

水中快速冷却对花岗岩高温残余力学性能的影响

王朋, 陈有亮, 周雪莲, 郜珊珊, 赵卉子

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 通过研究 20 ~ 800℃ 高温状态的花岗岩在自然冷却和水中快速冷却后的力学性能, 分析了花岗岩随温度和冷却方式变化的破坏机理, 从纵波波速、应力-应变曲线、单轴抗压强度、峰值应变和杨氏模量等方面探讨了水中快速冷却对花岗岩高温残余力学性能的影响。试验结果表明: 花岗岩的纵波波速、单轴抗压强度和杨氏模量随经历温度的升高而衰减, 水中快速冷却比自然冷却衰减的幅度更大。这说明温度越高, 花岗岩的力学性能劣化越严重, 水中快速冷却产生的热冲击加剧了花岗岩力学性能的劣化。花岗岩水中快速冷却后的峰值应变小于自然冷却后的峰值应变, 说明高温状态的花岗岩水中快速冷却后, 其脆性比自然冷却后更加明显。

关键词: 岩石力学; 高温; 快速冷却; 力学性能; 热冲击

中图分类号: TV315; TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)03-0054-04

Impact of rapid cooling in water on residual mechanical properties of granite under high temperature

WANG Peng, CHEN Youliang, ZHOU Xuelian, GAO Shanshan, ZHAO Huizi

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Though investigating the mechanical properties of granite cooled by nature cooling (in air) and rapid cooling (in water) at the temperatures from 20 to 800℃, the paper analyzed the failure mechanism of granite under various heating temperatures and cooling modes and discussed the effect of rapid cooling in water on residual mechanical properties of granite from longitudinal wave speed, stress-strain curve, uniaxial compressive strength, peak strain and Young's modulus. The results show that the longitudinal wave speed, uniaxial compressive strength and Young's modulus of granite decrease with the increase of temperature. The amount of decrement of them rapid cooled in water is more than that in nature air. The higher the temperature, the more severe the degradation of mechanical property is. The thermal shock generated by rapid cooling might exacerbates the deterioration of mechanical property of granite. The peak strain of granite under rapid cooling is less than that under natural cooling. The brittleness of granite is more obvious through rapid cooling in water than through natural cooling in air.

Key words: rock mechanics; high temperature; rapid cooling; mechanical property; thermal impact

0 引言

温度是影响岩石物理力学性质的重要因素之一, 高温作用下岩石力学性质的研究, 已成为岩石力学研究的热门课题。在地热资源开发、高放射性核废料处理及深部地下空间的开发利用等工程领域, 都与岩石高温后的力学性质密切相关。此外, 岩石工程遭受火灾等突发性高温的影响, 其灾后的安全性评估、加固、修复及重建也需要考虑岩石高温后性能的变化。

岩石在不同高温作用下, 其力学性能会有较大的差别。长期以来, 国内外许多学者做了大量岩石高温的力学性能研究, 例如, 朱合华、杜守继等^[1-6]研究了高温作用后岩石在动静载荷作用下, 峰值应力、峰值应变、弹性模量等力学特性的变化; Araújo R G S 等^[7-9]在岩石高温高压下的变形机制、破坏准则和本构方程、热裂化及岩石损伤破坏机制等方面都做了大量的研究, 并取得一系列成果。但这些研究主要是在岩石高温后自然冷却的条件下进行的, 关于岩石在高温状态在水中快速冷却后的力学

收稿日期: 2013-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872133、11010101024); 上海市教委科研创新重点项目(11ZZ134)

作者简介: 王朋(1986-), 男, 山东汶上人, 硕士研究生, 研究方向为岩石、混凝土材料力学性能和边坡稳定性。

通讯作者: 陈有亮(1966-), 男, 河北故城人, 教授, 硕、博士生导师, 研究方向为岩土工程。

性能研究较少,而冷却方式也是影响高温后的岩石力学性能的重要因素之一。

本文通过研究花岗岩在经历不同高温后分别进行自然冷却、水中快速冷却后的力学性能,得出了花岗岩在不同温度不同冷却方式作用后纵波波速、应力-应变关系、单轴抗压强度、峰值应变和杨氏模量等力学性能的变化规律。这些研究成果可为火灾后岩石工程的稳定性和安全性评估、修复与重建提供可靠的科学依据。

1 试验介绍

1.1 试样制作

花岗岩试样采自福建省,形状为 50 mm × 100 mm 的圆柱体,基本尺寸和加工精度均符合岩石试验规程。每组 3 个,共 27 个试样。试样的平均密度为 2 600 kg/m³。

1.2 试验设备

试验中所用的高温设备为上海特成机械设备有限公司制造的型号为 SX2-10-12 的箱式电阻炉,膛净空为 400 mm × 250 mm × 160 mm,额定功率为 10 kW,最高温度可达 1 200℃。花岗岩的纵波波速和杨氏模量采用 V-METER III 超声脉冲速度测试仪测量。单轴压缩试验采用 SANS 微机控制电液伺服压力试验机,其最大荷载为 1 000 kN。

1.3 试验方法

对试样进行分组编号,将试样放入箱式电阻炉中,以 10℃/min 的升温速度达到预定温度后,恒温 6 h,以确保试样内外温度达到均匀,然后分别自然冷却和水中快速冷却至室温。对冷却到室温的试样干燥后分别测量各自的纵波波速和杨氏模量。

利用 SANS 微机控制电液伺服压力试验机对高温后的花岗岩进行单轴压缩试验,试验采用应力控制方式,以 0.8 MPa/s 的速率沿轴向施加荷载,直至

试样破坏,试验数据由试验系统自动采集,得到试样位移与力的关系曲线。

试验温度共分 20、200、400、600 和 800℃5 个等级,温度曲线如图 1 所示。每个等级六个试样,其中自然冷却和水中快速冷却的试样各三个。

2 试验结果及分析

2.1 纵波波速

超声脉冲在固体材料中的传播速率依赖于此种材料的弹性特性和组织结构。花岗岩高温冷却后,其内部组织结构发生变化,导致热破裂。为了了解高温状态花岗岩在不同冷却方式作用后组织结构的变化,用 V-METER III 超声脉冲速度测试仪测纵波波速,每组取平均值。

图 2 为不同温度不同冷却方式下花岗岩的相对纵波波速。由图 2 可知,在经历温度为 200℃ 以内,花岗岩的纵波波速没有明显变化;200~800℃ 内花岗岩的纵波波速随温度的升高急剧衰减,600℃ 时,自然冷却的花岗岩纵波波速衰减了 45%,而水中快速冷却的花岗岩纵波波速衰减了 62%;800℃ 时,自然冷却的花岗岩纵波波速衰减了 61%,水中快速冷却的花岗岩纵波波速衰减了 71%。可见,花岗岩水中快速冷却比自然冷却的纵波波速衰减幅度更大。这是由于坚硬的花岗岩受高温作用开始劣化,水中快速冷却下,温度急剧降低加速了岩石的热破裂,岩石由致密状态变为含有多条微裂隙状态,阻碍了超声波的传导,纵波波速降低。

2.2 应力-应变关系

花岗岩试样在经历不同温度不同冷却方式作用后,采用 SANS 微机控制电液伺服压力试验机进行单轴压缩试验。图 3 为不同温度不同冷却方式作用后花岗岩的典型全应力-应变曲线。

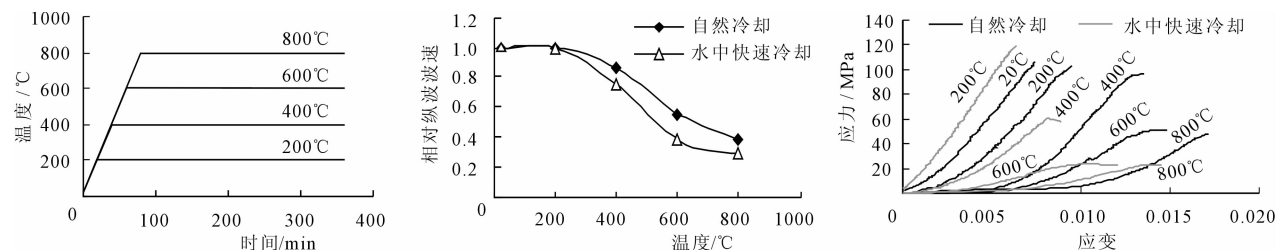


图 1 温度曲线

图 2 不同温度不同冷却方式下花岗岩的相对纵波波速

图 3 不同温度不同冷却方式作用后花岗岩的典型全应力-应变曲线

从图 3 中可以看出,不同温度不同冷却方式下的典型全应力-应变曲线变化规律大致经历 3 个阶

段:
(1)第 1 阶段,即压密阶段。此阶段曲线呈上

凹型,随着应力的增大,变形发展较快,这主要是由于岩石的微裂隙在外力作用下发生闭合所致。随着温度升高,花岗岩的水分逐渐蒸发以及矿物的脱水,致使含水率减少,孔隙率增大,同时高温后花岗岩经历了升温与冷却的过程,升温过程中岩石内不同组分的不均匀性膨胀,使内部在冷却过程中产生的残余应力造成较多损伤。岩石加密过程中需要将孔隙压实、裂隙压密,从而高温后压密阶段更加明显。

(2)第2阶段,即弹性阶段。此阶段的曲线基本呈直线状态,应力与应变成比例关系,该曲线在此直线段的斜率就是平均切线弹性模量,由曲线可知,温度越高斜率就越小,其平均切线弹性模量也越小。

(3)第3阶段,即应变软化阶段。曲线中此阶段不明显,只有温度超过400℃时,才呈现出一定的软化现象。此阶段,试样超过峰值强度,其内部结构遭到破坏,裂隙快速发展,承载力随着应变的增大而快速减小,直到试件完全破坏。

图3中,自然冷却的花岗岩应力-应变曲线在经历温度20~400℃时没有明显的变化,超过400℃后,应力-应变曲线形态发生较大变化,而水中快速冷却的应力-应变曲线在20~200℃时没有明显的变化,超过200℃后,发生较大变化,主要体现在弹性阶段斜率减小,应变软化阶段逐渐明显。可以说,400℃是花岗岩高温后自然冷却下应力-应变曲线的阈值温度,而200℃是花岗岩高温后水中快速冷却下应力-应变曲线的阈值温度。水中快速冷却的花岗岩,在200℃时,应力-应变曲线出现特殊情况,压密阶段十分短暂,超过200℃后,其应力-应变曲线比自然冷却时明显变缓,峰值应力迅速降低。在20~800℃,水中快速冷却的应力-应变曲线的压密阶段明显小于自然冷却的应力-应变曲线的压密阶段。

2.3 单轴抗压强度

图4为不同温度不同冷却方式作用后花岗岩的单轴抗压强度。从图4中可以看出,对于花岗岩在两种冷却方式下都表现为:当经历温度低于200℃时,单轴抗压强度有小幅增加,这一趋势与朱合华教授等^[1]对花岗岩的高温特性研究所得的规律一致;当经历温度为200~600℃时,单轴抗压强度近似呈线性快速降低,可以认为200℃为花岗岩单轴抗压强度的阈值温度;当经历温度为800℃时,与600℃时相比,单轴抗压强度没有明显降低。

对于水中快速冷却的花岗岩,在经历温度200~600℃时,单轴抗压强度比自然冷却降幅更大。经

历600℃高温后,自然冷却的花岗岩单轴抗压强度由常温时的106.09 MPa降低到51.30 MPa,降幅为51.6%;水中快速冷却的花岗岩单轴抗压强度由常温时的106.09 MPa降低到26.14 MPa,降幅为75.4%。由此可见,水中快速冷却对花岗岩高温残余单轴抗压强度具有很大的影响。

2.4 峰值应变

由单轴压缩试验测得的位移求出峰值应变,每组试样的峰值应变取平均值,得到不同温度不同冷却方式作用后花岗岩的峰值应变,如图5所示。从图5可以看出,在自然冷却方式作用下,当温度为20~200℃时,峰值应变没用明显变化。当经历温度超过200℃后,峰值应变呈正对数规律增大,其与经历的温度关系符合以下方程:

$$\varepsilon = 0.0043 \ln T - 0.013 \quad (R^2 = 0.963) \quad (1)$$

在水中快速冷却方式作用下,当温度为20~400℃时,峰值应变没用明显变化;当经历温度超过400℃后,峰值应变呈线性规律增大,其与经历的温度关系符合以下方程:

$$\varepsilon = 0.00002T + 0.003 \quad (R^2 = 0.999) \quad (2)$$

200~800℃时,花岗岩在水中快速冷却作用后的峰值应变小于自然冷却下的峰值应变,说明高温状态的花岗岩水中快速冷却后,其脆性比自然冷却后更加明显。当经历温度为800℃时,两种冷却方式下的峰值应变比较接近,约为常温下的1.5倍。这是因为,花岗岩经历800℃高温以后,花岗岩的矿物成分发生较大变化,结构水脱失、重结晶和相变等多种情况十分复杂,导致其力学性能劣化相当显著^[4]。

2.5 相对杨氏模量

用超声脉冲速度测试仪测出不同温度不同冷却方式下花岗岩的杨氏模量,每组取平均值,并求出相对杨氏模量,即不同温度不同冷却方式下花岗岩的杨氏模量与初始杨氏模量之比。图6为不同温度不同冷却方式下花岗岩的相对杨氏模量。从图中可以看出,两种冷却方式下,当经历温度为20~200℃时,花岗岩的相对杨氏模量没有明显变化,超过200℃后,相对杨氏模量随温度的升高明显下降,水中快速冷却后,相对杨氏模量的下降幅度显著。当经历温度为200~800℃时,对花岗岩水中快速冷却后的相对杨氏模量曲线进行对数函数拟合,可得:

$$E/E_0 = -0.695 \ln T + 4.684 \quad (R^2 = 0.975) \quad (3)$$

对花岗岩自然冷却后的相对杨氏模量曲线进行指数函数拟合,可得方程:

$$E/E_0 = 2.137e^{-0.0037T} \quad (R^2 = 0.973) \quad (4)$$

由此可见,当经历温度为 200 ~ 800℃ 时,花岗岩水中快速冷却后的相对杨氏模量随温度的升高呈

负对数规律减小;花岗岩自然冷却后的相对杨氏模量随温度的升高呈负指数规律减小。

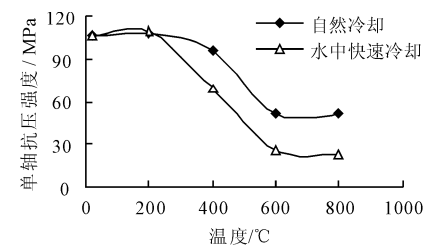


图 4 不同温度不同冷却方式作用后花岗岩的单轴抗压强度

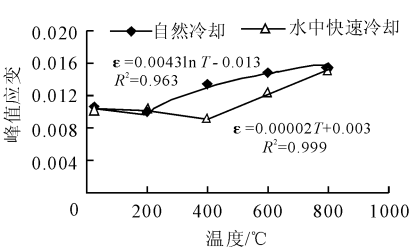


图 5 不同温度不同冷却方式下花岗岩的峰值应变

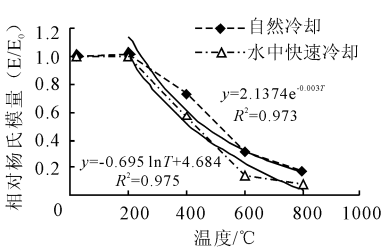


图 6 不同温度不同冷却方式下花岗岩的相对杨氏模量

3 讨 论

由于影响试验结果的因素很多,既有试验设备本身的误差和人为的操作误差,也有花岗岩试样的尺寸效应、端部效应、加工精度、不均匀性等因素^[11],上述规律和结论还有待进一步验证,同时还需要深入研究试样的破坏模式和损伤本构关系。众多因素使试验结果的离散性较大,但仍存在较强的规律性。下面根据试验结果,从微观机制、花岗岩的矿物成分及内部结构,对高温后的花岗岩在冷却方式下的力学性能进行探讨。

高温对花岗岩力学性质的影响从微观分析,主要是由于温度较高时,花岗岩内部各种矿物颗粒粒径、热膨胀系数和热弹性性质的不同,引起颗粒边界的热膨胀不一致,矿物颗粒之间或颗粒内部产生拉、压应力,即结构热应力,使花岗岩内部产生微裂纹,随后,原生以及次生裂纹扩展、贯通,宏观上就表现为花岗岩物理力学性质的劣化。

高温作用后花岗岩的力学特性不仅与温度有关,同时与冷却方式也密切相关。高温状态的花岗岩在水中快速冷却时所产生的温度梯度比供给稳定热流所产生的温度梯度要大的多^[12],导致岩体内部产生热冲击,加剧了裂隙裂纹的产生和发展,使花岗岩的力学性能进一步劣化。因此,高温后的花岗岩在水中快速冷却下比在自然冷却下的力学性能劣化更加显著。

此外,在水中快速冷却的花岗岩应力-应变曲线的压密阶段明显小于自然冷却的花岗岩应力-应变曲线的压密阶段,这是因为水中浸泡冷却的花岗岩可以充分与水接触,使得原来的水化物在脱水后又重新生成新的水化物,与自然冷却的花岗岩相比,在一定程度上,对由高温形成的微裂隙进行修补,使

孔隙减少,压密段变短。可见花岗岩在水中快速冷却,其力学性能既受重新生成的水化物修补作用的影响,又受热冲击的影响,这种交互影响作用有待于深入研究。

4 结 语

本文通过对 800℃ 以内花岗岩在自然冷却和水中快速冷却后的力学性能的试验研究,可得到以下结论:

(1)从总体上看,两种冷却方式下,高温后花岗岩的纵波波速、单轴抗压强度、杨氏模量随温度的升高而衰减,但水中快速冷却后,衰减的幅度更大。

(2)两种冷却方式下,经历不同温度的试样的应力-应变曲线基本分为压密、弹性和应变软化 3 个阶段。经历温度越高,压密阶段越明显,弹性阶段斜率也越小,平均切线弹性模量也越小。

(3)水中快速冷却的花岗岩应力-应变曲线的压密阶段明显小于自然冷却的花岗岩应力-应变曲线的压密阶段。200℃ 是花岗岩高温后水中快速冷却下应力-应变曲线的阈值温度。

(4)在两种冷却方式下,当经历温度不超过 200℃ 时,应变软化阶段、纵波波速、单轴抗压强度和杨氏模量没有明显变化,而经历温度超过 200℃ 后,温度越高,其变化越明显。200℃ 是花岗岩高温冷却后应变软化阶段、纵波波速、单轴抗压强度和杨氏模量的阈值温度。

(5)花岗岩高温后在水中快速冷却作用下的峰值应变小于自然冷却下的峰值应变。水中快速冷却花岗岩的脆性比自然冷却的更加明显。

(6)水中快速冷却产生的热冲击加剧了花岗岩力学性能的劣化。

- uct formation from chlorine and alternative disinfectants [J]. *Water Research*, 2007, 41(8):1667 – 1678.
- [20] Chiang P C, Chang E E, Chuang C C, et al. Evaluating and elucidating the formation of nitrogen – contained disinfection by – products during pre – ozonation and chlorination[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(3):327 – 333.
- [21] Hu J, Song H, Karanfil T. Comparative analysis of halonitromethane and trihalomethane formation and speciation in drinking water: the effects of disinfectants, pH, bromide, and nitrite[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(2):794 – 799.
- [22] Von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by – product formation in presence of bromide, iodide or chlorine[J]. *Water Research*, 2003, 37(7):1469 – 1487.
- [23] Pehlivanoglu E. The fate of wastewater – derived dissolved organic nitrogen in the aquatic environment[D]. University of California, Berkeley, 2005.
- [24] Hoigné J, Bader H. The formation of trichloronitromethane (chloropicrin) and chloroform in a combined ozonation/chlorination treatment of drinking water [J]. *Water Research*, 1988, 22(3):313 – 319.
- [25] Choi J, Richardson S D. Formation studies of halonitromethanes in drinking water[C] // . Proc. of the 2004 AWWA Water Quality Technology Conference, Denver, Colo, USA. 2004.
- [26] Chu Wenhai, Gao Naiyun, Deng Yang, et al. Formation of nitrogenous disinfection by – products from pre – chloramination [J]. *Chemosphere*, 2011, 85 (7): 1187 – 1191.
- [27] Chu Wenhai, Gao Naiyun, Deng Yang, et al. Impacts of drinking water pretreatments on the formation of nitrogenous disinfection by – products[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102:11161 – 11166.
- [28] Chu Wenhai, Gao Naiyun, Krasner S W, et al. Formation of halogenated C – , N – DBPs from chlor (am) ination and UV irradiation of tyrosine in drinking water[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 161:8 – 14.
- [29] Shah AD, Dotson A D, Linden K G, et al. Impact of UV disinfection combined with chlorination/chloramination on the formation of halonitromethanes and haloacetonitriles in drinking water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(8):3657 – 3664.
- [30] Krasner S W, Mitch W, Westerhoff P, et al. Control of N – DBP precursors: how does that compare to the control of THM precursors[C] // . American Water Works Association Annual Conference and Exhibition, Atlanta, GA, USA. 2008.

(上接第 57 页)

参考文献:

- [1] 朱合华,闫治国,邓涛,等. 3 种岩石高温后的力学性质的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 1945 – 1950.
- [2] 杜守继,刘华,职洪涛,等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2359 – 2364.
- [3] 李夕兵,周子龙,叶州元,等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(7): 1387 – 1395.
- [4] 吴刚,邢爱国,张磊. 砂岩高温后的力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(10): 2110 – 2116.
- [5] 方荣,朱珍德,张勇,等. 高温和循环高温作用后大理岩力学性能试验研究与比较[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(z1): 4735 – 4739.
- [6] 尹士兵,李夕兵,殷志强,等. 高温后砂岩静、动态力学特性研究与比较[J]. *岩石力学与工程学报*, 20012, 31(2): 273 – 279.
- [7] Aratjo R G S, Sousa J L A, Bloch M. Experimental investigation on the influence of temperature on the mechanical properties of reservoir rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3): 459 – 466.
- [8] Zhang Z X, Yu J, Kou S Q, et al. Effects of high temperatures on dynamic rock fracture [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(2): 211 – 225.
- [9] Heueckel T, Peano A, Pellegrini R. A constitutive law for thermo – plastic behavior of rocks: an analogy with clays [J]. *Surveys in Geophys*, 1994, 15: 643 – 671.
- [10] 许锡昌,刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(3): 332 – 335.
- [11] 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(5): 892 – 898.