

考虑高温 - 水化学腐蚀 - 围压损伤岩石本构模型及其工程应用

王嘉成, 张爽爽

上海理工大学, 环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年2月26日; 录用日期: 2025年3月19日; 发布日期: 2025年3月28日

摘要

岩石材料在自然环境和工程条件下, 常常受到高温、化学腐蚀和围压作用的影响, 导致其力学性能发生变化。本文提出了一种考虑水化学腐蚀 - 围压损伤的岩石本构模型, 用于描述岩石材料的损伤程度和应力 - 应变关系。本文首先引入了温度损伤变量、水化学损伤变量和力损伤变量, 分别反映了岩石材料在不同温度、不同pH值和暴露时间下的化学腐蚀程度以及在不同荷载下的力学破坏程度。然后基于考虑岩石微元强度破坏的SMP准则, 岩石破坏的Weibull概率分布和Lemaitre应变等效假设, 并引入了荷载作用下岩石微元损伤变量修正系数, 建立了考虑高温 - 水化学腐蚀 - 围压损伤的岩石本构模型。采用极值方法, 通过理论推导确定了两个威布尔分布参数(m 和 F_0), 并通过岩石三轴压缩试验验证了本构模型的正确性和适用性。该模型有效地反映了岩石高温 - 水化学腐蚀 - 围压损伤下的力学性能, 为岩石材料的损伤机理和工程应用提供了一种新的理论和方法, 拓展了岩石力学和岩土工程的研究范围和深度。

关键词

岩石材料, 高温损伤, 水化学腐蚀, 围压损伤, 本构模型, 极值方法

Constitutive Model of Rock Considering High Temperature-Hydrochemical Corrosion-Confining Pressure Damage and Its Engineering Application

Jiacheng Wang, Shuangshuang Zhang

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 26th, 2025; accepted: Mar. 19th, 2025; published: Mar. 28th, 2025

Abstract

Rock materials are often affected by high temperature, chemical corrosion and confining pressure under natural environment and engineering conditions, resulting in changes in their mechanical properties. In this paper, a rock constitutive model considering hydrochemical corrosion-confining pressure damage is proposed to describe the damage degree and stress-strain relationship of rock materials. In this paper, temperature damage variable, water chemical damage variable and force damage variable are introduced to reflect the degree of chemical corrosion of rock materials at different temperatures, different pH values and exposure time, and the degree of mechanical damage under different loads. Then, based on the SMP criterion considering the strength failure of rock micro-element, the Weibull probability distribution of rock failure and the Lemaitre strain equivalent hypothesis, the correction coefficient of rock micro-element damage variable under load is introduced, and the constitutive model of rock considering high temperature-hydrochemical corrosion-confining pressure damage is established. Using the extremum method, two Weibull distribution parameters (m and F_0) are determined by theoretical derivation, and the correctness and applicability of the constitutive model are verified by rock triaxial compression test. The model effectively reflects the mechanical properties of rock under high temperature-hydrochemical corrosion-confining pressure damage. It provides a new theory and method for the damage mechanism and engineering application of rock materials, and expands the rock mechanics.

Keywords

Rock Materials, High Temperature Damage, Water Chemical Corrosion, Confining Pressure Damage, Constitutive Model, Extreme Value Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩石材料是一种广泛存在于自然环境和工程条件下的地质材料, 研究其物理、化学和力学性质对人类的工程活动和环境保护有着重要的意义。例如, 岩石材料在矿产资源的开采、水能资源的开发、水力资源的利用、铁路公路的建设、地质灾害的防治等方面都起着关键的作用[1]-[4]。因此, 研究岩石材料的工程特性和变化规律, 是岩石力学和岩土工程的一个重要课题。

损伤力学是研究受损材料的损伤演变规律及其破坏的理论, 其核心问题是建立损伤模型, 即确定损伤变量及其转化问题[5]。损伤模型可以从不同的角度描述岩石材料的损伤过程, 如基于细观动态断裂机理的 TCK 模型[6], 基于 Weibull 分布的统计损伤模型[7], 基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤本构模型[8]等。此外, 岩石材料是一种非均质的脆性材料, 其内部存在着大量的微观和宏观缺陷, 如微裂纹、微孔洞、节理、裂隙等。这些缺陷在外力作用下会发生扩展、演化甚至贯通, 导致岩石材料的损伤和破坏[9]-[11]。这些基于损伤力学的模型对于理解岩石材料的力学行为, 分析岩石工程的安全性和可靠性, 预测岩石灾害的发生和发展, 都具有重要的意义[12] [13]。

岩石材料的本构关系复杂, 受到多种因素的影响, 如应力水平、应变速率、温度、环境侵蚀等[14]-[17]。在自然环境和工程条件下, 岩石材料常常遭受水化学腐蚀和围压作用, 导致其内部结构和组成发生变化, 进而影响其力学性能[18]。因此, 考虑水化学腐蚀-围压损伤的岩石本构模型的建立, 对于理解岩

石材的损伤机理和指导岩石工程的设计和施工, 具有重要的理论和实际意义。

水化学腐蚀是指岩石材料在含有酸性或碱性物质的水溶液中, 发生的物理和化学反应, 导致岩石材料的质量、强度和韧性降低, 甚至产生裂缝和孔隙。水化学腐蚀的程度受到水溶液的 pH 值、温度、流速、浓度等因素的影响[14][15]。在自然环境中, 岩石材料常常受到雨水、地下水、海水等不同来源和性质的水溶液的侵蚀, 在工程条件下, 岩石材料也可能受到酸性或碱性的人工溶液的浸泡或喷洒。水化学腐蚀对岩石材料的力学性能的影响, 已经引起了许多学者的关注, Yang 等[16]通过对高岭石和膨润土充填的岩石节理进行了超声测试, 以研究粘土矿物和充填物的含水饱和度对单个充填岩石节理弹性 P 波行为的作用, 他们发现充填物的含水饱和度和矿物成分对黏性土充填岩石单节理的 P 波特征具有综合影响。Wang 等[17]研究了化学效应对砂岩力学响应的影响机理, 建立了基于化学损伤的疲劳损伤演化模型。

高温是指岩石材料所处的温度高于其正常环境温度的情况, 它会导致岩石材料的热胀冷缩、相变和热破裂等现象, 影响岩石材料的强度、刚度和韧性[18]。高温的来源可以是自然的, 如地热、火山、地震等, 也可以是人为的, 如爆破、钻探、核废料处置等。高温的作用时间和范围可以是瞬时的, 如爆破, 也可以是长期的, 如地热[19]。高温的影响程度取决于岩石材料的类型、结构、成分、含水量等因素。一般来说, 高温会使岩石材料的强度降低, 但也有些岩石材料在一定温度范围内会出现强度增加的现象, 这与岩石材料的矿物组成和结构变化有关。

围压是指岩石材料所承受的三个主应力的最小值, 它反映了岩石材料所处的应力环境。围压的大小和变化, 对岩石材料的强度、变形、破坏等力学特性有显著的影响[20]。在自然环境中, 岩石材料常常受到地层压力、水压、气压等不同来源和方向的围压作用, 在工程条件下, 岩石材料也可能受到爆破、开挖、支护等人为干扰的围压作用[21]。围压对岩石材料的力学性能的影响, 已经成为岩石力学和岩土工程的一个重要研究方向, Liu 等[22]研究了砾石对砂砾岩破坏模式的影响, 对不同的砂砾岩进行了三轴压缩试验, 揭示了在不同围压下, 砂砾岩的 3 种破坏模式。Wang 等[23]探讨了岩块含量对 S-RM 动力特性的影响, 分析了围压对 S-RM 动力特性的影响, 总结了 S-RM 动态特性的经验公式。Wang 等[24]利用 DEM 软件建立了二维离散元数值模型, 模拟了锥形截齿岩石的线性切割过程。

水化学腐蚀和围压作用是岩石材料常见的两种损伤因素, 它们往往同时或交替地作用于岩石材料, 导致岩石材料的损伤程度和力学性能发生复杂的变化。因此, 考虑水化学腐蚀 - 围压损伤的岩石本构模型的建立, 是岩石力学和岩土工程的一个重要和有挑战的课题。目前, 已有一些学者对此进行了一些探索, Guan 等[25]通过试验方法研究了高围压下泥岩的岩石力学特征, 建立了考虑岩石塑性和静液柱压力产生的容屑效应的岩石可钻性评价新模型。Chen [26]等研究水岩相互作用下煤岩组合的力学退化模式和变形损伤特征。此外, 他们还通过各种微观观察方法分析了煤岩组合的破坏机理, 揭示了煤岩组合失效模式下的劣化和过渡阶段。Li 等[27]系统考察了 ATP 攻击后砂岩的损伤特性(质量、孔隙率、单轴抗压强度、破坏模式和弹性模量)、微观结构特征及劣化机制。但是这些研究还存在一些不足之处, 如参数选择困难、与试验数据不完全符合、不能反映岩石材料的残余强度特征等。

本文提出了一种考虑高温、水化学腐蚀 - 围压损伤的岩石本构模型, 用于描述岩石材料的损伤程度和应力 - 应变关系。本文首先引入了温度损伤变量、水化学变量和力损伤变量, 分别反映了岩石材料在不同 pH 值和暴露时间下的化学腐蚀程度和在不同荷载下的力学破坏程度。然后基于考虑岩石微元强度破坏的 SMP 准则, 岩石破坏的 Weibull 概率分布和 Lemaitre 应变等效假设, 并引入了荷载作用下岩石微元损伤变量修正系数, 建立了考虑高温、水化学腐蚀 - 围压损伤的岩石本构模型。本文采用极值方法, 通过理论推导确定了两个威布尔分布参数(m 和 F_0), 并通过岩石三轴压缩试验验证了本构模型的正确性和适用性。实验表明, 模型参数设置合理, 能有效地反映岩石高温、水化学腐蚀 - 围压损伤下的力学性能。

2. 高温 - 水化学腐蚀 - 围压损伤岩石本构模型的建立

2.1. 机械(力)损伤变量的确定

岩石由不同尺寸和形状的矿物颗粒胶结而成, 其内部包含着随机分布的微裂纹和孔隙, 而不同矿物颗粒之间的胶结程度也各有差异。由于岩石内部缺陷分布的演化具有随机性, 遵循统计学规律, 可以通过一定的概率分布进行描述。定义损伤为在某一应力作用下已经破坏的微元数目 n 与岩石初始状态下的微元总数目 N 之比。损伤变量即为微元破坏的概率, 表示为已损伤的微元数目 n 与总微元数目 N 之比。

$$D = \frac{n}{N} \quad (1)$$

在外部荷载作用下, 岩石微元的破坏表现出随机性, 并且根据 **Krajcinovic** 模型描述, 损伤变量可被定义为微元破坏概率小于等于 F 的累积概率 P 。如果我们设定微元破坏的概率密度函数为 $f(x)$, 那么 $P(F)$ 可以被表述为 $f(x)$ 的累积分布函数, 即:

$$D_M = P(F) = \int_0^F f(x) dx \quad (2)$$

研究表明, 当建立岩石损伤统计本构模型时, 基于岩石微元强度服从 **Weibull** 分布或正态分布的假定, 来研究岩石破坏过程中的损伤演化特性, 能够达到较好的研究效果, 相对于正态分布, **Weibull** 分布是一种较不保守的分布类型, 它在一定程度上更真实地反映了随机变量的分布。鉴于此, 本文假定岩石微元强度服从 **Weibull** 分布, 其概率密度函数为

$$\phi(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (3)$$

式中, F 表示微元强度, m 和 F_0 为 **Weibull** 分布的参数。

由式(2)得岩石在荷载作用下的损伤变量为

$$D_M = \int_0^F \phi(x) dx = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (4)$$

2.2. 水化学损伤变量的确定

当岩石处在水溶液环境中, 岩石的组成成分中有部分会与水以及其中的氢离子或者其他离子反应生成新的化学物质, 在此过程中, 岩石组分溶解, 孔隙率增大, 岩石的结构也发生变化, 导致岩石的强度以及弹性模量均发生变化。事实上, 岩石的结构和组成极其复杂, 理想情况下可以认为是由可溶性胶结性和不溶性材料制成的孔隙度岩石。水化作用会导致可溶性胶结材料的损失, 减少不溶性颗粒之间的接触, 最终影响岩石的宏观变形性能。因此, 本文认为砂岩中可溶性胶结材料的损失是导致水化学腐蚀作用下岩石力学性能恶化的根本原因。根据李宁[28]之前的研究, 一个基于微观结构的化学损伤变量可以将可溶性胶结材料的摩尔数变化来表征岩石水化学损伤:

$$D_{CH} = \frac{\Delta S^d}{(S^d)_0} = \left[\frac{\Delta \omega^d}{(\omega^d)_0}\right]^{\frac{2}{3}} = 1 - \frac{S^d}{(S^d)_0} = \left[1 - \frac{\omega^d}{(\omega^d)_0}\right]^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

其中, $(S^d)_0$ 和 $(\omega^d)_0$ 分别为初始无腐蚀时有效承载面积和岩石材料的总摩尔数; ΔS^d 和 $\Delta \omega^d$ 分别为化学

腐蚀过程中有效承载面积的减小值和可溶胶结材料摩尔数的衰减值, S^d 和 ω^d 分别为经过水化学腐蚀后的有效承载面积和可溶材料的摩尔数。考虑到岩石中还有不可溶材料, 即不与水和酸性溶液反应的材料, 这里的 $(\omega^d)_0$ 表示岩石试样中所有材料的总摩尔数。

$\Delta\omega^d$ 可根据以下公式(10)~(12)得到。 $(\omega^d)_0$ 可以根据岩石的矿物组成计算出来。

水与岩石之间存在着复杂而多样的相互作用, 这种相互作用在地质历史上持续了很长时间, 其机理涉及到多个方面。其中一个重要的方面是水和岩石中可溶性胶结物之间的化学反应, 这种反应会影响岩石的力学性质和耐久性。水和岩石中可溶性胶结物之间的化学反应主要包括两个过程: (1) 溶解过程, 即水分子与可溶性胶结物分子之间发生静电力或氢键作用, 使得可溶性胶结物分子从固态转变为液态或气态, 并进入到水中。(2) 反应过程, 即水中的溶质与岩石中的可溶性胶结物分子之间发生化学键断裂或形成, 产生新的物质, 并改变原有物质的结构和组成。由于水在岩体内部具有一定的流动性, 因此水和岩石之间的化学反应不仅发生在表面接触处, 还会发生在内部孔隙处。这样就会导致岩石内部孔隙度、渗透率、强度、刚度等参数发生变化, 从而造成岩石的化学损伤。为了描述和预测岩石在不同环境条件下(如酸度、温度、压力等)由于水和岩石之间的化学反应而引起的力学性质变化, 需要建立合理的化学损伤本构模型。岩石与水之间的化学反应在这一复杂相互作用过程中起着决定性的作用。考虑到实验室中相对静止的浸泡条件和自然岩体中水流缓慢的情况, 所提出的化学损伤模型忽略了水传输引起的化学损伤, 仅将溶质溶解和化学反应作为化学损伤的主要原因。

岩石中可溶性胶结物与酸性溶液中的氢离子之间的化学反应是导致岩石化学损伤的主要原因之一。这种反应会降低砂岩的强度和刚度, 增加其孔隙度和渗透率。反应速率取决于酸的类型和浓度、温度、压力和砂岩的矿物组成, 岩石中的可溶性胶结物和氢离子反应方程式如下:



其中, A_i 和 H^+ 为反应物, B_i 和 C_i 代表生成物, m_i 、 n_i 、 p_i 和 q_i 为化学方程的平衡系数。

为了预测与 H^+ 的化学反应造成的损伤, 应知道可溶性水泥的反应物损失。根据化学动力学理论, 用 H^+ 的浓度变化速率表示的各化学反应的速度如下:

$$v^i(H^+) = k c^{x_i}(H^+) c^{y_i}(A_i) \quad (7)$$

其中, $v^i(H^+)$ 为 H^+ 与 A_i 的反应速率, $c^{x_i}(H^+)$ 和 $c^{y_i}(A_i)$ 分别表示 H^+ 和反应物 A_i 的瞬时浓度。比例常数 k 为速率参数, x_i 和 y_i 分别为反应物的浓度参数。

反应物 A_i 难溶于水, 其在水溶液中的浓度是一个常数。由于存在多重反应, 反应机理复杂, H^+ 的反应速率可以用来综合反映所有反应速率。 H^+ 的反应速率简化如下:

$$v_{H^+} = \lambda c^x(H^+) \quad (8)$$

即:

$$-\frac{dc(H^+)}{dt} = \lambda c^x(H^+) \quad (9)$$

由式(9), 可得:

$$C_{H^+}(t) = \left((C_{H^+}^0)^{1-x} - (1-x)\lambda t \right)^{\frac{1}{1-x}} \quad (10)$$

其中, $C_{H^+}^0$ 为 H^+ 的初始浓度, $C_{H^+}(t)$ 为时刻 t 时的 H^+ 的浓度。

反映溶液 pH 值与 H^+ 浓度关系的公式如下:

$$\text{pH} = -\lg c(\text{H}^+) \quad (11)$$

为了预测岩石和 H^+ 的化学反应造成的损伤, 应知道岩石可溶性化合物中反应物的损失。由式(6)与各反应物含量的关系, 可以推断出与 H^+ 反应一定时间引起的岩石可溶性化合物 D_i 摩尔数反应的量如下:

$$\Delta\omega_1^d = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (C_{\text{H}^+}(t) - C_{\text{H}^+}^0) V_{cs} \quad (12)$$

其中, V_{cs} 表示化学溶液的体积。 α_i 表示所有能与 H^+ 反应的反应物中反应物 A_i 的初始摩尔分数。

另一方面, 化学溶液中的水可以与岩石中的相关物质发生反应。由于水量充足, 反应在短时间内完成, 时间效应可以忽略。因此, 可溶性化合物的摩尔数损失可以定量地表示如下:

$$\Delta\omega_2^d = \sum_{i=1}^m \frac{m_{Di}}{M_i} \quad (13)$$

其中, m_{Di} 和 M_i 分别为可溶性化合物 D_i 的质量和摩尔质量。

由于任何物质与水反应实际上都是和水中水分子电离出来的 H^+ 以及 OH^- 发生反应, 岩石化合物不管是和酸性 H^+ 反应还是和水发生反应, 本质上都是与 H^+ 发生反应, 因此岩石化合物可溶性化合物的摩尔数损失总量应表示为:

$$\Delta\omega^d = \Delta\omega_1^d + \Delta\omega_2^d = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (C_{\text{H}^+}(t) - C_{\text{H}^+}^0) V_{cs} + \sum_{i=1}^m \frac{m_{Di}}{M_i} \quad (14)$$

结合式(5)、(12)~(14), 可以得到化学损伤的表达式如下:

$$D_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (10^{-\text{pH}_0} - 10^{-\text{pH}(t)}) V_{cs} + \sum_{i=1}^m \frac{m_{Di}}{M_i}}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

2.3. 温度损伤变量的确定

岩石经循环的加热和冷却作用后, 由于热应力的反复作用使得岩石在受荷载之前就存在微元破坏, 从而产生热损伤。高温作用下, 岩石内产生的热膨胀力以及结构热应力, 使其内部微观结构(如微孔隙、微裂纹等)发生不可逆的变化, 从而导致岩石宏观力学性质产生劣化。根据损伤力学理论, 岩石热处理后, 其损伤变量可用岩石物理力学参数的变化来表征。通过大量的文献及试验数据可以得出温度对岩石具有软化的作用, 即温度升高, 岩石的弹性模量减小, 因此可采用弹性模量来定义热损伤变量:

$$D_T = 1 - \frac{E_T}{E_0} \quad (16)$$

式中, E_T 为高温下岩石的弹性模量, E_0 为常温下岩石的弹性模量。

2.4. 高温 - 水化学 - 围压耦合作用下总损伤变量的确定

由于岩石在温度、化学腐蚀和荷载作用下会表现出不同的损伤特性, 因此, 围压 - 化学腐蚀 - 温度耦合作用下岩石的总损伤并不是各种单一损伤变量的叠加。用缺陷材料的占比来分别表示岩石在三种单一状态下的损伤, 缺陷材料的占比及缺陷材料体积占材料总体积的比值, 假设初始状态未损伤岩石, 高温损伤岩石, 化学和高温耦合损伤岩石和围压 - 化学腐蚀 - 温度三种应力状态耦合作用后岩石的有效体积分别为 V_0 , V_1 , V_2 和 V_3 。则有:

$$D_T = 1 - \frac{V_1}{V_0} \quad (17)$$

$$D_C = 1 - \frac{V_2}{V_1} \quad (18)$$

$$D_M = 1 - \frac{V_3}{V_2} \quad (19)$$

联立式可得围压 - 化学腐蚀 - 温度耦合作用下岩石的总损伤变量:

$$D_H = D_T + D_C + D_M - D_T D_C - D_T D_M - D_C D_M + D_T D_C D_M \quad (20)$$

式中, D_T 为温度损伤变量, D_C 为化学损伤变量, D_M 为力损伤变量, D_H 为围压 - 化学腐蚀 - 温度耦合作用下岩石的总损伤变量。

真三轴压缩下的岩石损伤本构关系为:

$$\sigma_1 = E_{CT} \varepsilon_1 (1 - D_T) (1 - D_C) (1 - D_M) + \nu (\sigma_2 + \sigma_3) \quad (21)$$

假三轴压缩下的岩石损伤本构关系为:

$$\sigma_1 = E_{CT} \varepsilon_1 (1 - D_T) (1 - D_C) (1 - D_M) + 2\nu \sigma_3 \quad (22)$$

式中, E_T 为高温处理后岩石的弹性模量, ν 为岩石的泊松比。

根据有效应力概念和 Lemaitre 应变等价性原理, 名义应力下含损伤岩石产生的应变等价于有效应力下无损伤岩石产生的有效应变(其中名义应力即为试验测得的应力)。则可建立岩石损伤本构关系如下:

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1 - D}; i = 1, 2, 3 \quad (23)$$

式中, σ_i^* 为岩石的有效应力, σ_i 为岩石的名义应力, D 为岩石的损伤变量。

在对损伤变量修正以后, 有效应力 σ_i^* 和名义应力 σ_i 关系式变为:

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1 - \lambda D} = \frac{\sigma_i}{1 - D \sqrt{\frac{\sigma_r}{\sigma_p}}}; i = 1, 2, 3 \quad (24)$$

由于修正系数只是用于修正力损伤变量, 对温度损伤变量和化学损伤变量没有影响, 则修正后的围压 - 化学腐蚀 - 温度耦合作用下岩石的总损伤变量耦合公式变为:

$$D_H = D_T + D_C + \lambda D_M - D_T D_C - D_T \lambda D_M - D_C \lambda D_M + D_T D_C \lambda D_M \quad (25)$$

将公式(4)、(15)和(16)代入式(25), 岩石的损伤总变量为:

$$D_H = 1 - \frac{E_T}{E_0} \left[1 - \left[\frac{A}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \right] \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (26)$$

其中

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (10^{-pH_0} - 10^{-pH(t)}) V_{cs} + \sum_{i=1}^m \frac{m_{Di}}{M_i} \quad (27)$$

2.5. 高温 - 水化学 - 围压耦合作用下岩石损伤本构模型

岩石的三轴压缩试验, 由于不是轴向压力和围压同时加载, 而是先施加围压, 待围压达到预定值并

稳定后再施加轴向压力。因此在施加轴向压力之前, 岩石在围压作用下已经产生了初始轴向应变, 所以实际的轴向应变应为试验测量应变值与初始轴向应变之和。

根据 Lemaitre 应变等价性原理和有效应力的概念, 名义应力下含损伤岩石产生的应变等价于有效应力下无损伤岩石产生的有效应变(其中名义应力即为试验测得的应力)。则可建立岩石损伤本构关系如下

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1 - D_s}; i = 1, 2, 3 \quad (28)$$

式中, σ_i^* 为岩石的有效应力, σ_i 为岩石的名义应力, D_s 为岩石的损伤变量。则根据广义胡克定律可知

$$\varepsilon_i^* = \left[\sigma_i^* - \nu(\sigma_j^* + \sigma_k^*) \right] / E_s \quad (29)$$

式中: (i, j, k) 为 $(1, 2, 3)$, E_s 为除力场外的所有场叠加作用下岩石的弹性模量, ν 为泊松比, ε_i^* 为与有效应力 σ_i^* 所对应的有效应变。

根据变形协调条件得

$$\varepsilon_i^* = \varepsilon_i \quad (30)$$

由式(20), (21)和(22)可得岩石损伤本构关系

$$\sigma_1 = E_s \varepsilon_1 (1 - D_s) + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (31)$$

由岩石的三轴压缩试验可知, 三轴压缩试验的加载顺序是通过液压油先施加围压, 待围压稳定至预定值时, 再加载轴向压力。因此在施加轴向压力之前, 岩石会在围压的作用下产生初始轴向应变, 所以试验中记录的轴向偏应力 σ_{lr} 实际上为轴向应力 σ_1 和围压 σ_3 的差值, 即

$$\sigma_{lr} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (32)$$

在围压作用下, 岩石产生的初始轴向应变为

$$\varepsilon_{10} = \frac{1 - 2\nu}{E_T} \sigma_3 \quad (33)$$

由于试验结果中不包含轴向压力施加前产生的初始轴向应变, 故实际轴向应变 ε_1 为试验中测量的轴向应变 ε_{lr} 与初始轴向应变 ε_{10} 之和, 即

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{lr} + \varepsilon_{10} \quad (34)$$

修正后的化学和围压耦合作用下岩石损伤本构关系为:

$$\begin{aligned} \sigma_{lr} &= [E_{CT} \varepsilon_{lr} + (1 - 2\nu)\sigma_3] (1 - D_H) + (2\nu - 1)\sigma_3 \\ &= [E_{CT} \varepsilon_{lr} + (1 - 2\nu)\sigma_3] (1 - D_M)(1 - D_C)(1 - D_T) + (2\nu - 1)\sigma_3 \end{aligned} \quad (35)$$

将式(26)代入(35)得:

$$\sigma_{lr} = [E_{CT} \varepsilon_{lr} + (1 - 2\nu)\sigma_3] \frac{E_T}{E_0} \left[1 - \left[\frac{A}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \right] \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] + (2\nu - 1)\sigma_3 \quad (36)$$

其中

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \alpha_i}{n_i} \left(10^{-pH_0} - 10^{-pH(t)} \right) V_{cs} + \sum_{i=1}^m \frac{m_{Di}}{M_i} \quad (37)$$

$$F = \frac{E_{CT}\varepsilon_{1t} + \sigma_3 + c \cot \varphi}{\sigma_3 + c \cot \varphi} \quad (38)$$

3. 岩石损伤本构模型的参数确定与验证

3.1. 模型参数的确定

从上述模型可以看出, 该模型中需要确定的参数有 E_T 和 m, F_0 , 对于参数 E_T 可采用 2 次多项式拟合弹性模量随温度变化的趋势来确定, 而对于参数 m, F_0 可采用岩石应力应变曲线的峰值点 $(\varepsilon_p, \sigma_p)$ 来确定, 即极值法。

在上文建立的损伤演化方程和本构关系中, 包含 2 个 Weibull 分布参数 m 和 F_0 作为损伤模型的待求参量, 本文采用岩石应力应变曲线的峰值点 $(\varepsilon_p, \sigma_p)$ 来确定模型的参数, 即极值法, 具体求解过程如下。

峰值应力 σ_p 与所对应的峰值应变 ε_p 满足下列两个几何条件

$$\varepsilon = \varepsilon_p, \sigma_1 = \sigma_p \quad (39)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_p, \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = 0 \quad (40)$$

将式(39)和(40)代入(36)中, 可得到两个关于 Weibull 分布参数 m 和 F_0 的关系式, 并最终求出模型参数 m 和 F_0 。

首先将式(39)代入式(36)中可得

$$\frac{E_T}{E_0} \left[1 - \left[\frac{A}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \right] \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] = \frac{\sigma_p + (1-2\nu)\sigma_3}{E_{CT}\varepsilon_p + (1-2\nu)\sigma_3} \quad (41)$$

其中

$$F_{sc} = \frac{E_{CT}\varepsilon_{1t} + \sigma_3 + c \cot \varphi}{\sigma_3 + c \cot \varphi} \quad (42)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (10^{-pH_0} - 10^{-pH(t)}) V_{cs} + \sum_{i=1}^m \frac{m_{Di}}{M_i} \quad (43)$$

对式(36)取偏导得:

$$\frac{\partial \sigma_{1t}}{\partial \varepsilon_{1t}} \Big|_{\substack{\sigma_{1t}=\sigma_p \\ \varepsilon_{1t}=\varepsilon_p}} = \frac{E_T}{E_0} \left[1 - \left[\frac{A}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \right] \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \left\{ E_{CT} - \frac{m [E_{CT}\varepsilon_p + (1-2\nu)\sigma_3]}{F_{sc}} \left(\frac{F_{sc}}{F_0} \right)^m \frac{\partial F_{sc}}{\partial \varepsilon_{1t}} \right\} \quad (44)$$

将式(40)代入(44)得:

$$E_{CT} - \frac{m [E_{CT}\varepsilon_p + (1-2\nu)\sigma_3]}{F_{sc}} \left(\frac{F_{sc}}{F_0} \right)^m \frac{\partial F_{sc}}{\partial \varepsilon_{1t}} = 0 \quad (45)$$

对式(42)求偏导得:

$$\frac{\partial F_{sc}}{\partial \varepsilon_{1t}} \Big|_{\substack{\sigma_{1t}=\sigma_p \\ \varepsilon_{1t}=\varepsilon_p}} = \frac{E_{CT}}{\sigma_3 + c \cot \varphi} \quad (46)$$

将式(46)代入式(45)得:

$$\left(\frac{F_{sc}}{F_0}\right)^m = \frac{E_{CT}\varepsilon_p + \sigma_3 + c \cot \varphi}{m[E_{CT}\varepsilon_p + (1-2\nu)\sigma_3]} \quad (47)$$

联立式(41)和(47)可得

$$m = \frac{1}{\ln(B)} \frac{E_{CT}\varepsilon_p + \sigma_3 + c \cot \varphi}{[E_{CT}\varepsilon_p + (1-2\nu)\sigma_3]} \quad (48)$$

$$F_0 = \frac{E_{CT}\varepsilon_p + \sigma_3 + c \cot \varphi}{\sigma_3 + c \cot \varphi} \left(\frac{m[E_{CT}\varepsilon_p + (1-2\nu)\sigma_3]}{E_{CT}\varepsilon_p + \sigma_3 + c \cot \varphi} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (49)$$

其中

$$B = \frac{E_{CT}\varepsilon_p + (1-2\nu)\sigma_3}{\sigma_p + (1-2\nu)\sigma_3} \frac{E_T}{E_0} \left[1 - \left[\frac{A}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \right] \quad (50)$$

3.2. 应力 - 应变曲线及模型验证

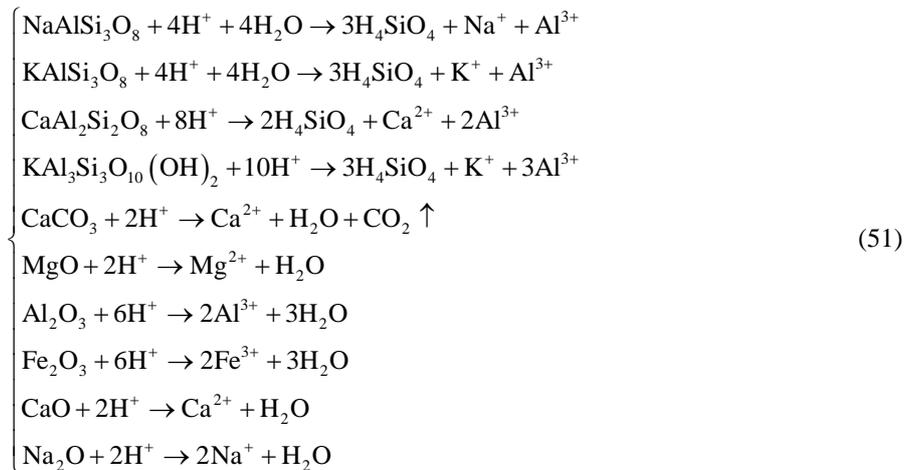
为了验证本文所建立的岩石损伤演化方程、统计损伤本构模型和参数确定方法的合理性及准确性, 本文通过引用 Chen [29] 的相关研究成果来验证。

在该试验过程中, 水化学处理组砂岩试样分别经过 pH 为 1, 3, 5 的硝酸溶液处理, 并设置了经过 pH 为 7 的蒸馏水处理的对照组。高温处理组加热升温速率为 10°C/min, 恒温处理 4 小时, 处理温度分别为 25°C、300°C、600°C、900°C。以及高温和水化学耦合处理组, 先经过水化学处理再高温处理。

该实验中选取砂岩试样的元素含量如表 1 所示。

温度 - 水化学 - 围压耦合作用涉及岩石中氧化物与水溶液反应, 温度 - 水化学 - 围压耦合作用涉及岩石中氧化物与水溶液反应, 砂岩中粘土矿物与酸性溶液之间的化学反应方程主要包括:

(1) 氧化物与酸反应:



(2) 氧化物与水的反应:



在酸性环境中, 砂岩中的物质与 H^+ 反应后只能置换出金属离子, 不能将 Si 变成离子融入水溶液使之脱离砂岩, 因此, 通过计算反应物和所涉及的产物的摩尔量, 就可以确定已经丢失的溶解混凝土的摩尔量。

Table 1. Reaction amount of sandstone soluble cementing material in hydrochemical environment

表 1. 水化学环境中砂岩可溶性胶结材料反应量

Substance	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Total
Weight (g)	243.41	27.29	95.10	13.65	4.76	58.77	2.04	445.02
Molar mass	60.00	160.00	102.00	56.00	40.00	94.00	62.00	
Molar (mol)	4.057	0.171	0.932	0.244	0.119	0.625	0.033	6.181
Can react with H ⁺	0	0.171	0.932	0.244	0.119	0.625	0.033	2.124
Proportion	0	8.03	43.90	11.48	5.60	29.44	1.55	100
pH = 1. Molar number of damaged soluble solids	0	1.339×10^{-3}	7.317×10^{-3}	5.739×10^{-3}	2.802×10^{-3}	1.472×10^{-2}	7.746×10^{-4}	3.269×10^{-2}
pH = 1 React with water	0	0	0	0.244	0.119	0	0	0.363
pH = 1 React with water and H ⁺	0	1.338×10^{-5}	7.316×10^{-5}	0.244	0.119	0	0	0.372
pH = 3. Molar number of damaged soluble solids	0	1.338×10^{-5}	7.316×10^{-5}	5.738×10^{-5}	2.801×10^{-5}	1.472×10^{-4}	7.746×10^{-6}	3.269×10^{-4}
pH = 3 React with water	0	0	0	0.244	0.119	0	0	0.363
pH = 3 React with water and H ⁺	0	1.338×10^{-5}	7.316×10^{-5}	0.244	0.119	0	0	0.363
pH = 5. Molar number of damaged soluble solids		1.325×10^{-7}	7.244×10^{-7}	5.681×10^{-7}	2.774×10^{-7}	1.457×10^{-6}	7.669×10^{-8}	3.236×10^{-6}
pH = 5 React with water	0	0	0	0.244	0.119	0	0	0.363
pH = 5 React with water and H ⁺	0	1.325×10^{-7}	7.244×10^{-7}	0.244	0.119	0	0	0.363
pH = 7. Molar number of damaged soluble solids		0	0	0	0	0	0	0
pH = 7 React with water	0	0	0	0.244	0.119	0	0	0.363
pH = 7 React with water and H ⁺	0	0	0	0.244	0.119	0	0	0.363

根据公式(12)和(13), 计算得出不同 pH 值水化学环境下砂岩可溶性胶结材料反应量, 见表 1。再根据公式(48)和(49)计算得出不同条件下威布尔分布系数 m 和 F_0 , 见表 2。

Table 2. The table of constitutive model parameters (the confining pressure is 20 MPa)

表 2. 本构模型参数表(围压为 20 MPa)

Temperature/°C	PH	ν	E_{CT}/GPa	c/MPa	φ	$\varepsilon_p/\%$	σ_p/MPa	m	F_0
25	1	0.185	43.3	6.498	51.33	0.7418	244.32	10.9212	17.0519
	3	0.184	46.8	6.733	52.32	0.7083	259.51	14.6336	16.9611
	5	0.182	47.8	6.629	51.89	0.8010	272.57	6.3257	21.5702
	7	0.182	52.3	6.658	52.01	0.7565	275.96	5.6304	22.5790

续表

300	1	0.185	41.3	6.738	52.34	0.7803	257.02	94.6298	14.4618
	3	0.181	42.5	6.625	51.87	0.8021	256.51	14.8329	17.3836
	5	0.180	46.9	6.743	52.36	0.8820	272.75	5.1899	23.7861
	7	0.188	50.3	7.020	58.47	0.7844	293.60	12.5400	20.3288
600	1	0.185	39.1	6.440	51.08	0.8000	210.22	12.7818	16.3235
	3	0.182	42.8	7.123	53.87	0.7515	217.41	13.0928	16.7045
	5	0.182	44.4	7.421	54.98	0.9716	247.45	4.2769	25.2860
	7	0.180	45.9	6.687	52.13	0.8900	258.90	7.1330	22.5765
900	1	0.180	39.5	6.959	52.23	0.5441	144.43	18.2107	12.1698
	3	0.180	41.7	6.738	53.23	0.6157	173.35	11.5125	15.5048
	5	0.189	40.2	6.928	53.11	1.0578	225.55	4.9748	24.5349
	7	0.180	41.2	6.582	51.69	0.8604	232.69	5.7461	32.6472

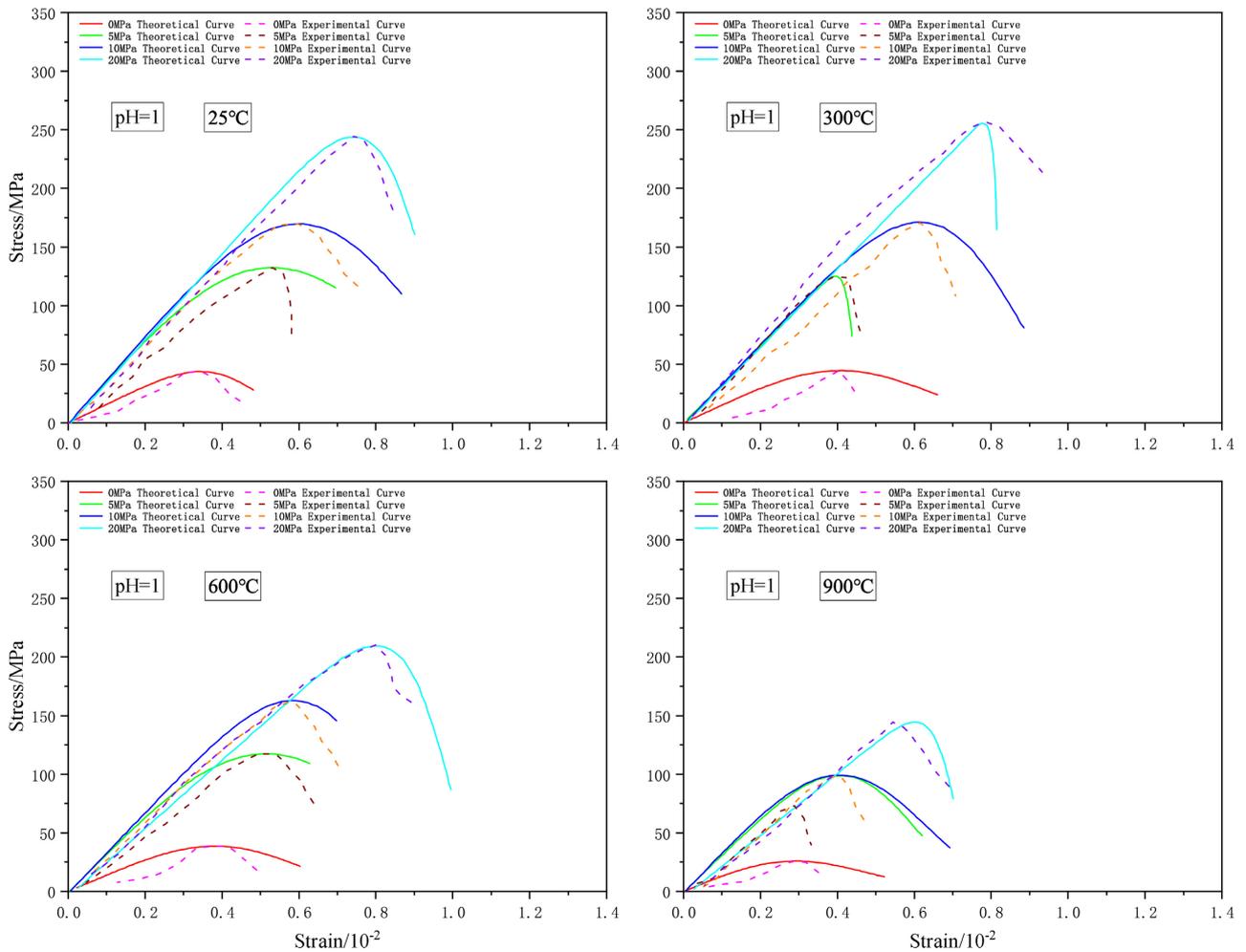


Figure 1. Stress-strain curves at different temperatures and confining pressures at pH = 1

图 1. pH = 1 时不同温度和围压下的应力 - 应变曲线

4. 结果分析

通过观察图 1, 在相同的酸处理条件下, 随着温度的升高, 砂岩样品的峰值应力逐渐降低。但是, 需要注意的是, 当砂岩经受 300℃ 的温度时, 峰值应力略有增加, 这是因为高温加热蒸发了岩石试样中的水, 而此时温度对岩石试样的损伤还很小, 进而导致其峰值压力升高。当温度高于 600℃ 时, 峰值应力明显下降。在相同的温度下, 随着 pH 值的降低, 砂岩的峰值应力也降低。但是, 相对于温度, 它对砂岩样品的影响较小。随着围压的增加, 砂岩样品的峰值应力和峰值应变呈现上升趋势。

本文根据图 1 中的数据, 分析了热处理和酸腐蚀对砂岩力学性能的影响。结果表明, 温度和 pH 值对砂岩的峰值应力有显著的影响, 而围压对砂岩的峰值应力和峰值应变也有一定的影响。根据表 2 计算得到的数据可知, 水对岩石的损伤远大于水溶液中酸性物质对岩石的损伤, 这与陈的实验相吻合。结果表明, 岩石损伤本构模型基于威布尔分布构建的 SMP 判据能够准确反映岩石的变化在不同温度、水化学环境和围压下的强度, 从而证明了岩石试样物质与水化学反应和酸反应确定化学损伤因素的可行性。

5. 结论

本文聚焦易受高温、化学侵蚀和水腐蚀的岩石, 分析现有实验数据, 揭示岩石力学性能损失源于矿物高温分解和水化学腐蚀, 将水化学腐蚀破坏归因于可溶性胶凝物质损失。基于损伤理论, 量化水化学损害, 建立高温 - 水化学腐蚀 - 围压耦合作用下的损伤本构模型。

研究引入温度、水化学和力损伤变量, 基于 SMP 准则、Weibull 分布和应变等效假设, 建立考虑水化学腐蚀 - 围压损伤的本构模型。研究砂岩三轴压缩应力 - 应变特征发现, 围压增大, 峰值强度和应变增大; 温度升高, 峰值应力降低, 300℃ 时因水蒸发且损伤小峰值应力略增; pH 值降低, 峰值应力降低, 但影响小于温度。

经不同温度和 pH 值处理砂岩试样, 定义相关损伤变量, 确定 Weibull 分布参数, 对比实验曲线验证模型适用性和准确性。虽采用现有数据验证模型, 但未真正实现耦合, 未来将进行水化学和围压耦合实验。该模型基于损伤力学和 SMP 准则, 仅需两个可通过常规三轴试验确定的参数, 能准确反映岩石损伤程度和强度特征, 为岩土工程提供理论指导, 具有创新性和实用性。

参考文献

- [1] Song, L., Chen, S., Wang, C., Wen, P. and Chen, H. (2023) Engineering Properties on Salt Rock as Subgrade Filler in Dry Salt Lake: Water Retention Characteristics and Water Migration Patterns. *Construction and Building Materials*, **406**, Article 133414. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133414>
- [2] Xie, H., Lu, J., Li, C., Li, M. and Gao, M. (2022) Experimental Study on the Mechanical and Failure Behaviors of Deep Rock Subjected to True Triaxial Stress: A Review. *International Journal of Mining Science and Technology*, **32**, 915-950. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.05.006>
- [3] Ping, S., Wang, F., Wang, D., Li, S., Yuan, Y., Feng, G., et al. (2023) Multi-Scale Deterioration Mechanism of Shear Strength of Gypsum-Bearing Mudstone Induced by Water-Rock Reactions. *Engineering Geology*, **323**, Article 107224. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107224>
- [4] Amar, H., Benzaazoua, M., Elghali, A., Hakkou, R. and Taha, Y. (2022) Waste Rock Reprocessing to Enhance the Sustainability of Phosphate Reserves: A Critical Review. *Journal of Cleaner Production*, **381**, Article 135151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135151>
- [5] Li, G. and Cui, S. (2020) A Review on Theory and Application of Plastic Meso-Damage Mechanics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **109**, Article 102686. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102686>
- [6] Lv, T.H., Chen, X.W. and Chen, G. (2018) The 3D Meso-Scale Model and Numerical Tests of Split Hopkinson Pressure Bar of Concrete Specimen. *Construction and Building Materials*, **160**, 744-764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.094>
- [7] Murali, G., Katman, H.Y.B., Wong, L.S., Ibrahim, M.R., Kathirvel, P. and Abid, S.R. (2023) Response of Treated Recycled Aggregate Concrete against Low-Velocity Impact Loading: Experimental and Weibull Statistical Analysis.

- Construction and Building Materials*, **408**, Article 133735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133735>
- [8] Tu, H., Zhou, H., Lu, J., Gao, Y. and Shi, L. (2020) Elastoplastic Coupling Analysis of High-Strength Concrete Based on Tests and the Mohr-Coulomb Criterion. *Construction and Building Materials*, **255**, Article 119375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119375>
- [9] Park, C.H. and Bobet, A. (2010) Crack Initiation, Propagation and Coalescence from Frictional Flaws in Uniaxial Compression. *Engineering Fracture Mechanics*, **77**, 2727-2748. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.06.027>
- [10] Peng, K., Wang, Y., Zou, Q., Liu, Z. and Mou, J. (2019) Effect of Crack Angles on Energy Characteristics of Sandstones under a Complex Stress Path. *Engineering Fracture Mechanics*, **218**, Article 106577. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106577>
- [11] Wong, L.N.Y. and Einstein, H.H. (2009) Systematic Evaluation of Cracking Behavior in Specimens Containing Single Flaws under Uniaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46**, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.03.006>
- [12] Eberhardt, E., Stead, D. and Stimpson, B. (1999) Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **36**, 361-380. [https://doi.org/10.1016/s0148-9062\(99\)00019-4](https://doi.org/10.1016/s0148-9062(99)00019-4)
- [13] Zhu, C., Karakus, M., He, M., Meng, Q., Shang, J., Wang, Y., et al. (2022) Volumetric Deformation and Damage Evolution of Tibet Interbedded Skarn under Multistage Constant-Amplitude-Cyclic Loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **152**, Article 105066. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105066>
- [14] Zhang, J., Zhang, B., Liu, B. and Li, B. (2024) Investigation on the Influence of the Frequency of Pulsed Water Jet on the Rock-Breaking Effect. *Powder Technology*, **431**, Article 119054. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119054>
- [15] Fan, Y., Peng, H., Chen, G., Peng, J., Han, H., Qin, Y., et al. (2023) Experimental Study of the Influences of Different Factors on the Acid-Rock Reaction Rate of Carbonate Rocks. *Journal of Energy Storage*, **63**, Article 107064. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107064>
- [16] Yang, H., Duan, H. and Zhu, J. (2023) Experimental Study on the Role of Clay Mineral and Water Saturation in Ultrasonic P-Wave Behaviours across Individual Filled Rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **168**, Article 105393. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105393>
- [17] Wang, Z., Yang, Y., Qin, W. and Lv, H. (2023) Experimental Investigation on the Effect of Alkaline Environment on the Mechanical Properties of Aggregate Rock. *Materials Today Communications*, **35**, Article 105867. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105867>
- [18] Yang, J., Fu, L., Zhang, W. and Wang, Z. (2019) Mechanical Property and Thermal Damage Factor of Limestone at High Temperature. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **117**, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.012>
- [19] Zhang, Z.X., Yu, J., Kou, S.Q. and Lindqvist, P.-A. (2001) Effects of High Temperatures on Dynamic Rock Fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **38**, 211-225. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(00\)00071-x](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(00)00071-x)
- [20] Luo, S., Gong, F., LI, L. and Peng, K. (2023) Linear Energy Storage and Dissipation Laws and Damage Evolution Characteristics of Rock under Triaxial Cyclic Compression with Different Confining Pressures. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **33**, 2168-2182. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(23\)66251-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(23)66251-x)
- [21] Li, Y., Peng, J., Zhang, P. and Huang, C. (2021) Hard Rock Fragmentation in Percussion Drilling Considering Confining Pressure: Insights from an Experimental Study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **148**, Article 104961. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104961>
- [22] Liu, J., Wang, J., Ge, H., Zhou, W., Chen, B., Li, X., et al. (2023) Effect of Gravel on Rock Failure in Glutenite Reservoirs under Different Confining Pressures. *Petroleum Science*, **20**, 3022-3036. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.04.006>
- [23] Wang, S., Zhu, Y., Ma, W., Wang, Z. and Li, G. (2021) Effects of Rock Block Content and Confining Pressure on Dynamic Characteristics of Soil-Rock Mixtures. *Engineering Geology*, **280**, Article 105963. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105963>
- [24] Wang, S., Shi, X. and Wu, Y. (2024) Dem-Based 2D Numerical Simulation of the Rock Cutting Process Using a Conical Pick under Confining Stress. *Computers and Geotechnics*, **165**, Article 105885. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105885>
- [25] Guan, Y., Zhu, H., Liu, Q., Luo, M., Zhang, C., Dai, X., et al. (2023) A New Model for Evaluating Rock Drillability Considering the Rock Plasticity and Chip Hold down Effect Caused by Hydrostatic Column Pressure under High Confining Pressure. *Geoenery Science and Engineering*, **227**, Article 211806. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211806>
- [26] Chen, W., Liu, J., Peng, W., Zhao, Y., Luo, S., Wan, W., et al. (2023) Aging Deterioration of Mechanical Properties on Coal-Rock Combinations Considering Hydro-Chemical Corrosion. *Energy*, **282**, Article 128770. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128770>

- [27] Li, S., Huo, R., Yoshiaki, F., Ren, D. and Song, Z. (2019) Effect of Acid-Temperature-Pressure on the Damage Characteristics of Sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **122**, Article 104079. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104079>
- [28] Ning, L., Yunming, Z., Bo, S. and Gunter, S. (2003) A Chemical Damage Model of Sandstone in Acid Solution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**, 243-249. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(02\)00132-6](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(02)00132-6)
- [29] Chen, Q., Chen, Y., Xiao, P., Du, X., Pan, Y. and Azzam, R. (2023) Mechanical Properties and Damage Constitutive Model of Sandstone after Acid Corrosion and High Temperature Treatments. *International Journal of Mining Science and Technology*, **33**, 747-760. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.11.011>