

高温循环作用下花岗片麻岩的动态力学特性研究

吴存全¹, 薛智¹, 葛林², 李沂衡³, 张明飞³

(1. 保利长大工程有限公司, 广东 广州 510640; 2. 河南省沁伊高速公路有限公司, 河南 洛阳 454000;
3. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015)

摘要: 为探究深部高温环境下隧道围岩的稳定性,以双龙山隧道花岗片麻岩为对象,分析其在高温循环作用后的动态力学特性。采用 SHPB 装置对经受 200°C ~ 800°C 高温循环处理的试样进行冲击试验。结果表明:随温度升高及循环次数增加,岩石质量损失率与体积膨胀率显著上升,动抗压强度下降,破坏模式由脆性向延性转变;XRD 分析显示,高温引发矿物相变,加剧微裂纹扩展。岩石破碎程度随温度升高而加剧,平均粒径减小,分形维数增大,表明内部损伤不断累积。研究结果揭示了高温循环对岩石宏观与微观结构的双重影响机制,为深部高温环境下隧道及岩体工程稳定性评估与设计优化提供了理论支持。

关键词: 高温循环;花岗片麻岩;动态力学特性;分离式霍普金森压杆(SHPB)

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0162-08

Dynamic Mechanical Properties of Granitic Gneiss Under High-temperature Cycling

WU Cunquan¹, XUE Zhi¹, GE Lin², LI Yiheng³, ZHANG Mingfei³

(1. Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. Qin Yi Expressway Co., Ltd., Luoyang, Henan 454000, China;

3. Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou, Henan 450015, China)

Abstract: To investigate the stability of tunnel surrounding rock in deep high-temperature environments, this work examines the dynamic mechanical properties of granitic gneiss from the Shuanglongshan Tunnel after high-temperature cycling. Impact tests were conducted using a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) apparatus on specimens subjected to cyclic heating at temperatures ranging from 200°C ~ 800°C. The results indicate that with increasing temperature and number of cycles, the mass loss rate and volume expansion rate of the rock increase significantly, while the dynamic compressive strength decreases, and the failure mode transitions from brittle to ductile. Analysis reveals that high temperatures induce mineral phase transformation, accelerating the propagation of microcracks. Moreover, the degree of rock fragmentation intensifies with rising temperature, characterized by a reduction in average particle size and an increase in fractal dimension, indicating continuous accumulation of internal damage. This work elucidates the dual influence mechanism of high-temperature cycling on both the macroscopic and microscopic structure of rocks, providing theoretical support for stability assessment and design optimization of tunnels and rock mass engineering in deep high-temperature environments.

Keywords: high temperature cycling; granitic gneiss; dynamic mechanical properties; Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)

岩石材料在隧道工程和深部资源开采中,特别是在应对极端加载条件如爆破、岩爆及地震波传播

等情况下,其动态力学行为研究变得至关重要。高地温环境不仅会显著影响围岩的物理和力学性质,

还可能导致结构的劣化和不稳定。特别是在隧道工程中,围岩长期暴露于高温环境中,其动态力学特性直接关系到工程的安全性和稳定性。因此,深入研究高温循环作用下岩石材料的动态力学性能,对于优化设计、提升工程安全性具有重要意义^[1-5]。

近年来,国内外学者围绕高温对岩石物理力学性能的影响开展了大量试验研究。平琦等^[6]通过对经历常温至 1000℃ 高温循环作用后的砂岩试件进行冲击压缩试验,发现试件质量、密度及纵波波速等参数与循环作用次数呈二次函数降低关系,并指出抗压强度和动应变在 400℃ 前后表现出不同的变化趋势。Rong 等^[7]通过在 600℃ 下对花岗岩进行循环测试,机械降解主要发生在最初的五个热循环中,尤其是在第一个循环期间,之后性能变化趋于稳定。刘石等^[8]对 25℃~1000℃ 温度后的大理岩进行了不同加载速率的冲击压缩试验,并观察到每个冲击循环的最大应变、平均应变率和损伤值逐渐增加,同时得出动态裂纹萌生应力阈值。Zhang 等^[9]利用热激砂岩的分离式霍普金森压力棒(SHPB)测试建立热循环频率与关键参数(如纵波速度、干密度、动态峰值应力、弹性模量和平均碎片大小)之间的负相关关系。然而,尽管这些研究提供了宝贵的见解,但针对花岗片麻岩这种典型的非均质变质岩,在高温循环作用下的动态力学特性及其损伤演化机制的研究仍然较少,特别是缺乏结合实际工程应用(如隧道工程)的相关研究^[10]。

鉴于此,本研究以隧道工程中的花岗片麻岩为研究对象,利用 XRD 分析成分变化,通过高温循环试验与动态力学测试相结合的方法,系统研究温度循环对岩石物理力学性能及劣化机制的影响。研究揭示了高温循环下岩石宏观力学性能与微观结构变化的关联性,特别是在 400℃ 附近的关键阈值现象,为深部工程围岩的动态稳定性评估提供理论依据。

1 试样制备与加工

1.1 试样来源与选取

花岗片麻岩作为一种典型的区域变质岩,广泛分布于造山带及深部工程围岩中^[11]。本研究选取的岩样取自沁阳至伊川高速公路双龙山隧道施工现场,该隧道穿越高应力变质岩地层,其围岩稳定性直接影响工程安全^[12-14],试件取样如图 1 所示。受试验设备(霍普金森夹具)限制,试样加工为直径 16 mm、高 8.5 mm 的圆柱体(图 1(b))。沿垂直于层理方向进行取芯,经切割和打磨抛光,控制试件两端

面不平整度小于 ± 0.05 mm,端面垂直于试件轴线的误差小于 $\pm 0.25^\circ$,经目视检查,花岗岩样品具有均匀的纹理,没有可见的缺陷。经测量,试样密度为 2.527 g/cm³。

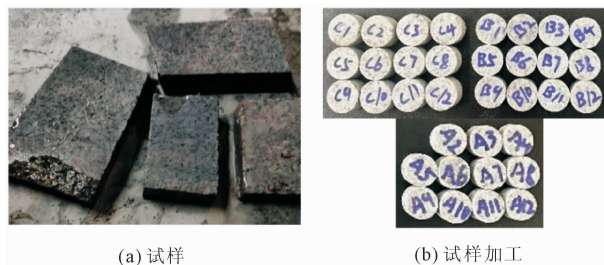


图 1 试样样本

1.2 高温循环处理及其对材料相结构的影响

高温循环处理过程中,试样被置于箱式电阻炉内,以 15℃/min 的升温速率分别加热至 200℃、400℃、600℃ 和 800℃,并在目标温度下恒温保持 2 h 以确保受热均匀。每个温度循环结束后,试样随炉冷却至室温,随后重复上述过程直至完成 10 次循环。试验过程中发现,在 25℃~800℃ 的煅烧后,试样颜色由青灰色逐渐转变为白黄色。特别在 600℃ 单次煅烧后,试样表面开始出现白色物质析出现象,如图 2 所示,经初步分析可能为 CaO 与 SiO₂ 的氧化产物^[15]。当温度升至 800℃ 并完成 2 次循环后,试样表面出现肉眼可观察到的微裂缝,说明高温循环作用使试件的物理性质发生变化。

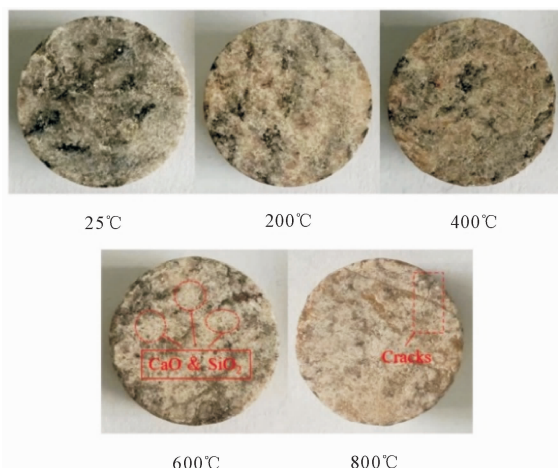


图 2 常温及高温循环 10 次后表现试样

为了进一步探究高温循环处理对材料微观结构的影响,进行了 X 射线衍射(XRD)分析,结果如图 3 所示。常温(25℃)试样主要呈现 SiO₂ (PDF#29-0085, ICDD-JCPDS 数据库,下同。)和 Fe₂O₃ (PDF#

23-39-1346)的特征衍射峰,而经 800℃ 循环处理后,试样中新生成了 $\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$ (PDF #41-1372)、 CaFe_4O_7 (PDF#39-1033) 及单质 Ca (PDF#23-0430) 等矿物相。这种矿物相变现象与前述力学性能退化具有直接关联^[16]:一方面,新生成的钙铁硅酸盐相(如 $\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$) 具有较低的结构稳定性;另一方面,单质 Ca 的出现证实了高温环境下矿物分解反应的发生。这些微观尺度的化学变化从本质上解释了宏观力学性能的劣化机制^[17]。

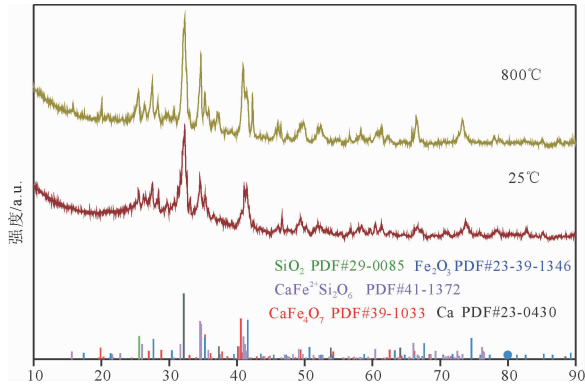


图 3 XRD 结果分析

1.3 高温循环作用下基本物理性质变化

在高温循环作用下,岩石的物理性质会发生显著变化,其中质量损失率是反映岩石在经历热循环后内部结构劣化程度的重要指标之一^[18]。图 4 展示了不同温度(200℃ 和 800℃) 以及不同循环次数(2 次至 10 次) 条件下,样品的质量损失率变化趋势及拟合结果。由图 4 可见,随着循环次数的增加,质量变化呈现出一定的规律性:在 200℃ 条件下,样品质量略有增加,而在 400℃ 及以上温度条件下,质量则呈现持续下降趋势。

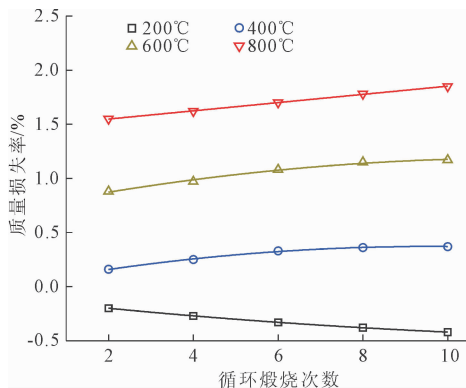


图 4 质量损失率随循环次数变化趋势图

在 200℃ 加热-冷却循环过程中,质量轻微增

加,最高增大 0.42%,可能源于空气中水分被岩石微孔吸附所致^[19]。由于该温度尚未达到大多数矿物脱水反应的临界点,岩石内部结构尚未发生明显损伤,反而可能因环境湿度影响而吸收微量水分,从而导致质量上升。此外,样品表面或裂隙中的可溶性物质在反复温差作用下可能发生迁移并沉积于孔隙中,也可能对质量变化产生一定影响^[20]。

而在 400℃ 及以上条件下,随着循环次数的增加,质量损失率逐渐增大,表明岩石中的云母类矿物开始发生明显的脱水反应,晶体结构遭到破坏^[21]。同时,热应力在反复加热-冷却过程中不断积累,促进了矿物脱水、挥发性物质逸出等反应的发生,进一步加剧了质量的损失^[22]。尤其在 800℃ 条件下最为显著,经过十次循环后,质量损失率为 1.85%,800℃ 煅烧后出现宏观微裂缝,如图 2 所示,说明高温内部微裂纹逐渐萌生与扩展,从而导致样品质量持续下降。

花岗岩试样的质量损失率与热循环次数之间存在显著的数学相关性,可通过式(1)二次多项式进行定量描述:

$$A = a_1x^2 + b_1x + c_1 \quad (1)$$

式中: A 为质量损失率; x 为循环次数; a_1 、 b_1 、 c_1 为拟合相关参数,拟合参数详见表 1。

表 1 试样质量损失率与热循环次数拟合曲线参数取值

$T/^\circ\text{C}$	a_1	b_1	c_1	R^2
200	0.00001	-0.00043	-0.00120	1.00000
400	-0.00003	0.00072	0.00030	0.99745
600	-0.00003	0.00077	0.00732	0.99132
800	-0.00001	0.00038	0.01472	0.99990

在高温循环作用下,岩石不仅表现出质量的损失,其体积也随着热循环次数的增加发生显著变化。试样的体积通过测量其尺寸计算得到。使用精度为 0.01 mm 的电子数显游标卡尺,在每个试样的上、中、下三个部位分别测量其直径与高度,各尺寸均测量 3 次并取算术平均值,再按圆柱体公式计算体积。图 5 展示了不同温度(200℃~800℃) 和不同循环次数条件下,样品的体积膨胀率变化趋势及拟合结果。

在 200℃ 条件下,体积变化较小,变化范围 0.05%~0.18%,说明低温对岩石内部结构影响有限。而在 400℃ 及以上温度,体积膨胀趋势明显增强,尤其在 600℃ (变化范围 2.7%~3.2%) 和 800℃ (变化范围 3.7%~4.6%) 更为显著。这主要由于高温促使云母类矿物发生脱水反应,晶体结构破坏,

引发微裂纹的产生与扩展。同时,不同矿物热膨胀差异加剧了内部应力积累,进一步推动微观损伤的发展。随着循环次数增加,这些微裂纹逐渐连通,孔隙空间扩大,导致体积发生宏观膨胀。高温下体积膨胀的非线性增强趋势表明,岩石损伤过程并非均匀进行,后期膨胀速率有所减缓,可能与孔隙增多导致热应力传递效率下降有关^[23]。

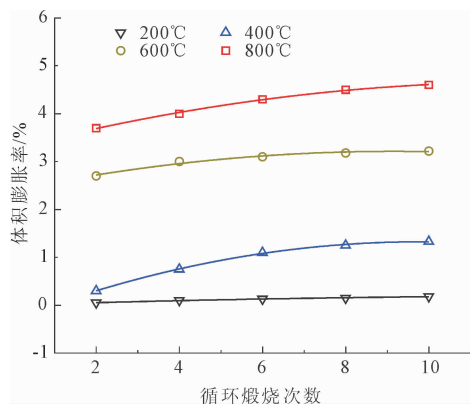


图5 体积膨胀率随循环次数变化趋势图

花岗岩试样的体积膨胀率与热循环次数之间存在显著的数学相关性,可通过式(2)二次多项式进行定量描述:

$$B = a_2x^2 + b_2x + c_2 \quad (2)$$

式中: B 为体积膨胀率; x 为循环次数; a_2 、 b_2 、 c_2 为拟合相关参数,拟合参数详见表2。

表2 试样体积膨胀率与热循环次数拟合曲线参数取值

$T/^\circ\text{C}$	a_2	b_2	c_2	R^2
200	-0.00001	2.62143	0.00004	0.99075
400	-0.00017	0.00329	-0.00292	0.99882
600	-0.00010	0.00177	0.02404	0.98188
800	-0.00009	0.00222	0.03280	0.99791

不同温度(200°C~800°C)和不同循环次数条件下试样密度减少率变化趋势及拟合结果如图6所示。

在200°C处理条件下,密度的轻微上升,最大不超过0.24%,主要源于质量增加幅度大于体积膨胀的影响。由于该温度尚未引发矿物脱水或结构损伤等明显物理化学变化,反而可能因微孔吸附水分而导致质量微幅上升,从而在体积变化较小的前提下表现为密度的局部增大。

而在400°C及以上温度,随着热循环次数的增加,密度逐渐降低,其下降速率在600°C(密度下降4.3%)和800°C(密度下降6.16%)尤为明显。这一现象与质量损失和体积膨胀的变化密切相关:一方

面,云母类矿物发生脱水反应,导致质量持续下降;另一方面,热应力诱发的微裂纹扩展使体积不断增大。二者共同作用,使得密度呈现出持续下降的趋势^[24]。

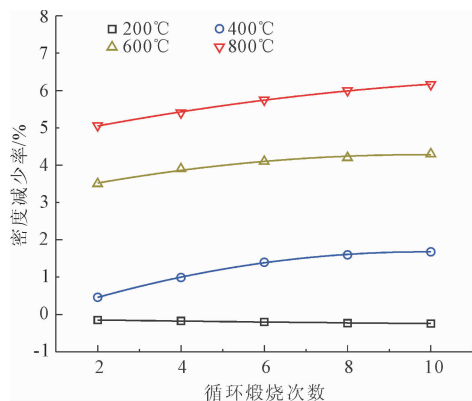


图6 密度减少率随循环次数变化趋势图

花岗岩试样的密度减少率与热循环次数之间存在显著的数学相关性,可通过式(3)二次多项式进行定量描述:

$$C = a_3x^2 + b_3x + c_3 \quad (3)$$

式中: C 为密度减少率; x 为循环次数; a_3 、 b_3 、 c_3 为拟合相关参数,拟合参数详见表3。

表3 试样密度减少率与热循环次数拟合曲线参数取值

$T/^\circ\text{C}$	a_3	b_3	c_3	R^2
200	0.00001	-0.00016	-0.00116	0.98445
400	-0.00020	0.00390	-0.00244	0.99955
600	-0.00013	0.00245	0.03080	0.99000
800	-0.00008	0.00239	0.04606	0.99849

2 动态力学特性

2.1 SHPB 冲击试验

本研究采用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置对高温循环作用后的花岗岩麻岩试件进行动态力学性能测试,试验装置示意图如图7所示。该装置主要由高压气腔、圆柱形冲头、入射杆、透射杆、吸收杆、应变片及数据采集系统组成^[25]。其中,冲头、入射杆、透射杆与吸收杆均采用高强度合金钢制成,杆体直径为19 mm,密度为7.85 g/cm³,弹性模量为210 GPa。入射杆与透射杆长度均为2 m,杆端面经精密抛光以确保应力波传递的准确性。试验采用0.5 MPa的冲击气压驱动冲头,由于杆径较小,应力传播本身较为均匀,加入紫铜整形片可能导致波形过度衰减,反而干扰应力平衡。因此,本试验未采用整形片,以保持原始波形特征。

基于一维弹性应力波理论及均匀性假设,采用三波法计算试件的动态力学参数。入射杆与透射杆上布置的应变片分别记录入射波 $\epsilon_i(t)$ 、反射波 $\epsilon_r(t)$ 及透射波 $\epsilon_t(t)$, 试件的动态应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 及应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 可通过以下公式计算^[26-27]:

$$\sigma(t) = \frac{EA}{2A_0} \cdot [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] \quad (4)$$

$$\epsilon(t) = \frac{2C_0}{L_s} \int_0^t [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] dt \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C_0}{L_s} [\dot{\epsilon}_i(t) - \dot{\epsilon}_r(t) - \dot{\epsilon}_t(t)] \quad (6)$$

式中: σ 是试样中的平均应力; ϵ 是试样的平均应变; $\dot{\epsilon}$ 是试样的平均应变率; E 是压力杆材料的弹性模量; C_0 是压力杆中纵波的速度, $C_0 = \sqrt{E/\rho}$; ρ 是密度; A 是压杆横截面积; A_0 是原始横截面积; L_s 是试样的长度。

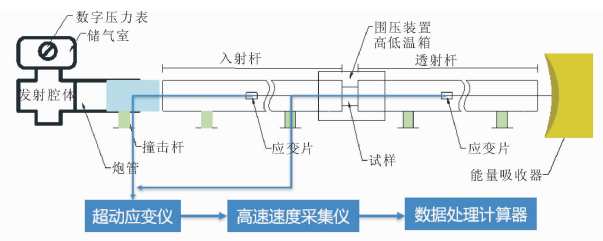


图7 SHPB试验装置图

2.2 结果分析

图8展示了不同温度循环条件下花岗片麻岩试样的动态应力-应变曲线,并叠加了各阶段的趋势线以揭示其变形特征。

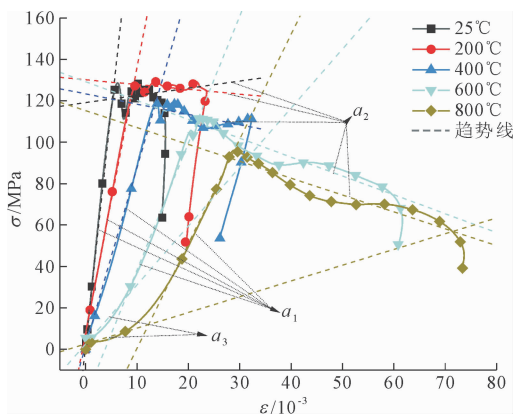


图8 不同温度循环条件下花岗片麻岩试样的动态应力-应变曲线

结合表4中不同温度下各阶段的斜率(k)、截距(b)及决定系数(R^2)可以看出:25℃、200℃和400℃条件下,试样在达到峰值应力后出现小幅波动

并迅速下降,表现出典型的脆性破坏特征,这种波动可能与微裂纹扩展过程中的能量释放有关^[28];而600℃和800℃条件下的曲线在峰值后则呈现平缓下降趋势,未见明显波动,表明高温作用使材料逐渐由脆性向延性转变。值得注意的是,在 a_2 (屈服阶段),尽管拟合曲线的 R^2 值较低,但这些趋势线依然为理解材料行为提供了有力参考。

表4 不同温度下应力-应变曲线阶段特征参数值

温度 $T/^\circ\text{C}$	阶段	斜率 k	截距 b	R^2
25	a_1	22683.3	2.3	0.998
	a_2	384.5	119.1	0.038
200	a_1	12821.9	7.8	1.000
	a_2	-230.9	130.1	0.096
400	a_1	8598.9	1.7	0.999
	a_2	-495.1	123.3	0.433
	a_3	6134.4	-23.1	0.993
600	a_2	-910.3	129.2	0.915
	a_3	2847.2	2.6	0.967
	a_1	5057.3	-50.2	0.996
800	a_2	-894.3	118.4	0.912
	a_3	760.5	2.6	0.889

注: a_1 为线性弹性阶段(直线上升阶段); a_2 为屈服阶段; a_3 为非线性弹性阶段(缓慢上升阶段)。

随着循环温度升高,试样的动态力学性能显著退化。具体表现为:峰值应力从25℃时的130 MPa降至800℃时的94 MPa,降幅达27.7%。同时,上升段斜率(即弹性模量)随温度升高逐渐减小,例如,25℃时的斜率为22 683.3,而在800℃时降至5 057.3,表明材料刚度随温度升高而降低。这一变化与高温诱导的矿物相变和微裂纹网络发育密切相关^[29],例如石英在573℃发生相变导致体积膨胀,长石类矿物熔融进一步削弱颗粒间胶结作用^[30]。此外,800℃试样的破坏应变较常温条件增加约40%,这进一步印证了高温促使材料塑性增强、强度减弱的演化规律。通过分析斜率的变化趋势,可以观察到随着温度的升高,斜率减少的具体数值,这直接反映了材料刚度的下降情况。

不同高温循环处理后花岗片麻岩试样峰值应力与平均应变率的变化情况,如图9所示。

峰值应力拟合曲线:

$$y = 0.0000547T^2 + 0.0021T + 129.1 \quad (7)$$

平均应变率拟合曲线:

$$y = 0.000157T^2 + 0.0015T + 112.3 \quad (8)$$

式中: T 为热循环温度。

从整体变化趋势可以看出,温度对岩石的力学响应具有显著影响。在 200℃ 时,峰值应力较常温略有升高(约 3.2%),同时平均应变率基本保持稳定,这源于低温热处理促使矿物颗粒间胶结物质发生重排,使结构致密性暂时增强。然而当温度升至 400℃ 以上后,峰值应力开始持续下降,分别降至常温值的 92.3%、87.5% 和 72.3%,而平均应变率则随温度升高呈现持续上升趋势,尤其在 800℃ 时,相比常温条件下,应变率增长为原来的 1.87 倍,表明材料逐渐由脆性向延性转变。这种劣化效应与两个关键机制相关^[31]:一是 573℃ 石英相变引发的体积膨胀导致微裂纹增殖;二是高温下长石矿物解离削弱了岩石骨架强度。尤其当温度达到 800℃ 时,峰值应力的急剧下降(降幅达 27.7%),表明材料已发生不可逆的矿物相变与结构重组^[32]。

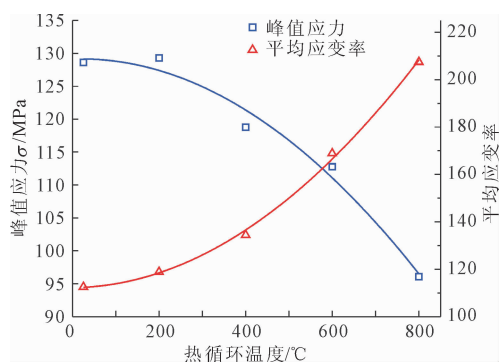


图 9 不同高温循环处理后花岗片麻岩试样峰值应力与平均应变率曲线

2.3 破碎特征

2.3.1 破碎块度的分布

为了定量分析试样在不同加载速率及循环次数扰动基础上施加相同破坏荷载后的破坏程度,对破坏后的试样碎块进行了系统收集与筛分。筛孔直径分别为 0.08 mm~0.15 mm、0.15 mm~0.30 mm、0.30 mm~0.60 mm、0.60 mm~1.00 mm、1.00 mm~2.36 mm、2.36 mm~4.75 mm,并利用高灵敏度电子天平精确称量每个等级孔径筛中滞留的碎块质量。表 5 展示了循环高温作用下花岗片麻岩冲击破碎块度的筛分结果,其中包括不同温度条件下各粒径段的质量分布以及对应的分形维数。

从常温到 800℃ 的不同高温循环条件下,试件的破碎形态呈现出显著变化。常温和 200℃ 时,试件主要表现为较大的碎块与少量细屑,随着温度升高至 400℃,虽然仍能观察到一些较大碎块的存在,但小粒径碎块的数量明显增多,表面岩石结构开始

出现一定程度的劣化。当温度进一步提升至 600℃ 及以上时,试件破碎程度显著加剧,尤其是达到 800℃ 时,样品几乎完全分解为细小颗粒乃至粉末状物质,这标志着高温导致岩石物理力学性质发生重大改变,进而加剧了其内部结构的损伤。如图 10 所示,展示了常温及高温循环作用后试样的破碎形态,直观地呈现了这一系列温度影响下的变化趋势。

表 5 循环高温作用下花岗片麻岩冲击破碎块度的筛分结果

温度 T/℃	筛分直径/mm							总质 量/g	分形 维数 D
	>4.75	2.36	1.00	0.60	0.30	0.15	0.08		
25	2.660	1.067	0.381	0.105	0.085	0.021	0.000	4.319	1.50
200	2.930	0.720	0.210	0.100	0.060	0.010	0.000	4.030	1.37
400	2.035	0.930	0.300	0.275	0.199	0.089	0.032	3.860	1.90
600	0.437	0.839	0.788	0.591	0.670	0.225	0.390	3.940	2.42
800	0.090	0.563	0.473	0.598	0.460	0.512	1.216	3.912	2.71

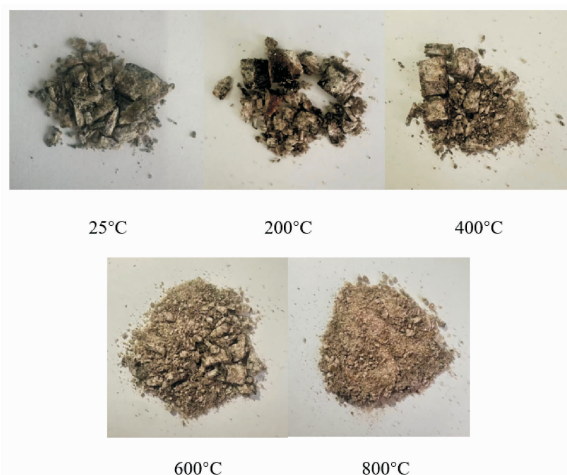


图 10 高温循环作用后试样破碎形态

2.3.2 不同高温循环作用对分形维数的影响

图 11 展示了不同温度循环后试样的平均破碎粒径分布规律,200℃ 高温循环后,其平均破碎粒径小幅度上升,当温度在 400℃~800℃ 时,其平均粒径急剧降低,尤其是 800℃ 时,相比常温条件下,其降幅比例高达 80%,总体变化趋势可通过分形理论进行定量表征。根据破碎分形模型,试样破碎后的粒径分布满足以下关系^[33]:

$$\frac{M_R}{M_T} = \left(\frac{r}{r_m}\right)^{3-D} \quad (9)$$

式中: D 为分形维数; r 为碎块尺寸; r_m 为碎块的最大尺寸; M_R 为粒径小于 r 的碎屑累积质量; M_T 为碎块总重。

$$\ln \frac{r}{r_m} = F \quad (10)$$

对两边取对数:

$$\lg\left(\frac{M_R}{M_T}\right) = (3 - D)\lg(F) \quad (11)$$

如图 12 所示,通过拟合 $\lg\left(\frac{M_R}{M_T}\right)$ 与 $\lg(F)$ 的线性关系,可知拟合直线斜率即为 $(3 - D)$ 。

图 12 展示了不同温度循环后试样的冲击破碎产物在双对数坐标下的分布特征。所有数据点均呈现出良好的线性拟合关系 ($R^2 > 0.93$),表明高温处理后的花岗片麻岩破碎块度具有显著的自相似性。通过拟合 $\lg\left(\frac{M_R}{M_T}\right)$ 与 $\lg(F)$ 曲线的斜率,分形维数依次增加,表明高温循环作用加剧了岩石内部结构的损伤,导致碎块数量增多、尺寸减小,进而提高了试样的破碎程度^[34-35]。

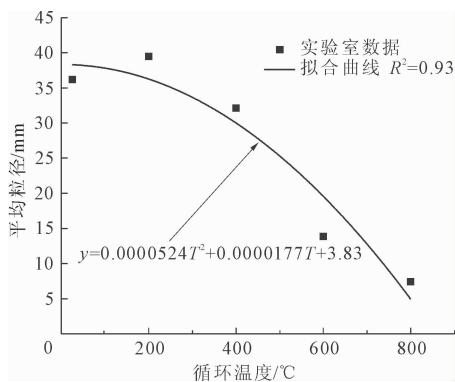


图 11 不同温度循环后试样的平均破碎粒径分布

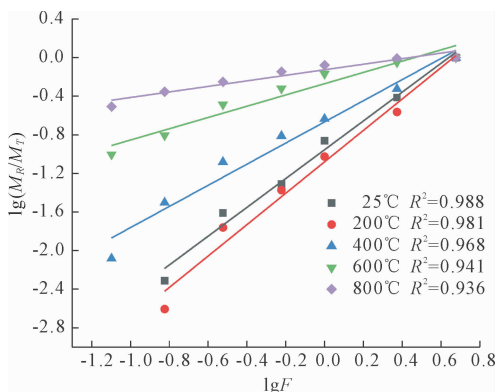


图 12 $\lg\left(\frac{M_R}{M_T}\right) - \lg(F)$ 曲线

3 结论

通过利用 SHPB 试验装置对常温和经历不同高温循环作用下的花岗片麻岩试件进行冲击压缩试验,主要得出以下结论:

(1) 高温循环导致了花岗片麻岩试件结构的显著劣化。

(2) 在高温循环作用下,花岗片麻岩的质量损失率、体积膨胀率以及密度减少率均呈现出随温度升高而增大的趋势。

(3) X 射线衍射 (XRD) 分析显示,高温循环处理后,岩石内部生成了新的矿物相如 $\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$ 、 CaFe_4O_7 等,同时出现了单质 Ca,表明高温环境下矿物分解反应的发生,这是导致材料宏观力学性能劣化的微观机制之一。

(4) 动态力学测试表明,高温循环作用后花岗片麻岩的动抗压强度呈二次函数关系减小,尤其是超过 400°C 后变化尤为显著。

(5) 随着温度的升高,花岗片麻岩试样的破碎程度加剧,平均粒径和分形维数显著增大。特别是在 800°C 条件下,样品几乎完全分解为细小颗粒乃至粉末状物质,揭示了高温循环对岩石内部结构造成严重损伤的本质影响。

参考文献:

- [1] Alqatahni N B, Cha Minsu, Yao Bowen, et al. Experimental investigation of cryogenic fracturing of rock specimens under true triaxial - confining stresses[J]. SPE Europe featured at 78th EAGE conference and exhibition, 2016, SPE-180071-MS.
- [2] Bahrami R, Rezaee R, Clennell B. Water blocking damage in hydraulically fractured tight sand gas reservoirs: an example from Perth Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 88-89 (S1):100-106.
- [3] 常智杨,杜庆洋,徐会君,等. 粉煤灰-矿渣地质聚合物的高温抗冲击性能研究[J]. 水泥,2025(5):62-66.
- [4] 明杏芬,范成伟. 温度循环对岩石物理力学性质影响[J]. 科学技术与工程,2017,17(13):261-265.
- [5] Sun Qiang, Geng Jishi, Zhao Fei, et al. Experimental investigation of thermal cycling effect on physical and mechanical properties of sandstone after variable thermal cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(7):3771-3784.
- [6] 平琦,后健民,胡薇,等. 高温循环作用含孔砂岩动态力学特性试验研究[J]. 金属矿山,2024(10):76-84.
- [7] Rong Guan, Yao Mengdi, Peng Jun, et al. Influence of initial thermal cracking on physical and mechanical behaviour of a coarse marble: insights from uniaxial compression tests with acoustic emission monitoring[J]. Geophysical Journal International, 2018, 214(3):1886-1900.
- [8] 刘石,许金余,刘志群,等. 温度对岩石强度及损伤特性的影响研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013(4):583-588.

- [9] Zhang Chuanda, Liang Weiguo, Li Zhigang, et al. Observations of acoustic emission of three salt rocks under uniaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77:19-26.
- [10] Siratovich P A, Heap M J, Villeneuve M C, et al. Mechanical behaviour of the rotokawa andesites (new zealand): insight into permeability evolution and stress-induced behaviour in an actively utilized geothermal reservoir[J]. *Geothermics*, 2016, 64:163-179.
- [11] 刘力源,罗胜文,王涛,等.超高温下花岗岩微观结构与能量演化特征的多尺度研究[J].*岩石力学与工程学报*,2025,44(9):2305-2320.
- [12] Jacques Paquet, Philippe Francois. Experimental deformation of partially melted granitic rocks at 600°C~900°C and 250 MPa confining pressure [J]. *Tectonophysics*, 1980,68(1-2):131-146.
- [13] Kong Peng, Jiang Lishuai, Jiang Jinquan, et al. Numerical analysis of roadway rock-burst hazard under superposed dynamic and static loads[J]. *Energies*, 2019, 12(19):3761.
- [14] 倪晓慧,李晓娟,黄殿武,等.不同高温循环次数后大理岩单轴压缩力学试验研究[J].*水力发电学报*,2016,35(9):95-100.
- [15] 殷志强,韩宁,齐潮,等.受加载速率影响花岗岩破坏试验及前兆研究[J].*中国矿业*,2025,34(3):194-204.
- [16] 王春,胡慢谷,王成,等.热-水-力作用下圆孔花岗岩的动态损伤特征及结构模型[J].*岩土力学*,2023,44(3):741-756.
- [17] 张浩天.超高速应变率冲击作用下花岗岩动态力学性能及破碎机制研究[D].武汉:江汉大学,2024.
- [18] 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):2184-2192.
- [19] 余莉,彭海旺,张钰,等.水-热循环花岗岩的物理力学性质试验研究[J].*科学技术与工程*,2021,21(2):703-713.
- [20] Wu Xiaoguang, Huang Zhongwei, Li Ran, et al. Investigation on the damage of high-temperature shale subjected to liquid nitrogen cooling[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 57:284-294.
- [21] 牛传星,付厚利,秦哲,等.温度周期循环作用下岩石损伤特性的试验研究[J].*长江科学院院报*,2017, 34(4):78-82.
- [22] Qin Yan, Tian Hong, Xu Nengxiong, et al. Physical and mechanical properties of granite after high-temperature treatment[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(1):305-322.
- [23] Rong Guan, Sha Song, Li Bowen, et al. Experimental investigation on physical and mechanical properties of granite subjected to cyclic heating and liquid nitrogen cooling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54:2383-2403.
- [24] Wang Chun, Hu Mangu, Wang Cheng. Dynamic damage characteristics and structural model of concentric perforated granite subjected to thermal-hydro-mechanical coupling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(3):741-756.
- [25] 孟龙,黄瑞源,蒋东,等.不同强度混凝土高温下动态劈拉性能研究[J].*工程力学*,2021,38(3):202-213.
- [26] 王宇,翟成,余旭,等.高温作用下五峰组-龙马溪组页岩动力学特征及损伤演化规律研究[J].*岩石力学与工程学报*,2023,42(5):1110-1123.
- [27] 吴浩,凡奥奇,贾永胜,等.冲击动载下含孔洞岩石的力学特性及破裂机制[J].*爆破*,2023,40(4):1-12.
- [28] 熊良宵,虞利军.高温作用下和高温后岩石力学特性的研究进展[J].*地质灾害与环境保护*,2018,29(1):76-82.
- [29] Heuze F E. High-temperature mechanical, physical and Thermal properties of granitic rocks- A review[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983,20(1):3-10.
- [30] 刘少坤,李清,黄晨.高温后对硅质砂岩的动态力学性能研究[J].*工程爆破*,2023,29(3):24-30.
- [31] 马建宏,韦四江,苏承东.高温对弱黏结中砂岩物理力学性质的影响[J].*采矿与安全工程学报*,2017,34(1):155-162.
- [32] Cai Chengzheng, Huang Zhongwei, Li Gensheng, et al. Feasibility of reservoir fracturing stimulation with liquid nitrogen jet[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 144:59-65.
- [33] 刘雅甜,方士正,何松林,等.动载作用下铁矿石能量耗散规律及破坏特征试验研究[J].*金属矿山*,2022(6):46-54.
- [34] 沈筠,吴启一,韩云飞,等.干燥及饱水状态多孔玄武岩力学性质试验研究[J].*金属矿山*,2024(5):232-236.
- [35] Nasseri M H B, Schubnel A, Young R P. Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(4):601-616.