

高温处理后花岗岩气体渗透率演变试验研究

程欢, 段志波

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 跨海隧道内发生火灾时, 围岩在高温作用下和遇水急剧冷却过程中会产生大量的裂隙, 这些裂隙会对围岩周边地下水渗透性产生影响。本文以高温(200℃、400℃、600℃)处理后花岗岩为试验对象, 在自然冷却和遇水冷却两种冷却方式下, 进行了一系列气体渗透率试验, 试验结果表明: 孔隙率在 600℃高温处理后显著增大; 渗透率在 200℃高温处理后几乎没有变化, 而在 400℃和 600℃下分别提高了 1 个和 2 个数量级达到 10^{-17} m^2 和 10^{-16} m^2 。通过 SEM 扫描电镜对试样内部裂隙发育发展情况进行观察, 印证了相关渗透率的演变规律。

关键词: 花岗岩; 孔隙率; 气体渗透率; 扫描电镜

中图分类号: U456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 05—0158—03

跨海隧道内发生火灾时, 围岩在高温作用下会产生大量裂隙, 导致周边地下水侵入, 在热冲击作用下进一步引发裂隙萌生和扩展, 造成围岩渗透性和力学性能劣化, 进而影响隧道的安全运行。渗透率作为深部岩体一个重要参数, 其与孔隙率和内部孔隙-裂隙结构息息相关。彭海旺等^[1]和 Hu 等^[2]对高温水冷后花岗岩物理性质作了相关试验研究, 结果表明, 花岗岩在经过高温水冷处理后, 其体表会有微裂纹出现, 导致孔隙结构发生改变。靳佩桦等^[3]以高温急剧冷却处理后花岗岩为实验对象, 进行了气体渗透率测试, 发现自然冷却和遇水冷却下渗透率变化的阈值温度为 400℃。本文旨在分析高温处理后花岗岩气体渗透率在不同冷却方式下随处理温度的演变规律, 并结合 SEM 电镜扫描观察其微观孔隙-裂隙结构。

1 试样制备及热处理方法

花岗岩试样采用 TNX1200-30 型马弗炉进行高温处理。加热目标温度分别为 200、400、600℃, 加热速率设定为 5℃/min, 至预定温度后恒温 2h。然后采用以下两种不同方式冷却: 实验室自然条件冷却和投入 25℃的水中急剧冷却。其中字母 A 代表水中冷却, 字母 B 代表自然冷却。图 1 为不同温度处理后花岗岩样品外观, 可以观察到试样表面颜色随着处理温度的升高, 从最初原始状态的灰色到淡黄色, 最后到灰白色的过程。

2 试验结果及其分析

2.1 孔隙率

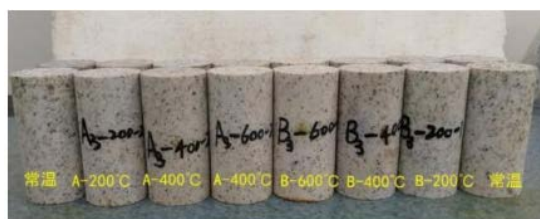


图 1 高温处理后试样外观

孔隙率的测量采用真空排水法。试样放入真空器皿中进行水饱和, 当 24 小时内质量变化小于 0.01g 时, 视为该试样已经处于饱水状态, 称量试样质量为 M_s ; 将完全饱水状态试样放入 105℃的干燥箱中干燥, 24 小时质量变化小于 0.01g 时视为试样已经处于干燥状态, 称量试样质量为 M_d 。用下面公式计算试样的孔隙率:

$$e = \frac{4(M_s - M_d)}{\pi D^2 L \rho_w} \quad (1)$$

式中: e 是试样的孔隙率, D 和 L 分别是标准圆柱形试样的直径和高度, ρ_w 为水的密度。

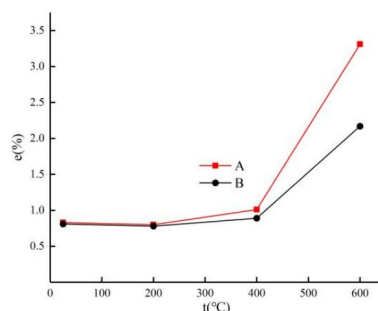


图 2 孔隙率-处理温度曲线

由图 2 可看出, 200℃处理后试样孔隙率对比初始状态略有下降, 这是由于花岗岩内部结构随温度升高发

生膨胀现象,导致孔隙率减小;200~400℃孔隙率随温度升高而逐渐增大,600℃时增大更加明显,这是由于此处理温度下花岗岩内部晶体结构发生变化,尤其是 β -type, α - β 类型晶体结构产生了较大破坏,导致裂缝的萌生和扩展。

2.2 SEM 扫描电镜

为了进一步研究试样内部裂隙发育情况,通过SEM扫描电镜进行观察。扫描电镜型号为SU8020,图3是两种冷却条件下花岗岩内部裂隙演化SEM图像,可以看出,常温状态下花岗岩试样内部微观状态良好,仅有少量裂隙;温度达到200℃时,花岗岩内部的裂隙均出现一定程度的闭合;经过高温400℃处理后,花岗岩试样内部产生了许多温度裂隙,并出现带状裂缝,而经过水冷后的裂缝宽度要明显比自然冷却条件下要宽;当温度为600℃,可以观察到裂隙大量增多,相互贯通形成网状结构,颗粒化严重,且出现明显的位错。

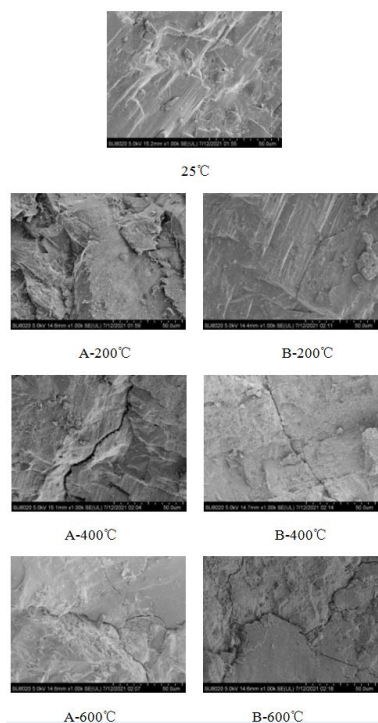


图3 不同温度处理后花岗岩内部裂隙扫描电镜图像

2.3 气体渗透率

花岗岩在高温处理后快速水冷过程中,内部会产生温度裂隙^[4-5]。气体渗透率测试采用稳态法,氩气作为流体介质,研究热处理温度、冷却方式、围压和围压加-卸载对气体渗透率的影响。试验设备示意图如图4所示,先将干燥状态试样用黑色橡胶套密封置于围压室中,并进行气密性检测,用高压伺服泵施加围压(加

载速率控制在1MPa/min),此处采用围压为 $P_c=5$ 、10、20、30MPa。使用注气装置,设定上游进气端压力 $P_1=1.5$ MPa,下游出气端与大气互通,待上游进气端与下游出气端达到稳定渗流状态后开始实验,用计算机记录上游进气端压力降和相应的时间,根据达西定律,气体渗透率 K 可以由下面公式计算:

$$K = \frac{2\mu L \Delta P_1 V_1}{S(P_{moy}^2 - P_0^2)\Delta t} \quad (2)$$

式中: μ 为气体粘性系数; L 为试样高度; V_1 为储气罐体积; S 为试样截面面积; ΔP_1 为上游进气压经过 Δt 时间后的变化值; P_{moy} 为进气压的平均值,其中 $P_{moy}=P_1-\Delta P/2$, P_1 为进气压初始值; P_0 为标准大气压; Δt 为测试时间;

逐级提高围压至30MPa,重复以上实验,再逐级卸载围压并进行同样实验至5MPa,重复以上实验。

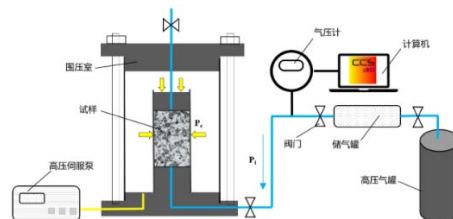


图4 气体渗透率实验装置示意图

前人大量研究表明,围压能在很大程度上影响花岗岩气体渗透率差值。图5为围压与花岗岩渗透率关系曲线,从图中可以看出,随着围压的增加,渗透率呈现减小的趋势,同一温度下,围压值越大,花岗岩内部孔隙微裂隙的发育越迟缓,进而影响了氩气的流动通道,使得渗透率减小;渗透率随着卸载量的增加而不断增加,但同围压下相对于加载状态时有一定的差值。对比图5(a)和(b),400℃以后,高温水冷下花岗岩的渗透率明显高于室温冷却,这是因为高温花岗岩在热冲击作用下,内部结构出现了劣化,致使其孔隙微裂隙增多,花岗岩渗透率提高;常温下花岗岩平均渗透率为 $6.32 \times 10^{-18} \text{m}^2$,25~200℃时的渗透率趋于平稳状态,400℃和600℃下分别提高了1个和2个数量级达到 10^{-17} 、 10^{-16}m^2 。

图6为热处理温度400℃、600℃的花岗岩在不同冷却条件下渗透率随围压变化曲线。可以看出,同温度下,水中冷却试样渗透率明显高于自然冷却,而围压则起到了使内部裂隙闭合的作用;加载情况下,渗透率从 10^{-17} 、 10^{-16} 降至 10^{-17} 、 10^{-18}m^2 ,卸载情况下,渗透率虽

出现明显的回升,但达不到初始加载水平。这说明围压对于花岗岩内部裂隙具有抑制作用,并且该作用效果不可逆。

图 7 为围压 5MPa 下对应初始状态的相对渗透率。可以明显看出水冷状态下气体渗透率高于自然冷却状态,且均在 200℃以后呈现明显上升趋势。

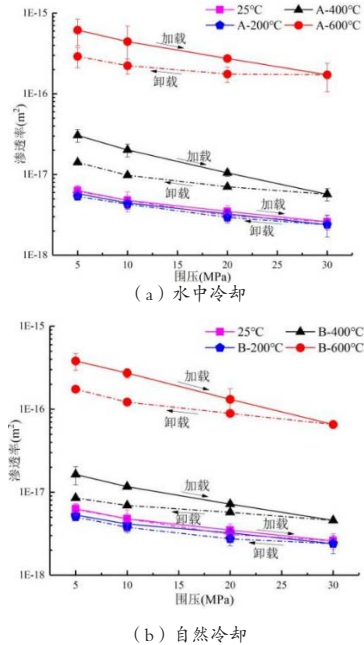


图 5 围压加卸载对热处理后花岗岩渗透率影响曲线

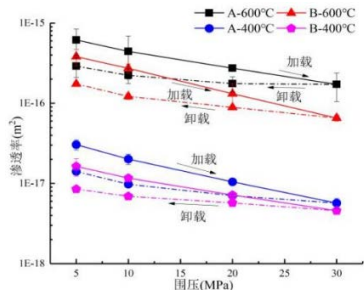


图 6 不同冷却条件下渗透率变化曲线

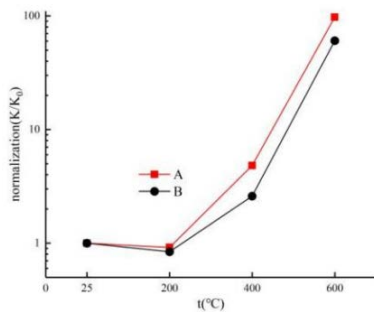


图 7 围压 5MPa 下相对渗透率

3 结论

通过对高温处理后的花岗岩进行孔隙率、气体渗透率和 SEM 扫描电镜实验,可以得出以下结论:

(1) 两种不同冷却下的花岗岩表现出相同的规律,都随着温度的升高,渗透率和孔隙率增大。

(2) 围压抑制了花岗岩内部微裂隙的发育,渗透率随着围压的增加而减小,并随着卸载量的增加而增加,但相对于加载状态时有一定的差值,反映了其内部孔隙微裂隙的可恢复程度。

(3) 通过观察 SEM 图像可知,随着温度的增加,试样内部孔隙-裂隙逐渐增多,温度 600℃时,岩石内部裂隙大量增多,形成网状结构且颗粒化严重,水冷却下的样品劣化程度较自然冷却更为明显。

(4) 高温水冷条件下渗透率高于自然状态冷却,急剧冷却过程为流体提供了良好的转运通道,导致渗透率大幅度增加。

参考文献:

- [1] 彭海旺,余莉.花岗岩多次高温水冷热冲击后力学试验[J].科学技术与工程,2021,21(13):5432-5439.
- [2] Hu J, Sun Q, Pan X. Variation of mechanical properties of granite after high-temperature treatment[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(2): 43.
- [3] 靳佩桦,胡耀青,邵继喜等.急剧冷却后花岗岩物理力学及渗透性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(11):2556-2564.
- [4] 邵保平,吴阳春,王帅等.热冲击作用下花岗岩力学特性及其随冷却温度演变规律试验研究[J].岩土力学,2020,41(S1):83-94.
- [5] Duan Z, Skoczylas F. Experimental study of the permeability and poro-mechanical properties of thermally damaged granite. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021,25(5):955-965.