚杆轴心为圆心，半径为r的液层的有效弧长，可视为偏心距n与液层半径r的函数，$S(n,r)=r\left[2\pi-2\arcsin\left(2\sqrt{X(X-R_{\mathrm{r}})(X-r)(X-n)}/rn\right)\right]$，其中$X=0.5(R_{\mathrm{r}}+r+n)$．

长度为$\mathrm{d}x$的锚杆杆体所受的反扭矩$\mathrm{d}M'_1$可表示为

$$\mathrm{d}M'_1=\frac{\omega\eta(t)\int_0^t v\,\mathrm{d}t}{\int_{R_{\mathrm{b}}}^{R_{\mathrm{r}}+n}\dfrac{1}{S(n,r)r^2}\mathrm{d}r}. \tag{11}$$

根据式(11)可得 t 时刻锚杆穿透锚固剂过程中所受反扭矩 M'_1 表达式为

$$M'_1=\frac{\omega\eta(t)vt}{\int_{R_b}^{R_r+n}\frac{1}{S(n,r)r^2}\mathrm{d}r}. \tag{12}$$

同理，如图 1b 所示，锚杆到达孔底后，长度为 $\mathrm{d}x$ 的锚杆杆体所受树脂与固化剂混合物的反扭矩 $\mathrm{d}M'_2$ 由两部分组成，即

$$\mathrm{d}M'_2=\mathrm{d}M'_{21}+\mathrm{d}M'_{22}, \tag{13}$$

式中：$\mathrm{d}M'_{21}$ 和 $\mathrm{d}M'_{22}$ 分别为以锚杆轴心为中心，长度为 $\mathrm{d}x$ 的锚杆杆体两侧表面所受反扭矩.

$\mathrm{d}M'_{21}$ 可表示为

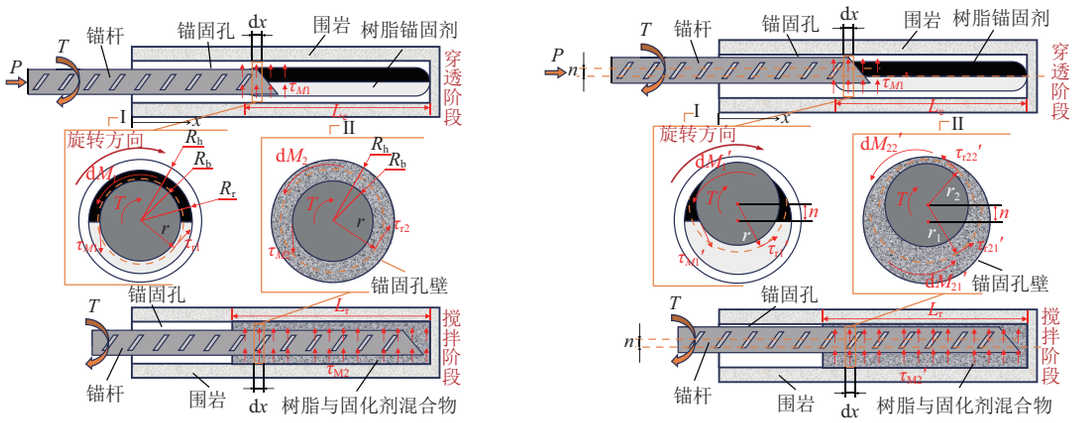
$$\mathrm{d}M'_{21}=\frac{2\pi\omega\eta(t)(R_b-n)^2R_h^2\int_0^{L_r}\mathrm{d}x}{(R_b-n)^2-R_h^2}. \tag{14}$$

$\mathrm{d}M'_{22}$ 可表示为

$$\mathrm{d}M'_{22}=\frac{2\pi\omega\eta(t)(R_b+n)^2\int_0^{L_r}\mathrm{d}x}{(R_b+n)^2-R_h^2}. \tag{15}$$

那么，偏心条件下，锚杆到达孔底后，所受反扭矩 M'_2 为

$$M'_2=M'_{21}+M'_{22}=2\pi\omega\eta(t)L_r\cdot\left[\frac{(R_b-n)^2R_h^2}{(R_b-n)^2-R_h^2}+\frac{(R_b+n)^2R_h^2}{(R_b+n)^2-R_h^2}\right]. \tag{16}$$



（a）居中条件下锚杆反扭矩分析模型　　（b）偏心条件下锚杆反扭矩分析模型

图 1　不同居中条件下锚杆反扭矩分析模型

Fig. 1　Reaction torque model under different eccentric conditions

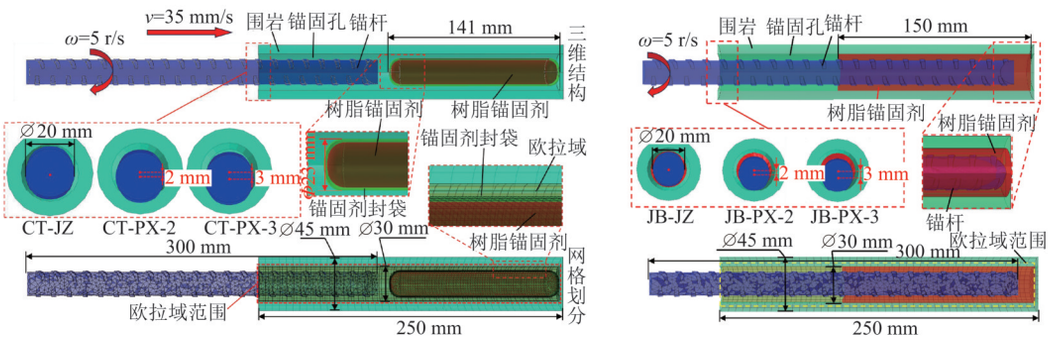
1.2　锚固剂搅拌状态与锚杆反扭矩的关系

上述分析表明，偏心锚固树脂锚固剂的分布特征、锚杆所受树脂及固化剂混合物的黏结作用力与居中锚固的区别造成了两者锚杆反扭矩的差异. 根据式(7)、(9)、(12)及(16)，当锚固孔尺寸、锚杆及树脂锚固剂规格、搅拌时长 t、锚杆转速 w 及轴向进给速度 v 为定值时，锚杆所受反扭矩主要与锚固偏心距 n、树脂及固化剂混合物的动力黏度 $\eta(t)$、锚固长度 L_r 有关，若不考虑树脂流失，L_r 应基本相同. 由式(12)及(16)可知，偏心条件下，两阶段锚杆反扭矩与 $\eta(t)$ 呈正相关. 通过将两式对 n 求导，发现穿透阶段锚杆反扭矩与 n 并无直接规律，但搅拌阶段锚杆反扭矩与 n 呈正相关关系，即随着锚固偏心度的增加而增加. 综上所述，锚固偏心度、树脂及固化剂混合物黏度作为表征锚固剂搅拌状态的重要参数，与两阶段锚杆的反扭矩具有紧密的联系，由此可见，树脂锚固剂的搅拌状态对锚杆反扭矩影响显著.

2　偏心锚固树脂锚固剂搅拌过程数值模拟分析

2.1　模型构建

采用有限元数值模拟软件的耦合欧拉-拉格朗日算法，该算法的核心为双网格系统，即欧拉网格用于描述树脂锚固剂在锚杆作用下的流动特征(通过在锚固孔中设置欧拉域实现)，拉格朗日网格用于描述锚杆与锚固剂封袋及树脂的动力学作用，从而最大程度还原树脂锚固剂的搅拌过程. 基本假设如下：1)将锚固剂搅拌的 2 个阶段分别建立模型进行分析；2)锚杆穿透锚固剂阶段，锚固剂封袋变形达到一定程度，单元即被删除，可认为封袋已经被破碎；3)锚固剂搅拌阶段，假设锚固剂封袋已破碎完全，忽略其对后续搅拌的影响；4)由于搅拌时长较短，假设两阶段树脂锚固剂黏度为定值；5)仅保留锚杆轴向平动及转动 2 个自由度，其余自由度均固定. 数值模型如图 2 所示.



（a）锚杆旋转穿透锚固剂阶段数值模型　　（b）锚杆到达孔底后的搅拌阶段数值模型

图 2　树脂锚固剂搅拌过程数值模型

Fig. 2　Numerical model of resin mixing process

建模步骤：首先在三维建模软件中创建包含锚杆、围岩、锚固剂封袋的装配体，然后导入至Abaqus数值模拟软件，创建欧拉体，依次完成网格划分、分析步配置、锚固剂流体划分、边界条件设置、相互作用设置、模型运算等步骤.

模型尺寸：如图 2 所示，数值模型均包含左旋螺纹钢锚杆、树脂锚固剂、封袋、孔壁围岩及欧拉域 5 个部件；其中，锚杆尺寸：∅20 mm×300 mm；树脂锚固剂尺寸：∅23 mm×141 mm（可形成锚固长度 150 mm）；孔壁围岩尺寸：∅30/45 mm（内/外径），长 250 mm；欧拉域范围与锚固孔范围一致.

边界条件：锚固剂穿透阶段锚杆进给速度设置为 35 mm/s，转速为 5 r/s（图 2a），锚固剂搅拌阶段仅保留锚杆转速 5 r/s，无轴向进给（图 2b）. 根据旋转式黏度计的工作原理[35]，通过试验中对初始搅拌阶段锚杆反扭矩监测，可推算出中速树脂锚固剂的黏度，因此模型中树脂锚固剂动力黏度设为 300 Pa·s，树脂的流动状态采用 Us-Up 状态方程进行描述. 锚固剂封袋选用聚乙烯材质，参数由Abaqus材料库中导入，采用约翰逊-库克损伤模型模拟封袋破碎过程（该模型通常用来模拟半结晶塑料或具有一定韧性工程塑料的破坏，可较好地还原锚固剂封袋的破碎行为）. 锚杆及孔壁围岩由于变形微小，为提高计算效率，将两者均设为刚体. 锚杆与锚固剂交界面及锚固剂与围岩交界面接触类型设定为通用接触，锚固孔模型底部完全固定.

网格划分：锚杆及锚固剂封袋采用四面体网格划分，对欧拉域及围岩采用六面体网格划分. 为提高计算精度，对欧拉域及锚固剂封袋网格进行细化. 模型最大网格尺寸为 6 mm，主要为孔壁围岩，最小网格尺寸为 2 mm，主要为锚固剂封袋区域，欧拉域网格尺寸为 4 mm，锚固剂穿透阶段数值模型单元共计 37 590，计算时长 4 s，搅拌阶段单元共计 4 736，计算时长 2 s.

根据 YB/T 4364—2014《锚杆用热轧带肋钢筋》相关规定，∅20 mm 螺纹钢锚杆肋高约为 1.7 mm，即锚杆与锚固孔单侧最大间距为 3.3 mm，因此，本文在 0～3.3 mm 范围内选取偏心度 0，2，3 mm 进行分析，数值模拟方案如表 1 所示.

表 1　数值模拟方案

Table 1　Numerical simulation scheme

样本名称	锚固剂或锚固长度/mm	转速/(r·s^{-1})	进给速度/(mm·s^{-1})	偏心度/mm	备注
CT-JZ	141	5	35	0	
CT-PX-2	141	5	35	2	穿透阶段
CT-PX-3	141	5	35	3	
JB-JZ	150	5	0	0	
JB-PX-2	150	5	0	2	搅拌阶段
JB-PX-3	150	5	0	3	

2.2　锚杆穿透阶段数值模拟结果分析

2.2.1　锚固剂搅拌状态分析

穿透阶段各样本锚固剂封袋破碎特征及树脂流动状态如图 3 所示. 如图 3a 所示，居中锚固条件下，在 t=0.5 s 时，锚固剂封袋被锚杆压缩，开始出现变形，随着锚杆持续钻进，t=1.0 s，封袋开始被锚杆破坏，剩余体积为 91.6%，树脂锚固剂开始自封袋流出，随后锚杆不断向孔底行进，树脂锚固剂

流出量不断增加，封袋被持续破碎，在 t=4.0 s时，锚固剂封袋基本被完全破坏，体积仅剩余0.87%.

偏心锚固条件下锚固剂的流动及封袋破坏状态基本与居中锚固相同，但在同时刻封袋的剩余体积却明显高于居中锚固（图 3b，3c），在 t=4.0 s时，两样本封袋剩余体积占比分别为13.15% 和 17.07%. 图 3d 为各样本锚固剂封袋的破碎速率统计情况，锚固剂封袋的平均破碎速率随锚固偏心度的增加而降低，不同时刻锚固剂封袋的破碎速率波动随着偏心度的增加而增大，原因可能是偏心锚固降低了锚杆对锚固剂封袋的接触范围，使封袋破碎更加随机，破碎效率也随之下降. t=2.0 s时各样本锚固剂分布密实程度如图 4 所示.

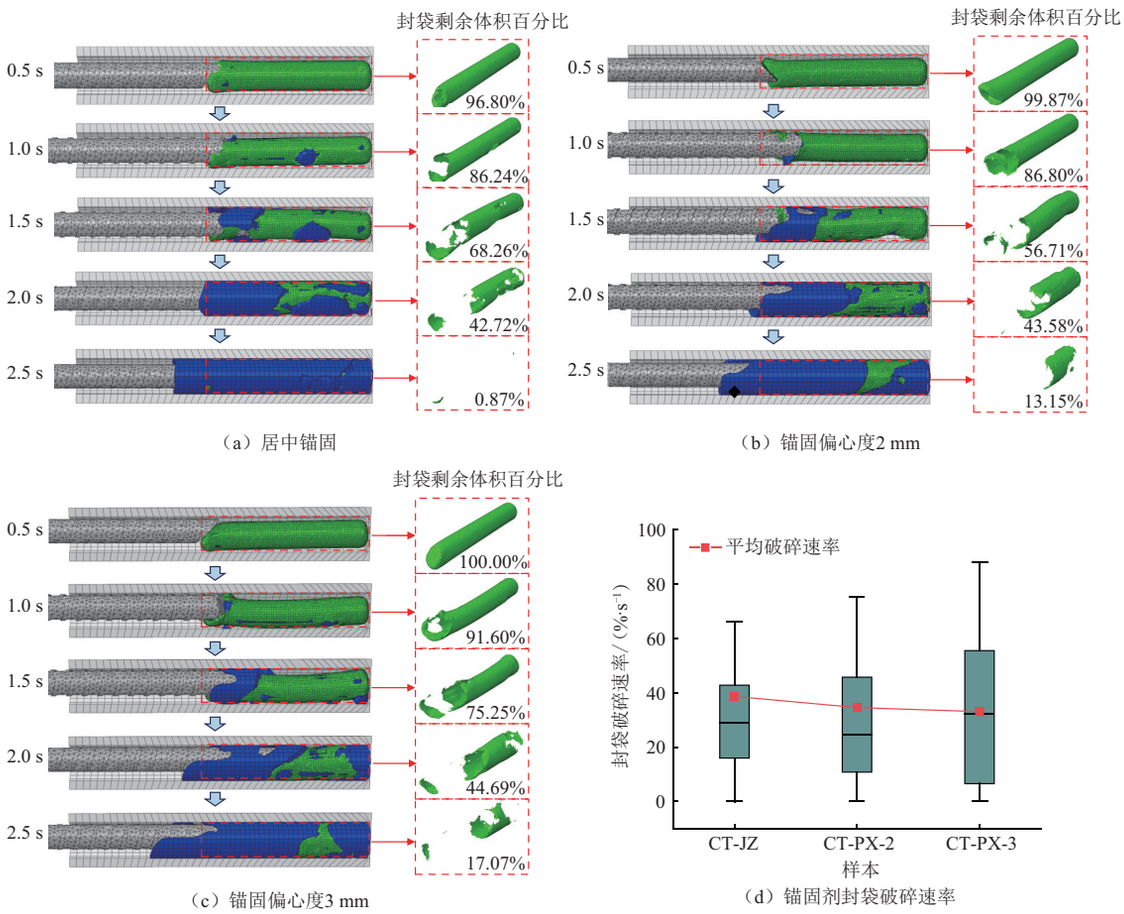


图 3　锚杆穿透阶段样本锚固剂封袋破碎特征及树脂流动状态

Fig. 3　Three samples of resin pouches broken degree during the bolt passing through the resin cartridge

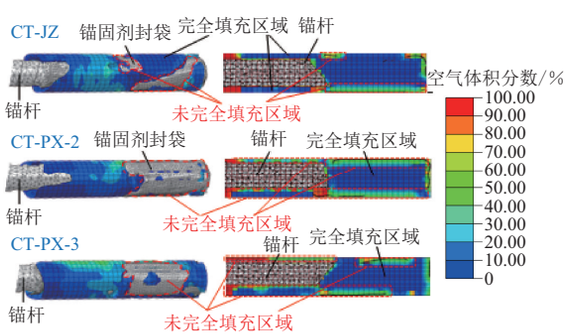


图 4　t=2.0 s时各样本锚固剂分布密实程度

Fig. 4　Distribution density of resin of each sample at t=2.0 s

如图 4 所示，不同锚固偏心度时，锚杆穿透封袋后，树脂锚固剂流出分布的密实程度不尽相同，居中锚固时，锚杆周边基本已完全被树脂锚固剂填充，未完全填充区域主要分布在未破碎的封袋附近. 偏心锚固时，除了大面积封袋区未完全填充外，锚杆周边也存在较多空洞区，密实程度较低，偏心度为 3 mm时，锚杆周边锚固剂中空气体积分数达到了 50%～100%.

在欧拉域表面均匀布设 4 条轴向测线，得到了不同锚杆到达孔底时，150 mm 锚固长度范围内不同位置处锚固剂的密实程度，如图 5a 所示，将锚固剂体积分数低于 75% 的区域定为低密实度区域. 测线 2 及测线 4 位于设定的偏心方向，居中锚固条件下，锚固剂各处的密实程度相对较高且分布均匀，局部小范围为低密实区.

图 5b 中，偏心度 2 mm 条件下，偏心方向两侧的树脂锚固剂出现了大范围的低密实区，测线 1 及 3 测得的密实程度较高．图 5c 中，测线 2 及 4 测得树脂锚固剂同样存在大范围空洞区及低密实区域，测线 4 低密实区域长度达 100 mm．居中、偏心度 2 mm、偏心度 3 mm 样本的 4 条测线中锚固剂低密实度区域平均占比分别为 17.5%，30.7%，38.1%，低密实度区域占比随着偏心度的增加而增加，偏心度 3 mm 低密实度范围是居中条件下的 2 倍以上．图 5d 中，各样本的平均密实程度分别为 88.4%，86.5%，78.8%，且偏心一侧测线 4 测得穿透阶段锚固剂密实程度分别为 89.9%，79.8%，61.0%，可知锚固剂密实程度随着偏心度的增加而降低，特别是偏心方向上树脂锚固剂密实度显著低于其他区域．因此，上述低密实度区域及空洞区可能会对锚固剂的最终分布状态产生影响．

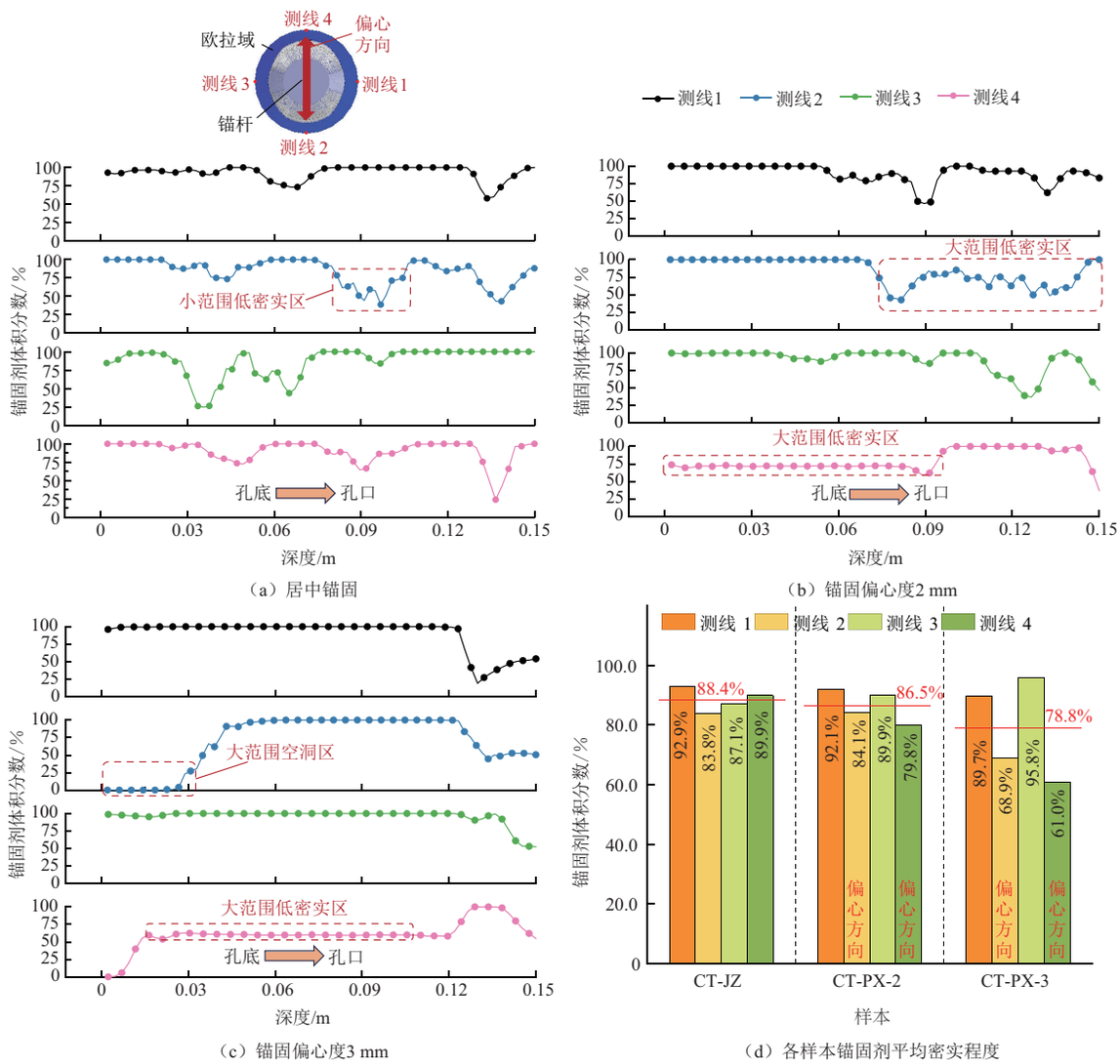


图 5　锚固剂穿透阶段各样本不同位置处锚固剂的密实程度

Fig. 5　Compactness of resin at different positions of samples during the passing through stage

2.2.2　锚杆穿透阶段反扭矩响应特征分析

各样本锚杆反扭矩-时间曲线如图 6 所示．穿透阶段锚固剂封袋破碎效果及树脂搅拌状态随锚杆偏心度呈现显著区别，因此该过程中锚杆所受封袋及树脂的反扭矩可能出现不同．如图 6 所示，各样本反扭矩-时间曲线基本呈波动特征，在穿透前 2 s 内，锚杆反扭矩均处于较低水平，不同偏心度样本平均值均保持在 0.2 N·m 以内，反扭矩最大值不超过 0.8 N·m，差异不明显．主要原因是锚固剂自封袋流出量较少，反扭矩主要由封袋对锚杆的作用力产生．t=2.0 s 时封袋进一步破碎，锚固剂流出量逐渐增加，树脂锚固剂对锚杆的黏结作用力逐步显现，封袋与锚固剂的共同作用，使反扭矩开始增长，t=4.0 s 时锚杆抵达孔底，锚杆反扭矩达到峰值．居中、偏心度 2 mm、偏心度 3 mm 样本穿透阶段反扭矩峰值分别为 2.9，4.5，4.9 N·m，呈递增趋势．

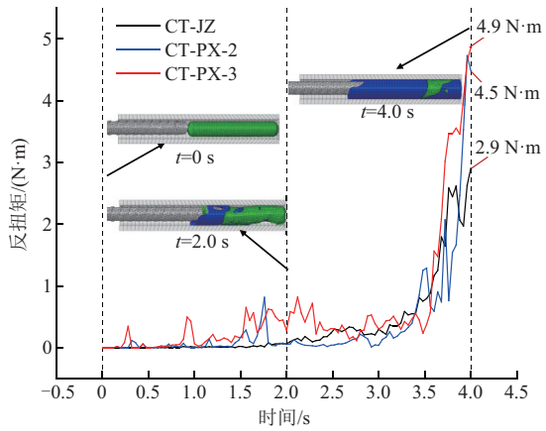
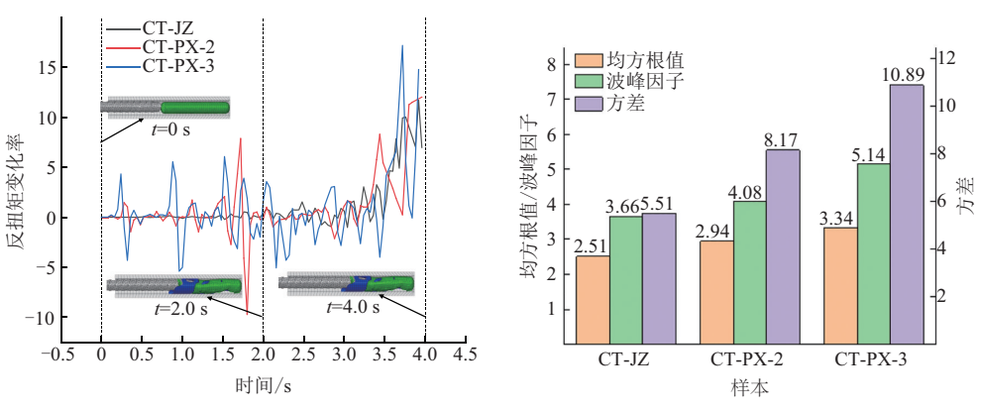


图 6　穿透阶段各样本锚杆反扭矩-时间曲线

Fig. 6　Reaction torque-time curve of each sample during passing through stage

根据 1.2 节理论分析结论及图 3,5 锚固剂封袋破碎程度及锚固剂密实程度随偏心度的变化情况可知,锚杆反扭矩的变化特征可能与锚固偏心度紧密相关,对图 6 反扭矩数据对时间求导,得到了各样本随时间的变化率曲线及其时域特征值,如图 7 所示.

由图 7a 可知,偏心锚固条件下锚杆反扭矩变化率的波动性显著高于居中锚固,这可能与锚固剂封袋破碎速率的不均匀及锚杆周边锚固剂的密实程度有关. 破碎速率及密实程度变化越剧烈,封袋与锚固剂对锚杆的作用力变化也越频繁,导致反扭矩变化率的波动程度增加. 由图 7b 中反扭矩变化率的时域特征值可知,反扭矩变化率的均方根值、波峰因子、方差均随着偏心度的增加而增加,相较于居中样本,偏心度 2,3 mm 样本均方根值增长率分别为 17.1%,33.1%,波峰因子增长率分别为 11.5% 和 40.4%,方差增长率分别为 48.3% 和 97.6%. 由此可知,穿透阶段反扭矩变化率的时域特征值对锚固偏心度具有良好的敏感度.



（a）反扭矩变化率-时间曲线　　（b）反扭矩变化率时域特征值

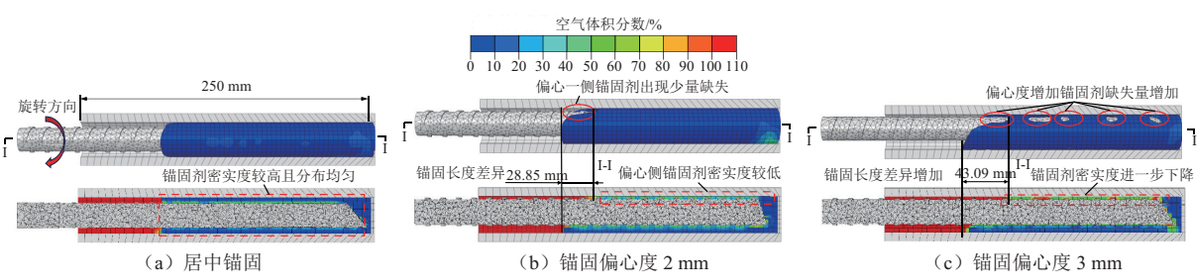
图 7　反扭矩随时间的变化率及其时域特征值

Fig. 7　Change rate of reaction torque with time and eigenvalue

2.3　锚固剂搅拌阶段数值模拟分析

2.3.1　锚固剂搅拌状态分析

锚杆抵达孔底后开始进行锚固剂搅拌,t=2.0 s时,不同锚固偏心度下锚固剂密实程度如图 8 所示. 图 8a 中,居中锚固时,基本不存在较多缺失区域,整体密实程度较高. 随着偏心度增加,搅拌状态下的树脂锚固剂分布不均匀程度逐渐增加. 图 8b 中,偏心度为 2 mm 时,锚固剂在偏心一侧出现了一定缺失,附着于锚杆的锚固剂中空气含量逐渐增加. 偏心度为 3 mm 时,偏心侧的锚固剂缺失量继续增加,出现了大范围的树脂缺失,锚固剂密实程度显著低于前两者.



（a）居中锚固　　（b）锚固偏心度 2 mm　　（c）锚固偏心度 3 mm

图 8　锚固剂搅拌阶段不同锚固偏心度锚固剂密实程度

Fig. 8　Compactness of resin with different anchoring eccentricity during the mixing process

利用图 5 中相同位置测线测得 150 mm 锚固长度范围内不同位置锚固剂密实程度. 如图 9a 所示,居中条件下锚固剂密实程度整体分布较为均匀,局部区域呈小范围低密实度,图 9b 中在偏心方向(测线 2 及测线 4)上锚固剂存在较多低密实区域,测线 4 出现了较大范围的严重低密实度区域,与图 8 中的缺失位置对应. 图 9c 中锚固偏心度为 3 mm 时,出现大范围严重低密实区域,测线 4 测得孔口侧有明显锚固剂缺失. 居中、偏心度 2 mm、偏心度 3 mm 样本的 4 条测线中锚固剂低密实度区域占比分别为 8.1%,9.6%,22.1%. 低密实度区域占比同样随着偏心度的增加而增加,偏心度 3 mm 低密实度范围是居中条件下的近 3 倍. 由图 9d 可知,各样本的平均密实度分别为 88.7%,84.9%,81.8%;在偏心一侧的锚固剂密实程度分别为 90.3%,79.3%,67.2%,可知在搅拌阶段锚固剂密实程度同样随偏心度的增加而降低,偏心方向锚固剂分布极不均匀,偏心度 3 mm 样本在偏心一侧的体积分数较居中条件下的体积分数降低了 23.1%,会对该阶段锚杆反扭矩的响应特征产生影响.

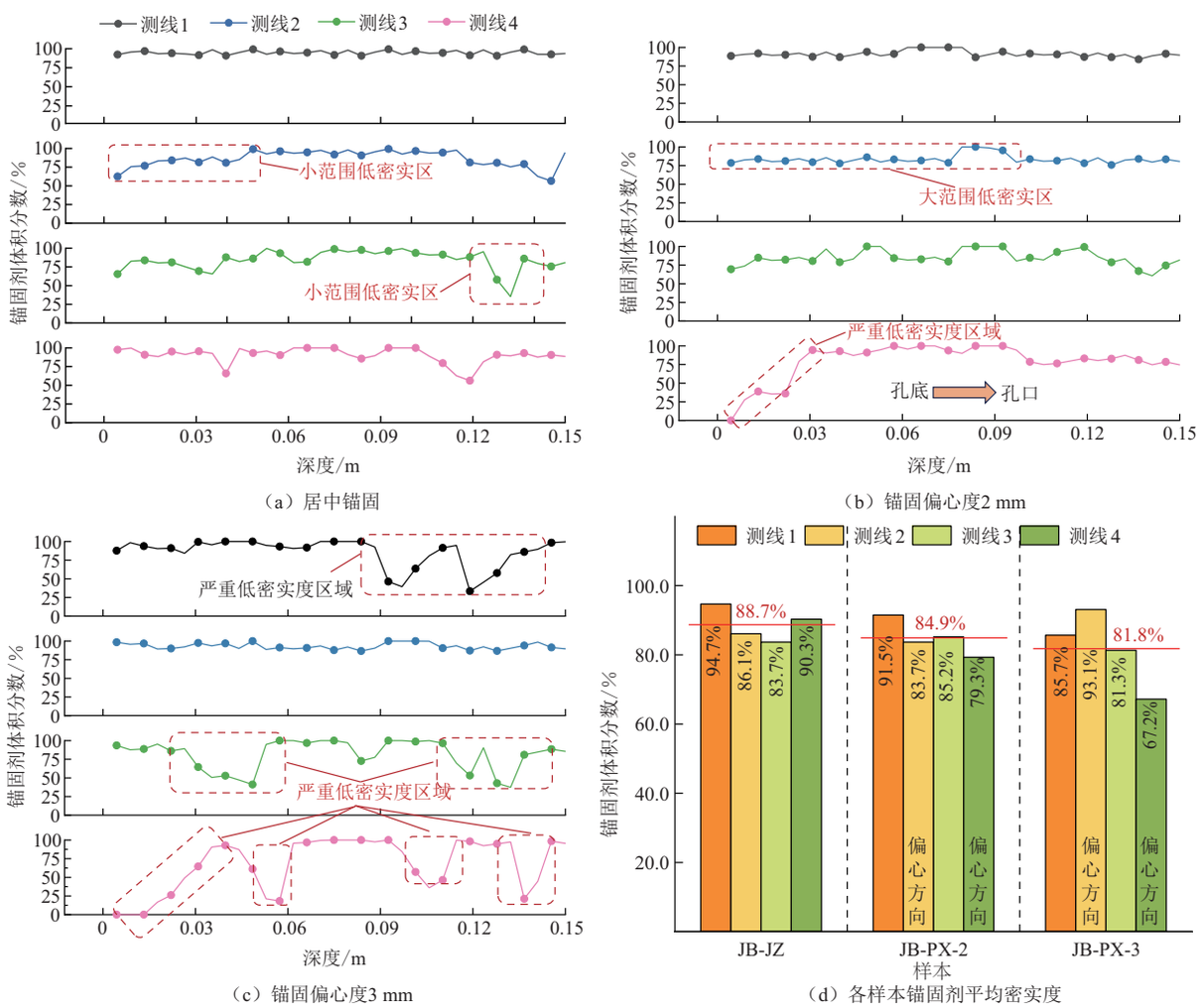


图 9 锚固剂搅拌阶段各样本不同位置锚固剂密实程度

Fig. 9 Compactness of resin at different positions of samples during the mixing

2.3.2 锚固剂搅拌阶段锚杆反扭矩响应特征分析

不同锚固偏心度下锚杆搅拌锚固剂受到的反作用力如图 10 所示. 由于锚杆并未进行轴向进给,相较于穿透阶段,搅拌阶段锚固剂随着锚杆的搅拌作用分布更加均匀,因此反扭矩相对稳定,三样本反扭矩数值波动均较小. 但居中条件下的锚杆反扭矩处于较低水平,反扭矩均值仅为 1.54 N·m,而偏心度 2 mm 和偏心度 3 mm 样本反扭矩均值分别为 2.28 N·m 和 3.31 N·m. 综上所述,搅拌阶段锚杆反扭矩均值随着锚杆偏心度的增加而增加,与 1.2 节中得到的理论关系一致,进一步表明锚杆反扭矩与不同锚固偏心度下树脂锚固剂的分布状态有紧密联系.

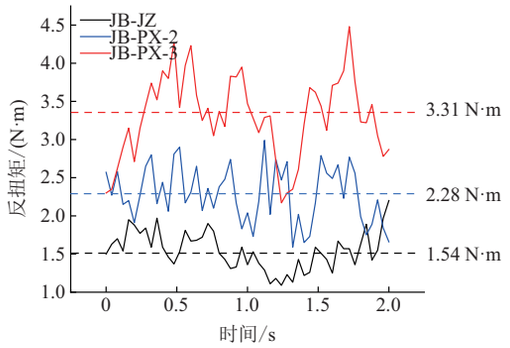


图 10　搅拌阶段锚杆反扭矩-时间曲线

Fig. 10　Reaction torque-time curves of three samples during the resin mixing process

3　不同偏心度下锚杆锚固实验室试验

3.1　试验材料与过程

在实验室开展不同偏心度条件下的锚杆锚固试验，分析偏心度对锚固剂搅拌状态及锚杆反扭矩的影响．试验材料及设备包括左旋无纵筋螺纹钢锚杆、树脂锚固剂、无缝钢管、全自动伺服钻机、动态扭矩传感器、智能显示控制仪以及联轴器．其中，锚杆尺寸为∅20 mm×300 mm，无缝钢管外径为 45 mm，内径为 30 mm，孔深为 250 mm，采用中速树脂锚固剂（额定搅拌时长 20～40 s，本次搅拌时长确定为 30 s），尺寸为∅23 mm×141 mm．采用全自动伺服钻孔机连接锚杆进行锚固搅拌，穿透阶段锚杆的进给速度设置为 10 mm/s，转速为 5 r/s．动态扭矩传感器通过特制的夹具与伺服钻孔机连接，传感器数据传输线连接至智能显示控制仪并将输出的反扭矩数据传输至计算机终端，锚固完成后的样本进行锚固力测试．试验材料及过程如图 11 所示．

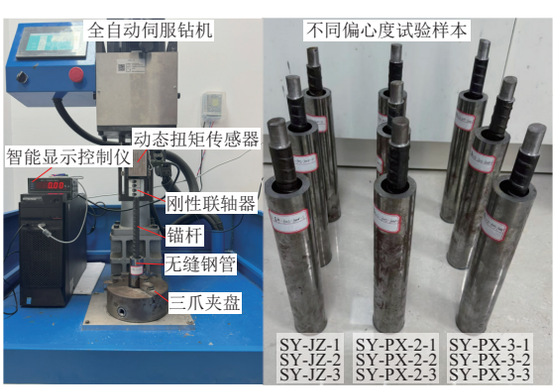


图 11　不同偏心度下锚杆锚固实验室试验

Fig. 11　Laboratory tests on anchoring under different eccentricities

试验按照锚固偏心度分为 3 组，每组 3 个样本，方案如表 2 所示．

表 2　试验方案

Table 2　Laboratory test scheme

样本名称	转速/(r·s^{-1})	进给速度/(mm·s^{-1})	偏心度/mm
SY-JZ-1			0
SY-JZ-2			0
SY-JZ-3			0
SY-PX-2-1			2
SY-PX-2-2	5	10	2
SY-PX-2-3			2
SY-PX-3-1			3
SY-PX-3-2			3
SY-PX-3-3			3

3.2　锚杆反扭矩响应特征分析

3 种偏心度条件下的样本反扭矩曲线如图 12 所示．搅拌阶段不同偏心度样本反扭矩均值分别为 1.06，1.28，1.34 N·m，随偏心度增加呈递增趋势，各试验样本搅拌阶段平均反扭矩也证明了反扭矩随锚杆偏心度的增加而增加．

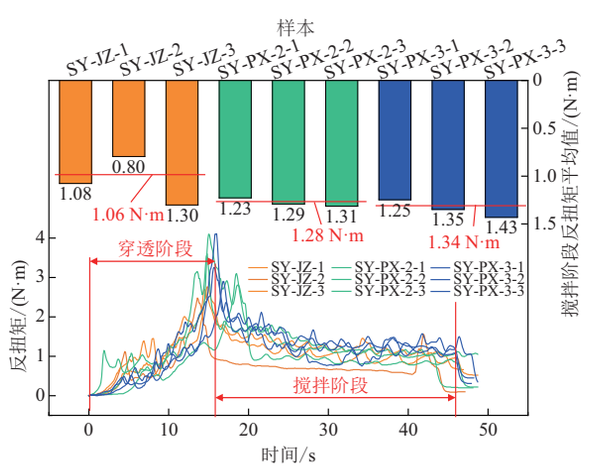


图 12　试验样本反扭矩曲线及搅拌阶段反扭矩平均值

Fig. 12　Reaction torque curve of test samples and average reaction torque in resin mixing process

穿透阶段反扭矩变化率平均特征值如图 13 所示．试验样本的反扭矩变化率特征值与模拟结果数值相比更小，但基本规律呈现一致性：锚杆居中条件下样本的反扭矩变化率特征值相较于偏心条件下更小．

如图 13 所示，随着锚固偏心度的增加反扭矩变化率均方根值、波峰因子及方差均逐渐升高，表明居中条件下锚杆在穿透阶段中的反扭矩变化率波动幅度更小，穿透阶段受到锚固剂的阻碍作用更小．相较于居中样本，偏心度 2 mm 和 3 mm 样本均方根值增长率为 26.5% 和 49.0%，波峰因子增长率分别为 71.4% 及 114.3%，方差增长率分别为 11.9% 及 43.4%．该规律与数值模拟部分图 7b 结论一致．

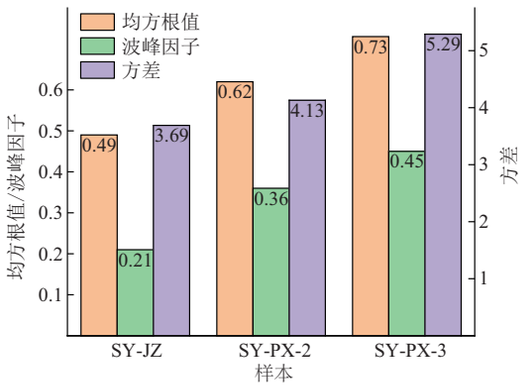


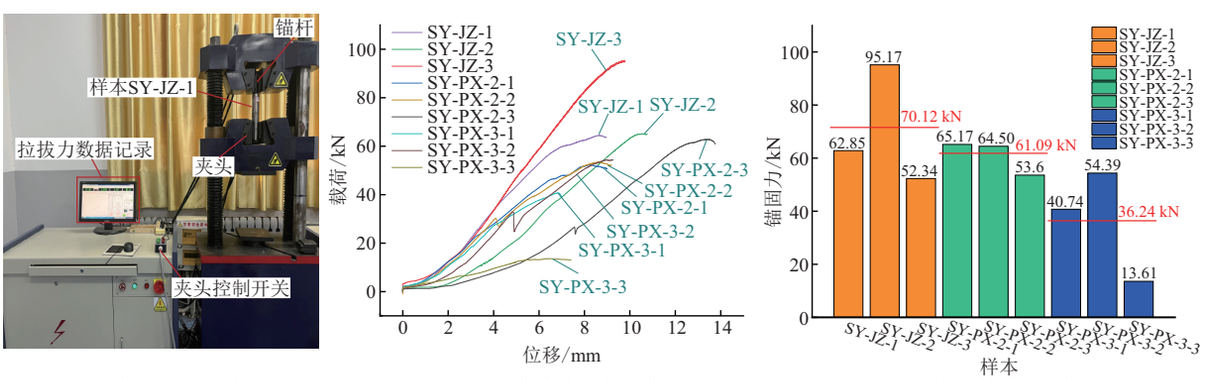
图 13 穿透阶段反扭矩变化率特征值

Fig. 13 Characteristics of reaction torque change rate during the bolt passing through the resin cartridge

3.3 各样本锚固力测试

对锚固完成的各样本进行锚固力测试. 测试过程如图 14a 所示,测试结果如图 14b,14c 所示.

如图 14a 所示,将样本通过上下夹具固定在拉拔试验机上,试验机载荷通过位移控制,位移速度为 5 mm/min. 各样本拉拔力曲线如图 14b 所示,居中条件下样本承载能力最强,且能承载能力随着偏心度的增加而降低. 此外,居中样本载荷-位移曲线相较于偏心样本更加平滑. 如样本 SY-PX-2-2、SY-PX-2-3 以及 SY-PX-3-2 的载荷-位移曲线均出现多个短暂的波动,主要原因可能与锚固剂内部密实度不佳有关,导致锚固结构在拉拔过程中产生滑移,使锚固力突然下降. 如图 14c 所示,最大锚固力为居中条件下的样本 SY-JZ-2 达到了 95.17 kN,最小锚固力则为偏心 3 mm 的样本 SY-PX-3-3,为 13.61 kN. 居中样本的平均锚固力为 70.12 kN,较偏心度 2 mm 样本的平均锚固力 61.09 kN 高 14.7%;较偏心度 3 mm 样本的平均锚固力 36.24 kN 高 93.5%,表明居中度的优劣对于锚固系统承载能力有显著影响.



(a) 锚固力测试过程 (b) 试验样本载荷-位移曲线 (c) 各样本锚固力及均值

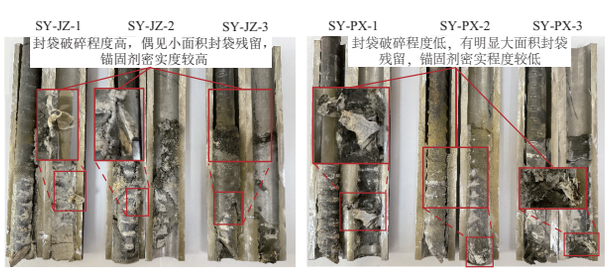
图 14 各样本锚固力测试结果

Fig. 14 Anchoring force test results for each sample

3.4 锚固剂搅拌状态分析

将 SY-JZ、SY-PX 这 2 组样本分别进行切割,观察不同偏心条件下内部锚固剂搅拌状态及封袋的破碎情况,如图 15 所示. 如图 15a 所示,居中锚固条件下各样本锚固剂密实程度整体较好,固化结构较为致密,整体呈灰白色,表明树脂与固化剂混合较为均匀,各样本锚固剂封袋破碎程度较高,偶见小面积的封袋残留,SY-JZ-3 样本基本无可见的封袋残留,锚固剂固化结构非常致密,这也是其锚固力最高的原因. 图 15b 偏心条件下,可见较多的大面积封袋残留,可知锚固偏心对锚固剂封袋破碎具有显著的影响.

此外,偏心样本固化后的锚固剂颜色较深,内部有明显的树脂残留,表明锚固剂并未得到充分搅拌,封袋的影响使锚固剂固化结构较为疏松,在外部钢管剖开时,固化结构表现得较为破碎.



(a) 居中锚固样本 (b) 偏心度3 mm样本

图 15 不同偏心条件下内部锚固剂搅拌状态及封袋的破碎情况

Fig. 15 Mixing state of internal resin and broken of resin pouches under different eccentricity conditions

综上所述,偏心锚固会导致锚固剂搅拌状态不佳,使锚固剂固化结构致密性及完整性下降,导致固化结构相较于居中条件下的稳定性更差,最终影响锚固系统的承载能力.

4　应用与展望

目前，锚杆锚固质量无损检测方法基本以分析沿杆体传播的应力波或超声导波的传导特性为主，分析的指标包括不同围岩强度、锚固剂环形厚度及界面刚度条件下应力波的反射能量衰减规律及幅值-时间曲线特征[26,29,31]. 但反射波信号易受杆体腐蚀、施工条件、环境、杆体形状、尺寸及表面粗糙度等多个因素影响[35-38].

本文研究得到了锚固剂搅拌过程中不同锚固偏心度下锚杆反扭矩的响应特征，发现了锚杆反扭矩随锚固偏心度增加表现出较好的规律性. 锚杆反扭矩变化率时域特征值及反扭矩均值可考虑作为识别锚杆偏心度的指标，该方法的特点在于可实时探测锚杆锚固质量，保证了围岩的及时支护，同时环境适应性较强，客观因素对探测效果影响较小. 未来可结合相关传感器及预测软件，通过开展大量的样本试验，得到锚杆偏心度与反扭矩的量化关系，形成基于锚杆反扭矩的锚固偏心度识别方法(图 16).

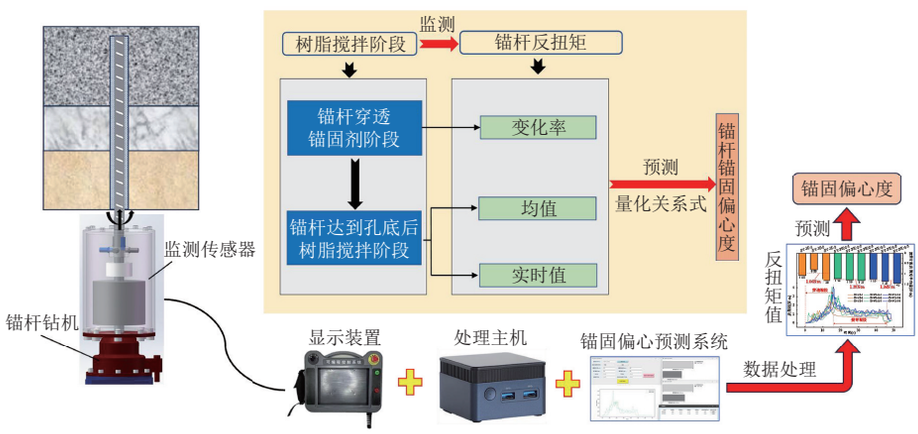


图 16　基于锚杆反扭矩的锚固偏心度识别设想

Fig. 16　Assumption of anchoring eccentricity identification based on bolt reaction torque

从未来现场应用角度而言，可考虑对监测传感器进行模块化设计，增强对锚杆机类型的适用程度. 受工人施工水平以及复杂施工环境影响，须尽量保持锚杆钻机的动力参数(钻速/转速等)恒定，以提高检测结果的准确性. 由于篇幅有限，本文只聚焦于偏心锚固这种单一缺陷条件下的锚杆反扭矩响应特征分析，未来会针对复合缺陷条件下的锚杆反扭矩响应特征进行研究，增加该方法的适用性.

5　结　论

1)偏心锚固会影响锚固剂的搅拌状态，易导致树脂锚固剂封袋破碎程度降低，树脂锚固剂分布不均，锚固剂固化结构致密性及完整性下降，进而影响搅拌过程锚杆的反扭矩响应特征，在承载时固化结构较居中条件下稳定性更差，最终削弱锚固系统的承载能力，可通过在锚固孔处以及锚杆杆体加装锚杆径向限位装置提高锚固居中程度.

2)整个锚固剂搅拌过程锚杆反扭矩-时间曲线呈现出先显著上升后趋于平稳的趋势，分段特征明显. 在锚固剂穿透阶段，反扭矩变化率的均方根值、波峰因子、方差均随着偏心度的增加而增加. 在锚杆抵达孔底后的锚固剂搅拌阶段，锚杆反扭矩均值随着锚杆偏心度的增加而增加.

3)以锚固剂穿透阶段锚杆反扭矩变化率时域特征值及锚固剂搅拌阶段锚杆反扭矩均值作为识别锚杆偏心度的指标，提出了基于锚杆反扭矩的锚杆偏心度识别设想，有望实现锚固过程中通过锚杆反扭矩监测对锚杆偏心度进行实时、智能、快速识别，使锚固质量检测不再滞后于锚固过程，可为锚固质量无损检测提供理论与技术参考.

参考文献：

[1]　康红普，姜鹏飞，张　农，等. 煤矿复杂条件巷道快速智能掘进研究策略及关键技术与装备分析[J]. 中国矿业大学学报，2025，54(2)：237-257.
KANG Hongpu，JIANG Pengfei，ZHANG Nong，et al. Key technology and equipment analysis and research strategies of rapid and intelligent driving in complex roadways of coalmines[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(2)：237-257.

[2]　康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J]. 中国矿业大学学报，2016，45(6)：1071-1081.

KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071-1081.

[3] 侯朝炯团队.巷道围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2013.
HOU Chaojiong Team. Surrounding rock control of roadway[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2013.

[4] 李春林.岩石锚杆加固原理与应用[M].北京:科学出版社,2021:140.
LI Chunlin. Rock bolting principles and applications[M]. Beijing: Science Press, 2021:140.

[5] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术发展70年及展望[J].岩石力学与工程学报, 2021,40(1): 1-30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1-30.

[6] FU M X, LIU S W, HUANG S S, et al. Resin flow characteristics and anchoring performance of resin-anchored bolts in soft and broken surrounding rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(3): 1579-1601.

[7] 付孟雄,黄帅帅,刘少伟,等.泥质软岩锚固孔钻渣泥化黏附特征及影响因素[J].煤炭学报, 2025, 50(2): 862-876.
FU Mengxiong, HUANG Shuaishuai, LIU Shaowei, et al. Characteristics of argillization and adhesion and influencing factors of drilling cuttings in borehole of roadway in soft argillaceous surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 862-876.

[8] 李 健,柴肇云,史沁彬.新型耐水锚固剂的研制及其性能表征[J/OL].太原理工大学学报,1-12[2025-9-20]. https://doi.org/10.16355/j.tyut.1007-9432.20240803.
LI Jian, CHAI Zhaoyun, SHI Qinbin. Development and characterization of a new water-resistant anchoring agent[J/OL]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1-12[2025-9-20].https://doi.org/10.16355/j.tyut.1007-9432.20240803.

[9] 付孟雄,黄帅帅,刘少伟,等.软弱破碎围岩锚固孔树脂锚固剂流失对锚固性能影响研究[J].中国矿业大学报,2024,53(3):483-496.
FU Mengxiong, HUANG Shuaishuai, LIU Shaowei, et al. Study on the influence of resin loss of the borehole on the anchoring performance in the soft and broken surrounding rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 483-496.

[10] AZIZ N, JALALIFAR H, CONCALVES J. Bolt surface configurations and load transfer mechanism[C]//Proceedings of the 2006 Coal Operators' Conference, Wollongong. 2006:236-245.

[11] AZIZ N, HILLYER J, JOYCE D, et al. New approach to resin sample preparation for strength testing[C]//Proceedings of the 2013 Coal Operators' Conference, Wollongong. 2013: 152-155.

[12] AZIZ N, CRAIG P, MIRZAGHORBANALI A, et al. Factors influencing the quality of encapsulation in rock bolting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 3189-3203.

[13] 贺德印.煤矿巷道软弱围岩锚固力增强抑衰机理与技术[D].焦作:河南理工大学, 2024.
HE Deyin. Mechanism and technology of enhancement and anti-attenuation for anchoring force in weak surrounding rock of coal mine roadway[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2024.

[14] 贺德印,刘少伟,贾后省,等.锚索偏心树脂锚固特征分析及锚固剂推送限位装置设计[J].岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 708-723.
HE Deyin, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Analysis of eccentric resin anchoring characteristics for cable bolts and the design of pushing and limiting device for resin cartridges[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 708-723.

[15] FU M X, HUANG S S, LIU S W, et al. Experimental study of a borehole repairing and strengthening device for improving the performance of resin-anchored bolts in soft and broken surrounding rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 145: 1-19.

[16] CAMPBELL R, MOULD R. Impacts of gloving and un-mixed resin in fully encapsulated roof bolts on geotechnical design assumptions and strata control in coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64: 116-125.

[17] COMPTON C, OYLER D. Investigation of fully grouted roof bolts installed under in-situ conditions[C]//Proceedings of 24th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown. 2005: 302-312.

[18] 刘少伟,崔 磊,马念杰,等.螺纹钢锚杆楔形端部搅拌树脂锚固剂运移特征及锚固实验[J].岩石力学与工程学报,2022, 41(1): 40-52.
LIU Shaowei, CUI Lei, MA Nianjie, et al. Flow characteristics of stirring resin at wedge end of bolts and anchorage test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 40-52.

[19] 刘少伟,崔 磊,马念杰,等.螺纹钢锚杆搅拌树脂锚固剂端部形态优化试验研究[J].煤炭学报, 2022, 47(4): 1501-1511.
LIU Shaowei, CUI Lei, MA Nianjie, et al. Experimental study on optimization of end shape of mixed

resin of rebar bolt[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1501-1511.

[20] JIA H S, WANG Y W, LIU S W, et al. Experimental study of stirring and resin-blocking devices for improving the performance of resin-anchored cable bolts[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021,54(8):3995-4008.

[21] 贺德印,刘少伟,付孟雄,等.煤矿软弱围岩锚固孔底部扩孔区锚固效果保障方法与实验[J].煤炭学报, 2024,49(增1): 108-120.
HE Deyin, LIU Shaowei, FU Mengxiong, et al. Anchoring effect guarantee method and experiment for the bottom reaming area of borehole in weak surrounding rock of coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(Sup 1): 108-120.

[22] 张伟光,陈全君,刘少伟,等.软岩巷道锚杆孔孔底增孔锚固方式及扩孔参数研究[J].煤炭科学技术, 2017,45(12): 53-58.
ZHANG Weiguang, CHEN Quanjun, LIU Shaowei, et al. Study on bottom enlarged anchoring mode and reaming parameters of bolt boreholes in mine soft-rock roadway[J]. Coal Science and Technology, 2017,45(12): 53-58.

[23] XU C. Dynamic analysis of resin-grouted roof bolt[D]. Houghton: Michigan Technological University, 1994.

[24] STJERN G, MYRVANG A. The influence of blasting on grouted rock bolts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,1998,13: 65-70.

[25] RODGER A A, LITTLEJOHN G S, XU H L, et al. Instrumentation for monitoring the dynamic and static behaviour of rock bolts in tunnels[C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering,1996,119(3):146-155.

[26] 汪明武,王鹤龄.锚固质量的无损检测技术[J].岩石力学与工程学报, 2002,21(1):126-129.
WANG Mingwu, WANG Heling. Non destructive testing technology for anchoring quality[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1):126-129.

[27] 张　雷,黄志敏,白　龙,等.锚杆锚固缺陷无损检测信号的多尺度熵分析[J].中国矿业大学学报, 2021,50(6):1077-1086.
ZHANG Lei, HUANG Zhimin, BAI Long, et al. Multiscale entropy analysis of non-destructive test signals of anchoring defects of rock bolts[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(6):1077-1086.

[28] WU Y, HAO Y, TAO J, TENG Y, et al. Non-destructive testing on anchorage quality of hollow grouted rock bolt for application in tunneling, lessons learned from their uses in coal mines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93:1-13.

[29] LEE J S, MIN B K, YU J D, et al. Applicability of non-destructive evaluation technique for rock bolt integrity using time-frequency analysis[C]// World Tunnel Congress 2008, Agra. 2008:726-734.

[30] CHUNG C C, LIN C P, WANG K, et al. Improved TDR method for quality control of soil-nailing works[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2016, 142(1):06015011.

[31] BEARD M, LOWE M. Non-destructive testing of rock bolts using guided ultrasonic waves[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003, 40(4):527-536.

[32] 杨润昀.煤矿锚杆腐蚀无损检(监)测与智能评估技术研究[D].徐州:中国矿业大学, 2023.
YANG Runyun. Research on non-destructive testing (monitoring) and intelligent evaluation technology of bolt corrosion in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[33] 王　莎.基于改进堆叠自编码器的锚杆锚固质量无损检测研究[D].石家庄:石家庄铁道大学, 2020.
WANG Sha. Study on nondestructive testing method of bolt anchorage quality based on improved stacking auto-encoder[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.

[34] 石林静.基于改进的Elman神经网络的锚杆锚固质量无损检测研究[D].石家庄:石家庄铁道大学, 2017.
SHI Linjing. Study on nondestructive detection of anchorage quality of rock bolts based on improved elman neural network[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.

[35] 赖小强.智能旋转式粘度仪设计[D].长沙:湖南师范大学, 2017.
LAI Xiaoqiang. Intelligent rotary viscometer design[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2017.

[36] MAJHI S, ASILO L K, MUKHERJEE A, et al. Multimodal monitoring of corrosion in reinforced concrete for effective lifecycle management of built facilities[J]. Sustainability. 2022, 14(15):9696.

[37] FENG W P, TARAKBAY A, MEMON S, et al. Methods of accelerating chloride-induced corrosion in steel-reinforced concrete: A comparative review[J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 123165.

[38] HE D Y, LIU S W, FU M X, et al. Experimental study on resin-anchored bolt concentricity including a device for more consistent bolt centering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 148:104962.

（责任编辑　沈　菊　仝　腾）