

姚韦靖, 刘宇, 庞建勇, 等. 不同界面倾角岩石-混凝土组合体蠕变特性研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(4): 043037.

YAO Weijing, LIU Yu, PANG Jianyong, et al. Creep behavior of combined rock-concrete specimens with different interface inclination angles[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(4): 043037.

不同界面倾角岩石-混凝土组合体蠕变特性研究

姚韦靖^{1,2,3}, 刘宇¹, 庞建勇^{1,3}, 韩金秀¹, 肖宇辰¹

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 芜湖市勘察测绘设计研究院有限责任公司 博士后科研工作站, 安徽 芜湖 241000; 3. 安徽理工大学 矿山建设工程安徽省高校重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为探究岩石-混凝土界面对地下建筑支护结构失效的影响, 通过7种不同界面倾角的岩石-混凝土组合体试件的单轴和分级加载蠕变试验, 研究了其蠕变特性。研究表明: 随界面倾角的增大, 组合体抗压强度呈“W”形变化, 倾角在 0° , 45° , 90° 时出现极大值, 而倾角在 30° , $60^\circ \sim 75^\circ$ 时出现极小值; 并将其破坏模式分为轴向破坏、组合破坏、界面破坏等3种典型破坏模式。组合体蠕变破坏强度低于单轴抗压强度, 表明长期加载对组合体会造成损伤; 瞬时应变随界面倾角的增大, 先减小后增大; 与倾角 0° 的相比, 倾角 45° , 60° , 75° , 90° 的瞬时应变分别减少了22.68%, 47.72%, 52.01%, 4.56%; 蠕变比随应力水平的提高呈下降-稳定-上升3个阶段特征; 随界面倾角的增大, 蠕变破坏临界应力逐渐减小, 蠕变稳定阶段逐渐缩短, 组合体稳定性逐渐降低。基于试验结果对 Burgers 蠕变模型参数进行辨识, 所得理论曲线与瞬时变形和衰减蠕变阶段试验数据吻合较好。研究成果可为深入认识混凝土支护与围岩结构界面倾角引起的蠕变破坏机制及地下建筑结构支护安全提供参考。

关键词: 岩石-混凝土组合体; 界面倾角; 应力水平; 蠕变; Burgers 模型

中图分类号: TU528; TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-7187(2024)04-3037-13

Creep behavior of combined rock-concrete specimens with different interface inclination angles

YAO Weijing^{1,2,3}, LIU Yu¹, PANG Jianyong^{1,3}, HAN Jinxiu¹, XIAO Yuchen¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Postdoctoral Science Research Workstation, Wuhu Surveying and Mapping Design Institute Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 3. Anhui Key Laboratory of Mining Construction Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The weak rock-concrete interface has a significant influence on the underground supporting structure. Seven combined rock-concrete specimens with different inclination angles were prepared, and uniaxial and graded loading creep tests were conducted. The results show that the compressive strength of the combined specimens shows W-typed fluctuation with the increase of the interface inclination angle. The compressive strength is the largest when

收稿日期: 2023-12-27

修回日期: 2024-04-16

责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174141); 淮南市科技计划资助项目(2023A313); 矿山建设工程安徽省高校重点实验室开放基金资助项目(GXZDSYS2022106); 安徽省大学生创新创业训练计划资助项目(S202310361232)

作者简介: 姚韦靖(1990—), 男, 安徽芜湖人, 副教授, 硕士生导师, 博士(后), 主要从事巷道支护与围岩控制等方面的研究与教学工作。E-mail: yaoweijing0713@163.com

the interface inclination angles are 0° , 45° , and 90° , and is smallest when the interface inclination angle belongs to 30° and $60^\circ-75^\circ$. The failure modes can be categorized into three types: axial damage, combined damage, and interface damage. The creep damage strength of most specimens is lower than the uniaxial compressive strength, which indicates that the specimen is damaged caused by long-term loading. The instantaneous strain decreased and then increased with the increase of interface inclination angle. Compared with an interface inclination angle of 0° , the interface inclination angle of 45° , 60° , 75° , and 90° of specimens instantaneous strain reduced by 22.68%, 47.72%, 52.01%, 4.56%, respectively. The creep ratio shows a decline-stability-rise three-stage behavior with increased stress levels. The critical stress at creep failure decreases with the increase of the interface inclination angle, and the creep stability stage is gradually shortened. With the increase of the interface inclination angle, the stability of specimens gradually decreases. The Burgers creep model parameters were calculated from experiment, and the obtained theoretical curve was in a good agreement with the test data of instantaneous deformation and decay creep stages. The research findings can provide a reference for understanding the creep failure mechanism induced by the interface angle between concrete support and surrounding rock structures and for the safety of underground structural support.

Key words: combined rock-concrete specimens; inclination angle; stress level; creep; Burgers model

喷射混凝土支护是矿井巷道、隧道及地下建筑物常用的支护手段,混凝土与围岩组成一种工程体-岩体结构^[1],其长期性能直接影响地下建筑物的安全与稳定^[2-3],其中岩石-混凝土界面的力学性能受到了诸多学者关注^[4-5],其在外荷载作用下容易引起界面裂缝的萌生与扩展。因此,开展岩石-混凝土界面力学性能和破坏行为的研究尤为必要。

国内外学者对岩石-混凝土组合体开展了大量试验研究。在岩石-混凝土组合体抗压强度试验方面,曾晟等^[6]对砂岩、混凝土、砂岩-混凝土组合体试件开展了单轴压缩试验,结果表明组合体试件抗压强度介于砂岩和混凝土之间,更接近于强度较低的混凝土试件;SELÇUK等^[7]通过单轴压缩、点载荷和劈裂拉伸试验发现倾斜界面对岩石-混凝土界面强度和破坏行为有显著影响;尹中凯等^[8]研究了煤岩组合体试验的蠕变强度特性,认为煤岩组合体是一个系统体,砂岩的蠕变变形和损伤减小了组合体的变形和损伤,因而组合体蠕变强度大于单一煤样强度;彭岩岩等^[9]对不同倾角下的煤岩组合体开展了真三轴加卸载试验,并基于声发射探测系统,发现随倾角的增大,试件强度逐渐降低,并由张拉剪切破坏逐渐过渡为剪切破坏。在直剪试验方面,王明年等^[10]研究了混凝土-岩石高温变温环境下界面的剪切特性,获得了养护温度与峰值剪切应力和位移间的关系,建立了温度损伤本构模型;申艳军等^[11]完成了岩石-混凝土在不同界面粗糙度及冻融

次数条件下的剪切试验,提出了界面黏结强度冻融劣化模型。在利用 SHPB 试验装置进行冲击试验方面,郭东明^[12]、陈猛^[13]等分别对不同材质的岩石-混凝土复合层进行了动态压缩试验,发现岩石-混凝土动态力学性能具有显著的应变率效应。在三点弯曲梁试验测试抗弯性能方面,荣华^[14]、姚洁香^[15]等研究了粗糙度与断裂能的关系,发现岩石-混凝土界面的断裂性能随界面粗糙度增加而增大;DONG等^[16]探讨了岩石-混凝土组合界面的断裂特性,建立了界面剪切软化本构模型;钟红等^[17]发现加载应变率对花岗岩-混凝土界面断裂性能有显著影响。在巴西圆盘劈裂试验测试抗拉性能方面,CHANG等^[18]研究了界面粗糙度对岩石-混凝土组合体断裂特性的影响,发现3种典型的断裂模式:界面断裂、拉伸断裂和组合断裂,且断裂模式受界面倾角的控制;ZHOU等^[19]研究了含水率和倾角对岩石-混凝土界面力学性能和破坏特性的耦合效应,发现水饱和后试件峰值载荷的减小与倾角无关。在长期力学性能研究方面,较多集中于岩石或锚喷材料单一的蠕变特性,针对围岩体,LIU等^[20]结合能量守恒定律分析了岩石蠕变3个变形阶段的能量演化规律,建立了描述衰变蠕变、稳定蠕变和加速蠕变全过程统一的蠕变本构模型;周瑞鹤等^[21]通过三轴压缩分级卸荷试验,系统分析了粉砂岩蠕变特性,建立了粉砂岩三维卸荷蠕变模型;针对锚喷支护材料,李永和等^[22]提出了锚喷材料损伤蠕变本构方程和损伤演化方程,验证了蠕变损

伤对锚喷材料的作用；辛亚军等^[23]通过分级加载蠕变试验，总结出岩石胶结体破坏模式及胶结充填体考虑硬化-损伤特征的非线性本构模型。

可见，目前针对岩石-混凝土界面的研究主要通过单轴、直剪、SHPB、三点弯曲梁、巴西圆盘劈裂等试验，鲜有与蠕变试验相关的研究。且实际工程情况下界面倾角多样并不断变化，因此，笔者开展了不同界面倾角下岩石-混凝土组合体的蠕变试验，试图通过测定其单轴抗压强度、蠕变特性，分析界面倾角对其力学性能和破坏行为的影响。

1 试件制备及方法

1.1 试件原材料

岩石-混凝土组合试件由砂岩、混凝土两部分组成。砂岩取自内蒙古鄂尔多斯某煤矿；混凝土使用C30细石混凝土，由胶凝材料、骨料、水和减水剂组成，混凝土各组分分配比见表1。胶凝材料由水泥和粉煤灰组成，其化学组分见表2。水泥使用淮南八公山牌P·O42.5级普通硅酸盐水泥，物理力学特性见表3；粉煤灰使用河南大唐电厂I级粉煤灰。粗骨料选用石灰质碎石，粒径5~15 mm连续级配，表观密度为2 780 kg/m³；细骨料选用中粗砂，细度模数为2.65，表观密度为2 500 kg/m³。减水剂选用中岩建材科技有限公司的聚羧酸高性能减水剂。

表1 混凝土配合比

Table 1 Concrete mix ratio

组成	水泥	粉煤灰	碎石	沙	减水剂	水
含量/(kg·m ⁻³)	420	50	856	856	4.7	211.5
百分比含量/%	17.51	2.09	35.69	35.69	0.20	8.82

表2 胶凝材料组成成分

Table 2 Chemical composition of binding material

组成	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	烧失量
水泥/%	63.11	22.60	5.03	1.46	4.38	—	2.24	1.18
粉煤灰/%	2.47	53.26	34.72	0.39	4.07	1.90	—	3.19

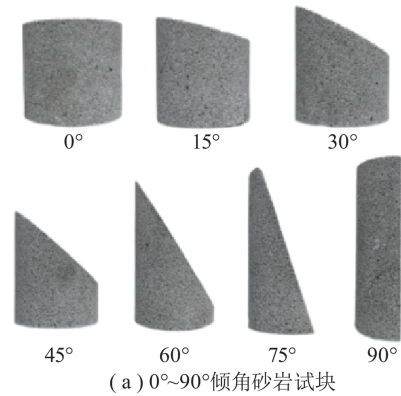
表3 P·O42.5水泥物理力学特性

Table 3 Technical parameters of P·O42.5 cement

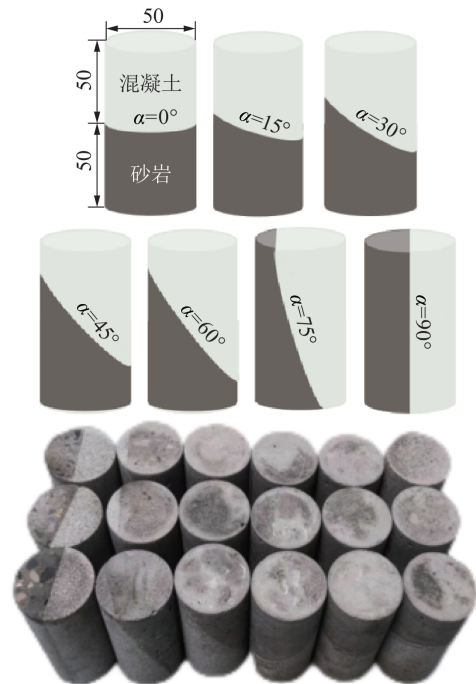
细度/ (m ² ·kg ⁻¹)	烧失 量/%	标准稠度 用水量/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d
342	3.5	25.9	165	220	29.9	49.75

1.2 试件制备

选取的砂岩多为中粒砂岩，内部较为均匀。通过筛选，剔除宏观和微观层次不连续的岩块，为减少试验误差，选取质地较为均匀的完整砂岩进行取芯。通过单轴压缩试验，测得砂岩试件的单轴抗压强度为51.87 MPa。运用岩石加工厂切割机将取好的标准岩芯试件切割成不同角度(0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°)的砂岩试件，如图1(a)所示。



(a) 0°~90°倾角砂岩试块



(b) 岩石-混凝土组合体

图1 岩石-混凝土组合体试件

Fig. 1 Preparation process of rock-concrete specimens

选取尺寸误差较小的试件，用打磨机进行打磨，并将制备好的砂岩试件放入 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体模具中。按表1所示的配比在实验室内制备混凝土，制备过程中严格控制混凝土的坍落度，以增加浇筑和易性及密实度。将制备好的混凝土倒入模具中，并在振动台上对其进行振动密实。将浇筑完成的试件放置在阴凉处，自然风干24 h后

拆模。将拆模后的试件放在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 95\%$ 的标准养护箱内养护至 28 d, 得到符合试验要求的岩石-混凝土组合体试件, 如图 1(b) 所示。

1.3 试验方法

采用 RDL-200 型岩石压缩流变仪对不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件进行单轴压缩和分级压缩蠕变试验。进行分级压缩蠕变试验前, 先以 1 mm/min 的速率对组合体试件进行单轴压缩试验, 测得其单轴抗压强度 σ_c 。分级压缩蠕变试验方案: 采用等量分级递增的加载方式, 第 1 级加载应力 σ_1 为单轴抗压强度 σ_c 的 40%, 记为应力水平 $\lambda=0.4$, 应力水平逐级递增为 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 参考文献 [24] 中分级蠕变试验加载方法, 以 0.25 MPa/s 的加载速率, 在每个应力水平保持

12 h, 获得材料的有效蠕变特性。试验过程中的应力、应变数据通过计算机自动采集, 加载期间的采样频率为 10 Hz , 稳压期间的采样频率为 0.1 Hz 。为保证蠕变过程中施加的载荷始终恒定, 加载系统会根据反馈的数据自动、实时进行调整。



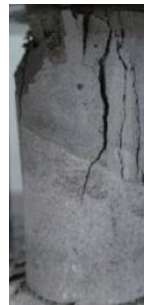



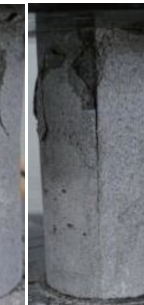




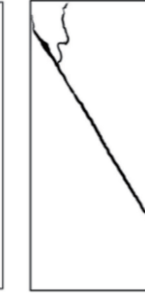


2 组合体试件破坏模式和抗压强度

2.1 破坏模式

对不同界面倾角的岩石-混凝土组合体试件均进行 3 次单轴压缩试验, 取 3 次单轴抗压强度的平均值作为该组合体试件的单轴抗压强度。并根据裂缝出现方向将组合体试件的破坏模式分为 3 类, 分别为轴向破坏、界面破坏、组合破坏(即界面和轴向破坏组合), 具体见表 4。

表 4 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的单轴压缩破坏模式

Table 4 Typical fracture patterns of rock-concrete specimens with different interface inclination angles under uniaxial compression test

界面倾角 $\alpha/(\circ)$	0	15	30	45	60	75	90
试件破坏形态							
破坏模式	轴向破坏	轴向破坏	轴向破坏	组合破坏	界面破坏	界面破坏	轴向破坏
							

由表 4 可知, 当组合体试件界面倾角从 15° 增加到 30° 时, 裂缝主要沿轴向出现, 即发生轴向破坏; 当界面倾角为 45° 时, 裂缝沿轴向和界面出现, 即发生组合破坏; 当倾角从 60° 增加到 75° 时, 裂缝主要沿界面出现, 即发生界面破坏; 当界面倾角为 0° 和 90° 时, 裂缝均沿轴向出现, 即发生轴向破坏, 但 90° 的首先在界面处出现裂缝。

造成上述破坏现象的一方面原因是, 随着组合体试件界面倾角的增大, 岩石与混凝土接触面积增大, 也即岩石与混凝土间的黏结力增大, 沿界面方向的剪切载荷也随之增大。界面倾角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时, 加载的剪切载荷小于岩石与混凝土间的黏结力, 达到混凝土强度极限时发生轴向破坏; 在 45° 时, 剪切载荷达到岩石与混凝土间黏结力的同时, 也达到

混凝土强度极限，即在轴向和界面处发生组合破坏，但破坏主要发生在混凝土部分，岩石部分未发生明显的破碎^[5,25]；在 60°~75°时，剪切载荷未达到岩石与混凝土强度极限，就达到了岩石与混凝土间的黏结力，即发生界面破坏；在 90°时，岩石与混凝土共同承担轴向载荷，破坏主要沿轴向方向。

2.2 单轴抗压强度

单轴压缩条件下的岩石-混凝土组合体试件的应力-位移曲线，如图 2 所示。由图 2 可知，组合体试件整体表现出脆性特征。随界面倾角的增大，组合体试件峰值位移先减小后增大，倾角 60°的组合体试件峰值位移最小，抗压稳定性最低。

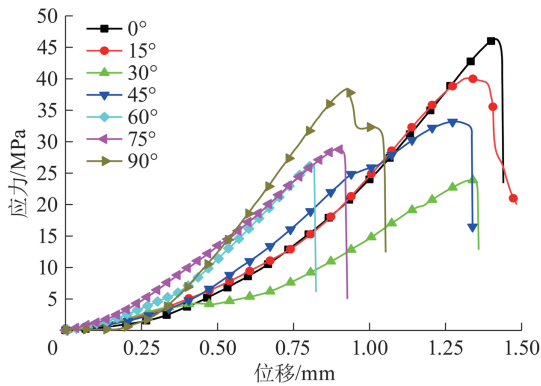


图 2 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的单轴压缩应力-位移曲线

Fig. 2 Stress-displacement curves of rock-concrete specimens with different interface inclination angles under uniaxial compression test

不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的单轴抗压强度见表 5。

表 5 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的单轴抗压强度

Table 5 Uniaxial compressive strength of rock-concrete specimens with different interface inclination angles

界面倾角 $\alpha/(\circ)$	平均密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	平均抗压 强度/MPa	破坏模式
0	2.31	41.21	轴向破坏
15	2.35	31.07	轴向破坏
30	2.34	23.21	轴向破坏
45	2.35	35.18	组合破坏
60	2.32	22.07	界面破坏
75	2.28	22.17	界面破坏
90	2.30	38.40	轴向破坏

采用 Origin 软件，基于 Levenberg-Marquardt 算法对抗压强度进行非线性拟合，根据表 5 绘制组合

体试件抗压强度随界面倾角变化的拟合曲线，如图 3 所示。

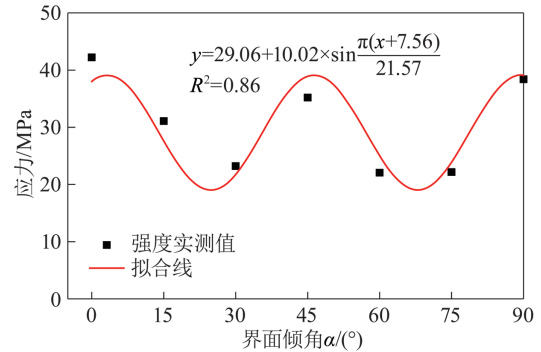


图 3 岩石-混凝土组合体试件单轴抗压强度与界面倾角的关系曲线

Fig. 3 Relationship between uniaxial compressive strength of rock-concrete specimens and interface inclination angle

由图 3 可知，组合体试件单轴抗压强度随界面倾角的增大，呈“W”形变化。造成此现象的原因是，界面倾角在 0°~30°时，随界面倾角的增大，岩石-混凝土界面薄弱区域逐渐增加，因而抗压强度逐渐降低；在 45°时，破坏由轴向载荷和剪切载荷共同控制，剪切载荷达到岩石与混凝土间黏结力的同时，也达到混凝土的强度极限，试件破坏且抗压强度升高出现极大值，但为何抗压强度出现极大值仍需进一步研究；在 60°~75°时，组合体试件抗压强度受剪切载荷的控制，未达到岩石与混凝土强度极限时，剪切载荷就达到岩石与混凝土间的黏结力，因此沿界面发生破坏；在 90°时，组合体试件受轴向载荷的控制，破坏强度接近岩石、混凝土的强度极限，因此抗压强度有所提高。

根据试验数据，拟合得出岩石-混凝土组合体试件单轴抗压强度随界面倾角变化的关系式，为

$$y = 29.06 + 10.02 \sin \frac{\pi(x + 7.56)}{21.57}, R^2 = 0.86 \quad (1)$$

式中， y 为组合体试件的抗压强度，MPa； x 为组合体试件的界面倾角，(°)。

3 组合体试件蠕变特性

3.1 蠕变破坏模式

表 6 为不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件蠕变破坏形态，由表 6 可见，各倾角组合体蠕变破坏形态与单轴压缩下组合体试件破坏模式相同。当组合体试件界面倾角从 0°增加到 30°，以及倾角

为 90°时，裂缝主要沿轴向出现，发生轴向破坏；当界面倾角为 45°时，裂缝沿轴向和界面出现，发生

组合破坏；当倾角从 60°增加到 75°时，裂缝主要沿界面出现，发生界面破坏。

表 6 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的单轴蠕变压缩破坏模式

Table 6 Typical fracture patterns of rock-concrete specimens with different interface inclination angles under uniaxial creep compression test

界面倾角 $\alpha/(\circ)$	0	15	30	45	60	75	90
试件破坏形态							
破坏模式	轴向破坏	轴向破坏	轴向破坏	组合破坏	界面破坏	界面破坏	轴向破坏

3.2 蠕变曲线

根据分级压缩蠕变试验的结果绘制岩石-混凝土组合体试件的蠕变曲线，如图 4 所示。由图 4 可知，不同界面倾角组合体试件的蠕变曲线均呈阶梯状上升，在应力施加瞬间应变发生突变，之后在稳压阶段，应变变化趋于平缓，产生蠕变。在低应力水平作用下变形以瞬时应变为主，稳压阶段变形较为平缓；随应力水平的不断提高，稳压阶段蠕变逐渐增加，应变曲线斜率增大，表现为减速蠕变和等速蠕变，蠕变速率随时间逐渐趋于定值；加载至最后一级时，轴向应变陡然增大并伴随蠕变破坏。蠕变曲线表现为减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变等 3 个阶段。

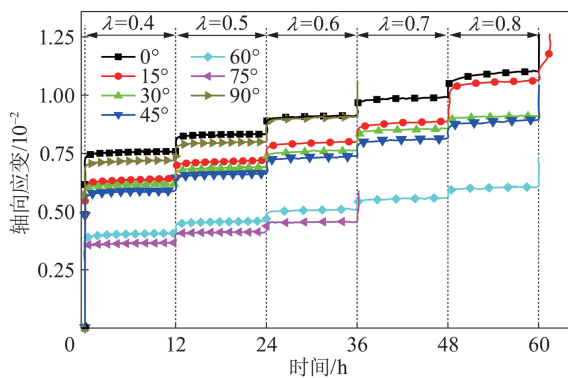


图 4 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的分级加载蠕变曲线

Fig. 4 Graded loading creep curves of rock-concrete specimens with different interface inclination angles

进一步分析图 4 可得，各组合体试件蠕变破坏强度大部分小于单轴抗压强度。蠕变是一种在长期稳压加载下发生变形的现象，由于岩石和混凝土

的蠕变行为不同，这导致组合体试件在蠕变加载下表现出较低的强度。同时，在蠕变加载下，岩石和混凝土之间的黏结会减弱，导致组合体试件整体强度降低^[26]。界面倾角 0°的组合体试件蠕变总应变为 1.164×10^{-2} ；45°，60°，75°，90°的总应变比 0°的分别减少了 18.9%，45.53%，57.9%，17.5%。表明蠕变总应变随界面倾角的增大，呈先减小后增大的趋势。

不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的蠕变参数见表 7。

表 7 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的蠕变参数
Table 7 Creep results of rock-concrete specimens with different interface inclination angles

界面倾角 $\alpha/(\circ)$	加载级数	蠕变总时长/h	破坏应力/MPa	破坏应力水平 λ
0	5	60.05	37.09	0.9
15	5	61.55	29.90	0.9
30	5	60.05	20.88	0.9
45	5	60.04	31.66	0.9
60	5	60.05	17.88	0.9
75	3	36.17	13.19	0.7
90	3	36.03	26.80	0.7

由表 7 可知，不同的界面倾角，蠕变加载级数并不相同，相较于 0°，在 75°和 90°时，岩石-混凝土组合体试件经 3 级加载后就发生了破坏，蠕变总时长从 60.05 h 缩短到 36.17 h 和 36.03 h。这表明随界面倾角的增大，界面薄弱区域逐渐增大，导致组合体试件的长期稳定性降低，尤其是 75°和 90°时稳定性最差。

由表 7 的蠕变破坏应力和试验现象可知, 界面倾角在 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 时, 组合体试件的单轴抗压强度受剪切载荷的控制, 岩石与混凝土未达到强度极限时, 剪切载荷就达到岩石与混凝土间的黏结力, 发生界面破坏; 在 90° 时, 受轴向载荷的控制, 破坏强度接近岩石、混凝土的强度极限, 单轴抗压强度明显高于 60° 和 75° 的。组合体试件的稳定性是根据蠕变破坏应力水平 λ 的大小来分析的, 由于不同界面倾角组合体试件是各自进行分级加载试验的, 倾角为 90° 的组合体试件自身单轴抗压强度较高, 因此蠕变破坏应力亦较高, 应力水平 λ 提高至 0.7 时即发生破坏, 与界面倾角为 0° 的组合体试件相比, 90° 试件的破坏应力降低了 27.74%, 应力水平降低了 22.22%, 蠕变时长缩短了 40.00%, 表现出较差的蠕变稳定性。这是因为较大的应力作用产生较大的变形, 较快的应力提升, 使得界面剪切载荷很快就达到界面黏结力, 引起界面破坏, 进而导致试件破坏变形。

3.3 瞬时应变

各分级应力水平下不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的瞬时应变曲线, 如图 5 所示。

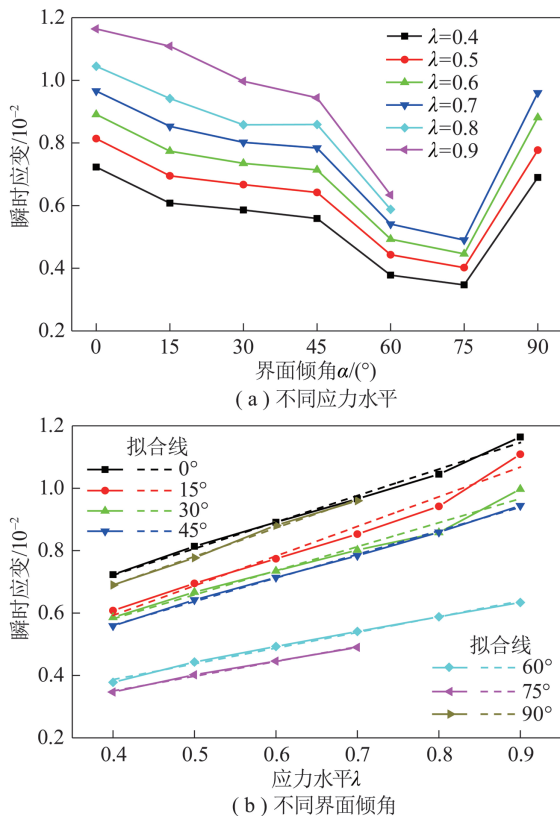


图 5 岩石-混凝土组合体试件的瞬时应变

Fig. 5 Instantaneous strain of rock-concrete specimens

由图 5(a) 可知, 不同应力水平下, 不同界面倾角组合体试件瞬时应变的变化规律基本一致, 随界面倾角的增大, 呈先减小后增大的趋势。界面倾角 0° 的组合体试件瞬时应变为 0.723×10^{-2} ; 45° , 60° , 75° , 90° 的与 0° 的相比, 分别减少了 22.68%, 47.72%, 52.01%, 4.56%, 与总应变的变化趋势相同。

由图 5(b) 可知, 随应力水平的增大, 组合体试件的瞬时应变基本呈线性增长。对试验数据进行拟合, 结果见表 8。

表 8 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的瞬时应变与加载应力关系

Table 8 Relationship between instantaneous strain and loading stress of rock-concrete specimens with different interface inclination angles

界面倾角 $\alpha(^{\circ})$	拟合式	k	b	R^2
0	$y=0.8494x+0.3817$	0.8494	0.3817	0.9941
15	$y=0.9500x+0.2127$	0.9500	0.2127	0.9776
30	$y=0.7700x+0.2737$	0.7700	0.2737	0.9799
45	$y=0.7560x+0.2589$	0.7560	0.2589	0.9991
60	$y=0.5037x+0.1854$	0.5037	0.1854	0.9961
75	$y=0.4730x+0.1611$	0.4730	0.1611	0.9968
90	$y=0.9140x+0.3243$	0.9140	0.3243	0.9975

由表 8 可知, 界面倾角大于 0° 的组合体试件瞬时应变变化规律基本相似, 且随界面倾角的增大, 瞬时应变随应力水平的增幅先减小后增大, 对应于表 8 中拟合公式中参数 k 先减小后增大。与界面倾角 0° 的组合体试件拟合直线斜率相比, 75° 的减小了 44.31%; 90° 的增加了 7.61%。

3.4 蠕变应变

不同界面倾角下, 岩石-混凝土组合体试件蠕变曲线在加载过程中产生的瞬时应变占比较大, 难以直观地了解组合体试件在各级应力水平下蠕变应变随时间的变化规律。将图 4 中各界面倾角组合体试件蠕变过程中的总应变减去加载过程中产生的瞬时应变^[27], 得到蠕变应变与时间关系曲线。选取应力水平 $\lambda=0.4, 0.6, 0.8$ 的蠕变应变曲线进行分析, 如图 6 所示。

不同界面倾角下组合体试件蠕变应变曲线呈波动变化, 但整体变化范围较小, 在第 1 级应力水平 $\lambda=0.4$ 下, 产生的蠕变应变较大, 这是由于试件内部有大量裂隙、孔洞等缺陷, 在第 1 级应力长期

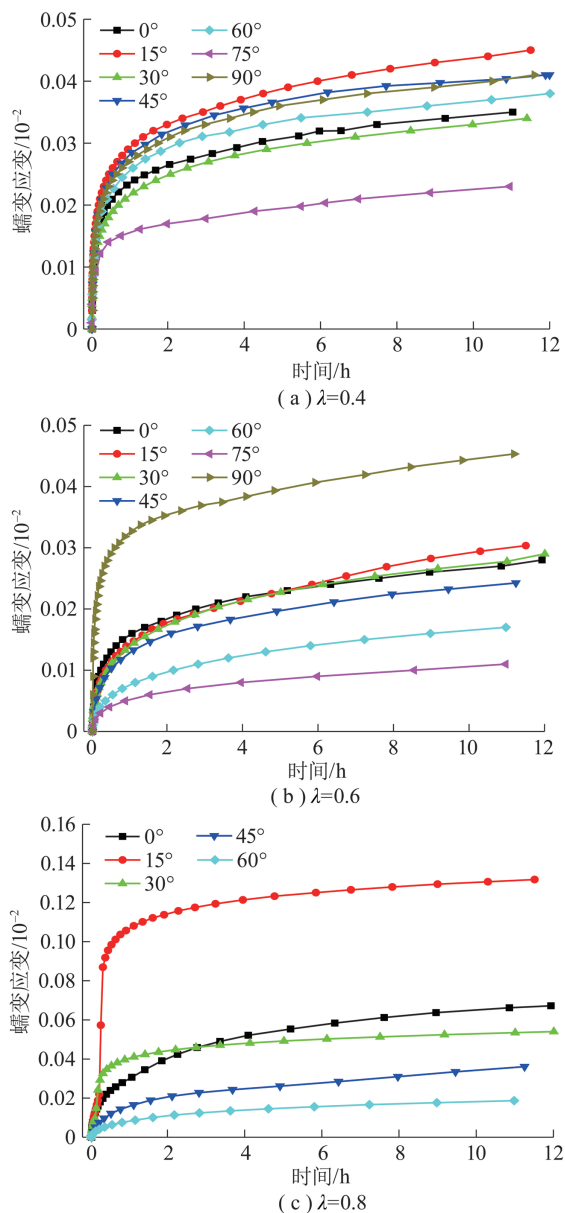


图6 岩石-混凝土组合体试件的蠕变应变曲线

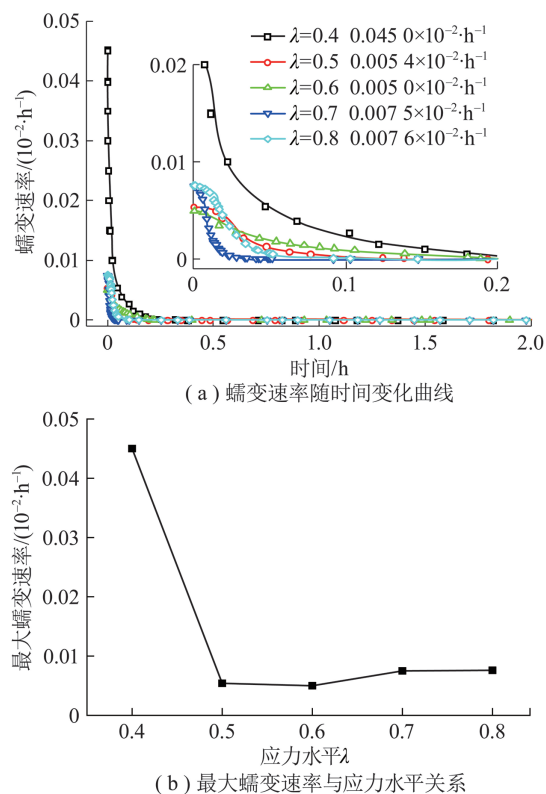
Fig. 6 Creep strain of rock-concrete specimens under each stress level

作用下, 这些裂隙、孔洞等被压密, 导致第 1 级蠕变应变较大, 如图 6(a) 所示。当 λ 为 0.6 和 0.8 时, 蠕变应变曲线变化范围逐渐扩大, 如图 6(b), (c) 所示。不同界面倾角组合体试件在临近破坏应力水平条件下, 呈不同的破坏模式, 倾角 $0^\circ \sim 30^\circ$ 和 90° 时, 砂岩、混凝土达到强度极限, 试件变形急剧增加, 最终沿轴向发生破坏, 故产生的蠕变应变较大; 倾角 $45^\circ \sim 75^\circ$ 时, 砂岩、混凝土尚未达到强度极限, 界面剪切力已超过界面黏结力, 主要沿界面方向破坏, 而轴向由于未达到砂岩、混凝土强度极限, 故沿轴向蠕变应变较小, 甚至小于第 1 级应力下试件内部经历孔隙结构调整压密下所产生的

蠕变应变。

3.5 蠕变速率

对图 4 的岩石-混凝土组合体试件分级压缩蠕变曲线, 在各时间点处一阶求导, 绘制界面倾角为 45° 的组合体试件蠕变速率与时间关系曲线, 如图 7 所示。

图7 界面倾角 45° 的岩石-混凝土组合体试件蠕变速率Fig. 7 Creep rate of rock-concrete specimen with interface inclination angle of 45°

由图 7(a) 可知, 在各级应力水平作用下, 组合体试件均是在应力加载瞬间产生一个较大蠕变速率, 对应试件此时所产生瞬时变形; 由图 7(b) 可知, 随应力水平提高, 最大瞬时蠕变速率先减小后逐渐稳定, 原因是在第 1 级应力作用下, 试件内部孔隙、裂缝压密调整, 产生较大蠕变应变, 因此第 1 级蠕变速率较大, 随后趋于稳定。

为清晰描述岩石-混凝土组合体试件稳定蠕变速率与界面倾角的关系, 定义每级应力水平下稳压阶段的蠕变速率 ε' [28] 为

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中, ε_1 , ε_2 分别为每级稳定蠕变阶段起止点所对应的蠕变量; t_1 , t_2 分别为每级稳定蠕变阶段起止点所对应的时间, h。

根据式(2)计算不同界面倾角组合体试件每级应力水平下的稳态蠕变速率,如图8所示。由图8可知,组合体试件在试验初期应力水平较低时,稳态蠕变速率始终保持在一个较低值,且整体波动区间较小;随应力水平的提高,稳态蠕变速率也随之增大,在最后一级应力水平下,稳态蠕变速率突然增大,发生蠕变破坏。

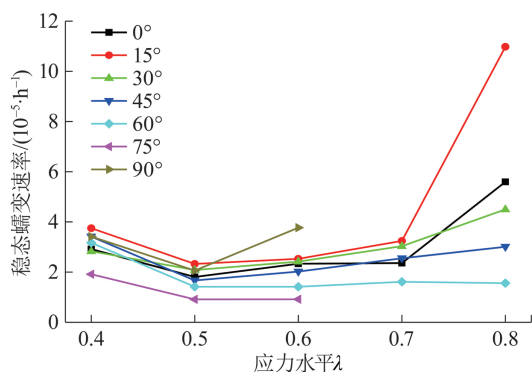


图8 岩石-混凝土组合体试件的稳态蠕变速率

Fig. 8 Creep rate of rock-concrete specimens with different interface inclination angles

不同界面倾角组合体试件,在应力水平 $\lambda=0.4$ 时,稳态蠕变速率波动区间为 $1.9167 \times 10^{-5} \sim 3.7500 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$;在 $\lambda=0.5$ 时,区间为 $0.9150 \times 10^{-5} \sim 2.3258 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$;在 $\lambda=0.8$ 时,区间为 $1.5580 \times 10^{-5} \sim 10.9775 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ 。应力水平不变时,随界面倾角的增加,稳态蠕变速率波动区间先缩小后增大,其原因是低水平应力时,试件经历压密阶段后强度有所提高,抗变形能力加强,因而蠕变应变较小,速率区间波动范围变小。而随应力水平的提高,在长期应力作用下蠕变损伤加剧了裂缝内部局部弱化区域的产生,宏观上表现为稳态蠕变速率区间的波动范围增大。

3.6 蠕变比

在分级蠕变加载试验过程中,在应力施加瞬间试件产生瞬时应变,在应力水平长期保持不变下产生蠕变应变。为更好理解不同界面倾角对试件蠕变行为的影响,定义蠕变应变与总应变的比值为蠕变比^[24],记为 φ ,则

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中, φ 为蠕变比; ε_c 为不同应力水平下组合体试件的蠕变应变; ε_t 为不同应力水平下组合体试件的蠕变总应变。

根据式(3),计算得到不同界面倾角下组合体

试件的蠕变比,如图9所示。由图9可知,界面倾角不变时,组合体试件的蠕变比 φ 随应力水平的提高呈下降-稳定-上升3个阶段特征。与第1级应力水平相比,第2级的蠕变比有所降低,随应力水平的提高,蠕变比稳定增加,但达到一个上限后,突然增大,这表明蠕变变形迅速发展,试件发生破坏。因此把曲线蠕变比突然增大点处的恒载应力称为蠕变破坏临界应力,其与单轴抗压强度之比为临界应力水平^[29]。

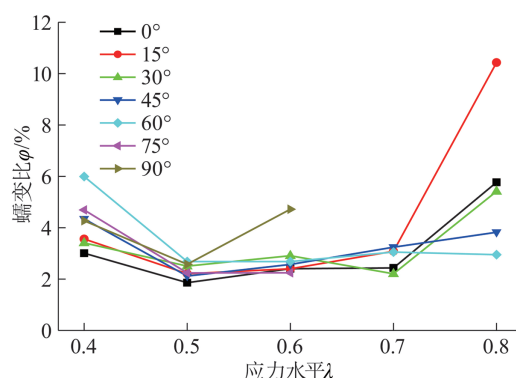


图9 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的蠕变比与应力水平关系

Fig. 9 Relationship between creep ratio and stress level of rock-concrete specimen with different interface inclinations

由图9还可知, φ 的转折点随界面倾角的增大逐渐前移,界面倾角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,临界应力水平为0.7;在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时,为0.6;在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时,为0.5。转折点前移使得试件稳定阶段逐渐缩短,这说明界面倾角对试件长期稳定性有较大的影响。

3.7 Burgers 蠕变模型

由图4可知,组合体试件的主要变形特征发生在载荷施加瞬间,产生瞬时变形,随加载的进行,蠕变曲线表现出衰减蠕变特征,蠕变速率逐渐接近于0。因此,模型中需要有描述其瞬时变形和衰减特性的元件。分析经典元件模型,选定Burgers模型来综合描述组合体试件瞬时变形(弹性)、衰减蠕变变形(黏弹性)的变形特征,如图10所示。

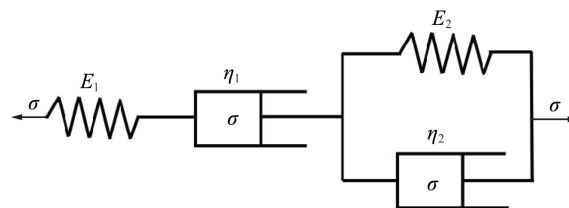


图10 Burgers 模型

Fig. 10 Burgers model

由于 Burgers 模型由 Kelvin 模型与 Maxwell 模型组成，根据同一瞬时叠加原理，可得 Burgers 模型蠕变方程为

$$\varepsilon = \sigma_0 \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\} \quad (4)$$

式中， t 为时间，h； E_1 为弹性模量，GPa； E_2 为黏弹性模量，GPa； η_1 为黏性系数，GPa·h； η_2 黏弹性系数，GPa·h。

利用 Origin 软件，以界面倾角为 0° 、 45° 和 90° 时的岩石-混凝土组合体试件蠕变试验结果为例，根据其试验数据，分别对 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 进行蠕变参数反演，对应的 Burgers 蠕变模型参数见表 9，绘制蠕变试验数据与 Burgers 蠕变模型曲线，如图 11 所示。由表 9 可知，拟合相关系数 R^2 均大于 0.97，表明 Burgers 模型能较好地反应岩石-混凝土组合体试件蠕变试验的瞬时变形和衰减蠕变特征。

表 9 岩石-混凝土组合体试件的 Burgers 蠕变模型参数

Table 9 Parameters of Burgers creep model of rock-concrete

界面倾角 $\alpha/(^\circ)$	加载等级	应力水平	应力/MPa	E_1 /GPa	η_1 /(GPa·h)	E_2 /GPa	η_2 /(GPa·h)	R^2
0	1	0.4	16.48	16.69	12.06	0.76	0.11	0.976 2
	2	0.5	20.60	19.63	24.19	1.62	0.61	0.986 1
	3	0.6	24.72	70.68	23.29	1.54	0.48	0.988 1
	4	0.7	28.84	27.36	27.67	1.78	0.73	0.987 7
	5	0.8	32.97	6.60	13.81	0.91	0.79	0.988 0
45	1	0.4	14.07	5.66	12.59	0.53	0.12	0.971 7
	2	0.5	17.59	52.51	10.67	1.01	0.56	0.997 1
	3	0.6	21.11	24.71	17.82	1.23	0.70	0.993 1
	4	0.7	24.63	27.04	25.30	1.85	0.85	0.989 1
	5	0.8	28.14	101.16	33.67	2.81	1.71	0.994 1
90	1	0.4	15.36	4.67	10.85	0.65	0.12	0.974 3
	2	0.5	19.20	11.04	21.58	1.38	0.49	0.983 3
	3	0.6	23.04	4.58	15.39	0.75	0.09	0.971 6

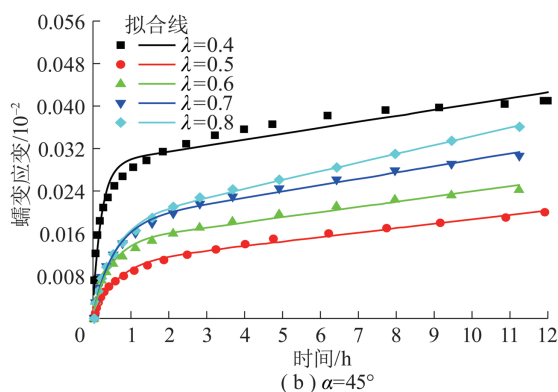
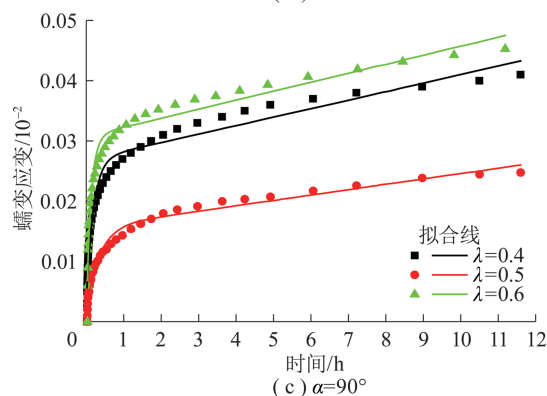
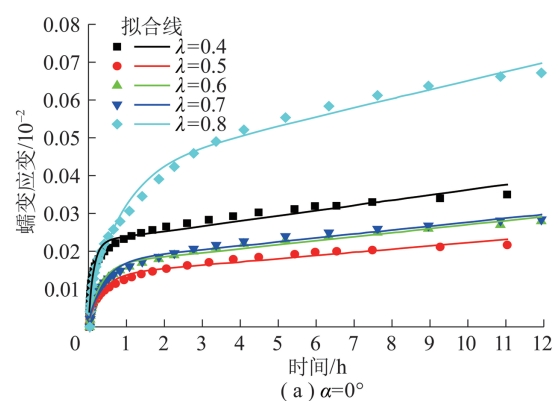


图 11 不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件的试验数据与 Burgers 蠕变模型曲线

Fig. 11 Test data and Burgers creep model curve of rock-concrete specimens with different interface inclination angle

4 结论

(1) 将不同界面倾角岩石-混凝土组合体试件单轴压缩破坏模式分为 3 类，分别为界面倾角为

0°~30°, 90°时的轴向破坏, 45°时的组合破坏, 60°~75°时的界面破坏; 组合体试件单轴抗压强度随界面倾角的增大, 呈“W”型变化, 倾角在0°, 45°和90°时出现极大值, 而倾角在30°和60°~75°区间时出现极小值。

(2) 岩石-混凝土组合体试件的分级加载蠕变强度普遍低于其单轴抗压强度, 且随界面倾角的增大, 总应变先减小后增大, 破坏应力水平逐渐降低。

与界面倾角为0°的组合体试件相比, 90°的破坏应力降低了27.74%, 应力水平降低了22.22%, 蠕变时长缩短了40.00%。

(3) 根据岩石-混凝土组合体试件的分级加载蠕变数据, 讨论了各试件瞬时应变、蠕变应变、蠕变速率、蠕变比和临界应力水平的变化, 结果表明随界面倾角的增大, 瞬时应变呈先减小后增大, 蠕变速率和蠕变比呈下降-稳定-上升3个阶段特征, 临界应力呈降低趋势; 蠕变应变随应力水平的提高而增长, 在临近破坏阶段时急剧增加。

(4) Burgers蠕变模型能较好地反应其瞬时变形和衰减蠕变特征; 进一步可以构建或修正得到可描述的试样蠕变全过程本构模型, 提高模型的准确性和适用性。

本文的试验方法, 对认识混凝土支护与围岩结构界面倾角的长期稳定性有一定的参考作用, 但在试验过程中发现, 界面倾角45°时, 组合体试件强度出现了提高, 这其中的内部作用机理尚不清楚, 仍需进一步讨论; 此外, 在实际工程中岩体受地应力的作用时间要更长, 因此笔者下一步会探究更贴合实际的模型试验值。

参考文献 (References):

[1] 谢和平, 陈忠辉, 易成, 等. 基于工程体-地质体相互作用的接触面变形破坏研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1767-1780.
XIE Heping, CHEN Zhonghui, YI Cheng, et al. Research on deformation and failure of interface based on interaction between structural body and geo-body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1767-1780.

[2] 马芹永, 苏晴晴, 马冬冬, 等. 含不同节理倾角深部巷道砂岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1104-1116.

MA Qinyong, SU Qingqing, MA Dongdong, et al. SHPB experimental study on dynamic characteristics and failure behaviors of sandstone containing weakly filled joints with various angles in deep roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1104-1116.

[3] 刘新喜, 李盛南, 周炎明, 等. 高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 138-146.
LIU Xinxi, LI Shengnan, ZHOU Yanming, et al. Study on creep behavior and long-term strength of argillaceous siltstone under high stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 138-146.

[4] BISTA D, SAS G, JOHANSSON F. Influence of location of large-scale asperity on shear strength of concrete-rock interface under eccentric load[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(3): 449-460.

[5] 陈猛, 崔秀文, 颜鑫, 等. 岩石-钢纤维混凝土复合层抗压强度预测模型[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 638-646.
CHEN Meng, CUI Xiuwen, YAN Xin, et al. Prediction model for compressive strength of rock-steel fiber reinforced concrete composite layers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 638-646.

[6] 曾晟, 张妮, 孙冰, 等. 干燥和饱水状态下岩石混凝土一体两介质受力特征试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(7): 2206-2209, 2213.
ZENG Sheng, ZHANG Ni, SUN Bing, et al. Mechanical performance of uni-body bi-material model for rock-concrete under dry and saturated states[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(7): 2206-2209, 2213.

[7] SELÇUK L, ASMA D. Experimental investigation of the rock-concrete bi materials influence of inclined interface on strength and failure behavior[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 123: 104119.

[8] 尹中凯, 尹大伟, 王怀远, 等. 岩-煤组合体试验蠕变特性研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(10): 40-44.
YIN Zhongkai, YIN Dawei, WANG Huaiyuan, et al. Study on creep strength characteristics of rock-coal composite samples[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(10): 40-44.

[9] 彭岩岩, 郇亦凡, 余虎, 等. 基于真三轴卸载试验不

- 同倾角组合煤岩力学特性研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): 023037.
- PENG Yanyan, LI Yifan, YU Hu, et al. Research on mechanical properties of coal and rock with different dip angles based on true triaxial unloading test[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 023037.
- [10] 王明年, 胡云鹏, 童建军, 等. 高温变温环境下喷射混凝土-岩石界面剪切特性及温度损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 63-75.
- WANG Mingnian, HU Yunpeng, TONG Jianjun, et al. Experimental study on shear mechanical properties and thermal damage model of shotcrete-rock interfaces under variable high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 63-75.
- [11] 申艳军, 魏欣, 杨更社, 等. 岩石-混凝土界面黏结强度冻融劣化模型及试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 480-490.
- SHEN Yanjun, WEI Xin, YANG Gengshe, et al. Freeze-thaw degradation model and experimental analysis of rock-concrete interface bond strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 480-490.
- [12] 郭东明, 闫鹏洋, 凡龙飞, 等. 喷层混凝土-围岩组合体波动特性及动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24): 85-91, 136.
- GUO Dongming, YAN Pengyang, FAN Longfei, et al. A study on the stress wave characteristics and dynamic mechanical property of the sprayed concrete-surrounding rock combined body[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 37(24): 85-91, 136.
- [13] 陈猛, 王浩, 齐迈, 等. 岩石-钢纤维混凝土复合层动态压缩性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1222-1230.
- CHEN Meng, WANG Hao, QI Mai, et al. Experimental study on dynamic compressive properties of composite layers of rock and steel fiber reinforced concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1222-1230.
- [14] 荣华, 王玉珏, 赵馨怡, 等. 不同粗糙度岩石-混凝土界面断裂特性研究[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 96-103, 163.
- RONG Hua, WANG Yujue, ZHAO Xinyi, et al. Research on fracture characteristics of rock-concrete interface with different roughness[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 96-103, 163.
- [15] 姚洁香. 岩石-混凝土界面 I 型断裂性能率相关性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- YAO Jiexiang. Experimental investigations on rate-dependent mode I fracture property of rock-concrete interface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [16] DONG W, WU Z M, ZHANG B S, et al. Study on shear-softening constitutive law of rock-concrete interface[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(9): 4677-4694.
- [17] 钟红, 马振洲, 胡少伟, 等. 混凝土/花岗岩界面动态断裂性能的轴拉试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 152-158.
- ZHONG Hong, MA Zhenzhou, HU Shaowei, et al. Axial tensile test for dynamic fracture characteristics of concrete-granite interface[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 38(11): 152-158.
- [18] CHANG X, LU J Y, WANG S Y, et al. Mechanical performances of rock-concrete bi-material disks under diametrical compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 71-77.
- [19] ZHOU Z L, LU J Y, CAI X, et al. Water saturation effects on mechanical performances and failure characteristics of rock-concrete disc with different interface dip angles[J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126684.
- [20] LIU W B, ZHOU H, ZHANG S G, et al. A nonlinear creep model for surrounding rocks of tunnels based on kinetic energy theorem[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(2): 363-374.
- [21] 周瑞鹤, 程桦, 蔡海兵, 等. 三轴压缩分级卸荷条件下粉砂岩蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1136-1147.
- ZHOU Ruihe, CHENG Hua, CAI Haibing, et al. Creep characteristics and creep model of siltstone under triaxial compression and graded unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1136-1147.
- [22] 李永和, 葛修润. 锚喷材料经时蠕变损伤本构方程[J]. 岩土力学, 1997, 18(4): 8-12.
- LI Yonghe, GE Xiurun. The creeping damage constitutive equation for shotcrete-bolt materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(4): 8-12.
- [23] 辛亚军, 吕鑫, 郝海春, 等. 劈裂损伤岩石胶结强化

- 的蠕变特性与失稳模式[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 617-625.
- XIN Yajun, LYU Xin, HAO Haichun, et al. Instability mode and creep characteristics of cementation of rock with splitting damage[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 617-625.
- [24] 刘雨珊, 庞建勇, 姚韦靖. 页岩陶粒轻骨料混凝土高温后蠕变特性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 1096-1104.
- LIU Yushan, PANG Jianyong, YAO Weijing. Creep behavior of shale ceramsite lightweight aggregate concrete exposed to high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 1096-1104.
- [25] 陈光波, 李谭, 杨磊, 等. 不同煤岩比例及组合方式的组合体力学特性及破坏机制[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(2): 023522.
- CHEN Guangbo, LI Tan, YANG Lei, et al. Mechanical properties and failure mechanism of combined bodies with different coal-rock ratios and combinations[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(2): 023522.
- [26] KROUNIS A, JOHANSSON F, LARSSON S. Shear strength of partially bonded concrete-rock interfaces for application in dam stability analyses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(7): 2711-2722.
- [27] 程爱平, 戴顺意, 舒鹏飞, 等. 考虑应力水平和损伤的胶结充填体蠕变特性及本构模型[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 439-449.
- CHENG Aiping, DAI Shunyi, SHU Pengfei, et al. Creep characteristics and constitutive model of cemented backfill considering stress and damage[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 439-449.
- [28] VIDAL T, SELIER A, LADAoui W, et al. Effect of temperature on the basic creep of high-performance concretes heated between 20 and 80 °C [J]. Journal of Materials in Civil Engineering Archive, 2015, 27(7): B4014002.
- [29] 马芹永, 郁培阳, 袁璞. 干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 593-600.
- MA Qinyong, YU Peiyang, YUAN Pu. Experimental study on creep properties of deep siltstone under cyclic wetting and drying[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 593-600.