

重力主导作用下拉裂型边坡危岩体临崩 微倾斜变形规律研究

贺 铮¹, 谢谟文^{2*}, 赵 晨²

(1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085; 2. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要: 为探明拉裂型危岩体在重力主导作用下的崩塌前兆倾斜变形规律, 首先将危岩体崩塌演化过程概化为受弯 I 型断裂模型在应力腐蚀作用下的亚临界扩展过程, 构建倾斜变形时效演化方程, 分析倾斜变形理论规律。此外, 基于微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 重力加速度测试原理, 建立基于空间矢量夹角的危岩体主倾斜方向累积倾斜角度监测方法, 设计并实现重力主导作用下拉裂型危岩体崩塌物理模型监测试验, 分析倾斜变形试验规律。进一步利用高低温试验对 MEMS 倾斜传感器进行温度漂移校正分析, 并通过拉裂型危岩体崩塌现场自动化监测, 得到倾斜角度的时序变化规律。综合分析表明: 拉裂型危岩体临崩倾斜变形由“(近)匀速”向“(加)加速”转变, 但受裂隙亚临界扩展路径的非均质介质影响, 匀速变形阶段会出现“局部阶跃”, 加速变形阶段会出现“趋势更新”。拉裂型危岩体临崩加速过程中倾斜变形速率与加速率呈现显著幂函数关系, 进而提出倾斜速率倒数崩塌时间预测方程, 并明晰了线性与非线性方程的预测效果。研究成果有助于应用倾斜传感技术进行崩塌监测预警研判。

关键词: 边坡工程; 拉裂型危岩体; 倾斜变形; 亚临界裂隙扩展; 崩塌模型试验; 现场监测; MEMS 倾斜传感器

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2026)02 - 0449 - 17

第一作者: 贺 铮 (1995 -), 现任助理研究员, 主要从事危岩崩塌监测预警方面的研究工作。E-mail: hezheng_ustb@126.com

***通信作者:** 谢谟文 (1965 -), 现任教授, 主要从事边坡工程防灾减灾方面的研究工作。E-mail: mowenxie@126.com

Micro-tilting deformation behavior of tension-fractured hazardous rock mass preceding collapse under gravity

HE Zheng¹, XIE Mowen^{2*}, ZHAO Chen²

(1. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To elucidate the precursory tilt deformation patterns of tension-fractured hazardous rock masses under gravitational loading, this study conceptualizes the collapse process as subcritical propagation under stress corrosion, utilizing a bending Mode-I fracture model. A time-dependent evolution equation for tilt deformation is derived, and the theoretical characteristics of tilting behavior are examined. Based on the principles of micro-electro-mechanical system (MEMS) gravity accelerometry, a method for monitoring the cumulative tilt angle along the primary tilting direction is established using spatial vector angles. A physical model test simulating the collapse of such rock masses under predominantly gravitational loading is designed and conducted, with the resulting tilt deformation

收稿日期: 2025 - 05 - 19; **修回日期:** 2025 - 09 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42477167); 国家重点研发计划项目 (2023YFC3081400)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42477167) and National Key Research and Development Program Project of China (Grant No. 2023YFC3081400)

behavior analyzed. Additionally, high-low temperature tests are performed to calibrate MEMS tilt sensor drift, and automated field monitoring is implemented to capture time-series variation patterns of tilt angles during collapse events. Comprehensive analysis indicates that precursory tilt deformation transitions from a constant-rate phase to an accelerating phase. However, due to subcritical crack propagation within a heterogeneous medium, localized step-like fluctuations occur during the constant-rate stage, while trend alterations manifest during acceleration. A power-law relationship is identified between the tilt rate and its acceleration prior to collapse. Based on this relationship, a collapse time prediction equation utilizing the inverse of the tilt rate is proposed, and the predictive efficacy of both linear and nonlinear formulations is evaluated. These findings support the application of tilt-sensing technology in monitoring and early warning systems for rock collapse.

Key words: slope engineering; tension-fractured rock mass; tilt deformation; subcritical crack propagation; collapse model test; field monitoring; MEMS tilt sensor

First author: HE Zheng (1995 -), assistant research fellow, is engaged in monitoring and early warning of unstable rock mass on slopes. E-mail: hezheng_ustb@126.com

***Corresponding author:** XIE Mowen (1965 -), professor, is engaged in slope disaster prevention and mitigation. E-mail: mowenxie@126.com

1 引言

拉裂型危岩体是我国广泛分布的危岩体类型^[1],其后缘发育陡倾张拉裂隙,在重力作用下,岩体裂隙逐渐损伤发展^[2],最终往往发生突发性崩塌,进而可能造成地质灾害。现阶段,变形是拉裂型危岩体最主要的监测内容,揭示崩塌前兆变形规律是实现灾害精准预警的关键。

拉裂型危岩体往往具有脆性破坏特征,长期蠕变变形缓慢微小^[3],但失稳崩塌快速短暂^[3],崩塌前兆变形规律研究难度较大。由于拉裂型危岩体的稳定性受拉张区控制^[4],其蠕变过程可参考岩石的拉伸蠕变行为:周德培^[5]指出岩石在单轴拉伸下的加速蠕变持续时间可能很短,甚至难以观察;陈有亮和孙钧^[6]从岩石断裂角度指出岩石在初始应力强度因子小于断裂韧度的情况下也会发生持续的拉伸蠕变直至断裂;R. H. C. Wong与K. T. Chua^[7]观察到了岩梁试件加载的初始-稳态-加速蠕变过程,指出蠕变过程伴随着裂隙尖端持续的微裂纹亚临界扩展现象。从岩石力学研究可推断,重力作用下拉裂型危岩体可能具有短暂的加速蠕变阶段,且受裂隙时效扩展的控制。

此外,在拉裂型危岩体变形监测研究方面,国内外学者普遍采用地面激光雷达遥测方法进行定期监测:A. Abellán等^[8]借助激光扫描定期监测技术,发现拉裂型危岩体在崩落前的厘米级变形;M. J.

Royán等^[9]进一步通过该技术发现了危岩体在临近破坏前的位移指数呈加速趋势;E. Rowe等^[10]分析了207次落石事件的临崩变形行为,指出激光扫描可实现33%危岩体变形前兆识别,并发现倾斜变形常见于具有陡倾裂隙的危岩体;H. B. Li等^[11]通过分析激光点云旋转平移解算分析,发现拉裂型危岩体的倾斜行为是变形的重要特征。总的来说,拉裂型危岩体崩塌前可能具有可测的加速倾斜变形行为。但由于激光扫描技术数据处理流程繁琐,假设条件苛刻,难以实现倾斜变形的自动化实时监测。

值得注意的是,随着微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)技术的发展,有关学者尝试利用简易高效的MEMS技术进行边坡倾斜变形监测研究。日本学者T. Uchimura等^[12]早期提出利用MEMS倾斜角度传感器监测土体表面倾斜异常行为作为边坡的预警信号,近几年来,MEMS倾斜监测技术多应用于滑坡监测研究^[13-14]。由于MEMS传感器具有精度高且价格经济的特点,显著降低了预警系统的构建成本,结合低功耗无线通信技术,能够使安装部署与后期维护较传统有线传感方式更为便捷,同时提升了数据传输的效率和可靠性,相较传统位移监测,其更加适配具有倾斜变形特征的危岩体^[15]。现阶段,MEMS倾斜监测技术也已逐渐尝试应用于我国拉裂型危岩体的监测预警,然而鲜有拉裂型危岩体临崩过程中倾斜变形规律的研究文献,现有研究尚难支撑准确的预警研判。

为此,本文以拉裂型危岩体倾斜变形作为研究

切入点，结合裂隙时效扩展过程倾斜变形的理论解析、基于 MEMS 倾斜传感技术的崩塌物理模型监测试验与崩塌现场自动化监测研究，对拉裂型危岩体临崩倾斜变形阶段演化特征进行了深入分析，得到了崩塌前兆规律与预测模型，研究成果对于危岩崩塌的预警预测具有积极的指导意义。

2 拉裂型危岩体时效倾斜变形过程的断裂力学分析

2.1 时效倾斜变形断裂力学模型构建

为了深入理解拉裂型危岩体倾斜变形规律，首先进行理论解析研究。由于危岩体崩塌破坏本质上是主控裂隙的断裂扩展^[16]，这里把危岩崩塌演化过程概化为含边缘裂隙的岩石蠕变断裂过程，由于拉裂型危岩体的稳定性一般受最大拉应力控制^[4]，这里忽略剪应力的作用，将危岩体概化为受弯 I 型断裂模式^[17]，根据拉裂型危岩体的受力特征，建立如图 1 所示的简化二维力学模型，图中， H 为高度(m)， L 为厚度(m)， x 为主控裂隙长度(m)， m 为质量(kg)， g 为重力加速度(m/s²)， σ_{\max} 为岩桥截面最大正(拉)应力， θ 为裂隙张开角(rad)。

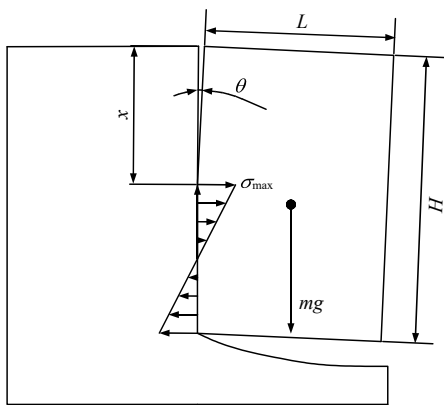


图 1 简化二维力学模型

Fig.1 The simplified 2D mechanical model

根据线弹性断裂力学原理，岩体裂端应力强度因子 K_I 达到或超过其临界值 K_{IC} 时，裂隙将以接近介质中声速的传播速度扩展，而在长期荷载作用下，当 K_I 远小于 K_{IC} 时，裂隙仍能有一个准静态扩展过程，这种现象被称为亚临界裂隙扩展^[18]。大量岩石力学试验研究已经证实，裂隙的灾变性扩展通常是在亚临界扩展之后发生的，并发现了张拉型(I 型)裂隙扩展速率与裂隙尖端应力强度因子之间的关系符合 Charles 幂率^[18-23]，可由下式表示：

$$\frac{dx}{dt} = A \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n \quad (1)$$

式中： K_{IC} 为断裂韧度(Pa · m^{1/2})， A 为裂隙扩展速率常数(m/s)， n 为应力腐蚀常数， x 为主控裂隙长度， t 为时间。

根据应力强度因子手册^[24]，裂纹尖端应力强度因子 K_I (Pa · m^{1/2}) 由下式表示：

$$K_I = \sigma_{\max} \sqrt{\pi x} F_1(\lambda) \quad (2)$$

其中，

$$\lambda = \frac{x}{H} \quad (3)$$

$$F_1(\lambda) = 1.122 - 1.4\lambda + 7.33\lambda^2 - 13.08\lambda^3 + 14\lambda^4 \quad (4)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{3\rho g L^2}{H} \quad (5)$$

式中： λ 为裂隙贯通比， $F_1(\lambda)$ 为理论校正函数^[24]， ρ 为危岩密度(kg/m³)。

将式(2)~(5)代入式(1)中整理可得到：

$$\frac{d\lambda}{dt} = A \left(\frac{\sigma_{\max} \sqrt{\pi}}{K_{IC}} \right)^n H^{\frac{n-2}{2}} [F_2(\lambda)]^n \quad (6)$$

式中： $d\lambda/dt$ 为裂隙贯通比变化速率(s⁻¹)； $F_2(\lambda)$ 为理论校正函数，表示如下^[24]：

$$F_2(\lambda) = 1.122\lambda^{0.5} - 1.4\lambda^{1.5} + 7.33\lambda^{2.5} - 13.08\lambda^{3.5} + 14\lambda^{4.5} \quad (7)$$

为了使式(6)可积且尽可能避免对计算结果趋势与精度的影响，将多项式函数 $F_2(\lambda)$ 改写成在 [0, 1] 自变量范围内函数值拟合优度为 0.98 的幂函数 $F_2'(\lambda)$ ：

$$F_2'(\lambda) = 7.396\lambda^{3.192} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)进行替换，并用 $t = 0$ ， $\lambda = \lambda_0$ 的初始条件进行常微分方程求解，则可得到裂隙贯通比的时变模型：

$$\lambda(t) = \left[\mu 7.396^n A \left(\frac{\sigma_M \sqrt{\pi}}{K_{IC}} \right)^n H^{\frac{n-2}{2}} t + \lambda_0^\mu \right]^{\frac{1}{\mu}} \quad (9)$$

式中： λ_0 为初始贯通比， $\mu = 1 - 3.192n$ 。

另外，断裂力学模型裂隙张开角 θ (°) 与裂隙贯通比之间的关系方程，可由下式近似表示：

$$\theta = \frac{180}{\pi} \frac{4\sigma_{\max}(1-\nu^2)}{E} F_3(\lambda) \quad (10)$$

式中： E 为岩石弹性模量(Pa)， ν 为泊松比， $F_3(\lambda)$ 为理论校正函数，由下式^[24]表示：

$$F_3(\lambda) = 0.8 - 1.7\lambda + 2.4\lambda^2 + \frac{0.66}{(1-\lambda)^2} \quad (11)$$

结合式(9)，(10)，以危岩体裂隙张开角作为其

倾斜变形表征参量, 则可得到拉裂型危岩体倾斜变形时变演化断裂力学模型, 由下式表示:

$$\theta(t) = \frac{180}{\pi} \frac{4\sigma_{\max}(1-\nu^2)}{E} F_3\{\lambda(t)\} \quad (12)$$

该模型蕴含了重力主导作用下拉裂型危岩体崩塌成因的 2 个主要特征: (1) 重力作用由恒弯矩所反映, 该恒弯矩由重力产生; (2) 风化作用由裂端应力腐蚀所反映。

2.2 倾斜变形规律理论算例分析

在确定了拉裂型危岩体宏细观参数后, 可利用式(12)计算重力长期作用下危岩体倾斜变形的时变演化曲线。细观参数取值方面, B. Atkinson^[18]采用双扭试验法得到在常温常湿空气中单晶石英应力腐蚀常数 A 的范围为 9.5~19.9, 裂隙扩展速率常数 n 的范围为 10^{-3} ~ 10^{-9} m/s; 花岗岩 A 的范围为 10^{-3} ~ 10^{-6} m/s, n 的范围为 35~45, 因此结合大量岩石试验结果^[19-23], 并考虑了计算曲线的易识性, 算例采用具体宏细观参数取值如表 1 所示。

图 2 为理论算例计算得到的倾斜变形演化曲线。在迭代求解过程中, 以裂端应力强度因子达到断裂韧度作为危岩崩塌判据, 崩塌演化时长约 72.675 9 a, 期间累积倾斜变形量约为 1.565°。宏观上, 倾斜变形理论演化曲线处于非线性增大过程, 在很长一段时期内缓慢增大, 临近崩塌发生急剧增大, 这是由于岩石材料的应力腐蚀常数(见式(1)中参数 n)较大, 在 10^1 ~ 10^2 的数量级^[18-23], 因此在重力作用下, 当应力强度因子非常接近断裂韧度时, 裂隙扩展速率才会显著增大, 倾斜才会发生突变。这解释了能够利用倾斜变形异常趋势进行崩塌预警的断裂力学机制。

并且由 Charles 幂率可知, 当裂端应力强度因子降低, 裂隙扩展速率也随之降低, 但目前实验室尚未发现岩石材料中扩展速率为 0 的应力强度因子“门槛”^[20], 甚至扩展速率低至 10^{-12} m/s 时仍没有发现阈值^[23]。可以想见, 拉裂型危岩体形成后, 在空间上可能一直存在着逐渐向临空面倾斜的极

微小变形行为。在本算例中, 危岩体倾斜变形速率由 6.16×10^{-8} °/h 在 73 a 间逐渐增长到 2.110°/h 后发生崩塌, 然而在现阶段地灾监测领域, 倾斜传感器的较优分辨力约为 0.001°^[15], 结合崩塌监测通常需要 1~24 次/d 的监测频率, 这里以 0.001°/d 作为分辨力阈值, 则很长一段时间危岩体处于倾斜变形“不可测”过程, 而能够监测到趋势变化后, 距离崩塌约 184 h(7.7 d)。这解释了崩塌灾害的“突发性”, 而由于物理力学参数的区别和监测传感器性能的差异, 危岩体变形可测时长应存在差异, 本文不过多讨论, 下面重点分析可测变形曲线的趋势特征规律。

图 3 为理论算例倾斜变形趋势可测曲线, 可以发现, 倾斜变形曲线由加速率趋近于 0、平均速率约 0.001 7°/d 的近似匀速上升向加速率逐渐增大的加速上升转变。因此, 从监测意义上, 拉裂型危岩体临崩倾斜变形曲线由“近匀速”阶段向“加加速”阶段转变。

为了描述加速倾斜变形的过程, 根据曲线宏观趋势特征, 尝试利用幂函数($y = ax^b$)与指数函数($y = a + be^{cx}$)对速率与加速率数据进行拟合, 结果如图 4 所示。虽然 2 种函数均拟合成功, 但只有幂函数能够精准描述全部数据趋势, 其关系方程为

$$\dot{\theta}^\alpha \ddot{\theta} - B = 0 \quad (13)$$

式中: $\dot{\theta}$ 与 $\ddot{\theta}$ 分别为倾斜变形速率与倾斜变形加速率, α 与 B 为方程拟合参数。

3 拉裂型边坡危岩体倾斜变形过程的模型试验分析

3.1 重力型崩塌监测物理模拟设计

(1) 倾斜变形监测方法

试验采用 MEMS 倾斜传感器进行监测, 该传感器实质上是基于硅电容测量原理的 MEMS 加速度计, 利用地球重力场稳定且方向恒定不变的原理,

表 1 理论算例宏细观参数

Table 1 Macro and micro parameters in theoretical example

危岩高度 (height of hazardous rock) H/m	危岩厚度 (thickness of hazardous rock) L/m	主控裂隙初 始贯通比 (initial crack penetration ratio) λ_0	危岩密度 (density of hazardous rock) $\rho /$ ($kg \cdot m^{-3}$)	断裂韧度 (fracture toughness) $K_{IC} / (10^6 Pa \cdot m^{1/2})$	弹性模量 (elastic modulus) $E / (10^9 Pa)$	泊松比 (Poisson's ratio) ν	裂隙扩展 速率常数 (crack propagation rate constant) $A / (10^{-5} m \cdot s^{-1})$	应力腐蚀常数 (stress corrosion constant) n
3	3	0.67	2 450	2.3	3.7	0.2	8	25

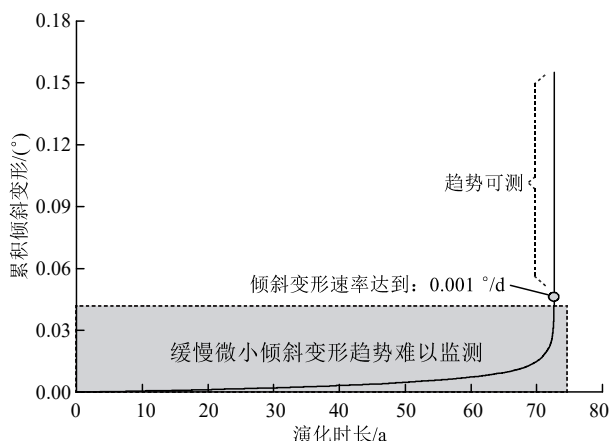
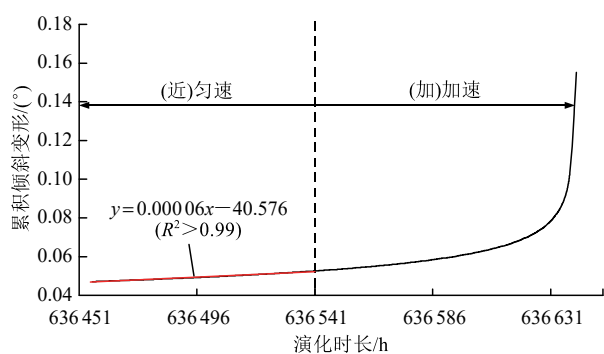
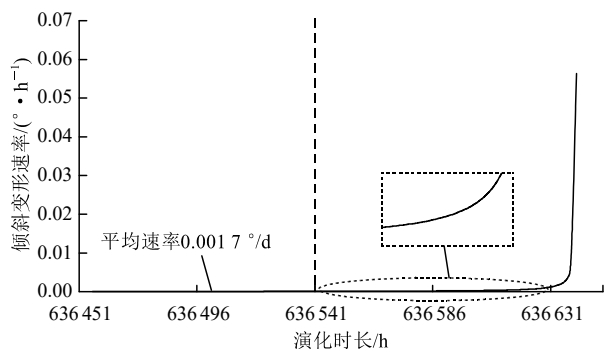


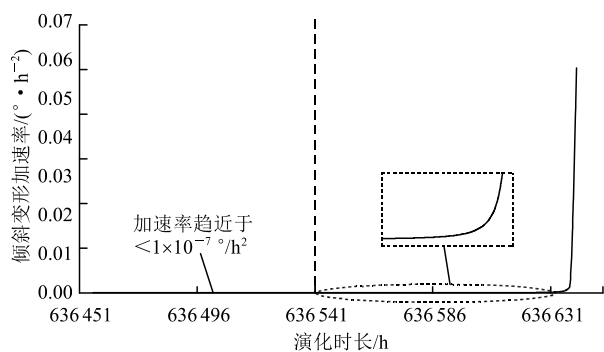
图 2 理论算例危岩体累积倾斜变形曲线
Fig.2 The cumulative tilt curve in theoretical example



(a) 累积倾斜变形
(a) Accumulated tilting deformation



(b) 倾斜变形速率
(b) Tilt deformation rate



(c) 倾斜变形加速度率
(c) Tilt deformation acceleration rate

图 3 理论算例危岩体倾斜变形趋势可测曲线

Fig.3 The measurable curves of the tilt trend in theoretical example

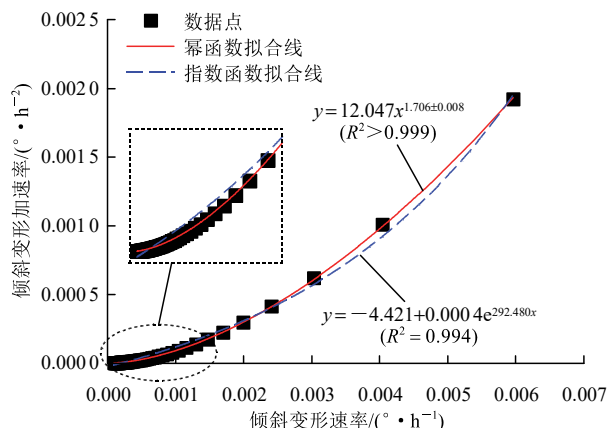


图 4 理论算例危岩体临崩倾斜变形速率与加速度拟合曲线
Fig.4 The tilt rate and tilt acceleration rate fitting curve near collapse in theoretical example

当倾斜传感器处于准静态并产生倾斜时，传感器敏感芯片上的重力加速度分量发生改变，通过对不同状态的加速度向量进行反三角函数求解即可获得倾斜角度变化量，以此实现加速度和倾斜角度之间的转换。图 5 为传感器重力加速度分量变化示意图，图中， x_0, y_0, z_0 分别为初始状态下获得的重力加速度分量， x_n, y_n, z_n 分别为倾斜转动后的重力加速度分量。

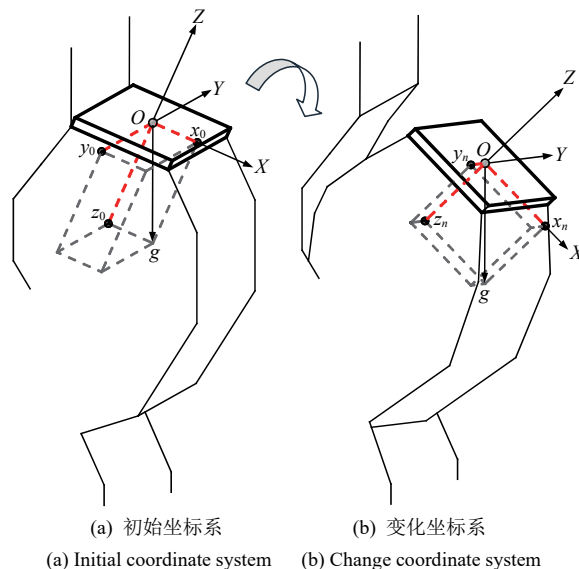


图 5 MEMS 倾斜角度传感器计算示意图
Fig.5 Measurement schematic of MEMS tilt sensor

这里采用空间矢量夹角的计算原理进行危岩体倾斜角度变化量 ϑ (°) 的计算：

$$\vartheta = \frac{180}{\pi} \arccos \left(\frac{|\overline{OG}_0 \cdot \overline{OG}_n|}{|\overline{OG}_0| \cdot |\overline{OG}_n|} \right) \quad (14)$$

其中，

$$\overline{OG}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}, \overline{OG}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix}$$

应用式(14)计算危岩体倾斜角度的优点在于:

- ① 角度计算结果为危岩体主倾斜方向上累积倾斜角度,能够有效描述危岩体的倾斜变形程度;
- ② 角度计算结果不会过分受制于传感器的安装位置与方向,易于实际应用。

试验用 MEMS 倾斜传感器外观如图 6 所示,其尺寸为 1.5 cm×2 cm×10 cm,质量仅约 0.1 kg,相关技术指标如表 2 所示。

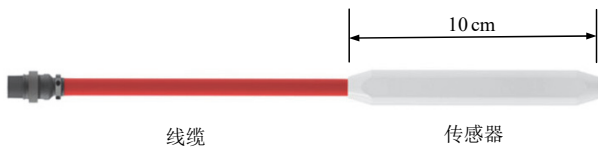


图 6 试验用 MEMS 倾斜传感器外观
Fig.6 Experimental MEMS tilt sensor

表 2 试验用 MEMS 倾斜传感器技术指标参数
Table 2 Parameters of experimental MEMS tilt sensor

量程 (range)/(°)	精度 (accuracy)/(°)	工作温度(operating temperature)/°C	采样频率(sampling frequency)/Hz
0~45	±0.003	-30~70	0~1 000

(2) 崩塌物理模拟设计

自然环境下,拉裂型危岩体与边坡母岩体多具有相同的材料属性,且危岩体的破坏由其后缘裂隙的损伤扩展断裂导致,考虑到上述因素,本次试验保证整个模型的材料相同,采用预制前缘底部临空段与在后缘切割裂隙的方式形成危岩体物理模型,典型物理模型结构如图 7 所示。

物理模型相似材料是以典型灰岩的力学性质作为原岩参考,以原岩:相似材料为 1:1 的密度比、100:1 的应力比和尺寸比配置而成。相似材料配合比与力学参数如表 3, 4 所示。

危岩体崩塌演化过程可能持续几十年甚至几百

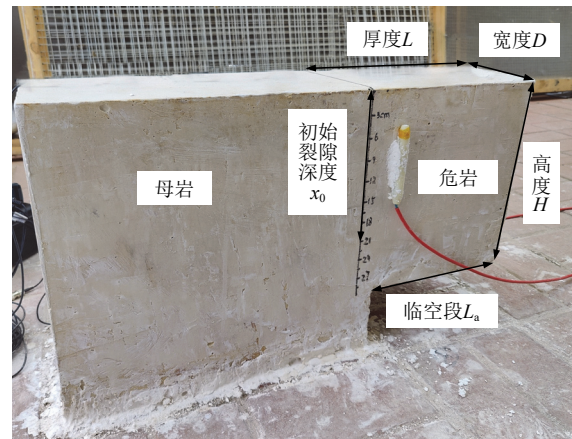


图 7 典型危岩体物理模型

Fig.7 Typical physical model of hazardous rock mass

表 3 相似材料配合表

Table 3 Mix proportions of similar materials

材料(material)	质量比(mass ratio)
石英砂	6.000
重晶石粉	4.000
石膏	1.000
水	2.000
甘油	0.300
缓凝剂	0.002

年,在物理模拟过程中,如何合理加速诱发崩塌是试验的关键,由于本次试验需要探明恒重主导作用下危岩体的微倾斜变形规律,且倾斜监测本质是监测加速度的变化,因此,试验过程不宜改变危岩尺寸质量、不能有太大的外部噪声,因此,常用的加载、开挖、离心等方法均存在一定限制。由于崩塌灾害大多发生在雨季,水环境是诱发崩塌的最不利的外部因素,同时水环境也会加快裂隙的应力腐蚀速率^[21-22]。因此,为了能够在合理时间内监测到危岩体崩塌前的微小倾斜变化特征,通过“裂隙滴水”方法来诱发危岩体崩塌,如图 8 所示。该方法的水岩接触点在裂隙端部,试验过程中储水区仅在裂端

表 4 相似材料力学参数表

Table 4 Mechanical properties of similar materials

材料 (material)	密度 (density)/ (g·cm ⁻³)	抗拉强度 (tensile strength)/ MPa	抗拉强度 软化系数 (tensile strength softening coefficient)	抗压强度 (compressive strength)/MPa	抗压强度 软化系数 (compressive strength softening coefficient)	弹性模量 (elastic modulus)/ GPa	泊松比 (Poisson's ratio)	黏聚力 (cohesion)/ MPa	内摩擦角 (internal friction angle)/(°)
原岩平均值	2.846	7.79	0.60	89.89	0.67	33.07	0.17	23.187	40.68
相似材料平均值	2.829	0.12	0.68	1.01	0.71	0.28	0.26	0.190	50.00

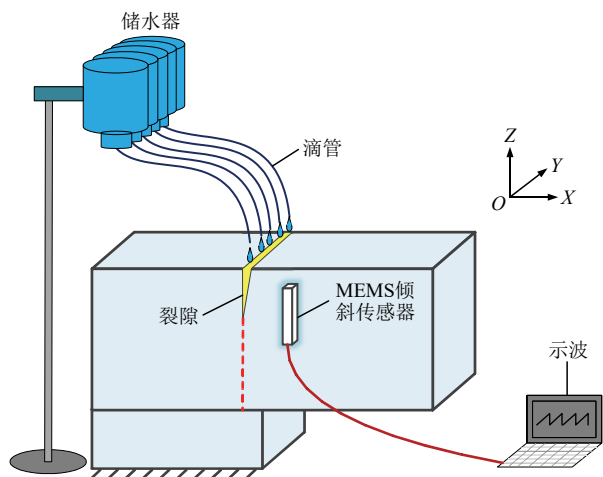


图 8 崩塌物理模拟示意图

Fig.8 Schematic diagram of collapse physical simulation

3~5 cm 范围，尽量控制了危岩体质量的恒定，确保能够在恒定应力腐蚀环境下实现危岩体倾斜变形演化规律的有效捕捉。

(3) 试验组别设置

为了验证理论规律的正确性，试验设置了 3 组不同尺寸和裂隙深度的物理模型，具体尺寸如表 5 与图 9 所示，危岩质量分别为 156, 47 与 26 kg，崩塌演化时长分别为 556, 2 793 与 1 189 min。

3.2 倾斜角度 - 时间试验监测曲线分析

图 10 为危岩体物理模型累积倾斜角度 - 时间试验监测曲线。宏观上曲线均存在由“近匀速”上升向“加加速”上升的转变，与理论规律一致。倾

斜角度匀速上升过程中呈现出“试验条件可测”的极缓慢变化，3 组试验分别约为 0.000 2°/h, 0.001°/h 与 0.000 5°/h，第 1, 2 组试验曲线为“直线上升”形态，曲线在微小波动状态下的近匀速上升，波动幅度与监测精度有关；第 3 组试验曲线在直线上升过程中存在局部增量加剧与恢复的“阶跃上升”。

图 11 为加速阶段累积倾斜角度 - 时间监测曲线，3 组危岩体倾斜角度加速上升过程分别持续 220.7, 217.8 与 121.91 min，崩塌前临界变化速率分别约为 0.04°/h, 0.03°/h 与 0.18°/h，试验结果有着明显的差异，这反映了不同危岩体之间的“个性”特征。此外，对 3 组试验加速阶段倾斜角速变化速率与加速率进行幂函数拟合，如图 12 所示，整体数据符合幂函数关系(拟合优度>0.97)，与理论解析结果一致，因此该“加加速”现象可作为拉裂型危岩体的“共性”崩塌前兆特征。另外，结合图 11, 12 也可以发现，危岩体加速过程中也出现了加速“趋势更新”现象。

3.3 裂隙扩展特征分析

3 组试验过程中，很难通过人工发现危岩体的宏观变形破坏现象，但在临近崩塌之前，通过高清摄像发现了危岩体表面裂隙的亚临界扩展迹象，这里以第 3 组试验为例，亚临界扩展过程如图 13(a)~(c)所示，初始迹象出现在崩塌前 280 s，由裂隙端部向下发展，逐渐指向临空段端点。实际上，根据岩石亚临界裂隙扩展过程的声发射试验研究^[7]表明，

表 5 物理模型试验组别统计表

Table 5 Physical model experiment group statistical table

组别 (test group)	危岩尺寸(hazardous rock size)					危岩质量(hazardous rock mass)/kg	崩塌演化时长 (duration of collapse evolution)/min
	高度 (height)/cm	宽度 (thickness)/cm	厚度 (thickness)/cm	初始裂隙深度(initial crack depth)/cm	临空段长度(overhang section length)/cm		
1	30	20	28	21	25	156	556
2	18	12	24	6, 13.5	24	47	2 793
3	18	12	15	8, 14	15	26	1 189

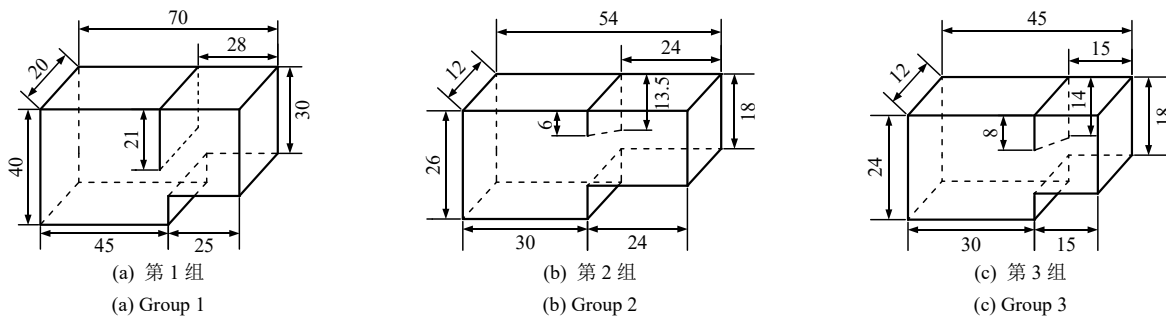
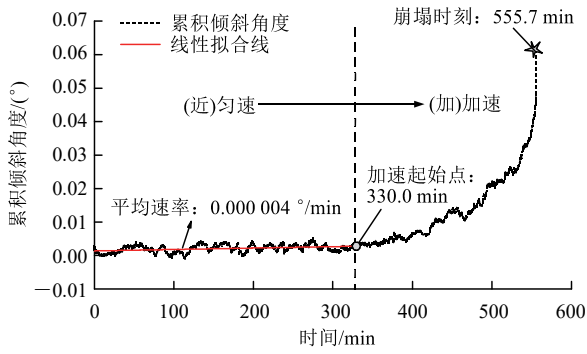
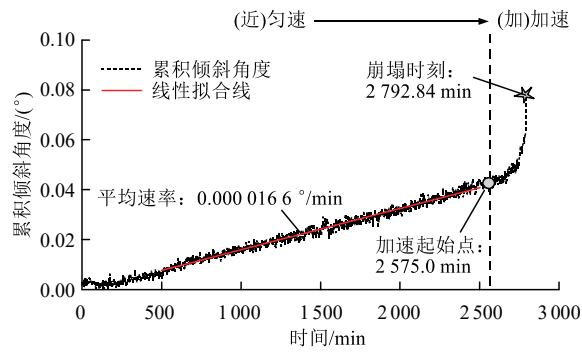


图 9 3 组危岩体物理模型尺寸图(单位: cm)

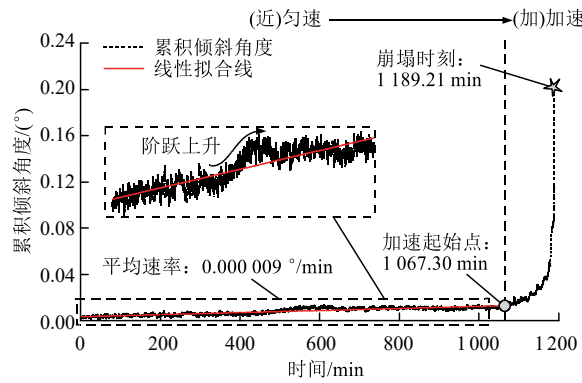
Fig.9 Dimensions of physical models of 3 groups of dangerous rock masses diagram(unit: cm)



(a) 第1组
(a) Group 1



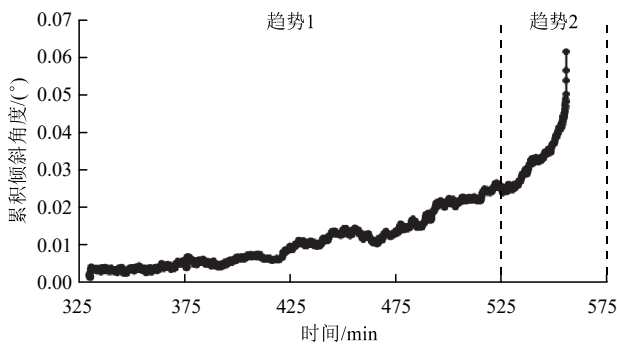
(b) 第2组
(b) Group 2



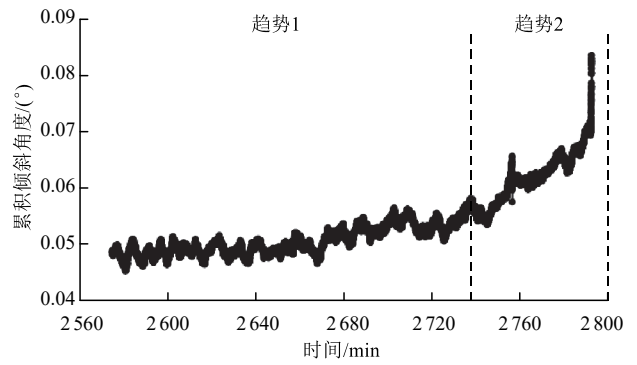
(c) 第3组
(c) Group 3

图 10 模型试验危岩体累积倾斜角度监测曲线

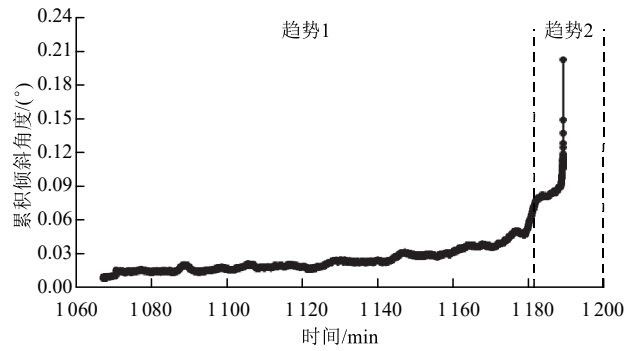
Fig.10 Accumulated tilt angle monitoring curves of hazardous rock masses in model tests



(a) 第1组
(a) Group 1



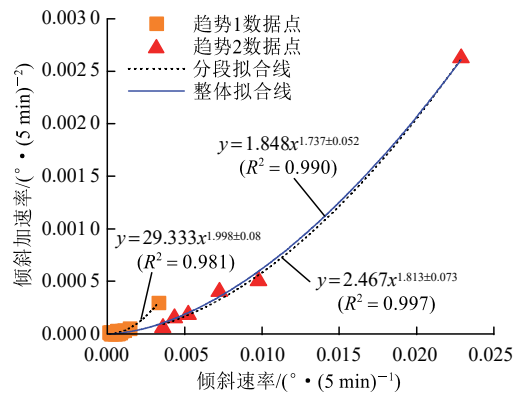
(b) 第2组
(b) Group 2



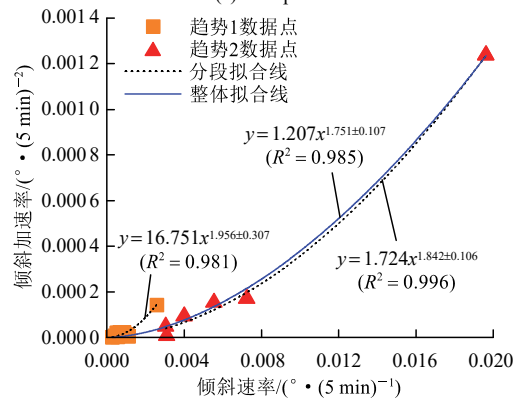
(c) 第3组
(c) Group 3

图 11 模型试验危岩体临崩倾斜加速监测曲线

Fig.11 Monitoring curves of the accelerated tilting process near collapse in model tests



(a) 第1组
(a) Group 1



(b) 第2组
(b) Group 2

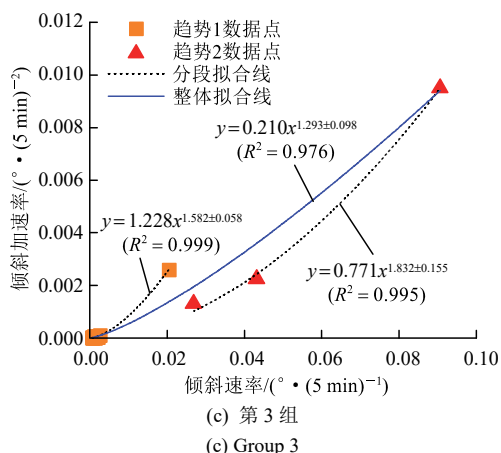


图 12 模型试验危岩体临崩倾斜变形速率与加速率拟合曲线
 Fig.12 The tilt rate and tilt acceleration rate fitting curve near collapse in model tests

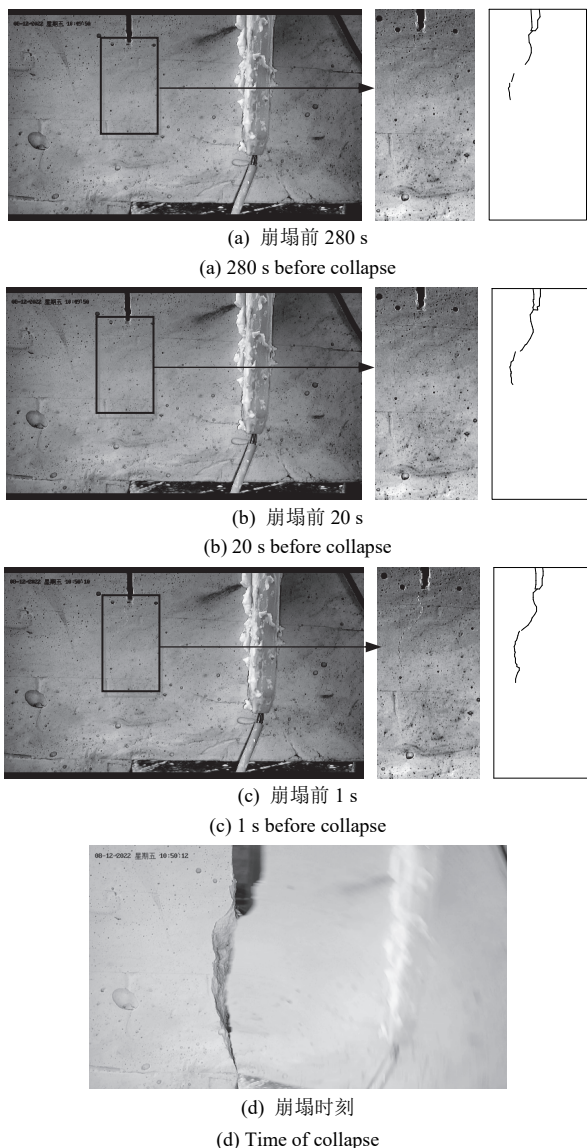


图 13 模型试验典型危岩体裂隙扩展图像
 Fig.13 Typical fracture extension images of hazardous rock masses in model tests

这种表面裂隙的亚临界扩展现象是内部微破裂累积损伤的宏观结果。可以推断，亚临界裂隙扩展是拉裂型危岩体时效演化主要原因，也反映了运用该原理进行理论模型构建的合理性。

图 13(d)为第 3 组试验危岩体断裂过程的裂隙扩展图像，可以发现，危岩体的破坏过程短暂，仅在 1 s 之内完成，且以临空段端点作为转动中心，发生快速的倾斜旋转运动。图 14 为模型试验典型危岩体破坏面，具有张拉破坏特点。其余 2 组试验也具有同样现象。因此，根据拉裂型危岩体的破坏特征，拉应力强度的失效是失稳崩塌(断裂扩展)的主要因素，也体现了理论解析过程中断裂模式简化的合理性。

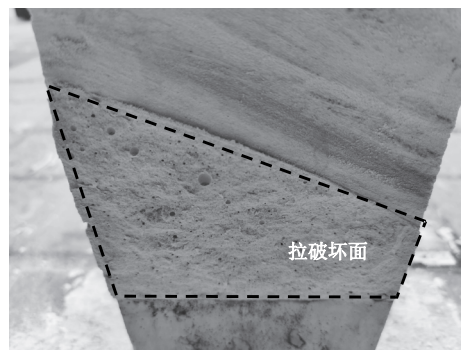


图 14 模型试验典型危岩体破坏面
 Fig.14 Typical failure surface of hazardous rock masses in model tests

4 拉裂型边坡危岩体倾斜变形过程的现场监测分析

4.1 自动化 MEMS 倾斜监测方法

为了实现危岩体倾斜变形的现场自动化监测，本文将 MEMS 倾斜采集模块(内置温度传感)、边缘计算模块、无线传输模块及电源能量模块集成封装一体，形成适用于危岩体现场监测的“微芯桩”传感器^[3]，实物如图 15 所示，密封透明外壳提供防水、防冲击的保护作用，并可使太阳光透射到太阳能板上，输出的电能存储在内置的大容量充电电池中，保证了传感器的自供电，应用配套支架能够简便地通过膨胀螺丝锚固于边坡危岩体表面，并直接通过 4G/L0Ra 等方式实现无线数据传输。

为了满足危岩体倾斜角度采集与传输的高频率、低功耗要求，设计了主动高频采集、定时与阈值触发唤醒传输相结合的采集传输方式，既保证了倾斜变形的实时获取又能节省耗能，图 16 为 MEMS 倾斜传感器采集传输机制流程图。



图 15 “微芯桩” MEMS 倾斜传感器实物图

Fig.15 Physical diagram of MEMS tilt sensor for “micro-core pile”

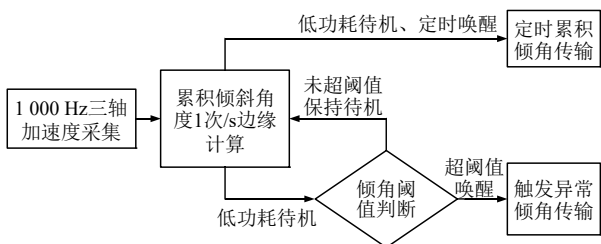


图 16 MEMS 倾斜传感器采集传输机制流程图

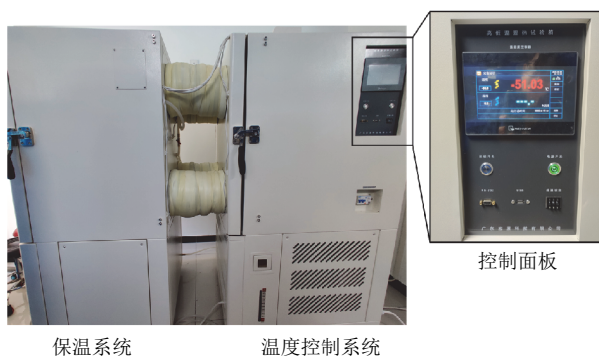
Fig.16 Flow chart of collection and transmission for MEMS tilt sensor

MEMS 加速度计以 1 000 Hz 的高采样频率主动采集加速度信息，同时以 1 次/s 进行累积倾斜角度的精确计算。基于监测经验和应用需求，这里将倾斜角度的定时传输间隔设置为 1 h，并设定触发传输阈值为 5°，不仅有助于实时获取危岩体的倾斜趋势，还能及时发现异常倾斜状态。

4.2 MEMS 倾斜传感器监测精度分析

MEMS 倾斜传感器中的核心半导体元件微硅加速度计在应用过程中易受环境温度的影响，导致监测数据出现温度漂移(温漂)，这也是影响倾斜监测精度的最关键因素^[3]。因此，为了探明不同温度下倾斜角度数据的温漂特征，首先进行传感器的高低温试验分析。将传统高低温试验箱的保温系统与温度控制系统进行分离，减少设备振动对监测的影响，试验箱如图 17 所示。

这里详细阐述后文所应用的“微芯桩 2.8 型”MEMS 倾斜传感器测试结果。通过温控系统，将高低温试验箱设置为在 -30 °C~70 °C 范围，周期 24 h 的温度变化，设定微芯桩倾斜角度为 2.8°，传输频率为 1 次/min(同时传输内置温度)，获取到的原始数据与传感器温度关系如图 18 所示。可以发现，倾斜



保温系统 温度控制系统

图 17 高低温试验箱组成实物图

Fig.17 Physical diagram of the components of high and low temperature test chamber

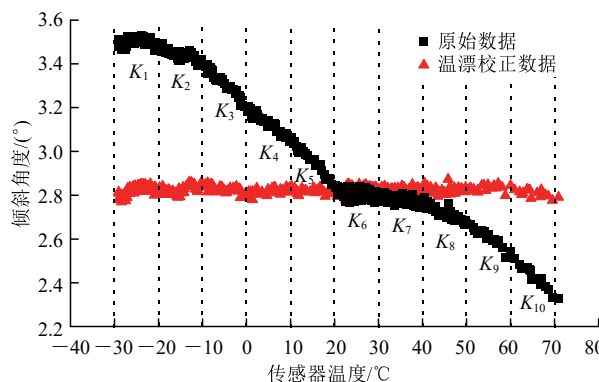


图 18 倾斜角度与温度监测数据相关性曲线

Fig.18 Correlation curves between tilt angle and temperature data

角度与传感器温度整体上呈现“分段线性关系”。温度漂移量在 5 °C~45 °C 范围为 ±0.2°，随着温度的升降，倾斜角度会产生更大漂移。因此，为了提高监测精度，需在设备出厂前对倾斜角度进行温度补偿。

采用“分段线性补偿”进行温漂校正，首先将工作温度按照每 10 °C 进行划分，通过每个温度区间内倾斜角度随温度变化的线性关系，得出相应的温漂变化率 K 。对于该测试案例，倾斜角度 θ (°) 与传感器内部温度 T (°C) 的分段线性关系为

$$\theta = \begin{cases} -0.000\ 08T + 3.490 & (-30\text{ °C} \leq T < -20\text{ °C}) \\ -0.000\ 63T + 3.354 & (-20\text{ °C} \leq T < -10\text{ °C}) \\ -0.02T + 3.211 & (-10\text{ °C} \leq T < 0\text{ °C}) \\ -0.014\ 25T + 3.204 & (0\text{ °C} \leq T < 10\text{ °C}) \\ -0.020\ 79T + 3.272 & (10\text{ °C} \leq T < 20\text{ °C}) \\ -0.001\ 91T + 2.857 & (20\text{ °C} \leq T < 30\text{ °C}) \\ -0.002\ 7T + 2.881 & (30\text{ °C} \leq T < 40\text{ °C}) \\ -0.009\ 01T + 3.128\ 2 & (40\text{ °C} \leq T < 50\text{ °C}) \\ -0.014\ 45T + 3.405 & (50\text{ °C} \leq T < 60\text{ °C}) \\ -0.018\ 87T + 3.667 & (60\text{ °C} \leq T < 70\text{ °C}) \end{cases} \quad (15)$$

则每个温度段内的温漂变化率为

$$K_i = \begin{cases} -0.000\ 08 & (i=1) \\ -0.000\ 63 & (i=2) \\ -0.02 & (i=3) \\ -0.014\ 25 & (i=4) \\ -0.020\ 79 & (i=5) \\ -0.001\ 91 & (i=6) \\ -0.002\ 7 & (i=7) \\ -0.009\ 01 & (i=8) \\ -0.014\ 45 & (i=9) \\ -0.018\ 87 & (i=10) \end{cases} \quad (16)$$

式中： K_i 为第 i 个温度段内的温漂变化率。

此外根据传感器元件的工作标定温度，这里选取 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 作为基准温度，以确保校正结果的准确性和可靠性。进一步根据利用拟合曲线对倾斜角度进行校正，使其更接近基准温度下的真实值，得到温漂校正数据 $\tilde{\theta}$ ($^\circ$) 如下式：

$$\tilde{\theta} = \begin{cases} \theta + K_1(-20 - T) + 10K_2 + 10K_3 + 10K_4 + 10K_5 & (-30\text{ }^\circ\text{C} \leq T < -20\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta + 10K_2(-10 - T) + 10K_3 + 10K_4 + 10K_5 & (-20\text{ }^\circ\text{C} \leq T < -10\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta + K_3(-T) + 10K_4 + 10K_5 & (-10\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 0\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta + K_4(10 - T) + 10K_5 & (0\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 10\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta + K_5(20 - T) & (10\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 20\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta - K_6(T - 20) & (20\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 30\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta - K_7(T - 30) - 10K_6 & (30\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 40\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta - K_8(T - 40) - 10K_7 - 10K_6 & (40\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 50\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta - K_9(T - 50) - 10K_8 - 10K_7 - 10K_6 & (50\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 60\text{ }^\circ\text{C}) \\ \theta - K_{10}(T - 60) - 10K_9 - 10K_8 - 10K_7 - 10K_6 & (60\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 70\text{ }^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (17)$$

温漂校正后的倾斜角度曲线也在图 18 中显示，可以发现，倾斜角度在 $-30\text{ }^\circ\text{C} \sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 温度漂移量为 $\pm 0.02^\circ$ ， $5\text{ }^\circ\text{C} \sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 温度漂移量为 $\pm 0.01^\circ$ ，相较原始数据大幅缩减。

图 19 为微芯桩 2.8 型传感器在湖北十堰拉裂型危岩体崩塌监测案例地区稳定边坡现场实测数据的时间序列分解曲线，可以发现，由于现场环境变化的复杂性(温度变化速率、循环幅度等)，尽管监测传感器在实验室进行了温度标定，野外应用过程中仍会出现明显的温度漂移与随机噪声^[3, 25]，温度漂移数据形态与传感器温度具有相似性，随机噪声则源于接近高斯分布的电路、环境等噪声，由监测曲线可知，该现场应用案例的监测精度约 $\pm 0.1^\circ$ 。

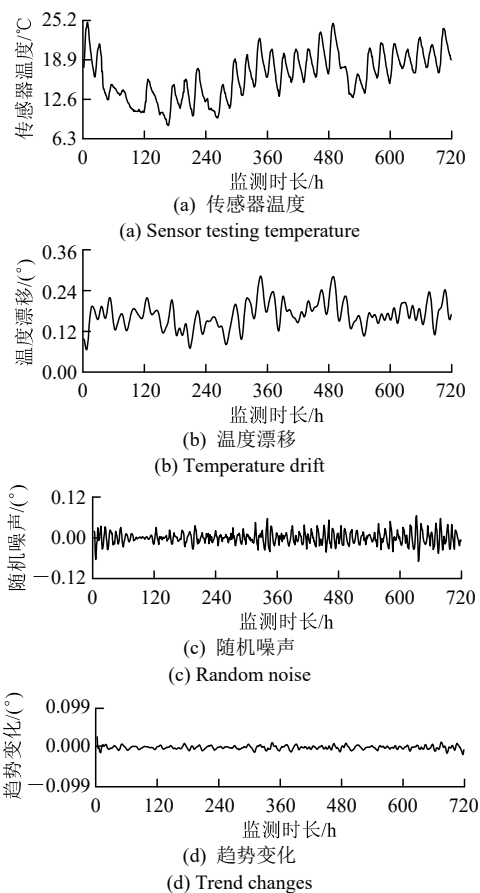


图 19 MEMS 倾斜角度传感数据时间序列分解图像
Fig.19 Time series decomposition diagram of MEMS tilt angle sensing data

此外，根据大量室内外试验测试分析，“微芯桩 2.8 型”传感器具体指标参数如表 6 所示。

表 6 “微芯桩 2.8 型”传感器倾斜指标参数
Table 6 “Microchip pile 2.8 type” sensor tilt parameters

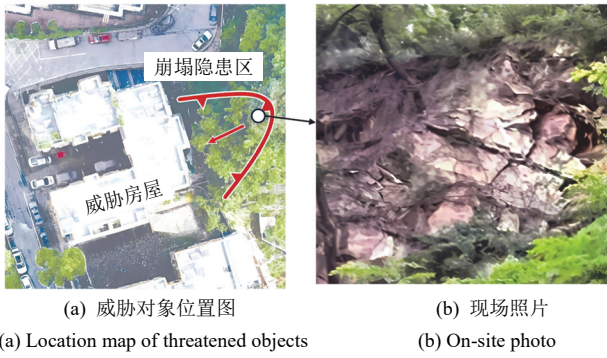
分辨率 (resolution)/($^\circ$)	标况精度(standard condition accuracy)/($^\circ$)	野外精度(field accuracy)/($^\circ$)	量程 (range)/($^\circ$)
0.001	$\pm 0.01^*$	$\pm 0.3(-30\text{ }^\circ\text{C} \sim 70\text{ }^\circ\text{C})$ $\pm 0.1(5\text{ }^\circ\text{C} \sim 35\text{ }^\circ\text{C})$	0~90

注：*表示常温常压下精度。

4.3 重力型崩塌监测案例概况

拉裂型危岩体崩塌监测案例位于湖北十堰，危岩体赋存于陡峭天然山体，后缘发育超 30 cm 宽长卸荷裂隙，存在向临空方向的变形条件，底部存在挤压破裂现象，具有明显的拉裂破坏特征，威胁着房屋居民安全，危岩体示意图如图 20 所示。

为实时获取危岩体的崩塌演化特征，在危岩体表面安装了“微芯桩 2.8 型”MEMS 倾斜传感器。自监测系统正常工作，约 77 d 后危岩体在重力作用下发生了崩塌，方量约 10 m^3 ，崩塌后现场情况如图 21 所示。系统成功获取了崩塌演化过程的微小

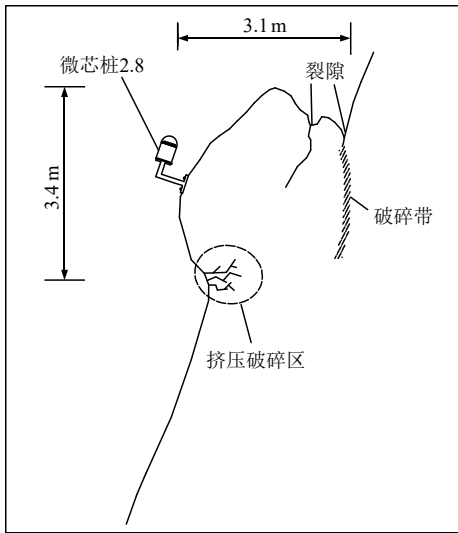


(a) 威胁对象位置图

(b) 现场照片

(a) Location map of threatened objects

(b) On-site photo



(c) 素描图

(c) Profile diagram

图 20 湖北十堰崩塌监测案例现场危岩体示意图

Fig.20 Schematic diagram of the hazardous rock mass at the site of collapse monitoring case in Shiyan, Hubei



图 21 崩塌现场照片

Fig.21 Pictures of the collapse site

倾斜变形过程。

4.4 倾斜角度 - 时间现场监测曲线分析

危岩体倾斜角度监测曲线如图 22 所示。由于危岩体断裂扩展时刻会产生高能量振动^[26]且很快发生倾斜、碰撞解体，导致采集的静态重力加速度附加了动态振动加速度，因此微芯桩能够秒级计算

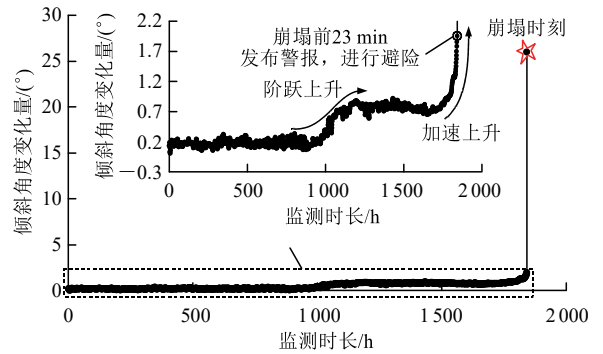


图 22 危岩体倾斜角度现场监测曲线

Fig.22 Monitoring curve of the tilt angle of hazardous rock mass on site

出异常突变倾斜角度(本案例约 26°)，并发生触发传输(阈值为 5°)。因此根据监测曲线可知，危岩体崩塌时刻约为自监测起 1 841 h 26 min。监测系统成功记录了危岩体崩塌前的倾斜加速变形趋势，监测曲线加速上升过程持续约 117 h，临界变化速率约 0.093°/h。然而，监测曲线未显示出匀速变形阶段的直线上升过程，这可能是由于危岩体匀速变形量微小，其变化趋势被掩盖在了噪声当中，或由于匀速变形速率极为缓慢且监测时长较短，监测曲线宏观上只能识别出匀速变形阶段的某一阶跃上升过程。

将倾斜加速变形过程数据进行平滑滤波，并利用幂函数拟合发现，在 1 827 h 时(崩塌前约 14.5 h)，倾斜速率与倾斜加速率呈明显的幂函数关系，如图 23 所示，随着危岩体的崩塌演化发展，该关系更为明显，因而能够指导本案例在崩塌前 23 min 发布崩塌警报。因此，拉裂型危岩体的幂函数加速关系(式(13))可作为危岩体的崩塌预警判据。

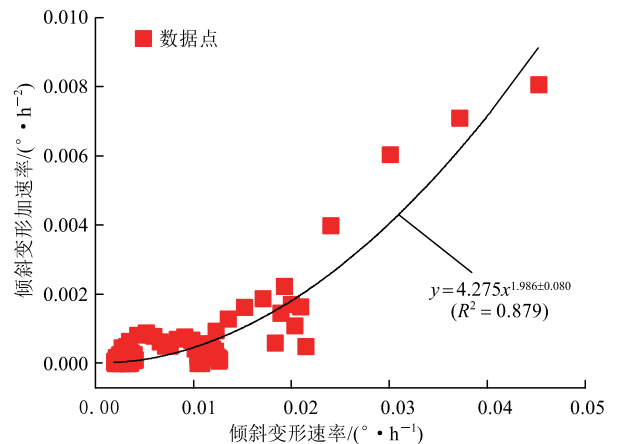


图 23 现场危岩体临崩倾斜变形速率与加速率拟合曲线
Fig.23 The tilt rate and tilt acceleration rate fitting curve near collapse on site

5 讨 论

5.1 拉裂型危岩体临崩倾斜演化曲线特征

本文通过理论解析、模型试验、现场实测 3 种方法对拉裂型危岩体崩塌前的倾斜演化曲线进行了趋势特征分析，为了进一步讨论 3 种方法得到的曲线规律性和差异性，这里绘制了典型曲线对比图，如图 24 所示。

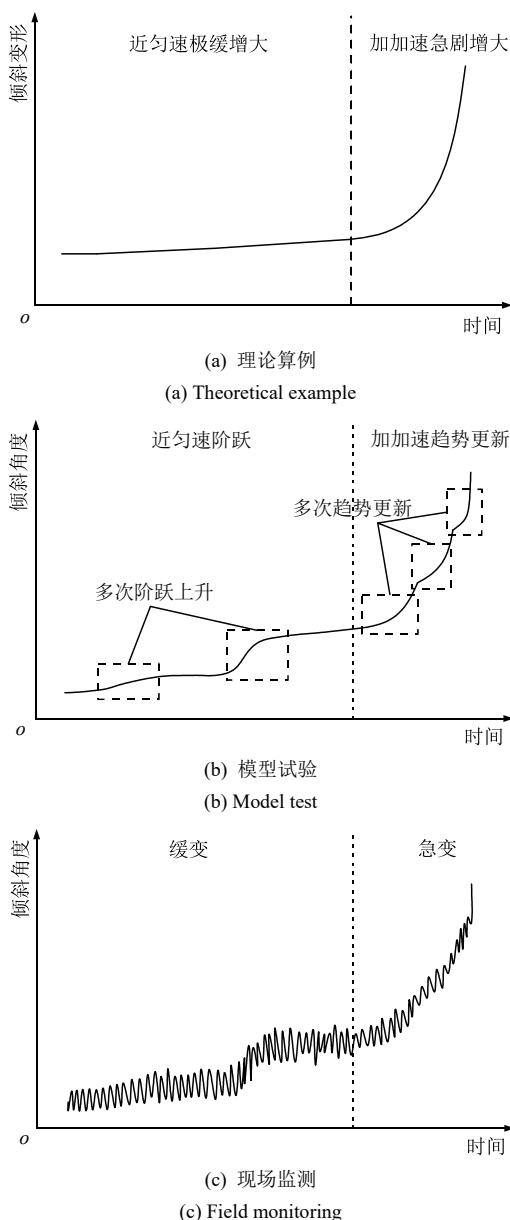


图 24 拉裂型危岩体崩塌前的倾斜演化曲线对比

Fig.24 Comparison of tilt evolution curves before the collapse of tensile fracture type hazardous rock mass

图 24(a)为倾斜变形理论解析曲线概化图，由于理论推导过程中对拉裂型危岩体力学模型进行了均

质连续简化，裂隙发育在临空段的最不利截面，且忽略了剪应力作用，裂隙亚临界扩展路径由端部向底部临空段端点垂直扩展，倾斜变形曲线形式呈现出理想的“近匀速”极缓增大与“加加速”急剧增大过程。

图 24(b)为物理模型试验累积倾斜角度 - 时间监测曲线概化图。由模型试验结果可知，拉裂型危岩体的崩塌演化是拉应力主导的亚临界裂隙扩展过程，裂隙亚临界扩展路径整体上由裂端向下延伸扩展至临空段端点，因此试验曲线在总体趋势上与理论规律较为一致，但在匀速上升阶段出现了局部“阶跃上升”现象，加速上升阶段出现了“趋势更新”现象。岩石力学研究表明，岩石的非均质性会导致宏观变形的非线性行为^[27]，破坏面的非均匀介质会导致变形的阶跃变化^[28]。对于本次物理模型试验，由于相似材料在拌合过程中很难做到各类骨料的完全均匀分布，同时由于相似材料固化过程中内部会存在气孔，导致了断续的裂隙亚临界扩展路径，因此推断，相似材料的非均质性是导致试验曲线与理论规律存在局部差异的原因，这实际上更真实地反映了危岩体的倾斜变形特征。

图 24(c)为累积倾斜角度 - 时间现场监测曲线概化图，由试验曲线叠加环境噪声形成。MEMS 倾斜传感器由于受到环境温度等影响，会在真实趋势上存在波动噪声，以至于掩盖了危岩体微小的倾斜变形趋势。由图可知，野外监测条件下，危岩体近匀速变形过程中，倾斜监测曲线的小幅阶跃过程和直线上升过程都可能被掩盖，而危岩体加加速变形过程中倾斜监测曲线的趋势更新也可能难以识别。因此在现场实测中，抓住可测加速过程的趋势规律是实现崩塌预测的关键。

5.2 基于倾斜加速演化规律的拉裂型崩塌预测

本文通过系统的研究，推导并验证了拉裂型危岩体崩塌前加速倾斜过程中倾斜速率与加速率之间的幂函数关系(式(13))，实际上，这一发现与 B. Voight^[29]总结的固体材料蠕变规律一致，也是 M. Satio^[30]模型和 T. Fukuzono^[31]模型的广义表达式，因此这一规律发现也对于崩塌预测具有重要意义。结合前人的思路，为了得到倾斜变形与时间的关系方程，当 $\alpha > 1$ 时，将式(13)进行微分方程求解可以得到：

$$\frac{1}{\theta} = [B(1 - \alpha)t + C(1 - \alpha)]^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (18)$$

式中： C 为方程拟合参数。

进一步地，设 t_f 为崩塌时刻， $\dot{\theta}_f$ 为崩塌时刻的倾斜变形速率，则由式(18)整理可得到速率倒数方程为

$$\frac{1}{\dot{\theta}} = \left\{ B(1-\alpha) \left[t - \left(\frac{\dot{\theta}_f^{1-\alpha}}{B(1-\alpha)} + t_f \right) \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (19)$$

假设崩塌时刻 $\dot{\theta}_f$ 为无穷大值，则速率倒数方程可改写为

$$\frac{1}{\dot{\theta}} = [B(1-\alpha)(t-t_f)]^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (20)$$

基于此假设，崩塌发生时，式(20)中 $\dot{\theta}$ 趋近于无穷($\dot{\theta}_f$)，则等式左边趋于 0，此时 $t=t_f$ ，因此绘制 $1/\dot{\theta}-t$ 的关系曲线，则曲线横截距为预测的崩塌时间。

图 25 为本文数据拟合的幂指数 α 统计图，由图可知， α 均小于 2.0，且 α 在 1.7~2.0 范围的占比超过 80%，接近 2.0。因此，理论上拉裂型危岩体临崩加速阶段速率倒数曲线形式为下凹型且近似直线。

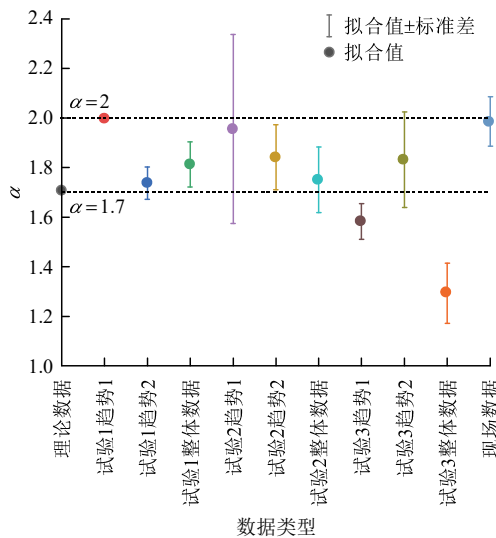


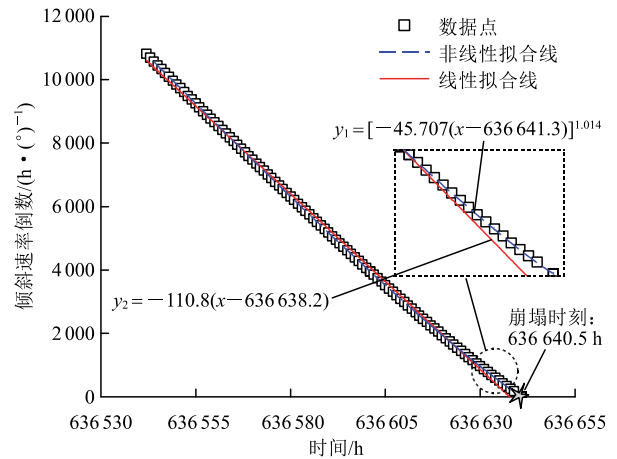
图 25 本文数据拟合的幂指数 α 统计图

Fig.25 Statistical chart of α fitted by the data in this paper

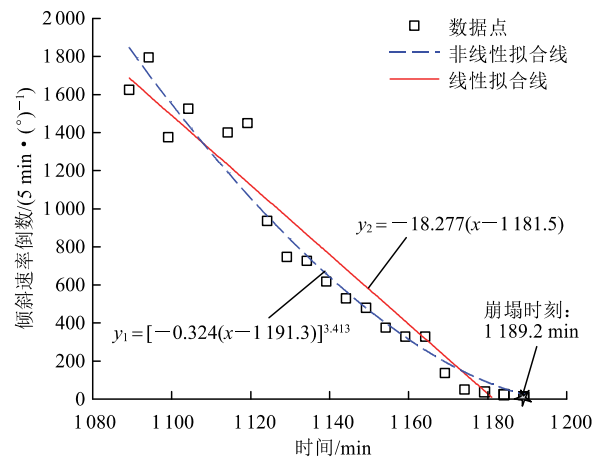
为了便于预测应用，速率倒数方程实际使用中往往令 $\alpha=2$ ^[32-35]，则式(20)可改写为线性形式：

$$\frac{1}{\dot{\theta}} = -B(t-t_f) \quad (21)$$

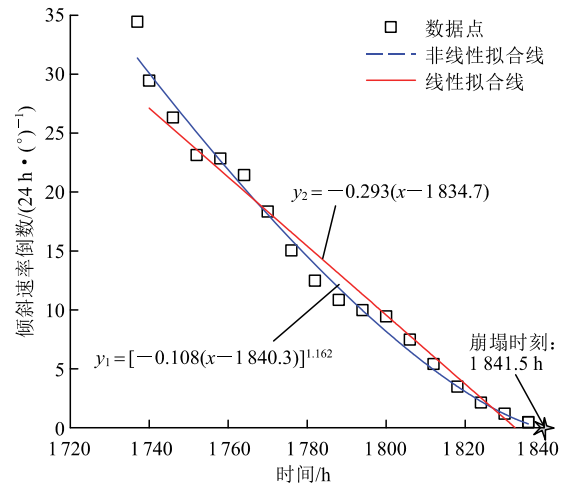
首先利用式(20)非线性方程对本研究典型数据进行拟合后如图 26 所示。可以发现，理论算例拟合横截距为 636 641.3 h，与理论崩塌时刻 636 640.5 h 的误差为 0.8 h；模型试验以第 3 组为例，拟合横截距为 1 191.3 min 与实际崩塌时刻 1 189.2 min 误差



(a) 理论算例
(a) Theoretical example



(b) 模型试验(以第 3 组为例)
(b) Model test (taking Group 3 as an example)



(c) 现场监测
(c) Field monitoring

图 26 倾斜速率倒数拟合曲线

Fig.26 Fitting curves of reciprocal tilt rate

为 2.1 min；现场监测案例数据拟合预测计算结果为 1 834.3 h，与实际崩塌时间 1 841.5 h 的误差为 1.2 h。可以发现，非线性方程的拟合结果与实际崩塌时间较为一致，但不可否认的是，由于拟合曲线是“下

凹”型, 崩塌预测结果易偏于危险(在真实崩塌时间后), 例如理论与试验结果, 且由于非线性方程的拟合过程中, 很容易由于方程拟合参数初值设定偏离过大而造成拟合不收敛, 不易于实际应用。

利用式(21)线性方程对本研究典型数据进行拟合后也在图 26 显示, 可以发现, 线性方程拟合结果与真实崩塌时间也较为接近, 预测误差分别为 2.3 h, 7.7 min 与 6.8 h, 2 个方程拟合预测结果对比如表 7 所示(表中, 拟合预测误差 = 拟合预测时间 - 真实崩塌时间)。整体上, 线性方程预测误差为非线性方程的 3~5 倍, 但线性方程预测结果偏于安全且计算更为便捷。

表 7 线性与非线性倾斜速率倒数方程预测结果对比
Table 7 Comparison of prediction results between linear and nonlinear equations

方程类型 (equation type)	拟合预测误差 (fitting prediction error)			备注 (remarks)
	理论算例 (theoretical example)/h	模型试验 (model test)/min	现场监测 (field monitoring)/h	
非线性方程	0.8	2.1	-1.2	正值为 偏于危险
线性方程	-2.3	-7.7	-6.8	

综上分析, 倾斜速率倒数崩塌预测方法具有应用潜力, 可结合线性与非线性方程的预测结果进行崩塌预报的综合判断。

需要说明的是, 由于现场数据的精准获取是实现危岩体演化状态判断的基础, 下一步将继续进行 MEMS 倾斜传感设备的迭代研发, 提高监测精度, 目前“微芯桩 4.0 型”倾斜传感器已实现 $\pm 0.05^\circ$ 的温度漂移控制^[3], 但由于野外环境的复杂性, MEMS 倾斜数据实时可靠性检测^[25]与滤波处理方法^[35]仍需进一步研究。此外, 危岩体进入倾斜加加速过程是预警判断的关键, 而基于 MEMS 倾斜传感数据特征的加加速起始点、“趋势更新”点识别^[34]与倾斜速率倒数方程实时预测应用方法^[3]仍需进一步研究。另外, 对于非均质强脆性岩体, 其崩塌演化过程的多次“局部阶跃”加速或突跳^[28], 很容易出现变形预警误报, 由于裂隙的损伤扩展控制着边坡岩体的稳定性, 贺 铮等^[36]提出了通过固有振动特征反演岩体裂隙亚临界扩展行为的思路; 张晓勇等^[37]提出了裂隙扩展临界阈值计算方法; 杜 岩等^[38]进一步进行变形 - 振动特征结合的综合预警研究, 以提高预警准确率。总而言之, 探明复杂裂隙结构、复杂失稳工况下拉裂型危岩体演化规律并建立实时

精准预测预警方法是进一步的研究重点。

6 结 论

本文以拉裂型危岩体倾斜变形作为研究切入点, 结合主控裂隙亚临界扩展过程的断裂力学解析、基于 MEMS 倾斜传感技术的物理模型试验与现场自动化监测对重力主导作用下危岩体微小倾斜变形规律进行了系统分析, 得到主要结论如下:

(1) 拉裂型危岩体的时效变形演化受主控裂隙的亚临界扩展过程控制, 倾斜转动是其主要的变形行为。

(2) 拉裂型危岩体崩塌前倾斜变形由“(近)匀速”向“(加)加速”转变, 但受危岩体裂隙扩展路径的非均质介质影响, 匀速变形阶段会出现“局部阶跃”现象, 加速变形阶段会出现“趋势更新”现象。

(3) 拉裂型危岩体具有倾斜变形加速且速率与加速率呈幂函数关系(式(13))的可测崩塌前兆特征。临崩阶段幂指数小于 2, 且 80% 在 1.7~2.0 范围, 倾斜速率倒数曲线呈现下凹型且近似直线。

(4) 提出了倾斜速率倒数崩塌时间预测方程, 验证了利用拟合曲线横截距进行崩塌预测的适用性。典型理论、试验与现场数据分析表明: 倾斜速率倒数非线性方程(式(20))相较线性方程(式(21))的预测准确性更高, 预测误差(预测值 - 真值)分别为 0.8 h, 2.1 min 与 -1.2 h, 但预测结果可能偏于危险; 线性方程的预测误差为非线性方程的 3~5 倍, 但预测结果偏于安全且计算更为便捷, 实际应用过程中可结合两方程进行综合预测判断。

参考文献(References):

- [1] 胡厚田. 崩塌分类的初步探讨[J]. 铁道学报, 1985, 7(2): 90 - 100.(HU Houtian. Preliminary investigation on the classification of landfalls[J]. Journal of the China Railway Society, 1985, 7(2): 90 - 100.(in Chinese))
- [2] 陈洪凯, 唐红梅. 拉剪型危岩发育过程的模型试验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(6): 115 - 119.(CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Testing research on development of perilous rock in tension-shear fracture[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(6): 115 - 119.(in Chinese))
- [3] 贺 铮, 谢谟文, 吴志祥, 等. 应用微芯桩传感器的拉裂型边坡危

- 岩体临崩倾斜变形特征现场实测研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3 399 - 3 415.(HE Zheng, XIE Mowen, WU Zhixiang, et al. Field measurement study on the pre-collapse inclination deformation characteristics of tension-cracking slope rock mass using micro-core-pile sensor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3 399 - 3 415.(in Chinese))
- [4] 王根龙, 伍法权, 祁生文. 悬臂 - 拉裂式崩塌破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增 2): 269 - 274.(WANG Genlong, WU Faquan, QI Shengwen. Research on failure mechanisms for cantilever and tension crack-type collapse[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Supp.2): 269 - 274.(in Chinese))
- [5] 周德培. 岩石单向拉伸的蠕变特性[J]. 西南交通大学学报, 1988, 69(3): 21 - 29.(ZHOU Depei. Creep behaviour of rocks under uniaxial tension[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1988, 69(3): 21 - 29.(in Chinese))
- [6] 陈有亮, 孙 钧. 岩石的流变断裂特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 323 - 327.(CHEN Youliang, SUN Jun. Creep fracture of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(4): 323 - 327.(in Chinese))
- [7] WONG R H C, CHAU K T. Effect of cyclic heating on subcritical crack growth of rock beams under four-point bending test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 1 - 23.
- [8] ABELLÁN A, CALVET J, VILAPLANA J, et al. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring[J]. Geomorphology, 2010, 119: 162 - 171.
- [9] ROYÁN M J, ABELLÁN A, JABOYEDOFF M, et al. Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR[J]. Landslides, 2014, 11(4): 697 - 709.
- [10] ROWE E, HUTCHINSON D J, KROMER R A, et al. An analysis of failure mechanism constraints on pre-failure rock block deformation using TLS and roto-translation methods[J]. Landslides, 2018, 15(3): 409 - 421.
- [11] LI H B, QI S C, YANG X G, et al. Geological survey and unstable rock block movement monitoring of a post-earthquake high rock slope using terrestrial laser scanning[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 4 523 - 4 537.
- [12] UCHIMURA T, TOWHATA I, ANH T T L, et al. Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface[J]. Landslides, 2010, 7: 351 - 357.
- [13] 谢济仁, 乔世范, 余鹏鲲, 等. 土质滑坡坡表倾斜变形的室内外试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 681 - 690.(XIE Jiren, QIAO Shifan, YU Pengkun, et al. Surface tilt deformation of soil landslides based on laboratory and field tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 681 - 690.(in Chinese))
- [14] 李 程, 宋胜武, 孙进忠. MEMS 惯性传感器在水库岸坡变形监测中的应用及仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1 248 - 1 257.(LI Cheng, SONG Shengwu, SUN Jinzhong. Application and simulation research of MEMS inertial sensor in reservoir bank slope deformation monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1 248 - 1 257.(in Chinese))
- [15] 贺 铮. 拉裂型边坡危岩体崩塌预测模型研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京科技大学, 2023.(HE Zheng. Study on instability prediction model of tension-splitting rock mass on slopes[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.(in Chinese))
- [16] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 危岩稳定性断裂力学计算方法[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(4): 434 - 437.(CHEN Hongkai, XIAN Xuefu, TANG Hongmei. Stability analysis method for perilous rock by fracture mechanics[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(4): 434 - 437.(in Chinese))
- [17] 何思明, 吴 永, 李新坡. 地震诱发岩体崩塌的力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 3 359 - 3 363.(HE Siming, WU Yong, LI Xinpo. Collapse mechanism of danger rock triggered by earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.1): 3 359 - 3 363.(in Chinese))
- [18] ATKINSON B. Subcritical crack growth in geological materials[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B6): 4 077 - 4 114.
- [19] 肖洪天, 杨若琼, 周维垣. 三峡船闸花岗岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 447 - 450.(XIAO Hongtian, YANG Ruoqiong, ZHOU Weiheng. Testing study of subcritical crack growth of granite at the three gorges shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 447 - 450.(in Chinese))
- [20] 李江腾, 曹 平, 袁海平. 岩石亚临界裂纹扩展试验及门槛值研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 415 - 418.(LI Jiangteng, CAO Ping, YUAN Haiping. Study on subcritical crack growth and thresholds of rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 415 - 418.(in Chinese))
- [21] 蒋青青, 李江腾, 胡毅夫, 等. 水对亚临界裂纹扩展的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2 527 - 2 530.(JIANG Qingqing, LI Jiangteng, HU Yifu, et al. Effects of water on subcritical crack growth[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2 527 - 2 530.(in Chinese))
- [22] 万琳辉, 曹 平, 黄永恒, 等. 水对岩石亚临界裂纹扩展及门槛值的影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2 737 - 2 742.(WAN Linhui, CAO Ping, HUANG Yongheng, et al. Study of subcritical crack

- growth of rocks and threshold values in different environments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2 737 - 2 742.(in Chinese)
- [23] WILLIAMS D, EVANS A. A simple method for studying slow crack growth[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1973, 1(2): 264 - 270.
- [24] TADA H, PARIS P, IRWIN G. The stress analysis of cracks handbook[M]. Hellertown: Del Research Corp, 1973: 1 - 252.
- [25] 张 磊, 巨能攀, 何朝阳, 等. 滑坡裂缝计时序数据实时异常检测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(1): 206 - 215.(ZHANG Lei, JU Nengpan, HE Chaoyang, et al. Real-time anomaly detection and analysis of time series data for crack gauge in landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(1): 206 - 215.(in Chinese))
- [26] 唐红梅, 陈洪凯, 王 智, 等. 危岩破坏激振效应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 25(11): 2 117 - 2 122.(TANG Hongmei, CHEN Hongkai, WANG Zhi, et al. Experimental study on excitation effect for unstable rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 25(11): 2 117 - 2 122.(in Chinese))
- [27] 傅宇方, 梁正召, 唐春安. 岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(6): 486 - 492.(FU Yufang, LIANG Zhengzhao, TANG Chun'an. Numerical simulation on influence of mesoscopic heterogeneity on macroscopic behavior of rock failure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 486 - 492.(in Chinese))
- [28] 秦四清, 王媛媛, 马 平. 崩滑灾害临界位移演化的指数律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 873 - 880.(QIN Siqing, WANG Yuanyuan, MA Ping. Exponential laws of critical displacement evolution for landslides and avalanches[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 873 - 880.(in Chinese))
- [29] VOIGHT B. A method for prediction of volcanic eruption[J]. *Nature*, 1988, 332: 125 - 130.
- [30] SAITO M. Forecasting time of occurrence of a slope failure[C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Toronto: University of Toronto Press, 1965: 537 - 541.
- [31] FUKUZONO T. A new method for predicting the failure time of a slope[C]// *Proceedings of IV International Conference and Field Workshop on Landslides*. Tokyo: Tokyo University Press, 1985: 145 - 150.
- [32] PETLEY D N, BULMER M H, MURPHY W. Patterns of movement in rotational and translational landslides[J]. *Geology*, 2002, 30: 719 - 722.
- [33] ROSE N D, HUNGR O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(2): 308 - 320.
- [34] DICK G J, EBERHARDT E, CABREJO-LIEVANO A G, et al. Development of an early-warning time-of-failure analysis methodology for open-pit mine slopes utilizing ground-based slope stability radar monitoring data[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52: 515 - 529.
- [35] CARLÀ T, INTRIERI E, TRAGLIA F D, et al. Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses[J]. *Landslides*, 2017, 14(2): 517 - 534.
- [36] 贺 铮, 谢谟文, 赵 晨, 等. 基于共振频率时变特征的拉裂型危岩体崩塌预测方程及试验研究[J]. *工程力学*, DOI: 10.6052/j.issn.1000 - 4750.2024.10.0799(HE Zheng, XIE Mowen, ZHAO Chen, et al. Construction and experimental verification of collapse time prediction model for tension-splitting rock mass on slopes based on natural frequency[J]. *Engineering Mechanics*, DOI: 10.6052/j.issn.1000 - 4750.2024.10.0799.(in Chinese))
- [37] 张晓勇, 谢谟文, 张 磊, 等. 基于固有频率的坠落危岩体稳定系数计算模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(3): 585 - 593.(ZHANG Xiaoyong, XIE Mowen, ZHANG Lei, et al. Study on calculation model of stability coefficient of falling dangerous rock mass based on natural frequency[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 585 - 593.(in Chinese))
- [38] 杜 岩, 张洪达, 谢谟文, 等. 大型危岩体崩塌灾害早期监测预警技术研究综述[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(5): 10 - 23.(DU Yan, ZHANG Hongda, XIE Mowen, et al. Review on the monitoring and early warning technology of large-scale unstable rock collapse[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(5): 10 - 23.(in Chinese))