

文章编号:1001-4888(2019)03-0381-07

冷却方式对高温状态花岗岩裂隙分布特点的影响^{*}

高经纬¹, 马国伟^{1,2}, 范立峰¹

(1. 北京工业大学建工学院, 北京 100024; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300400)

摘要: 火灾后地铁隧道围岩发生破坏, 特别是在消防射水冷却后其性能劣化更为显著。为了深入研究冷却方式对高温状态岩石裂隙分布特点的影响, 本文首先将花岗岩试样加热至 800℃, 并分别采用自然冷却和水冷却两种方式降温, 然后采用 CT (Computed Tomography Technique, 计算机层析扫描技术) 观察岩石内部裂隙的分布, 并对裂隙进行重构, 接着结合经纬分析法确定最优经纬线划分密度, 最后研究冷却方式对岩石内部裂隙分布的非均匀性和各向异性的影响。结果表明: (1) 网格间距为 0.922mm 时, 试验结果不再随着网格间距的减小而变化; (2) 花岗岩 800℃ 时水冷却后, 在经向和纬向上的裂隙分布比自然冷却后在经向和纬向上的裂隙分布更趋近于均匀性; (3) 花岗岩 800℃ 时水冷却后的裂隙分布比自然冷却后的裂隙分布更趋近于各向同性。

关键词: 高温状态花岗岩; 冷却方式; CT 扫描技术; 细观裂隙; 非均匀性; 各向异性

中图分类号: TU458; TU521

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-247

0 引言

岩体作为地铁隧道的主要承载材料, 当隧道发生火灾时, 温度能够达到 800℃, 会使隧道围岩产生破坏, 尤其是消防射水在控制火情的同时, 会显著加剧隧道围岩性能的劣化, 严重威胁人员疏散以及消防救援人员的安全, 而且关系着火灾后地铁隧道工程的安全性评估、加固、修复及重建等工作^[1-3]。因此, 研究不同冷却方式对高温状态花岗岩损伤劣化的影响十分必要。

目前关于冷却方式对高温状态岩石或混凝土物理力学性能的影响, 国内外许多学者做了大量研究^[4-6]。黄真萍和邵保平等^[7,8]分别对高温状态大理岩和高温状态花岗岩遇水冷却后的力学特性和波动特性进行了试验研究。王朋等^[9]对比研究了自然冷却和水冷却对不同温度等级状态的花岗岩物理力学性能的影响。Shao 等^[10]比较了自然冷却和水冷却两种冷却方式对三种类型的花岗岩力学性能的影响。以上研究表明高温状态岩石水冷却和自然冷却后, 其物理力学性能的变化有明显的差异, 这是因为岩石内部产生了不同程度的损伤和裂隙, 裂隙分布的特点会显著影响岩体的物理力学性能。因此定量描述和分析高温状态岩石不同方式冷却后内部裂隙分布的特点, 对于评价岩石的物理力学特性具有重要意义。目前许多学者对岩石的非均匀性和各向异性进行了研究, 邓涛等^[11]对不同种类的岩石进行了纵、横波波速试验, 提出了岩石介质纵横波波速比的各向异性效应。张渊等^[12]通过统计岩石内部各种矿物质量所占百分比和各种矿物体积所占的百分比, 分别定义了岩石质量非均质度和体积非均质度, 然后将非均质度与岩石热破裂门槛值建立联系。朱万成等^[13]用数字图像处理技术表征岩石非均匀性, 模拟非均匀岩石在外荷载和渗流耦合作用下发生破裂的整个过程。但是目前对岩石内部裂隙分布的非均

^{*} 收稿日期: 2017-11-25; 修回日期: 2018-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(11572282, 51778021)和国家自然科学基金重大科研仪器项目(51627812)资助

通讯作者: 范立峰(1980—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 岩体多场耦合, 应力波传播。Email: fanlifeng@bjut.edu.cn

匀性和各向异性的研究很少。本文基于 CT 技术,结合韩越祥等人提出的经纬分析法^[14],定量描述和分析 800℃时水冷却和自然冷却后岩石裂隙分布的非均匀性和各向异性并对比其差异性,对于评价灾后岩石渗透规律的变化以及岩石强度的变化具有参考价值,并且对于地铁隧道工程灾后安全性评估、修复、加固和重建具有一定的参考意义。

1 试验概况

1.1 试样热处理

本试验采用均匀性和完整性都较好的山东花岗岩,将其加工成长方体试样,长和宽都是 10mm,高是 20mm,如图 1(a)所示。加热仪器采用北京工业大学岩土与地下工程研究所的箱式气氛炉,如图 2 所示。具体试验方法:准备两组花岗岩试样,每组三块,均以 2.5℃/min 的加热速率加热至 800℃,恒温 6h,将需要遇水冷却的一组试样快速取出,立即放入室温下的自来水中进行冷却,水面完全淹没试样,试样的浸泡时间不低于 6h,以保证岩样完全冷却^[7];另一组试样在炉内自然冷却。热处理后的试样见图 1(b),图中从左往右依次是常温、800℃时自然冷却后和 800℃时水冷却后的花岗岩试样。

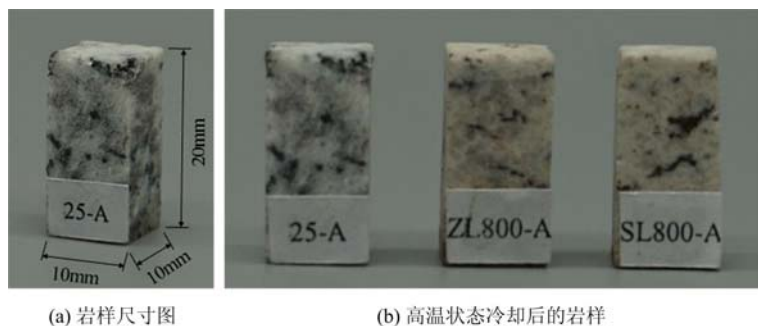


图 1 岩样图

Fig. 1 Rock specimen



图 2 箱式气氛炉

Fig. 2 Box type atmosphere furnace



图 3 CT 扫描系统

Fig. 3 Computed Tomography System

1.2 细观裂隙提取

本试验采用北京工业大学岩土与地下工程研究所的 CT 扫描系统(图 3),观察 800℃时不同方式冷却后试样内部的裂隙分布。扫描参数见表 1。

表 1 CT 扫描参数

Tab. 1 CT scan parameters

分辨率/ μm	电压/kV	电流/ μA	图像合并数/张	曝光时间/s
16	130	75	4	0.29

为了使 CT 扫描图中的裂隙更清楚以便于分析,将裂隙进行提取重构^[14],如图 4 所示。

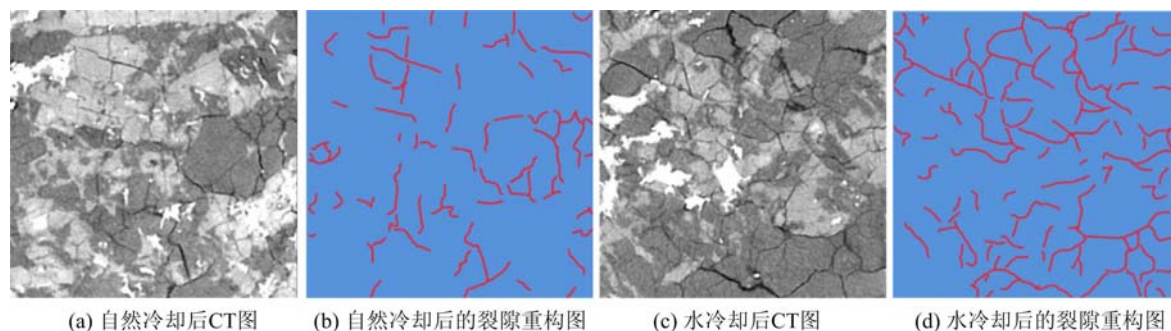


图4 两种方式冷却后的试样内部损伤图

Fig. 4 Internal damage of specimens after two cooling methods

2 最优经纬线划分密度

2.1 经纬线划分

本文对花岗岩 800℃ 时水冷却后的裂隙重构图由疏至密分别用间距为 2.304mm, 1.843mm, 1.536mm, 1.229mm, 0.922mm, 0.614mm, 0.307mm 的网格进行经纬线划分, 如图 5, 竖线代表经线, 横线代表纬线。

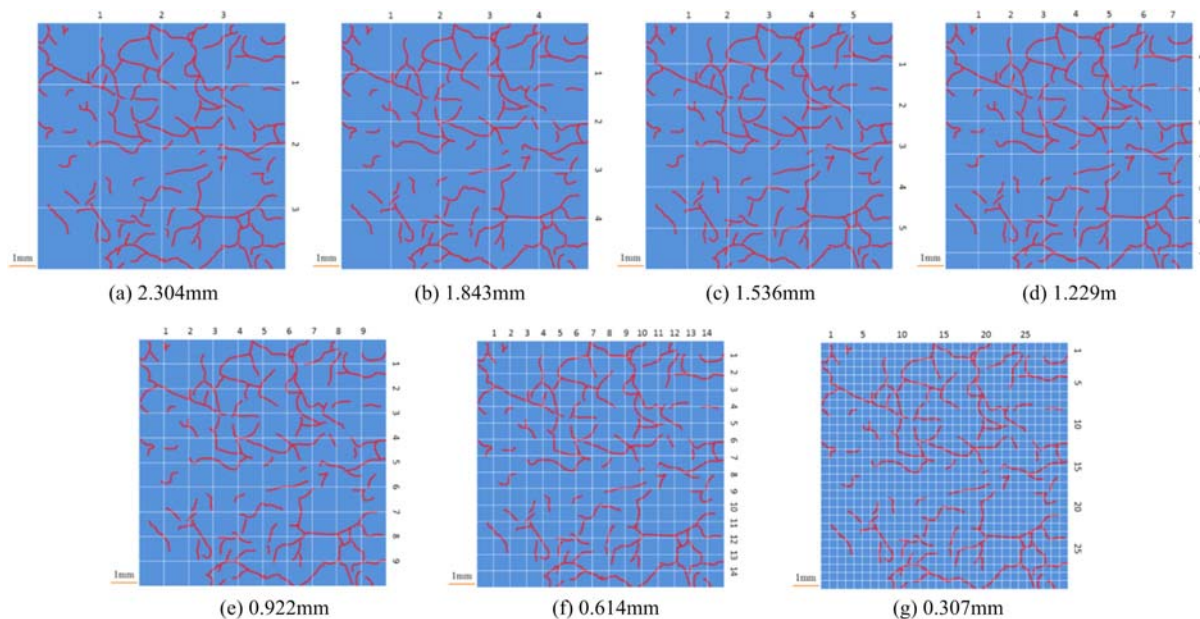


图5 不同间距的经纬线划分

Fig. 5 Division of longitude and latitude with different mesh spacing

2.2 确定非均匀性分析的最优经纬线划分密度

统计每条参考线与裂隙的交点个数, 计算每条参考线上交点个数的离散度, 具体计算参考文献[14]。

将不同间距的经纬线对应的经向和纬向上各参考线交点个数离散度的算术平均值绘制于图 6。由图 6 可以看出, 0.922mm 的经纬线网格间距是非均匀性分析的临界网格间距, 当网格间距大于 0.922mm 时, 经向和纬向两个方向上的试验结果受间距划分的影响程度较大, 试验结果随间距的变化而有较大的变化; 当间距小于 0.922mm 时, 经向和纬向两个方向上的试验结果受间距划分影响很小, 试验结果随间距的变化无明显变化。

2.3 确定各向异性分析的最优经纬线划分密度

统计每条参考线与裂隙的交点个数, 并计算各向异性率, 具体计算参考文献[14]。

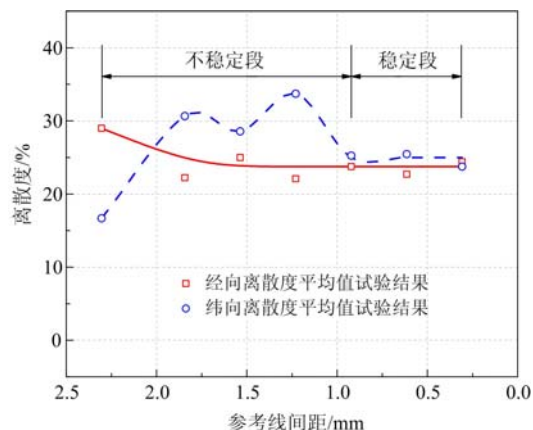


图 6 不同间距的经纬线对应的离散度平均值

Fig. 6 Average dispersion of longitude and latitude with different mesh spacing

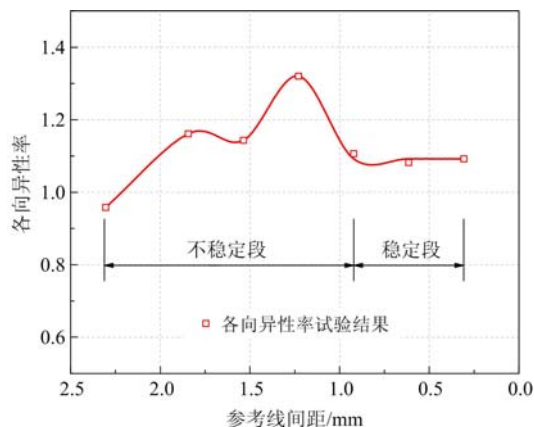


图 7 不同间距的经纬线对应的各向异性率

Fig. 7 The anisotropy rate of the longitude and latitude with different mesh spacing

将不同间距的经纬线对应的裂隙分布的各向异性率绘制于图 7。由图 7 可以看出,0.922mm 的经纬线网格间距同样是各向异性分析的临界网格间距,当间距大于 0.922mm 时,各向异性率受间距划分的影响程度较大;当间距小于 0.922mm 时,各向异性率受间距划分的影响很小。

由 2.2 节和 2.3 节试验结果可知,采用 0.922mm 的网格间距进行非均匀性分析和各向异性分析,在保证分析结果可靠的前提下能够最大限度地简化分析过程^[14]。

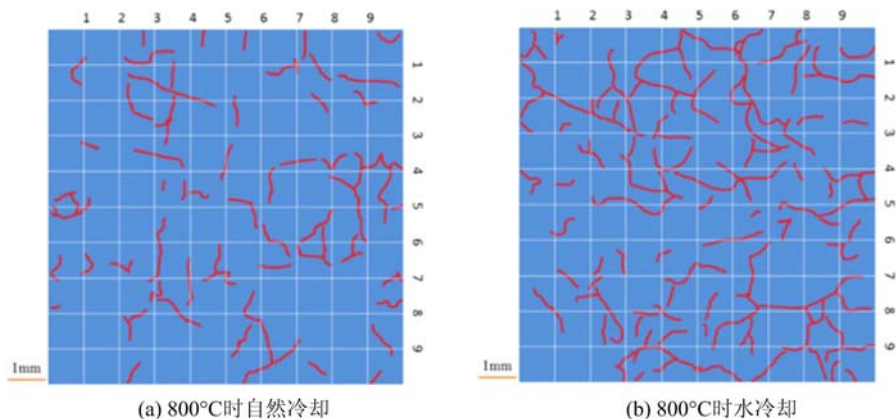


图 8 0.922mm 间距的经纬线划分

Fig. 8 Division of latitude and longitude with 0.922mm mesh spacing

3 试验结果及分析

图 8 是花岗岩 800℃ 时自然冷却后和水冷却后的裂隙重构图,均采用 0.922mm 的网格间距划分经纬线。图 9 和图 10 分别是 800℃ 时自然冷却后和水冷却后各参考线与裂隙的交点个数统计图。800℃ 时自然冷却后,经向平均交点个数为 4 个,纬向平均交点个数为 5.11 个。800℃ 时水冷却后,经向平均交点个数为 8.11 个,纬向平均交点个数为 7.33 个。800℃ 时水冷却后经向和纬向平均交点个数均大于自然冷却后的经向和纬向的平均交点个数。800℃ 时自然冷却的试样在升温 and 降温过程中,主要由于各种矿物热膨胀变形不同造成矿物彼此之间产生约束力,当约束力大于矿物之间的粘结强度或矿物本身强度时,就会造成开裂。800℃ 时遇水冷却的试样在升温过程中,同样是主要由于各种矿物热膨胀变形不同造成开裂;但是在遇水快速冷却过程中,试样外表面与试样内部产生一个温差,形成温度梯度应力,当温度梯度应力大于矿物之间的粘结强度或矿物本身强度时,就会产生开裂。温度梯度造成的热冲击力要大于由于热膨胀变形不同而产生的约束力,热冲击力会造成岩石内部产生更多的开裂,所以 800℃

时水冷却后经向和纬向平均交点个数均大于自然冷却后的经向和纬向的平均交点个数。

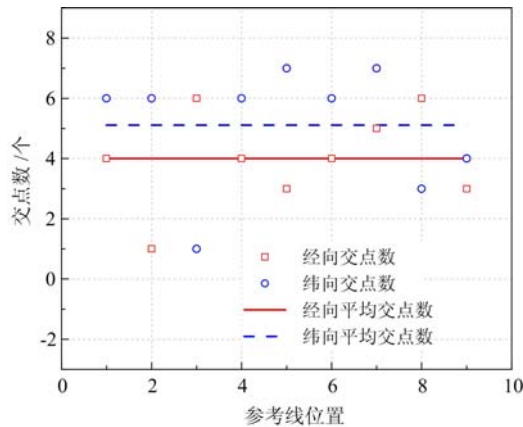


图9 800℃时自然冷却后交点数统计

Fig. 9 Statistics of intersection points after natural cooling at 800℃

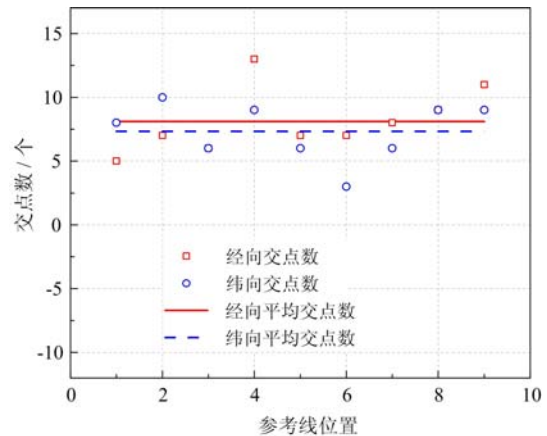


图10 800℃时水冷却后交点数统计

Fig. 10 Statistics of intersection points after water immersion cooling at 800℃

3.1 冷却方式对花岗岩内部裂隙分布非均匀性的影响

如图11所示, 800℃时自然冷却后, 经向离散度平均值为27.78%, 纬向离散度平均值为31.88%; 水冷却后, 经向离散度平均值为23.74%, 纬向离散度平均值为25.25%, 800℃时水冷却后在经向和纬向上的离散度平均值均小于自然冷却后在经向和纬向上的离散度平均值。800℃时自然冷却的试样在升温 and 降温过程中, 主要由于各种矿物热膨胀变形不同造成矿物彼此之间产生约束力, 当约束力大于矿物之间的粘结强度或矿物本身强度, 就会造成开裂。800℃时遇水冷却的试样在升温过程中, 同样是主要由于各种矿物热膨胀变形不同造成开裂, 但是在遇水快速冷却过程中, 一方面温度梯度热应力使升温过程中产生的裂纹进一步扩展贯通, 另一方面温度梯度热应力使试样在各个方向上产生大量新的裂纹, 这样就导致800℃时遇水冷却后的试样较800℃时自然冷却后的试样内部产生更多的裂纹, 并且裂纹在各个方向上的分布更均匀。

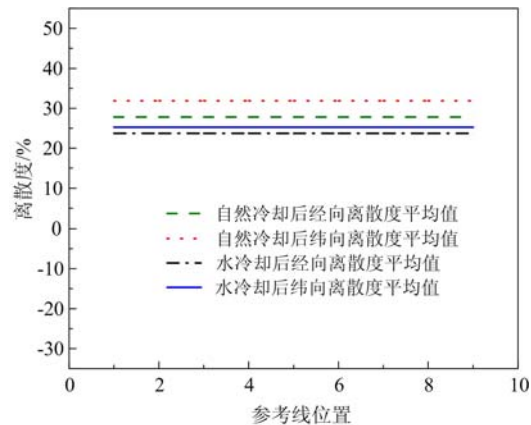


图11 离散度平均值随冷却方式的变化规律

Fig. 11 Average dispersion with cooling mode

3.2 冷却方式对花岗岩内部裂隙分布各向异性的影响

如图12所示, 花岗岩800℃时自然冷却后的各向异性率是0.783, 水冷却后的各向异性率是1.106, 800℃时水冷却后的各向异性率比自然冷却后的各向异性率更接近于1, 即花岗岩800℃时水冷却后的裂隙分布更接近于各向同性。800℃时自然冷却的试样在升温 and 降温过程中, 主要由于各种矿物热膨胀变形不同造成矿物彼此之间产生约束力, 当约束力大于矿物之间的粘结强度或矿物本身强度, 就会造成开裂。800℃时遇水冷却的试样在升温过程中, 同样是主要由于各种矿物热膨胀变形不同造成开裂, 但是在遇水快速冷却过程中, 一方面温度梯度热应力使升温过程中产生的裂纹进一步扩展贯通, 另一方面温度梯度热应力使试样在各个方向上产生大量新的裂纹, 800℃时水冷却后试样在各个方向上的沿晶破坏、穿晶破坏和混合破坏程度要大于自然冷却后试样的沿晶破坏、穿晶破坏和混合破坏程度, 这样就导致800℃时遇水冷却后的试样较800℃时自然冷却后的试样内部产生更多的裂纹, 并且裂纹分布更趋向于各向同性。

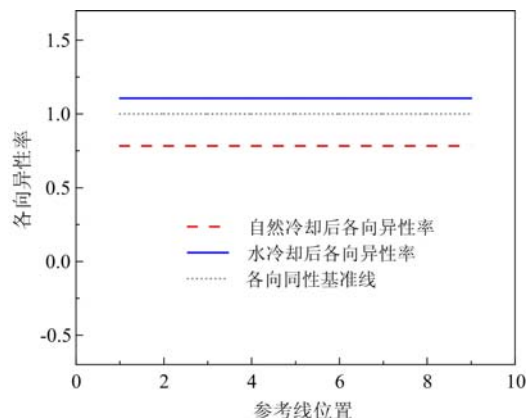


图 12 各向异性率随冷却方式变化规律

Fig. 12 Variation of anisotropy rate with cooling mode

4 结论

本文基于 CT 扫描技术,结合经纬分析法,研究 800℃ 时自然冷却后和水冷却后试样内部裂隙分布的非均匀性和各向异性,得出如下结论:

(1) 网格间距为 0.922mm 时,试验结果不再随着网格间距的减小而变化,试验结果趋于稳定。

(2) 花岗岩试样 800℃ 时自然冷却后在经向和纬向上裂隙分布的离散度平均值均大于水冷却后在经向和纬向上裂隙分布的离散度平均值,表明 800℃ 时水冷却后在经向和纬向上的裂隙分布比自然冷却后在经向和纬向上的裂隙分布更趋近于均匀性。

(3) 花岗岩试样 800℃ 时水冷却后的各向异性率比自然冷却后的各向异性率更接近于 1,表明 800℃ 时水冷却后的裂隙分布更趋近于各向同性。

参考文献:

- [1] 赵东平,王峰,余颜丽,等. 铁路隧道火灾事故及其规模研究综述[J]. 隧道建筑, 2015, 35(3):227—231 (ZHAO Dongping, WANG Feng, YU Yanli, et al. A review of fire accidents in railway tunnels and study on their scale[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(3):227—231 (in Chinese))
- [2] 曾磊,王少飞,林志,等. 公路隧道火灾事故调查分析[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3):41—48 (ZENG Lei, WANG Shaofei, LIN Zhi, et al. Investigation and analysis of fire accidents in highway tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(3):41—48 (in Chinese))
- [3] 王贤能,黄润秋. 引水隧洞工程中热应力对围岩表层稳定性的影响分析[J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(1):43—48 (WANG Xianneng, HUANG Runqiu. Influence of thermal stress on the surface stability of surrounding rock in a diversion tunnel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1998, 9(1):43—48 (in Chinese))
- [4] 翟越,艾晓芹,邓子辰,等. 受火温度和冷却方式对混凝土抗压强度影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11):74—80 (ZHAI Yue, AI Xiaoqin, DENG Zichen, et al. Influences of cooling mode and high temperature on concrete compressive strength[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2014, 41(11):74—80 (in Chinese))
- [5] 翟越,邓子辰,艾晓芹. 冷却方式和高温对混凝土劈裂抗拉强度影响[J]. 工业建筑, 2015, 45(7):113—117 (ZHAI Yue, DENG Zichen, AI Xiaoqin. Influence of different cooling mode and high temperature on concrete splitting tensile strength[J]. Industrial Construction, 2015, 45(7):113—117 (in Chinese))
- [6] 翟越,王思维,石蕴美,等. 高温—水冷却对混凝土抗冲击性能影响试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(7):127—131 (ZHAI Yue, WANG Siwei, SHI Yunmei, et al. Research on effects of high temperature-cooling method on concrete impact-resistance properties[J]. Industrial Construction, 2017, 47(7):127—131 (in Chinese))
- [7] 黄真萍,张义,吴伟达. 遇水冷却的高温大理岩力学与波动特性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2):367—375 (HUANG Zhenping, ZHANG Yi, WU Weida. Analysis of mechanical and wave properties of heat-treated marble by water cooling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2):367—375 (in Chinese))
- [8] 邵保平,赵阳升. 600℃ 内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(50):892—898 (XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooling granite under high temperatures within 600℃[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(50):892—898 (in Chinese))
- [9] 王朋,陈有亮,周雪莲,等. 水中水冷却对花岗岩高温残余力学性能的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3):54—57 (WANG Peng, CHEN Youliang, ZHOU Xuelian, et al. Impact of rapid cooling in water on residual mechanical properties of granite under high temperature[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,

- 2013, 24(3):54—57 (in Chinese))
- [10] Shao S S, Wasantha P L P, Ranjith P G. Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 70:381—387.
- [11] 邓涛, 杨林德. 各向异性岩石纵、横波的波速比特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10):2023—2029 (DENG Tao, YANG Linde. Characteristics of velocity ratio of P-wave and S-wave for anisotropic rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10):2023—2029 (in Chinese))
- [12] 张渊, 赵阳升. 岩石非均质度与热破裂的相关性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(6):135—137 (ZHANG Yuan, ZHAO Yangsheng. Analysis of correlation of rock thermal cracking with inhomogeneity[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(6):135—137 (in Chinese))
- [13] 朱万成, 康玉梅, 杨天鸿, 等. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术在流固耦合分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12):2087—2091 (ZHU Wancheng, KANG Yumei, YANG Tianhong, et al. Application of digital image-based heterogeneity characterization in coupled hydromechanics of rock[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12):2087—2091 (in Chinese))
- [14] 韩越祥, 万璋. 基于经纬分析法研究热损伤岩石的非均匀性和各向异性[J]. 工业建筑, 2018, 48(1):113—117 (HAN Yuexiang, WAN Zhang. Research on non-uniformity and anisotropy of thermal damage rock based on latitude-longitude analysis[J]. Industrial Construction, 2018, 48(1):113—117 (in Chinese))

Research on the effect of cooling method on crack distribution of high-temperature granite

GAO Jing-wei¹, MA Guo-wei^{1,2}, FAN Li-feng¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China)

Abstract: After the fire, surrounding rock of subway tunnel is destroyed. Especially after the fire fighting water cooling, its performance deterioration is more obvious. In order to study the effect of cooling method on crack distribution of high temperature granite, the granite specimens were heated to 800℃ first, and then cooled by natural cooling and water cooling, respectively. Then the crack distribution in rock was observed by Computed Tomography (CT) technique and reconstructed. In succession, the optimum density of meridional and weft division was determined by means of longitude and weft analysis. Finally, the effect of cooling method on the heterogeneity and anisotropy of crack distribution was studied. Results demonstrate that (1) when the grid spacing is 0.922mm, experimental results no longer vary with the decrease of grid spacing. (2) Crack distribution in specimen along latitude and longitude direction after water cooling is more homogeneous than that after natural cooling. (3) Crack distribution in specimen after water cooling is more isotropic than that after natural cooling.

Keywords: high-temperature granite; cooling methde; Computed tomography (CT) technique; mesoscopic cracks; heterogeneity; anisotropy