

考虑时间 - 温度耦合效应富水隧道注浆结石体力学 - 渗流特性研究

张纪云^{1,2,3}, 方志浩¹, 余永强^{1,2}, 王树仁^{1,2}, 范利丹^{1,2}, 曹运兴⁴, 张新生^{1,4}, 贾后省⁵,
李培涛¹, 徐峰¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省地下空间开发及诱发灾害防治国际联合实验室, 河南 焦作 454003;
3. 河南省地下工程智能建造与安全运维重点实验室, 河南 焦作 454003; 4. 河南省非常规能源地质与开发国际联合实验室,
河南 焦作 454000; 5. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 为揭示富水温度环境与时温耦合作用对注浆结石体力学性能的影响规律, 通过改进自制三维富水温度环境岩体注浆模拟试验装置, 采用均匀设计法设置 5 种工况高压注浆试验, 制备 270 组标准圆柱试样, 在富水温度环境下设置 7~90 d 多梯度养护时间, 系统研究注浆结石体抗压强度与渗透特性的演化机制。研究结果表明: (1) 自制改进的三维试验系统可精确模拟 20℃~60℃ 富水环境围岩注浆, 成功构建温度场 - 渗流场 - 应力场多场耦合物理试验平台; (2) 结石体力学性能呈现显著温度阈值响应, 50℃ 富水环境下抗压强度随养护时间呈“峰值 - 衰减 - 稳定”三阶段演化特征, 符合高斯函数分布规律, 当养护时间超过 28 d 后水温因素影响权重超越水灰比与注浆压力; (3) 渗透特性存在双临界转变现象, 50℃ 富水环境渗透性遵循三次多项式变化, 而 60℃ 富水环境下以 28 d 养护时间为转折阈值, 后期渗透性发生异常转变, 由持续降低转为线性增长; (4) 在 60℃ 富水环境下, 抗压强度与渗透性呈现显著负相关特征, 两者变化趋势曲线出现 2 次交叉转折, 揭示了富水温度 - 渗流 - 时间协同作用下结石体内部热损伤累积与微裂隙网络贯通演化的劣化机制。通过突破传统 28 d 养护时间限制, 基于动态富水温度 - 时间阈值获取的结石体性能演化规律, 可为深埋隧道注浆时机优化与围岩长期稳定性控制提供理论依据。

关键词: 隧道工程; 富水温度; 注浆加固; 液 - 热耦合; 时间效应; 力学 - 渗流特性

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2025)12 - 3316 - 17

Characterizing time-temperature coupled effects on mechanical-seepage properties of grouted rock mass in water-rich tunnels

ZHANG Jiyun^{1,2,3}, FANG Zhihao¹, YU Yongqiang^{1,2}, WANG Shuren^{1,2}, FAN Lidan^{1,2}, CAO Yunxing⁴,
ZHANG Xinsheng^{1,4}, JIA Housheng⁵, LI Peitao¹, XU Feng¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 2. International Joint Research Laboratory of Henan Province for Underground Space Development and Disaster Prevention, Jiaozuo, Henan 454003, China;
3. Key Laboratory of Intelligent Construction and Safety Operation and Maintenance of Underground Engineering in Henan Province, Jiaozuo, Henan 454003, China; 4. Henan International Joint Laboratory for Unconventional Energy Geology and Development, Jiaozuo, Henan 454000, China; 5. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

收稿日期: 2025 - 02 - 10; **修回日期:** 2025 - 08 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52208244); 河南省高校基本科研业务费 (NSFRF240324); 河南省高等学校重点科研项目 (25B560006)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52208244) and Fundamental Research Funds for the Universities of Henan Province (Grant No. NSFRF240324) and Key Research Projects of Henan Provincial Universities (Grant No. 25B560006)

作者简介: 张纪云 (1988 -), 男, 2022 年于河南理工大学矿山岩土工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事地下工程灾害防控及注浆加固等方面的研究工作。E-mail: zhangjiyun69@163.com。通讯作者: 余永强 (1972 -), 男, 现任教授。E-mail: yyq@hpu.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2025.0068

Abstract: To elucidate the influence of the coupling effect of a water-rich temperature environment and time on the mechanical properties of the grouted rock mass, we enhanced a self-constructed three-dimensional rock mass grouting simulation test device. Employing a uniform design method, five working conditions were established for conducting high-pressure grouting tests. A total of 270 standard cylindrical samples were prepared, with multi-gradient curing times ranging from 7 to 90 days in water-rich temperature environments, enabling a systematic investigation of the time-dependent evolution of compressive strength and permeability characteristics of the grouted rock mass. The findings demonstrate that the improved three-dimensional test system can accurately simulate the grouting environment of 20 °C to 60 °C surrounding rock. Furthermore, a multi-field coupling physical test platform was successfully constructed, integrating temperature, seepage, and stress fields. The mechanical properties of the grouted rock mass exhibited a pronounced temperature threshold response. Specifically, the compressive strength in a 50 °C water-rich environment displayed a three-stage evolution characterized by peak-attenuation-stability over curing time, aligning with the Gaussian distribution law. After 28 days of curing, the influence of the water temperature factor surpassed that of the water-cement ratio and grouting pressure. Additionally, a double-critical transition phenomenon was noted in the permeability characteristics. The permeability coefficient in the 50 °C water-rich environment adhered to a cubic polynomial trend, while in the 60 °C water-rich environment, the 28-day curing time served as a turning point, resulting in abnormal permeability changes in the later stages, transitioning from continuous reduction to linear growth. Under the 60 °C water-rich conditions, a significant negative correlation was observed between compressive strength and permeability, with the two trend curves exhibiting two cross-turns. This observation revealed the deterioration mechanism linked to thermal damage accumulation and micro-fracture network evolution in the grouted rock mass due to the synergistic effects of water-rich temperature, seepage, and time. By transcending the traditional limitation of a 28-day curing period, the derived evolution law regarding the performance of the grouted rock mass, based on the dynamic water-rich temperature-time threshold, provides a theoretical foundation for optimizing grouting times in deep-buried tunnels and ensuring the long-term stability of surrounding rock.

Key words: tunnelling engineering; water-rich temperature; grouting reinforcement; liquid-thermal coupling; temporal effect; mechanical-seepage characteristics

1 引言

随着国家“交通强国”规划的深入推进,我国隧道工程已实现由规模扩张向质量提升的跨越式发展。在此背景下,工程建设中揭露的富水温度环境岩体越来越多^[1-2]。注浆堵水加固是改善此类复杂环境的关键技术,其核心在于通过浆液固结形成的结石体与原岩协同构建复合承载结构,实现协同调控围岩应力-渗流场的动态平衡^[3-4]。然而,富水温度地层环境与时间长期作用的多场耦合效应显著弱化结石体力学性能,这直接关系到工程的长期稳定性^[5-7]。因此,深入探究富水温度环境下浆岩混合体的力学-渗流特性演化规律,不仅对提升地下工程施工效率具有现实指导价值,更为揭示多场耦合作用下浆岩混合体的长效稳定机制提供理论支撑。

富水温度地层中的岩体具有强富水、高水温、高岩温的特点,地下水是地质灾害的主要诱因。注

浆作为增强裂隙岩体、封堵裂隙水及隔热的关键技术,在此环境下需对注浆材料和注浆方式进行改进和优化^[8]。针对富水地层注浆,学者们聚焦地下水对浆液扩散效果的影响,如,尚宏波和王皓^[9]建立等效裂隙模型,推导注浆压力-扩散距离经验公式。S. C. Li等^[10]通过试验揭示动水下速凝与水泥浆液扩散规律。刘人太等^[11]发现特定动水流速可促进浆液扩散。Y. H. Wang等^[12]强调原始裂隙形态控制浆液最终形态。俞文生等^[13-14]量化了裂隙倾角、流速对注浆效果的影响。B. Ren等^[15]证实动水对顺流浆液的显著冲刷效应。L. Sun等^[16]基于水-力耦合模型阐明细裂隙难注浆机制。Q. S. Liu和L. Sun^[17]通过数值模拟研究了流固耦合下浆液扩散的关键因素。徐博会等^[18]模拟了浆材粒径对堵水效果的影响。研究表明,富水环境是控制浆液扩散与封堵效果的关键因素,这使得富水地层的注浆与无水地层有显著区别。

岩体热害分为干热型和水热型^[19],高地温会显

著改变岩石(或结石体)的特性, 导致其脆性、强度、弹性模量、泊松比、热导率和热膨胀系数等性能与常温环境存在差异^[20-22]。一般来说, 地层温度升高, 围岩的变形破坏规律更加复杂, 基岩和浆岩混合体峰后的脆性特征更加突出, 结石体强度、弹性模量普遍呈下降趋势^[23-25]。X. Ma 等^[20]基于实时高温真三轴试验, 发现低围压下花岗岩强度随温度先增后减。Y. H. Huang 等^[26]指出 300 °C 是预热花岗岩单轴抗压强度的转折点。J. W. Hao 等^[27]揭示砂岩在 150 °C~450 °C 区间孔隙与强度呈非线性变化并在 300 °C 达到峰值, 450 °C 后矿物剧变导致大孔隙发育、性能加剧劣化。刘泉声等^[28-31]系统探究了高温对花岗岩热损伤、断裂特性及微观结构的影响规律。B. Singh 等^[32]发现高应变率下花岗岩强度随温度升高呈非线性变化。由于实际施工中揭露的富水温度地层越来越多, 富水温度环境加速浆岩混合体的劣化, 在上述研究的基础上, 基于高温水浴试验, 唐宇等^[33]发现随着水浴温度从常温升至 92.6 °C, 片麻岩的力学特性表现出渐进弱化规律。D. D. Zhuang 等^[34]基于高温真三轴水力压裂试验, 发现温度升高与注入流量降低的共同作用会导致干热岩断裂韧性劣化, 其机制在于热冲击与平均断裂功率的协同效应。此外, X. Cai 等^[35-37]发现含水率对岩石的破坏临界能量、动态起裂、裂纹扩展速率、扩展韧性和强度^[38]具有显著的弱化作用。

综上, 当前研究在常温动水注浆扩散机制及高温无水岩石力学方面成果丰硕, 但对富水温度环境岩体的注浆加固机制及结石体长期性能演化研究存在不足: 一方面, 现有注浆理论缺乏对高温-渗流-应力多场耦合作用下浆液扩散相变与阻渗机制的系统考量; 另一方面, 对富水温度环境中结石体经历的水-热-力多场耦合时效劣化机制, 尤其是长期

性能衰减规律认知薄弱。随着高黎贡山等深埋隧道建设的推进, 富水温度地层引发的注浆体性能退化已成为工程安全的核心挑战。基于此, 针对上述瓶颈开展研究, 通过改进自制的三维注浆试验系统, 构建考虑地层温度、注浆压力、水灰比等多因素耦合的物理模型; 设计 5 组承压富水温度岩体注浆试验, 对结石体取芯标准化处理; 系统研究地层富水温度、注浆压力、水灰比对注浆效果的影响, 重点阐明富水温度与时间长期耦合对结石体力学性能影响的变化规律。研究成果旨在为富水温度地层岩体注浆加固与围岩稳定控制提供理论依据和实践参考。

2 试验概况

2.1 工程水文地质背景

高黎贡山隧道作为大瑞铁路的关键工程位于云南省保山市境内, 全长 34.5 km, 最大埋深 1 155 m, 平均埋深 800 m。受欧亚板块与印度洋板块碰撞挤压的影响, 隧道穿越 19 条断裂带, 由图 1 可知, 地层岩性复杂, 主要由砂岩、花岗岩、粉质黏土、石灰岩和粗圆砾土等组成, 隧道进、出口段 14 和 20 km 处石灰岩普遍发育, 经现场地质钻孔发现施工区域岩层较为破碎, 岩块粒径大小不一, 符合勘探资料中岩层普遍破碎, 糜棱岩、碎裂岩发育的工况, 为后面设计连续级配粒径的石灰岩块模拟现场地层奠定了基础。同时, 受上述地质构造影响, 隧道通过区域有 4 条大的导热水断层地段, 是引起隧道高温的主要元凶, 周围水热活动强烈, 形成天然温泉多达 122 处, 最高温度达 102 °C, 周围有著名的“腾冲火山群”, 周围的岩体一直在富水温度的环境中长期饱水浸泡, 施工现场量测的水温目前未超

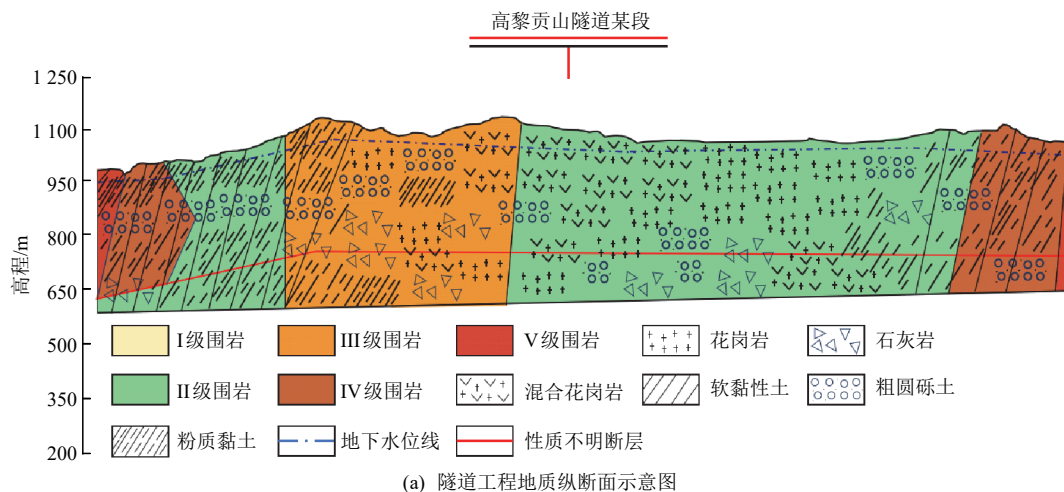




图 1 隧道工程地质纵断面及现场环境图

Fig.1 Tunnel engineering geological longitudinal profile and site environment drawings

过 60 ℃。因其地质条件复杂多样，被业内人士称为“地质博物馆”。

2.2 注浆装置设计及操作简介

本文采用的改进型富水温度地层岩体室内注浆系统主要由试验架、反力架、破碎地层模拟模块、恒温水供给系统和调压注浆系统等核心部分组成，见图 2，3，装置初步的设计说明见参考余永强等^[21]。其中，试验架为整套装置提供主体支撑，便于组装与拆卸；反力架则提供反力，用于在注浆前及注浆过程中压缩破碎地层模拟模块，防止活塞上移，确保实现承压注浆；破碎地层模拟模块由内部抛光处理的高强无缝钢筒(直径 600 mm、高度 700 mm、厚度 10 mm)及内部可移动活塞构成，在反力作用下可实现活塞下移以模拟地层压缩；恒温水供给系统由恒温水浴箱(调温范围：室温至 100 ℃)和磁力泵(扬程 33 m、吸程 12 m)组成；调压注浆系统可在固定流量下实现 0~5 MPa 的压力调节。试验流程主要包括：首先，在钢筒内铺设模拟地层并沿高度方向均匀布置 2 个 PT100 温度传感器以控制孔隙率；装置组装完成后，通过反力架和千斤顶对活塞做功压缩

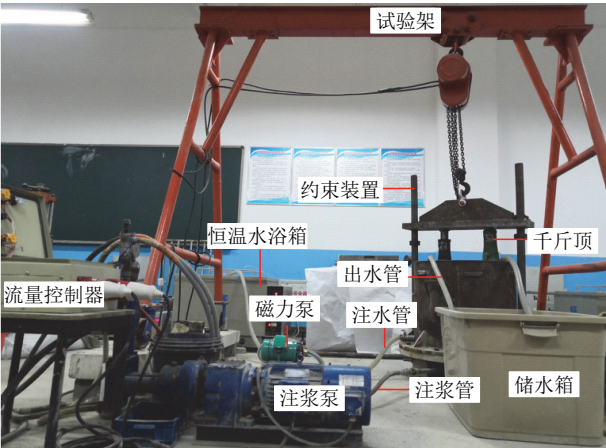


图 2 模拟富水温度环境岩体注浆试验装置

Fig.2 Simulation of water-rich temperature environment rock mass grouting test device

模拟地层至预定孔隙率；随后开启磁力泵进行恒温水循环，待地层温度达到预定值并稳定循环 10 min 后，启动调压注浆系统进行注浆；当地层中的水分被完全驱替出模拟地层后，注浆压力将快速升高，待压力保持时间大于 10 min 后停止注浆，完成承压注浆试验；最后彻底冲洗管路，结束该工况试验。

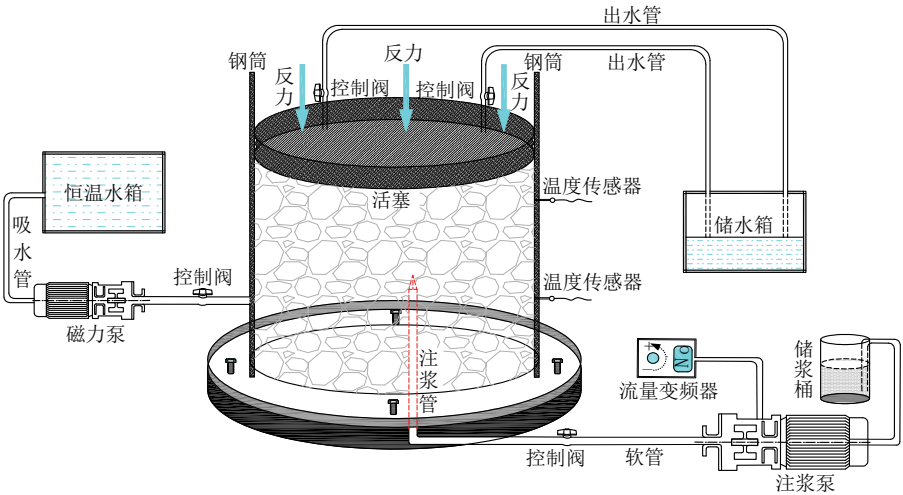


图 3 富水温度作用下破碎岩体注浆试验装置原理

Fig.3 Principle of grouting test device for broken rock mass under the effect of water-rich temperature

3 模拟岩层孔隙率控制与试验方案

3.1 注浆装置准确性验证

3.1.1 富水温度地层破碎岩体压缩变形分析

完整岩石经应力释放变为破碎岩块，体积会发生膨胀，而破碎岩体受外力作用重新压实过程，其体积和孔隙率将逐渐变小，随应力增大孔隙逐渐闭合，直至孔隙率趋于稳定值。破碎岩体的时变残余碎胀系数变化量可诠释这一特性，同时定义岩块装满试验模型未加载前的碎胀系数为 1，其时变残余碎胀系数 K 一般可用下式表示：

$$K=\frac{V_g}{V_c}=\frac{(H-h)s}{Hs}\tag{1}$$

式中： V_c 为岩体压缩前初始体积(m^3)， V_g 为各轴向力作用后岩体的体积(m^3)， s 为设计模型的截面积，(m^2)， H 为模型装载岩体的初始高度(m)， h 为模型内岩体受压后的下降位移(m)。

由图 4 知，在轴向应力分级加载过程，富水温度地层中岩体的孔隙率与时变残余碎胀系数随轴向应力和作用时间的延长均呈逐渐减小趋势，在有限轴向应力加载范围内宏观表现为孔隙率从初始的 0.338 降至 0.328；而时变残余碎胀系数从 1 降至 0.982，原因是岩体在压缩过程中会出现岩块间的棱角摩擦损坏、棱角边缘脱落和大块断破裂等情形，单一粒径岩块由于其棱角、骨架与孔隙分明，总体结构相对松散且连通性好，相互间多以点与点的接触为主，在轴向应力加载初期由于其连接结构抵抗压缩变形能力较差，其对应的孔隙率、压缩变形量

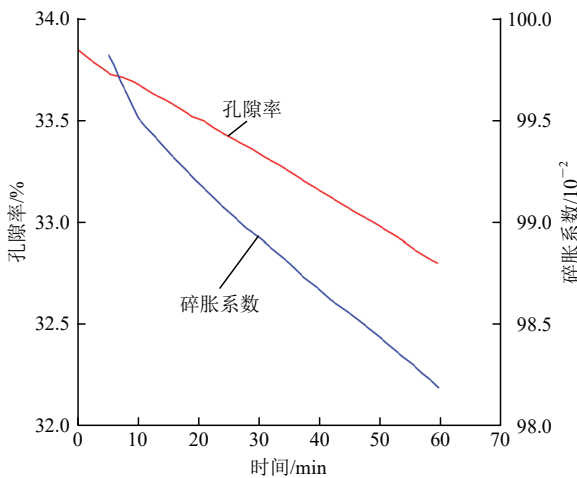


图 4 富水温度破碎岩体孔隙率、碎胀系数的时变特性
Fig.4 Time-dependent characteristics of porosity and bulking factor in broken rock mass under water-rich temperature

和时变残余碎胀系数变化幅度均较大。随轴向应力增大孔隙逐渐闭合，对应的孔隙率、压缩变形量和时变残余碎胀系数变化比较平稳，不会出现前期较大波动的现象。

3.1.2 岩体压缩变形与孔隙率的关系

当岩体重新堆积稳定一段时间后，其孔隙率可看作一定值。对钢筒分层铺设模拟地层岩块后，其孔隙率的误差不能保证在 0.5%以内，在总体积一定的前提下孔隙率的大小直接影响浆液的渗流路径和结石体的体积，为保证试验结果的准确性，通过模拟地层岩块的压缩变形控制孔隙率的大小，使其满足试验要求。一般用下式进行两者关系的描述，后续称为 p - s 公式：

$$p=\frac{s(H-h)-M/\rho}{s(H-h)}\tag{2}$$

式中： M 为模型装载岩体的质量(kg)， ρ 为岩块的密度(kg/m^3)， p 为模型内岩层孔隙率的实时变化值。

将模拟地层铺设完成，此时岩体的高度称为初始高度 H ，用排水法进行孔隙率的测定，即先用水注满上述模拟地层，注水体积与模拟地层的体积比即为此时未加荷载前的初始孔隙率，后用千斤顶、反力架与压力控制器对活塞施加轴向应力，用千分表记录模型内岩体的压缩变形量。每次加载后伴随岩体的压缩变形，将有恒量的水从溢流口排出，以表征孔隙率的变化。各参数测试结果如表 1 所示。

表 1 岩体压缩变形参数统计
Table 1 Statistics of rock mass compression deformation parameters

加载等级	轴向荷载/kN	恒载时间/min	排水量/g	压缩位移/mm
1	5	10	135.3	0.90
2	10	10	228.9	1.78
3	20	10	255.6	1.76
4	30	10	249.5	1.52
5	40	10	261.9	1.38
6	50	10	258.2	1.25
7	60	10	289.7	1.44

由图 5 可知， p - s 公式中孔隙率与岩体压缩位移呈线性关系，对试验数据进行拟合，发现两者关联度较高。在压缩变形量相同时，孔隙率的试验值与理论值之差占理论值的比例均小于 0.1%，只有在轴向应力为 5 kN 时，由于铺设模拟地层岩块的不平整度引起铺设面与活塞不能完全接触，出现试验曲线偏离理论曲线较明显，随加载的不断进行这一现象逐渐消失，说明了自制装置的合理性，能满足要求。

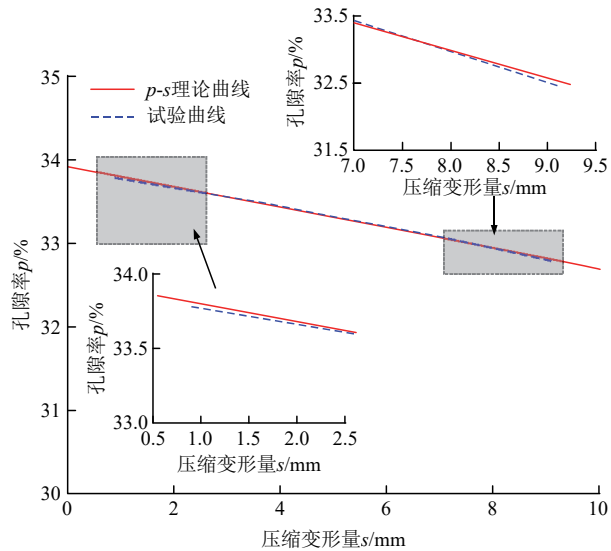


图 5 孔隙率与压缩位移理论值与实际值的关系曲线
Fig.5 Relationship between theoretical and actual values of porosity and compression displacement

3.2 试验方法

3.2.1 试验方案

所用注浆材料的主要成分为普通硅酸盐水泥(PO42.5)、偏高岭土和碱激发剂,按一定比例混合后得到自动研发的水泥基复合注浆材料,研究发现该材料在富水温度地层中注浆时表现出明显优势^[17]。为保证地下工程掘进的安全高效进行,需对节 2.1 中的工程岩体进行注浆,目前高黎贡山隧道周围天然温泉水的温度虽高达上百摄氏度,但目前施工现场出现的水温未超过 60℃,因此,将室内注浆工况设置为 20℃(常温对照),30℃,40℃,50℃和 60℃的富水温度环境,以下简称 20℃~60℃,对不同工况注浆后得到的浆岩混合体取芯,并按照《岩石物理力学性质试验规程》(DZ/T 0276.1—2015)进行标准化处理,然后放置于恒温养护箱中进行全水浸没饱和养护,分析富水温度和养护时间对结石体力学性能的影响,3 种结石体的差异性,如表 2 所示。

表 2 结石体组分差异

Table 2 Differences in stone body composition		
材料类型	核心组分	工程目的
纯水泥浆液	普通硅酸盐水泥+水	裂隙填充
混合浆液	普通硅酸盐水泥+水+偏高岭土+碱激发剂	裂隙填充
浆岩混合体	混合水泥浆液+原岩	研究围岩 - 注浆体协同承载机制

由于均匀设计适合于多因素多水平试验,在保证偏差的基础上可显著减少试验次数,减少工作量,即用相对较少的试验次数得到更有代表性的试验数据,故采用均匀设计法,由表 3 可知,设计的试验方案中各参数纵向分布较均匀,代表性较强,可满足要求。

表 3 注浆试验方案 $U_5(5^3)$
Table 3 Grouting test scheme $U_5(5^3)$

工况编号	注浆压力/MPa	水灰比	水温/℃
1	0.2	0.9 : 1.0	50
2	0.4	1.1 : 1.0	40
3	0.6	0.8 : 1.0	30
4	0.8	1.0 : 1.0	20
5	1.0	1.2 : 1.0	60

注: $U_5(5^3)$ 表示 5 种工况、3 种影响因素。

3.2.2 地层模拟

由节 2.1 可知,施工现场揭露的岩层糜棱岩、碎裂岩发育,总体较为破碎,岩块粒径大小不一。针对室内注浆试验岩石粒径的选择,王 琼等^[39]认为最大颗粒直径不超过模型直径的 1/5,由于后期注浆完成后要对浆岩结石体进行标准尺寸取芯,为避免取芯时出现“试样穿层”现象,试验方案要求最大粒径为 45 mm。为保证粒径级配关系对岩层孔隙率和渗透系数的影响,试验中岩石粒径选择采用连续级配理论,由于实际工程中含充填物的网络裂隙往往是经过多年沉积形成的,室内模拟试验受时间限制,为快速达到类似效果,确定采用泰波理论,且指数取 0.5 时来模拟实现破碎带岩层的连续级配问题,泰波理论公式为

$$P_x = 100\% \sqrt{d / D} \tag{3}$$

式中: P_x 为某粒径, d 为岩块的通过百分率(%), D 为岩块的最大粒径(mm)。

由节 2.1 可知,高黎贡山隧道进、出口段地层岩性复杂,隧道进、出口段 14 和 20 km 处石灰岩普遍发育,主要由砂岩、花岗岩、粉质黏土、石灰岩和粗圆砾土等组成,基于前期勘探结果,对隧道部分区域取芯,获得岩层的单轴抗压强度值为 60~66 MPa。由于试验需要岩石方量较大,现场交通条件恶劣,大规模岩石取样和运输极为困难,因此试验选用焦作地区的灰岩作为替代材料,其热力学参数如表 4 所示,与隧道区灰岩相近,可满足试验需求。在室内构建模拟地层,依据泰波理论,连续级配的粒径区间为 0~45 mm,模拟地层结构分层铺设,每层高度不大于 50 mm,即不大于最大岩块粒径,铺设完成后用水测定岩层的孔隙率,通过试验架进行模拟地层的压缩变形,进而控制孔隙率,尽可能与实际地层接近。连续级配的粒径区间总体划分为 6 个范围,由图 6 知,其中 0~5 mm 的岩块占比为 33%、5~10 mm 的岩块占比为 14%、10~15 mm 的岩块占比为 10%、15~25 mm 的岩块占比为 18%、25~35 mm 的岩块占比为 13%及 35~45 mm 的岩块占比为 12%。

图4 灰岩热力学参数

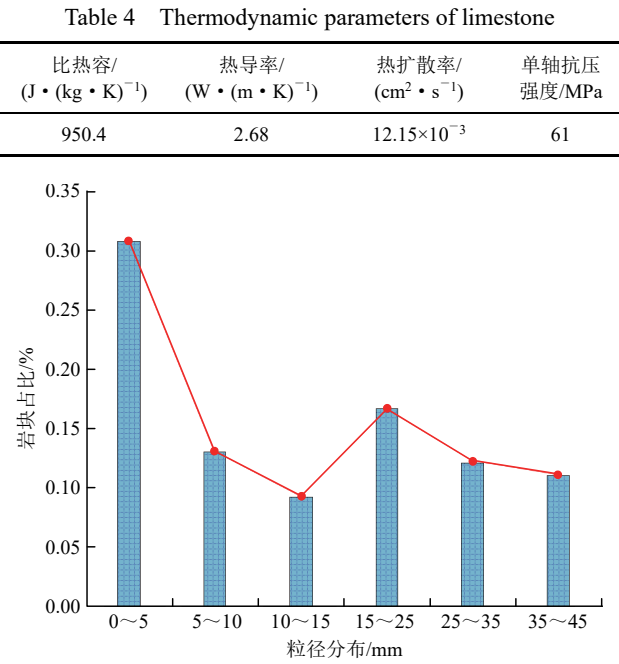
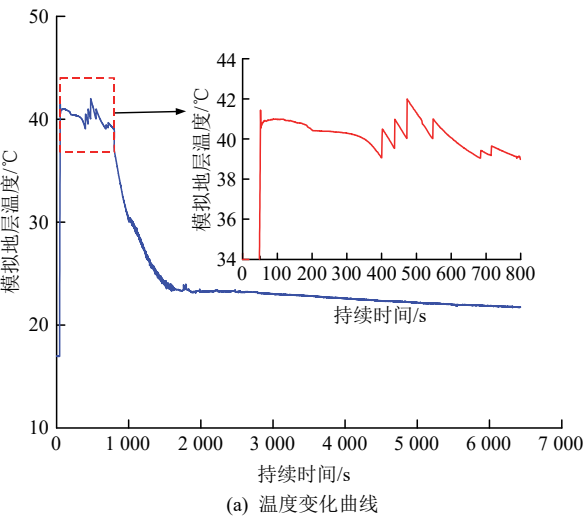


图6 试验用连续粒径岩块分布区间

Fig.6 Continuous particle distribution ranges for experimental rock blocks

3.2.3 试验步骤及监测

模拟地层分层铺设，每层厚度约 50 mm，在铺设高度达到 100 和 300 mm 时，分别安设一个微型孔隙水压力传感器和 PT100 温度传感器，地层孔隙率达到预算值后，开启磁力泵进行模拟地层的升温，具体实验步骤详见参考余永强等^[21]。由图 7 可知，试验过程地层温度可控制在±2 ℃内，保持某个水温 10 min 以上时，认为模拟地层整体达到恒温富水状态，此时开启注浆泵进行注浆。纵观整个注浆过程，开始阶段模拟地层温度快速升高，达到设定温度后通过调节恒温水箱控制模拟地层温度，开启注浆泵



(a) 温度变化曲线

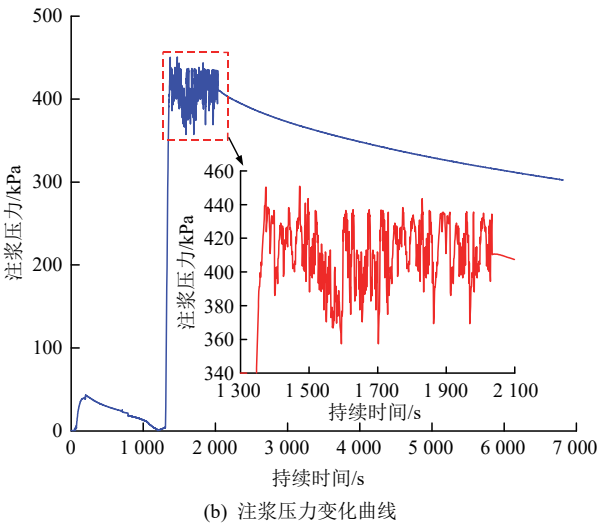


图7 工况二注浆过程多参数实时监测曲线
Fig.7 Multi-parameter real-time monitoring curves of grouting process in case two

后地层温度开始逐渐下降。而注浆压力在初始阶段几乎为 0，持续一段时间溢流阀开始有浆液流出，当地层中的水分全被驱替出模拟地层钢筒后，关闭溢流阀开始保压，此时注浆压力快速升高，达到设定值后压力值在±30 kPa 范围波动，压力保持时间大于 10 min 后停止注浆，随后压力缓慢降低，完成整个高压注浆试验。

3.3 试件制作及试验设备

试样制作和试验设备见图 8，每次注浆试验完成后的浆岩混合体，养护 3 d 脱模，形成直径 600 mm、高度 500 mm 的圆柱状试样；随后进行钻芯取样并精细打磨，最终制得符合《岩石物理力学性质试验规程》(DZ/T 0276.1—2015)的标准试样。每组试验制备 18 个标准试样，其中 15 个用于强度测试 (RMT - 150 岩石力学试验系统)，3 个用于渗透



图8 试样制作和试验设备
Fig.8 Sample preparation and test equipment

率测试(TCQT-III型低渗煤层气相驱替增产装置)。所有标准试样均置于南京环科生产的恒温恒湿养护箱中,在20℃~60℃的温度范围内进行全水浸没饱和养护。重点分析不同饱水温度(20℃~60℃)及不同养护时间(7~90 d)耦合作用下,浆岩混合体的单轴抗压强度与渗透性的演化规律,具体测试方案见图9。

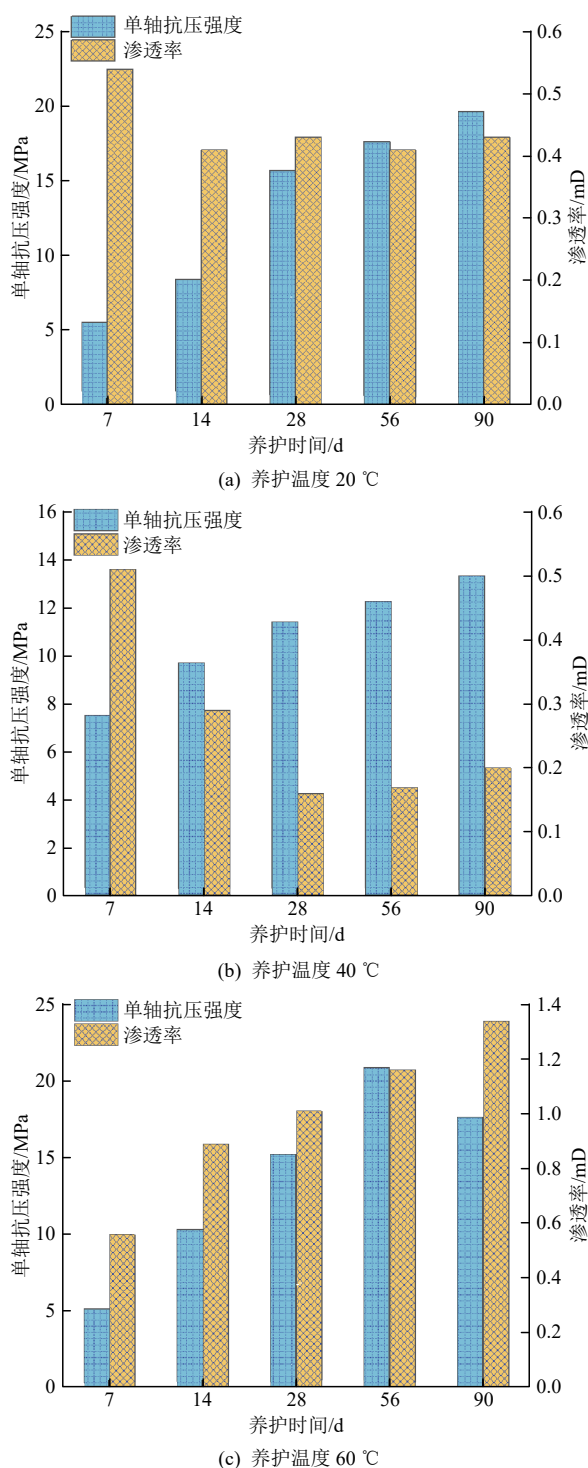


图9 结石体力学-渗流特性测试方案

Fig.9 Mechanical-seepage properties test scheme of stone body

分析图9可知,测试方案通过量化多因素交互效应,明确温度与时间对浆岩混合体抗压强度-渗透性协同演化的规律的调控作用,为构建“温度-时间”效应对结石体力学性能预测模型提供关键支撑。

4 结石体力学特征分析及讨论

4.1 数学模型建立

理论计算浆液的渗流模型是一个非常繁琐的过程,实际中往往想通过简单的计算便能对注浆效果进行良好的预测,结合前面的分析有必要深入整理所得的试验数据,找出注浆压力、水灰比、地层富水温度与结石体强度、渗透性的关系,两者关系式的求解方式一致,在此只对强度经验关系式的求导过程进行阐述。

处理这种试验数据一般选用多元线性回归分析和多元线性逐步回归分析,本次试验因变量为结石体强度 σ ,影响因素有3个自变量分别为注浆压力 $P(x_1)$ 、水灰比 $W/C(x_2)$ 、水温 $T(x_3)$,假设试验共有 n 组数据:

$$\left. \begin{aligned} &(P_{11}, (W/C)_{21}, T_{31}, \sigma_1) \\ &(P_{12}, (W/C)_{22}, T_{32}, \sigma_2) \\ &\vdots \\ &(P_{1n}, (W/C)_{2n}, T_{3n}, \sigma_n) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

则多元线性回归方程可用下式表示:

$$\sigma = a + b_1 P + b_2 (W/C) + b_3 T \quad (5)$$

式中: a 为常数, $b_i (i=1, 2, 3)$ 为试验结果 σ 对自变量 P 、 W/C 和 T 的偏回归系数。根据最小二乘法原理,令多元线性回归方程的残差平方和最小,可求得 a , b_1 , b_2 和 b_3 。

回归得残差平方和 R^2 可用下式表示:

$$R^2 = \sum_{j=1}^3 (\sigma_j - \hat{\sigma}_j)^2 = \sum_{j=1}^3 [V_j - (a + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + b_3 x_{3j})] \quad (6)$$

式中: σ_j 为结石体强度的实测值, $\hat{\sigma}_j$ 为结石体强度的预测值。

将残差平方和分别对 a 和 b_i 求偏导数可得

$$\frac{\partial R^2}{\partial a} = -2 \sum_{j=1}^3 [\sigma_j - (a + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + b_3 x_{3j})] = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial R^2}{\partial b_i} = -2 \sum_{j=1}^3 x_{ij} [\sigma_j - (a + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + b_3 x_{3j})] = 0$$

$$(i=1, 2, 3) \quad (8)$$

结合式(7), (8)可得下方程组:

$$\begin{aligned}
 & 3a + \left(\sum_{j=1}^3 x_{1j} \right) b_1 + \left(\sum_{j=1}^3 x_{2j} \right) b_2 + \left(\sum_{j=1}^3 x_{3j} \right) b_3 = \sum_{j=1}^3 \sigma_j \\
 & a \left(\sum_{j=1}^3 x_{1j} \right) + \left(\sum_{j=1}^3 x_{1j}^2 \right) b_1 + \left(\sum_{j=1}^3 x_{1j} x_{2j} \right) b_2 + \\
 & \left(\sum_{j=1}^3 x_{1j} x_{3j} \right) b_3 = \sum_{j=1}^3 x_{1j} \sigma_j \\
 & a \left(\sum_{j=1}^3 x_{2j} \right) + \left(\sum_{j=1}^3 x_{2j}^2 \right) b_1 + \left(\sum_{j=1}^3 x_{2j} x_{2j} \right) b_2 + \\
 & \left(\sum_{j=1}^3 x_{2j} x_{3j} \right) b_3 = \sum_{j=1}^3 x_{2j} \sigma_j \\
 & a \left(\sum_{j=1}^3 x_{3j} \right) + \left(\sum_{j=1}^3 x_{3j} x_{1j} \right) b_1 + \left(\sum_{j=1}^3 x_{3j} x_{2j} \right) b_2 + \\
 & \left(\sum_{j=1}^3 x_{3j}^2 \right) b_3 = \sum_{j=1}^3 x_{3j} \sigma_j
 \end{aligned} \quad (9)$$

试验中有 3 个自变量, 求解上面方程组, 可得 a , b_1 , b_2 和 b_3 的解。

初步分析试验数据发现, 试验结果与影响因素间并非线性关系, 而是幂函数关系, 因此假设其函数模型为

$$\sigma = \lambda P^\alpha (W/C)^\beta T^\gamma \quad (10)$$

式中: λ , α , β 和 γ 均为常数。

上述模型为非线性模型, 将两边取对数变形得

$$\lg \sigma = \lg \lambda + \alpha \lg P + \beta \lg(W/C) + \gamma \lg T \quad (11)$$

假设 $y = \lg \sigma$, $a = \lg \lambda$, $x_1 = \lg P$, $x_2 = \lg(W/C)$, $x_3 = \lg T$, 则上述模型可转化为线性回归模型:

$$y = a + \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 \quad (12)$$

4.2 地层富水温度对结石体强度影响分析

为增加对比性, 同时量化自主研制注浆材料性能的优越性, 增加同等工况下纯水泥浆液结石体和自主研制浆液结石体(下文称混合浆液)的性能对比, 同时把注浆后得到的结石体称为浆岩混合体。

为统一量化对比标准, 对标准尺寸的纯水泥浆液结石体、混合浆液结石体和浆岩混合体在 20 °C ~ 60 °C 的恒温养护箱中进行全水浸没饱和养护, 养护时间分别为 7, 14, 28, 56 和 90 d, 达到规定养护时间后取 3 个标准试样, 采用 RMT-150B 型岩石力学试验系统进行单轴抗压强度试验, 为减小误差取其平均值进行后续研究。由图 10 可知, 不同环境下 3 种结石体的抗压强度演化规律宏观表现为随养护时间的增加先逐渐增大, 后趋于稳定或下降。其演化规律可通过指数型函数 $\sigma = g - be^{-md}$ (g , b 均为常数; m 为增长率系数; d 为养护时间)来诠释。

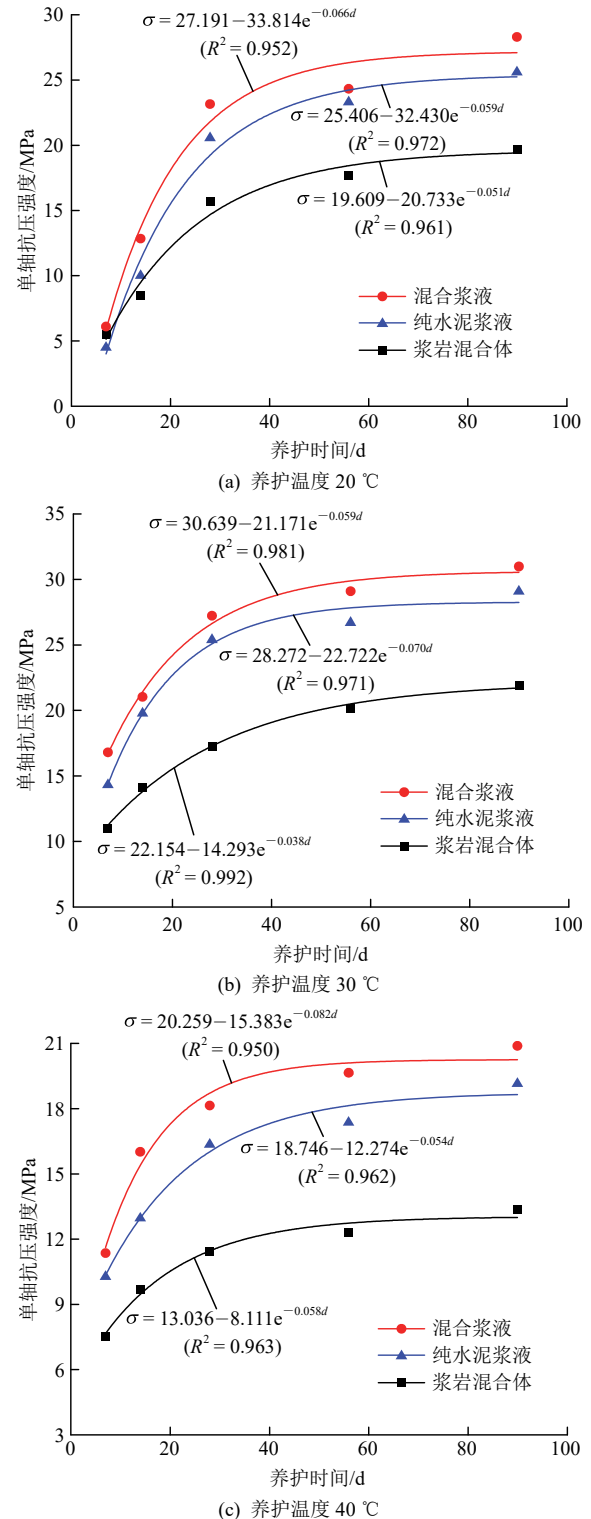


图 10 20 °C ~ 40 °C 富水温度下抗压强度变化规律与养护时间关系

Fig.10 Relationship between compressive strength evolution and curing time in water-rich 20 °C - 40 °C environments

0~28 d 养护初期强度快速增强阶段由 k 值主导, 峰值强度的差异源于 b 值决定的最大提升空间, 而长期稳定阶段由 a 值表征最终强度极限。峰值强度受温度和材料性能影响呈现一定差异, 富水环境小于 40 °C 时, 3 种结石体抗压强度达到峰值后均保持长

期稳定状态。

如图 11 所示, 当周围富水环境为 50 °C 时混合浆液和纯水泥浆液结石体的抗压强度在达到峰值后开始出现下降趋势, 但下降幅度较小, 而浆岩混合体的抗压强度达到峰值后其持久性优于前两者, 这是由于浆液和岩石导热性的差异, 在受外界环境干扰时, 包裹浆液的岩块起到了天然的隔热保护作用。

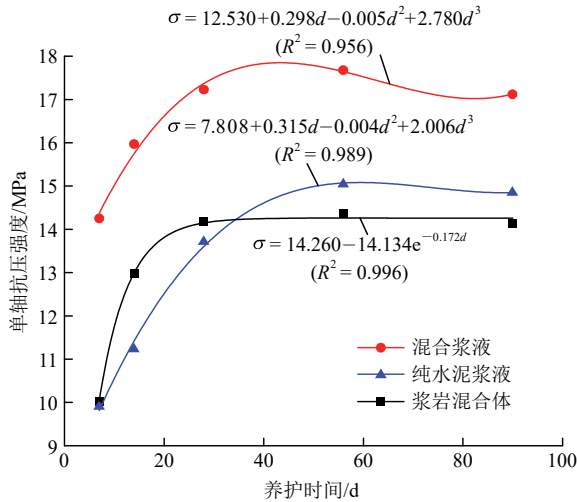


图 11 50 °C 富水温度下抗压强度变化规律与养护时间关系
Fig.11 Relationship between compressive strength evolution and curing time in water-rich 50 °C environments

图 12 为各数据点所代表的结石体, 其抗压强度发展呈先快速增长、短期稳定、后快速下降的规律。由于 60 °C 的富水地层温度显著促进了结石体早期水化反应, 使其前期抗压强度增长速率远高于其他组。在此环境影响下, 强度在达到峰值后逐渐下降, 未能维持长期稳定的趋势。结合前期研究^[22], 在富水温度地层环境下, 结石体抗压强度达到峰值

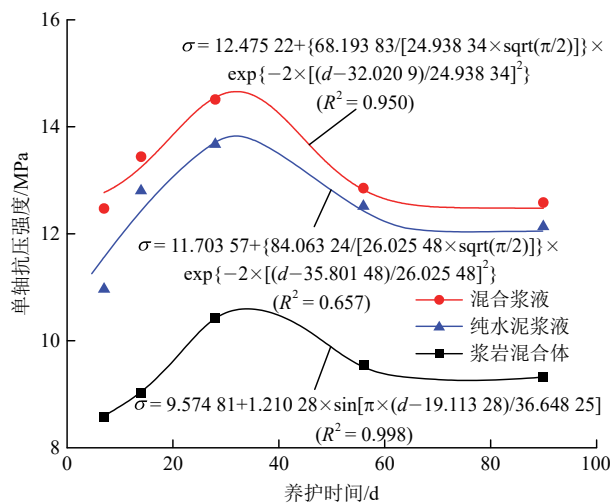


图 12 60 °C 富水温度下抗压强度变化规律与养护时间关系
Fig.12 Relationship between compressive strength evolution and curing time in water-rich 60 °C environments

后能保持稳定的“安全”富水温度区间为 40 °C ~ 50 °C。研究发现富水温度 20 °C ~ 50 °C 试验组处于低于此“安全”区间的温度范围, 因此其抗压强度遵循随养护时间稳定非线性增长的正常模式, 水灰比主要决定了各组结石体最终的强度水平, 并非导致上述根本性发展趋势差异的因素, 地层富水温度和养护时间才是造成 60 °C 组趋势异常的核心原因^[33]。

周围富水环境达到 60 °C 时, 3 种结石体的强度发展一致, 呈现明显的先上升后下降趋势, 且峰值维持时间较短, 说明该环境下结石体的抗压强度性能已不能长期保持稳定, 混合浆液结石体的强度始终高于纯水泥浆液结石体, 可见所研制的混合浆液在周围富水温度岩体低于 50 °C 时有较强的适应性。

由图 13 可知, 富水温度地层环境下, 结石体抗压强度随养护时间的增长, 其发展规律与常规环境下呈现出显著不同。在 28 d 养护时间关键节点下, 所研究的富水温度跨度区间除 60 °C 外, 结石体的抗压强度达到峰值后均未出现倒缩的现象, 这是由于在该富水温度区间水化反应速率加快, 水化产物生成更充分, 内部孔隙结构得到优化, 从而显著提升了结石体的整体密实度和力学性能。而地层富水温度为 60 °C 时, 结石体抗压强度快速达到峰值后逐渐下降, 说明该温度下随养护时间延长结石体内部出现局部热应力裂纹, 由于富水温度没有增加, 其内部损伤并未持续发展, 能保持相对的稳定状态^[33]。这与图 10~12 中所示关于富水温度对不同养护时间下结石体强度发展规律的研究结论高度吻合, 共同验证了富水温度 60 °C 左右是促进结石体在养护 28 d 实现高强度与高稳定性的一个有效温度阈值。

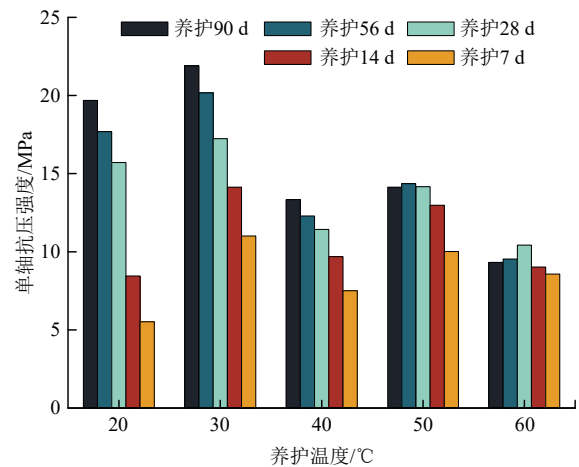


图 13 相同养护时间不同富水温度下抗压强度变化规律
Fig.13 Changing law of compressive strength at different water-rich temperatures with the same curing time

初步分析试验数据发现, 试验结果与影响因素间并非线性关系, 而是多元幂函数关系, 对所得的系列数据进行回归分析, 得到结石体抗压强度与注浆压力、水灰比和地层富水温度的数学表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a &= 0.962P^{0.124}(W/C)^{-1.720}T^{0.628} \\ \sigma_b &= 0.818(W/C)^{-1.782}T^{0.800} \\ \sigma_c &= 0.962(W/C)^{-1.531}T^{0.833} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: σ_a 、 σ_b 和 σ_c 分别为浆岩混合体强度、混合浆液强度和纯水泥浆液强度(MPa); W/C 为水灰比; P 为注浆压力(MPa); T 为模拟地层的富水温度($^{\circ}\text{C}$)。

由式(13)可知, 地层富水温度对结石体强度的影响明显高于注浆压力, 由图 14 知, 地层富水温度对 3 种结石体强度的影响因子系数随养护时间的增加均呈先降低后升高的规律, 具体为时间小于 14 d 时表现为快速下降, 属于影响显著阶段; 时间大于 14 d 后表现为缓慢上升, 属于影响减弱阶段。经对试验数据进行拟合分析发现, 可用分段函数即线性函数和指数函数分别描述影响显著和减弱阶段的变化规律, 预计随养护时间的继续增加影响因子系数会趋于稳定值, 此时表明岩体经注浆后在富水温度环境下其抗压强度性能已处于稳定状态。

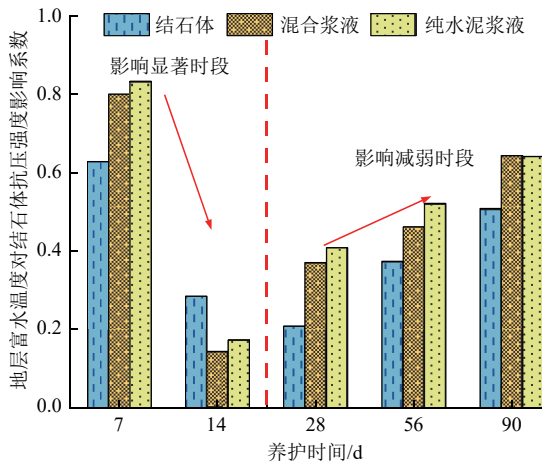


图 14 地层富水温度对抗压强度影响系数与养护时间关系
Fig.14 Influence coefficient of formation water-rich temperature on compressive strength in relation to curing time

图 15 为不同工况、不同养护时间下水灰比对结石体强度影响因子系数大小与养护时间的变化规律, 可知水灰比对 3 种结石体强度的影响因子系数随养护时间延长基本均可用平移指数函数表示, 具体表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \eta_a &= 1.132 + 1.398e^{-0.116d} \quad (R^2 = 0.674) \\ \eta_b &= 0.886 + 4.574e^{-0.233d} \quad (R^2 = 0.925) \\ \eta_c &= 0.726 + 3.010e^{-0.188d} \quad (R^2 = 0.909) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

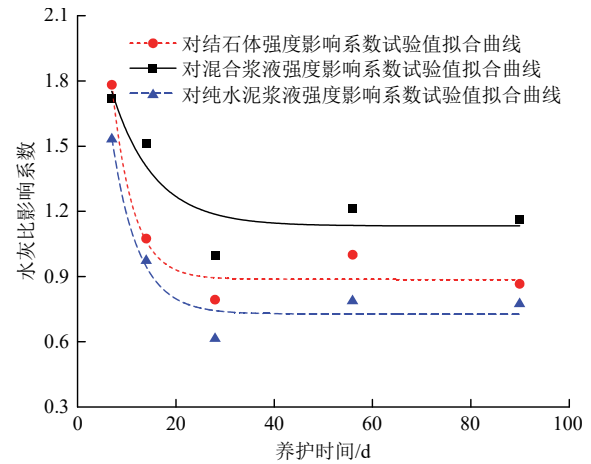


图 15 水灰比对抗压强度影响系数与养护时间关系的影响
Fig.15 Influence of water-cement ratio on relationship between the influence coefficient of compressive strength and the curing age

式中: η_a 、 η_b 和 η_c 分别为水灰比对浆岩混合体强度、混合浆液强度和纯水泥浆液强度随养护时间变化的影响系数。在富水温度地层中, 水灰比对结石体强度的影响主要体现在早期, 该时间节点认为以 28 d 左右较为合理, 大于该养护时间影响系数趋于稳定, 不会出现富水温度对其作用系数先降再升, 最后趋于稳定的现象, 也就是在富水温度环境下结石体养护时间大于 28 d 后, 地层富水温度对强度的影响将占主导作用。

图 16 为不同工况、不同养护时间下, 水灰比与地层富水温度对结石体强度影响因子系数之差与养护时间的变化规律, 由上文分析知, 地层富水温度对结石体强度的影响随养护时间的延长呈现先降后

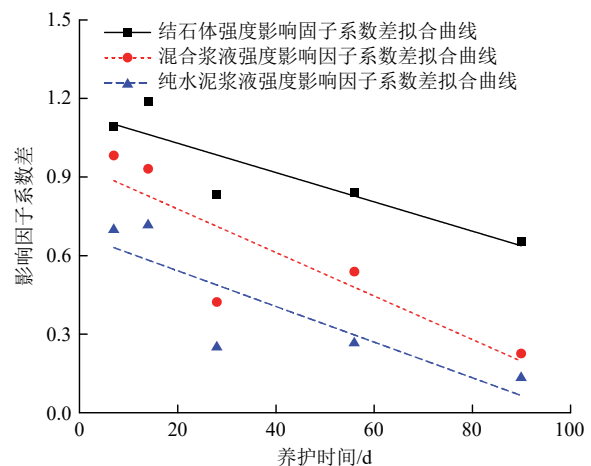


图 16 水灰比与富水温度对抗压强度的影响系数差与养护时间关系的影响

Fig.16 Influence of water-cement ratio on the relationship between the difference in the influence coefficients of and water-rich temperature on compressive strength and the curing age

升, 最后趋于稳定的规律, 而水灰比对其影响表现出先降低后趋于稳定两阶段。由图 16 可知, 水灰比与地层富水温度对 3 种结石体强度的影响因子系数之差随着时间的增加逐渐减小, 可用下式表示其变化规律:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\gamma_a &= 1.141 - 0.0056d \quad (R^2 = 0.721) \\ \Delta\gamma_b &= 0.944 - 0.0083d \quad (R^2 = 0.665) \\ \Delta\gamma_c &= 0.678 - 0.0068d \quad (R^2 = 0.625) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $\Delta\gamma_a$, $\Delta\gamma_b$ 和 $\Delta\gamma_c$ 分别为水灰比与地层富水温度对浆岩混合体强度、混合浆液强度和纯水泥浆液强度随养护时间变化的影响系数之差。在富水温度环境下完成岩体注浆后, 宏观上该区域仍长期处于周围大环境富水温度的笼罩之下, 故研究强度随养护时间的变化是有必要的, 发现若养护时间足够长, 在养护后期结石体强度受地层富水温度的影响将趋近于水灰比, 甚至会超过水灰比的作用。

4.3 地层富水温度对结石体渗透性影响分析

对纯水泥浆液结石体、混合浆液结石体和浆岩混合体的渗透率进行测试时, 每组工况养护环境和时间同节 3.2 所述, 采用河南理工大学自制 TCQT-III 型低渗煤层气相驱替增产装置完成渗透性试验, 为更好地对结果进行量化比较, 所有试样的围压均设置为 1.5 MPa, 达到规定养护时间后取 3 个标准试样进行渗透性试验, 为减小误差取其平均值进行后续研究。由图 17 可知, 不同环境组合下 3 种结石体抗渗性能与养护时间的变化趋势不尽一致, 按模拟地层富水温度从低到高的顺序进行分析, 富水温度为 20 °C 和 30 °C 环境下, 混合浆液和纯水泥浆液结石体的渗透性在达到终凝后保持稳定, 基本呈一条水平线且值的上下波动较小; 富水温度升至 40 °C

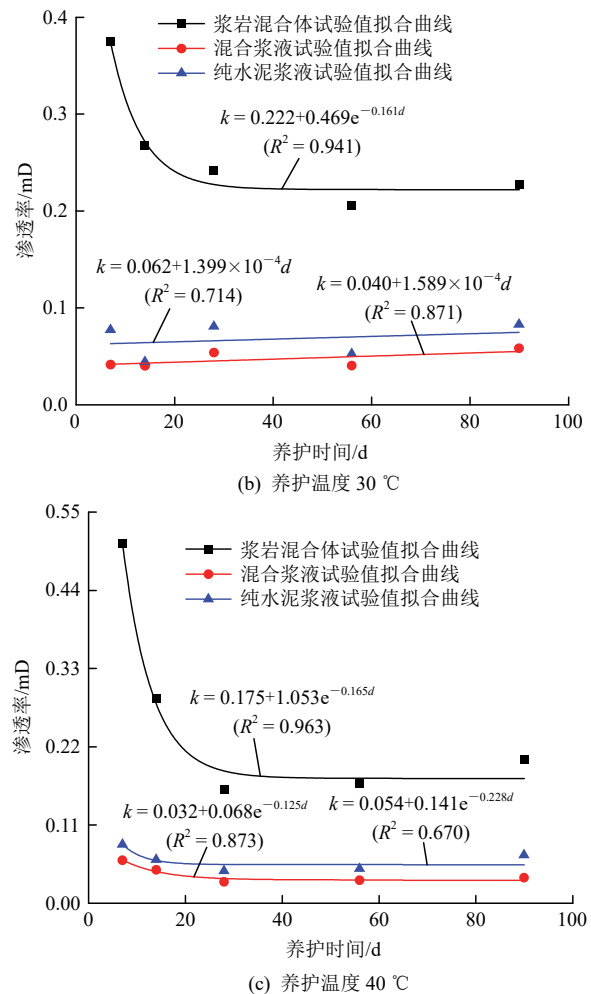
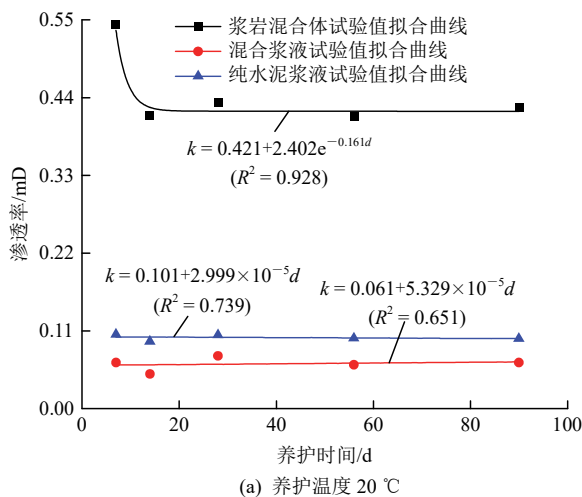


图 17 20 °C~40 °C 富水温度下渗透性与养护时间关系曲线
Fig.17 Relationship curves between permeability evolution and curing time in water-rich 20 °C - 40 °C environments

时其变化趋势可用平移指数函数表示, 主要变化发生在养护的初期阶段, 养护后期其值又恢复富水温度为 20 °C 和 30 °C 环境下的状态。

当富水温度达到 50 °C 和 60 °C 时, 其变化趋势发生明显改变。如图 18(a)所示, 50 °C 富水环境下两者呈线性关系但斜率较小, 即增大趋势不太显著。如图 18(b)所示, 而 60 °C 富水环境下其值变化显著, 尤其是养护时间超过 28 d 时变化更为显著, 用多种函数拟合发现可用二次多项式来描述该发展趋势。针对浆岩混合体渗透率的变化规律, 宏观上表现为当富水温度小于 40 °C 时两者的变化趋势可用指数函数描述; 富水温度为 50 °C 时先降后升最后趋于稳定。这是由于胶凝材料的渗透率随养护时间呈阶段性变化, 初期因水化反应未充分完成, 内部连通孔隙与微裂隙较多, 加之游离水形成渗透通道, 导致渗透率较高; 随着养护进入中期, 持续生成的水化产物 C-S-H 凝胶逐渐填充孔隙并阻断通

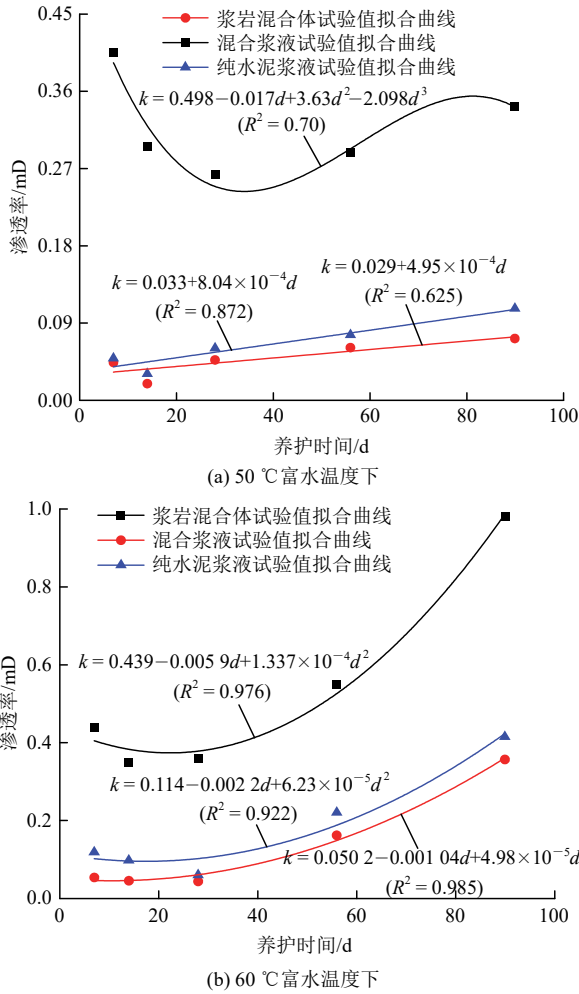


图 18 50 °C 和 60 °C 富水温度下渗透性与养护时间关系曲线
Fig.18 Relationship curves between permeability evolution and curing time in water-rich 50 °C and 60 °C environments

道,同时孔隙结构由开放型向封闭型重构,孔隙率降低且孔径分布优化,最终形成致密结石体骨架,使渗透率显著下降并趋于稳定,可用三次多项式描述两者的关系。模拟地层富水温度为 60 °C 时与混合浆液和纯水泥浆液结石体渗透性变化规律趋于一致。

分析试验数据发现,结石体的渗透性与注浆压力、水灰比和地层富水温度的关系可用多元幂函数表示,下式为养护初期对试验数据进行回归得到的相应数学表达式:

$$\left. \begin{aligned} k_a &= 0.8938 P^{0.0340} (W/C)^{0.7417} T^{-0.2366} \\ k_b &= 0.6292 (W/C)^{1.7178} T^{-0.6067} \\ k_c &= 0.8370 (W/C)^{2.9410} T^{-0.6550} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: k_a , k_b 和 k_c 分别为浆岩混合体渗透率、混合浆液渗透率和纯水泥浆液渗透率(mD)。

分析式(16)发现影响结石体渗透率的最重要因素是水灰比,其次为地层温度,最后为注浆压力且显著小于前两者。图 19 为地层富水温度对渗透性影响系数与养护时间的关系,可知随养护时间的延长地层富水温度对结石体渗透性的影响均呈先降低后上升的趋势,可用三次多项式描述两者间的相互关系,关系式如下:

$$\left. \begin{aligned} \phi_a &= 0.525 - 0.028d + 5.452 \times 10^{-4} d^2 - 2.338 \times 10^{-6} d^3 \\ &\quad (R^2 = 0.998) \\ \phi_b &= 0.631 - 0.016d + 2.816 \times 10^{-4} d^2 - 8.967 \times 10^{-7} d^3 \\ &\quad (R^2 = 0.787) \\ \phi_c &= 0.689 - 0.016d + 3.156 \times 10^{-4} d^2 - 1.521 \times 10^{-6} d^3 \\ &\quad (R^2 = 0.711) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: ϕ_a , ϕ_b 和 ϕ_c 分别为地层富水温度对浆岩混合体渗透性、混合浆液渗透性和纯水泥浆液渗透性随养护时间变化的影响系数。混合浆液和纯水泥浆液结石体渗透性的变化趋势一致性较强,而在养护初期浆岩混合体的渗透性受地层富水温度的影响系数相对较低,后期 3 种结石体的影响系数相当,这是由于岩块与浆液之间力学性能的差异性所致,岩体注浆后局部区域内岩块仍占较高体积,此时浆液处于岩块的包围状态下,基岩对地层富水温度的耐受性延缓了内部浆液结石体损伤劣化速度。

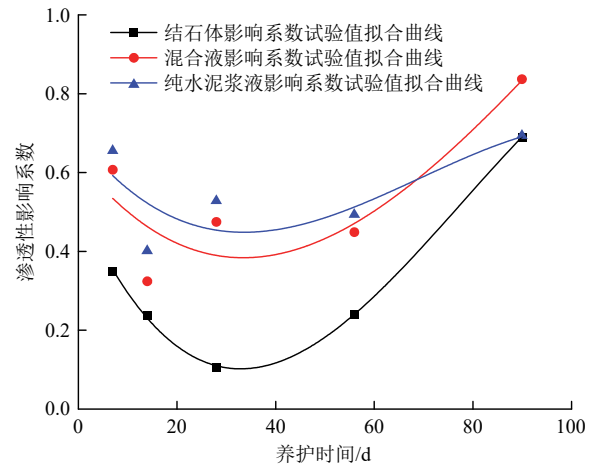


图 19 富水温度对渗透性影响系数与养护时间的关系曲线
Fig.19 Relationship curves between the influence coefficient of water-rich temperatures on permeability and curing time

图 20 包含水灰比对浆岩混合体渗透性影响系数与养护时间的关系、水灰比与地层富水温度对渗透性影响系数之差与养护时间的关系两部分内容,其中水灰比对浆岩混合体渗透性影响系数与养护时间的关系可用下式的平移指数函数表示:

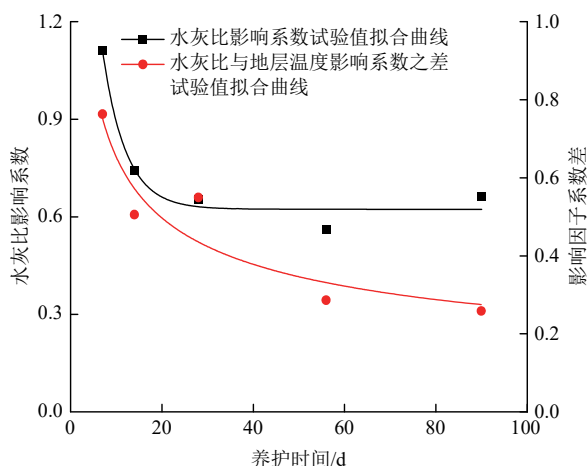


图 20 影响系数差作用下渗透性与养护时间的关系

Fig.20 Relationship between permeability and curing time under effect coefficient differences

$$\eta_a = 0.623 + 1.941e^{-0.197d} \quad (R^2 = 0.936) \quad (18)$$

而水灰比与地层富水温度对渗透性影响系数之差与养护时间的关系可用下式描述:

$$\Delta\gamma_a = 1.624d^{-0.395} \quad (R^2 = 0.884) \quad (19)$$

式中: η_a 为水灰比对浆岩混合体渗透性随养护时间变化的影响系数, $\Delta\gamma_a$ 为水灰比与地层富水温度对浆岩混合体渗透性随养护时间变化的影响系数之差。这意味着在完成注浆后不同环境、不同养护时间下水灰比与地层富水温度对结石体渗透性的影响系数处于波动状态, 水灰比的影响作用在 28 d 后基本趋于稳定, 此后地层富水温度的影响作用凸显, 故两者对结石体渗透性的影响系数差在逐渐降低。由于该影响系数差值在初始阶段的变化率较低, 随着养护时间的延长, 这 2 个因素间相互作用的差值将逐渐趋于稳定。

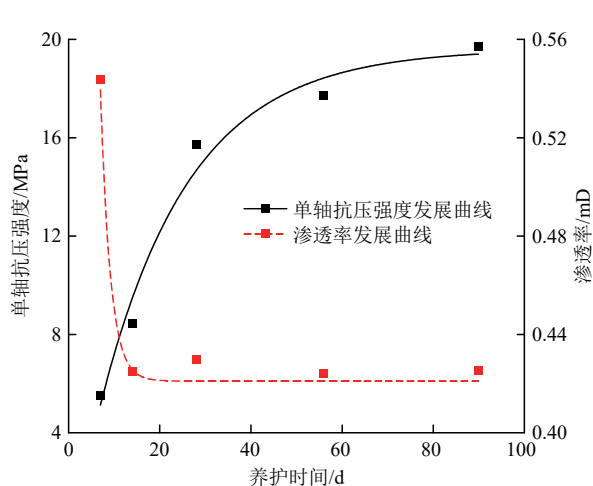
5 基于时间效应的富水温度环境对结石体强度 - 渗透性变化规律分析

岩体的抗压强度是表征其抵抗外力破坏的能力, 而渗透性是反映岩体透水性的核心指标, 受控于孔隙、裂隙数量、规模及连通性。作为岩体性能的 2 个关键指标, 力学性能与渗透性之间存在紧密关联: 较高的抗压强度有助于提升注浆后岩体的耐久性和抗渗能力, 而过大的渗透性则会破坏浆岩混合体的内部结构, 削弱其抗压强度。这种动态平衡具有显著的时间依赖性, 随着时间的推移, 水化反应进程与损伤累积效应将持续重塑二者的相互作用

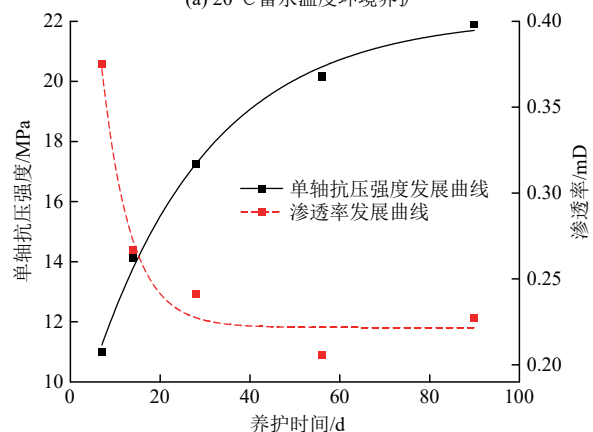
关系。因此, 在岩体的注浆设计和施工中, 需充分考虑浆岩混合体的抗压强度和渗透性的协同平衡, 优选施工参数, 尤为关键的是建立时效演化模型, 以预判不同时间节点的性能演变轨迹, 确保浆岩混合体的性能达到最优状态。

岩体的抗压强度和渗透性不仅直接受富水温度、作用时间等环境因素影响, 更深层次上与水 - 岩相互作用机制密不可分。时间效应表现为双重机制, 短期(<28 d)内, 水化反应主导性能增强; 长期(>28 d)内, 热 - 力耦合引发的时效损伤效应逐渐显现。岩石在水浴加热中存在临界时长, 超过此阈值, 矿物元素的迁移和重组可改善其力学特性。然而, 富水温度在地层环境模拟中扮演着“催化剂”角色: 尽管室内模拟的富水温度环境作用时长短, 但其显著加速了水 - 岩反应进程, 导致强度折减度更高^[34]。这种时间 - 富水温度的等效关系揭示了一个核心机制, 地层富水温度环境实质上是通过加速反应速率, 压缩了材料性能演变的时间尺度, 凸显了富水温度对岩体性能的双刃效应——既可能促进有益水化反应改善性能, 也可能因热损伤引发结构劣化。

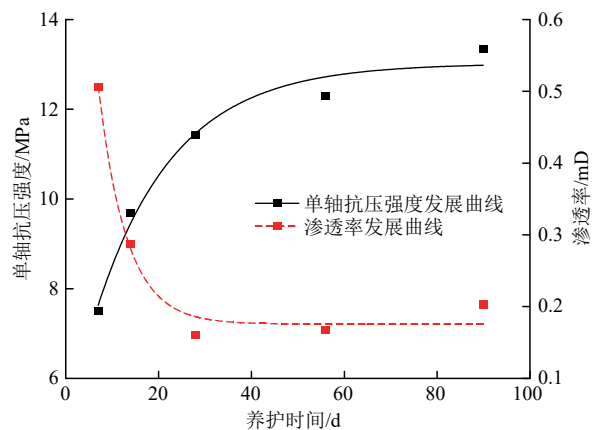
由图 21 可知, 结石体的强度与渗透性变化特征各异, 但二者均显著受控于周围环境的富水温度与养护时间。在富水温度不超过 40 °C 的环境下, 当养护时间达到 28 d 时, 结石体抗压强度达到峰值、渗透系数降至最低, 且后续性能可长期保持稳定, 对应着时效损伤速率与自愈合速率达成动态平衡的稳定平台期。这表明在此富水温度与时间的共同作用下, 浆液固结体水化反应充分完成, 实现了与原岩协同承载的理想工况, 从而提升了混合结构的抗压强度增大、降低了渗透系数, 保障了围岩长期稳定。当富水温度升至 50 °C 时, 演化规律发生转变, 随养护时间延长至 56 和 90 d, 抗压强度开始以较小斜率下降, 渗透系数则逆向上升, 其时间演化符合三阶段损伤模型: 初始强化期 0~28 d、稳定过渡期 28~56 d、加速劣化期 56~90 d。值得注意的是, 富水温度显著改变了性能演化的时间阈值, 当富水温度超过 40 °C 时, 养护时间阈值缩短至 28 d, 继续延长养护时间将加剧结石体内部热损伤, 微裂隙扩展导致力学性能失稳。这源于富水温度与长养护时间的耦合作用改变了结石体内部结构产物, 引发热损伤效应, 细观上形成大量微裂隙, 宏观上表现出力学性能的不稳定性。



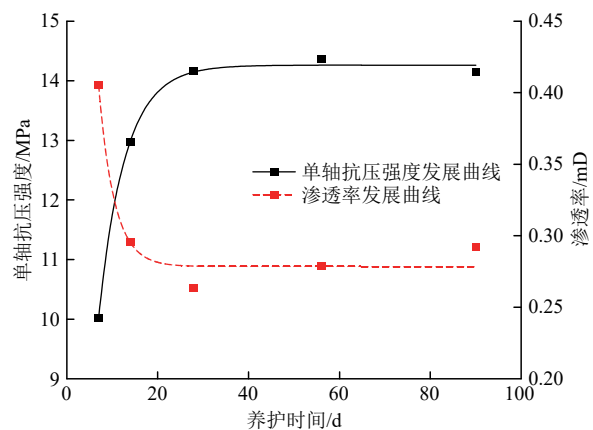
(a) 20 °C 富水温度环境养护



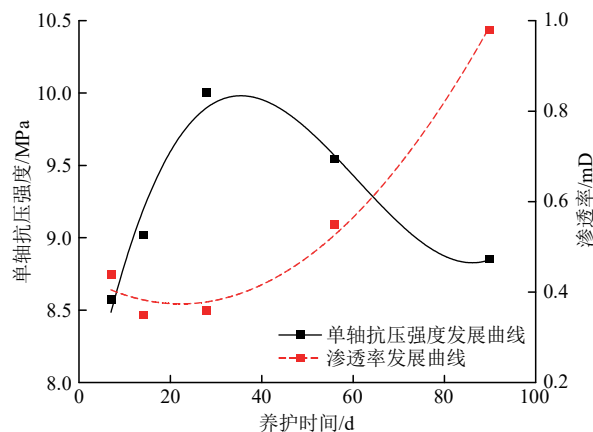
(b) 30 °C 富水温度环境养护



(c) 40 °C 富水温度环境养护



(d) 50 °C 富水温度环境养护



(e) 60 °C 富水温度环境养护

图 21 富水温度下时间效应对结石体强度 - 渗透特性的影响

Fig.21 Influence of time effects on the strength-permeability characteristics of cemented bodies under water-rich temperature

富水温度升高至 60 °C 时, 其影响在常规养护后期更为凸显。在相同养护时间不超过 28 d 时, 结石体性能与其他工况下的变化趋势保持一致。然而, 基于养护时间突破常规 28 d 的规律, 之后随养护时间的延长浆岩混合体的强度与渗透性变化曲线出现 2 次交叉, 呈现显著负相关, 这明确说明该高温工况下结石体内部的热损伤效应进一步加剧, 微裂隙进一步扩展并大量发育, 围岩结构稳定性已不能保持。因此, 抗压强度和渗透特性均能有效表征结石体内部损伤程度。这进一步强调了在富水温度地层中, 富水温度与养护时间是 2 个至关重要的参数, 必须突破常规 28 d 养护时间的思维定式。因为对于存在导水裂隙带的岩层, 注浆后浆岩混合体仍长期处于富水温度环境中, 实验室中延长试样在富水温度下的全浸没饱和和养护时间研究, 对实际工程具有更重要的指导意义。

基于富水温度环境下长期养护与力学性能测试发现, 结石体力学性能发生显著变化的富水温度临界区间为 40 °C ~ 50 °C, 当富水温度超过 40 °C 时, 其养护时间阈值仅为 28 d。时间序列分析进一步揭示, 富水温度环境对结石体性能衰变模式具有显著的阶段性特征, 当富水温度 ≤ 40 °C 时, 力学性能随时间推移呈平缓衰减; 而富水温度 ≥ 50 °C 时, 衰变速率显著加快且呈现非线性加速趋势。因此, 建议常规水泥基材料用于地下工程注浆时, 宜用于地层富水温度不高于 40 °C 的工程环境中。

6 结 论

通过自主研发、改进的模拟富水温度地层破碎

岩体注浆的室内装置,经高压注浆试验揭示了地层富水温度与养护时间耦合作用对注浆结石体力学-渗流特性的影响规律,主要结论如下:

(1) 富水温度地层中,注浆结石体抗压强度演化受富水温度与养护时间协同控制,当富水温度低于40℃时,抗压强度达峰值后可长期稳定;富水温度升至50℃时,抗压强度呈“峰值-衰减-稳定”三阶段特征,符合高斯函数分布规律。养护时间超过28d时,水灰比对抗压强度的影响减小,地层富水温度对抗压强度的影响逐渐增大,甚至超过水灰比和注浆压力。

(2) 富水温度地层中,结石体渗透性变化主要受富水温度和养护时间控制,表现出显著的阈值效应。当富水温度低于40℃时,渗透性随养护时间延长呈指数规律下降,与常规环境变化一致;富水温度升至50℃后,渗透性呈现先降低后升高的趋势,符合三次多项式函数规律;富水温度达到60℃后,渗透性在养护28d内短暂稳定后突破阈值,之后随养护时间延长呈线性增长。其中,28d为渗透性突变的临界养护时间,而水灰比、注浆压力的影响相对次要。

(3) 富水温度与养护时间显著影响结石体力学-渗流特性。突破常规28d养护时间发现,富水温度为50℃时,养护时间为56和90d时抗压强度小斜率下降,渗透系数同步小幅度上升;富水温度达60℃时,抗压强度与渗透系数呈显著负相关,变化曲线随养护时间出现2次交叉,且热损伤加剧导致微裂隙扩展,围岩稳定性丧失。故延长养护时间对揭示富水温度地层中结石体力学性能劣化及工程稳定性评估更具实际指导意义。

随着地下工程施工揭露富水温度地层日益增多,延长试样的养护时间、研究其对应时间的力学性能更贴近实际工况。因此,深入揭示富水温度地层环境与养护时间的耦合作用对浆液结石体力学性能的影响机制,是提升地层注浆后复合结构围岩稳定性评估的关键,也是笔者课题组近期的重要研究方向。

参考文献(References):

- [1] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,2024,49(1):75-99.(HE Manchao, WU Yiyi, GAO Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99.(in Chinese))
- [2] 郭平业,卜墨华,张鹏,等.高地温隧道灾变机制与灾害防控研究进展[J].岩石力学与工程学报,2023,42(7):1561-1581.(GUO Pingye, BU Mohua, ZHANG Peng, et al. Review on catastrophe
- mechanism and disaster countermeasure of high geotemperature tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(7): 1561-1581.(in Chinese))
- [3] 张颖.川藏铁路地下水环境影响关注的重点及对策研究[J].铁道标准设计,2021,65(8):155-158.(ZHANG Ying. Study on the key points and countermeasures of groundwater environmental impact on the Sichuan-Tibet railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(8): 155-158.(in Chinese))
- [4] 何平,张广泽,强新刚.川藏线桑珠岭隧道地下水成因及选线研究[J].铁道工程学报,2020,37(6):10-13.(HE Ping, ZHANG Guangze, QIANG Xingang. Cause analysis of geothermal water and geological route selection research on the Sangzhuling tunnel of Sichuan-Tibet railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(6): 10-13.(in Chinese))
- [5] DUAN Y J. Study of permeation-grouting diffusion mechanism of Bingham fluid based on percolation effect[J]. Building Technology Development, 2016, 43(10): 103-106.
- [6] LAVROV A. Flow of non-Newtonian fluids in single fractures and fracture networks: Current status, challenges and knowledge gaps[J]. Engineering Geology, 2023, 321: 107166.
- [7] 范利丹,孙亮,余永强,等.偏高岭土提高水泥基注浆材料在高地温隧道工程中的适应性[J].材料导报,2022,36(6):105-112.(FAN Lidan, SUN Liang, YU Yongqiang, et al. Metakaolin improves adaptability of cement-based grouting materials used in high geotemperature tunnel engineering[J]. Materials Reports, 2022, 36(6): 105-112.(in Chinese))
- [8] NIU J D, WANG B, FENG C, et al. Experimental research on viscosity characteristics of grouting slurry in a high ground temperature environment[J]. Materials, 2020, 13(14): 3221.
- [9] 尚宏波,王皓.裂隙岩体水平孔注浆浆液扩散规律研究[J].煤炭科学技术,2022,50(7):233-243.(SHANG Hongbo, WANG Hao. Study on diffusion law of grouting slurry in horizontal hole in fractured rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 233-243.(in Chinese))
- [10] LI S C, LIU R T, ZHANG Q S, et al. Protection against water or mud inrush in tunnels by grouting: a review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5): 753-766.
- [11] 刘人太,张连震,张庆松,等.速凝浆液裂隙水注浆扩散数值模拟与试验验证[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):3297-3306.(LIU Rentai, ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of crack grouting process of quick setting slurry with running water and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 3297-3306.(in Chinese))
- [12] WANG Y H, YANG P, LI Z T, et al. Experimental-numerical investigation on grout diffusion and washout in rough rock fractures under flowing water[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 126: 103717.
- [13] 俞文生,李鹏,张霄,等.可变倾角单裂隙水注浆模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(8):2137-2143.(YU Wensheng, LI Peng, ZHANG Xiao, et al. Model test research on hydrodynamic grouting for single fracture with variable inclinations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2137-2143.(in Chinese))
- [14] SUI W H, LIU J Y, HU W, et al. Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with flowing water[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 239-249.
- [15] REN B, MU W Q, JIANG B Y, et al. Grouting mechanism in water-

- bearing fractured rock based on two-phase flow[J]. *Geofluids*, 2021, (7): 1 – 18.
- [16] SUN L, GRASSELLI G, LIU Q S, et al. Coupled hydro-mechanical analysis for grout penetration in fractured rocks using the finite-discrete element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124: 104138.
- [17] LIU Q S, SUN L. Simulation of coupled hydro-mechanical interactions during grouting process in fractured media based on the combined finite-discrete element method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 472 – 486.
- [18] 徐博会, 丁述理, 白峰青. 煤矿特大突水事故注浆堵水过程的数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(10): 1 665 – 1 669.(XU Bohui, DING Shuli, BAI Fengqing. Numerical simulation of grouting for stopping up water in water inrush accident of coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(10): 1 665 – 1 669.(in Chinese))
- [19] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(3): 445 – 468.(XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan—Tibet railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(3): 445 – 468.(in Chinese))
- [20] MA X, WANG G L, HU D W, et al. Mechanical properties of granite under real-time high temperature and three-dimensional stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 136: 104521.
- [21] 余永强, 张纪云, 范利丹, 等. 高温富水环境下裂隙岩体注浆试验装置研制及浆液扩散规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2 582 – 2 592.(YU Yongqiang, ZHANG Jiyun, FAN Lidian, et al. Development of grouting test device for fractured rock and analysis of slurry diffusion law under high-temperature water-rich conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2 582 – 2 592.(in Chinese))
- [22] 张纪云. 裂隙岩体渗流规律与高温富水破碎岩体注浆及充填体力学特性研究[博士学位论文][D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.(ZHANG Jiyun. Research on the seepage characteristic of fractured rocks and the mechanical properties of grouting and fillings of high-temperature water-rich broken rock masses[Ph. D. Thesis][D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2022.(in Chinese))
- [23] 朱俊, 陈敬轩, 张玉姚, 等. 考虑浆液黏度时变性的动水注浆模拟[J]. *浙江工业大学学报*, 2023, 51(2): 180 – 186.(ZHU Jun, CHEN Jingxuan, ZHANG Yuyao, et al. Simulation of hydrodynamic grouting considering time-varying slurry viscosity[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2023, 51(2): 180 – 186.(in Chinese))
- [24] WANG S R, ZHANG J Y, LI C L, et al. Seepage characteristics of fractured rock mass with non-equal width filling under cyclic loading[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2022, 13(6): 101794.
- [25] WANG S R, ZHANG J Y, LI Z C, et al. Seepage behaviour of fractured rock mass infilling using different transfixion rates under cyclic loading[J]. *Geofluids*, 2021, (4): 1 – 15.
- [26] HUANG Y H, YANG S Q, BU Y S. Effect of thermal shock on the strength and fracture behavior of pre-flawed granite specimens under uniaxial compression[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 106: 102474.
- [27] HAO J W, QIAO L, LIU Z Y, et al. Effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of sandstone for thermal energy storage: a comprehensive experimental study[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(9): 3 887 – 3 908.
- [28] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. *岩石力学工程学报*, 2000, 19(4): 408 – 411.(LIU Quansheng, XU Xichang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(4): 408 – 411.(in Chinese))
- [29] 黄彦华, 陶然, 陈笑, 等. 高温后花岗岩断裂特性及热裂纹演化规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(4): 739 – 747.(HUANG Yanhua, TAO Ran, CHEN Xiao, et al. Fracture behavior and thermal cracking evolution law of granite specimens after high-temperature treatment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(4): 739 – 747.(in Chinese))
- [30] DWIVEDI A R, GOEL A R K, PRASAD V V R, et al. Thermomechanical properties of Indian and other granites[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45: 303 – 315.
- [31] 徐小丽, 高峰, 张志镇, 等. 实时高温下加载速率对花岗岩力学特性影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(8): 2 184 – 2 192.(XU Xiaoli, GAO Feng, ZHANG Zhizhen, et al. Experimental study of the effect of loading rates on mechanical properties of granite at real-time high temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2 184 – 2 192.(in Chinese))
- [32] SINGH B, RANJITH P G, CHANDRASEKHARAM D, et al. Thermo mechanical properties of Bundelkhand granite near Jhansi, India[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and GeoResources*, 2015, (1): 35 – 53.
- [33] 唐宇, 阳军生, 郑响凑, 等. 高温富水隧道弱风化片麻岩力学特性试验研究[J]. *岩石力学工程学报*, 2025, 44(1): 128 – 139.(TANG Yu, YANG Junsheng, ZHENG Xiangcou, et al. Experimental study on mechanical properties of weakly weathered gneiss in high temperature water-rich tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025, 44(1): 128 – 139.(in Chinese))
- [34] ZHUANG D D, YIN T B, LI Q, et al. Effect of injection flow rate on fracture toughness during hydraulic fracturing of hot dry rock(HDR)[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 260: 108207.
- [35] CAI X, CHENG C Q, ZHAO Y, et al. The role of water content in rate dependence of tensile strength of a fine-grained sandstone[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, 22(1): 58.
- [36] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 355 – 370.
- [37] TÖRÖK Á, VÁSÁRHELYI B. The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary[J]. *Engineering Geology*, 2010, 115(3/4): 237 – 245.
- [38] HASHIBAK, FUKUI K. Effect of water on the deformation and failure of rock in uniaxial tension[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(5): 1 751 – 1 761.
- [39] 王琼, 郭志飏, 欧阳振华, 等. 碎石粒径对切顶成巷碎石帮承载变形特性的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 100 – 106.(WANG Qiong, GUO Zhibiao, OUYANG Zhenhua, et al. The influence of crushed rock size on bearing-deformation performance of gangue rib of gob-side entry retaining formed by roof fracturing[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2022, 51(1): 100 – 106.(in Chinese))