

Research on Mechanical Properties of Sandstone Treated at Different Temperatures

Sihong Wang¹ Xiujie Zhong² Haiwen Yang¹ Yongjun Jiang¹

1. China Railway 24th Bureau Group Nanchang Railway Engineering Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

2. School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou, 550025, China

Abstract

The mechanical stability of sandstone under high temperature conditions, such as fire, is a key focus of many studies in tunneling and building construction. In this paper, we heated sandstone specimens in a muffle furnace to temperatures of 200°C, 400°C, 600°C, and 800°C. The wave velocity of the heated sandstone was measured using a digital sonic wave analyzer. Damage variables were defined based on the wave velocity data, with the highest value observed at 800°C. Uniaxial compression tests were conducted on the sandstone samples using a rock triaxial testing machine. As temperature increased, the peak strength of the sandstone progressively decreased. This study provides theoretical support for the stability of underground and tunnel engineering after fire incidents.

Keywords

sandstone; wave velocity; uniaxial strength

不同温度处理下砂岩的力学性能研究

汪思弘¹ 钟秀杰² 杨海文¹ 姜勇军¹

1. 中铁二十四局集团南昌铁路工程有限公司, 中国·江西 南昌 330000

2. 贵州大学土木工程学院, 中国·贵州 贵阳 550025

摘要

隧道和建筑砂岩等建筑, 在施工或者使用过程中可能会遭遇高温条件, 因此砂岩在火灾和高温条件下的力学稳定性变化一直是许多研究的重点。在论文中, 我们将砂岩分别在马弗炉中加热到200°C、400°C、600°C和800°C。用数字声波仪对高温后砂岩的波速进行测试。用波速数据定义损伤变量, 800°C时损伤变量最大。采用岩石三轴试验机对砂岩试样进行单轴压缩试验。随着温度上升, 砂岩的峰值强度逐渐降低。本研究可以为地下工程和隧道工程在火灾后的稳定性提供理论支撑。

关键词

砂岩; 波速; 单轴强度

1 引言

石材是土木工程中常运用的岩石材料之一, 研究这些岩石的性质具有重要意义。砂岩是常见的沉积岩, 其主要成分为石英和长石。因其优良的物理和力学性能被广泛应用于土木工程的所有领域, 特别是在建造建筑、桥梁和隧道等结构时。作为一种常见的天然建筑材料, 砂岩在工程应用中承担重要的结构和承载功能。随着经济的发展和交通运输的需要, 隧道工程呈现出快速发展的趋势。

然而在隧道的施工和运行过程中可能会发生火灾。由于火灾后温度升高, 隧道的围岩砂岩内部可能发生物理和化学变化。砂岩内部的微观结构在高温下会劣化, 这会导致砂岩的宏观力学性能受到影响。砂岩的热损伤会影响整个围岩结构的应

力状态, 从而导致结构的稳定性受到影响^[1]。因此深入研究热损伤下砂岩的力学性能, 对于理解其在实际工程中的表现及提出有效的工程解决方案具有重要的理论和实践意义。

目前, 已经有许多学者对砂岩作为围岩的热物理性质进行了研究。许多研究表明经过高温处理后, 砂岩的物理力学性能会发生变化^[2]。Luo^[3]等使用光学显微镜观测不同温度下红砂岩的破裂情况。Serdengecti^[4]对不同温度下的砂岩开展了三轴压缩试验。Liu^[5]对不同处理温度的砂岩开展了单轴压缩试验, 对不同温度下砂岩的强度变化进行了分析。李长春^[6]等认为岩石的力学性能会随着温度的变化发生明显变化。吕超^[7]等人通过试验研究了砂岩热物理性质的温度作用效应。

本研究通过对不同温度后砂岩进行单轴压缩试验, 得到应力应变曲线揭示温度对砂岩力学性能的影响机制。分析不同温度条件下砂岩的力学特征及其可能的工程应用。为工程上隧道遭受火灾后的安全性提供相应的参考依据。

【作者简介】汪思弘(1988-), 中国江西南昌人, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁结构及混凝土材料研究。

2 试验方法及仪器

2.1 试件制备

为了保证试件的离散性，本实验所用的砂岩取自同一结构完整的砂岩。切割成 50100mm 的标准圆柱体试件，所制砂岩试样的上下端面不平行度小于 0.05mm。

2.2 高温处理

本实验采用马弗炉对砂岩试样进行高温处理。具体步骤如下：将砂岩试样分别在马弗炉中加热到 200℃、400℃、600℃和 800℃。为了避免热冲击的影响，加热速率为 5℃/min。保持温度到预设温度后，恒温 2h。然后在自然状态下冷却至室温。高温处理后使用 WSD-4 数字声测仪对高温后砂岩的波速进行测试。

2.3 单轴压缩试验

单轴压缩试验采用 DSZ-1000 岩石三轴试验机进行。单轴加载采用位移控制，加载速率为 0.1mm/min。通过轴压加载系统施加轴向压力，直至试件破坏后停止施加压力。

3 试验结果

3.1 波速结果

砂岩主要由石英、长石等矿物组成。在高温条件下，某些矿物可能发生相变或化学变化，这会改变岩石的密度和弹性模量，从而影响声波在岩石中的传播速度。高温可能导致砂岩内的孔隙结构发生变化，例如孔隙的闭合或扩展。孔隙率的变化会直接影响波速。高温可能使砂岩中的微裂纹和缺陷扩展或发展，导致波速的变化。裂纹的存在通常会降低波速，尤其是在声波传播的方向与裂纹方向不一致时。以上因素共同作用，使得在高温环境下砂岩的声波传播速度发生变化。因此，在进行地质勘探、地震波传播分析等领域时，温度变化对砂岩的波速影响是一个重要的考虑因素。

高温后砂岩的波速变化如图 1 所示。经过高温处理后，砂岩的波速随着温度的升高而降低。砂岩波速的变化表明，随着温度的变化，内部孔隙和裂缝膨胀，最终导致试样内部损伤。

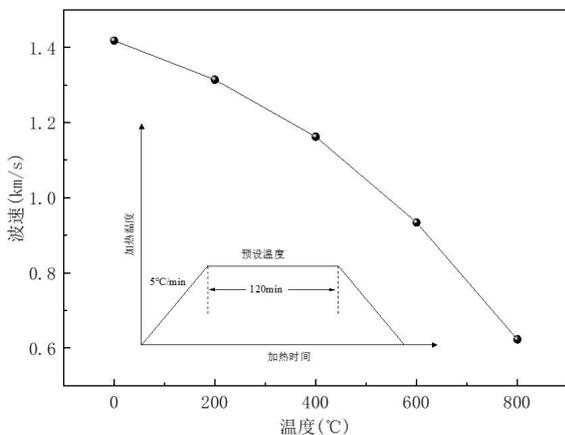


图 1 砂岩波速随温度变化曲线

虽然超声波波速度变化规律不能定量地解释岩石试样孔隙的变化，但可以解释岩石试样的损伤，损伤随着温度的升高而逐渐增加。即使将试样冷却到室温，损伤仍保持不变，说明高温处理造成的损伤是不可逆的。为了直观地描述砂岩在高温下的损伤变化。论文通过波速变化来定义损伤变量 D ，其计算公式如下：

$$D=1-v_n/v_0 \quad (1)$$

式中， D 为损伤变量， v_n 为高温处理后砂岩的波速， v_0 为对照组的砂岩波速。通过计算得到：200℃的损伤变量为 0.07，400℃的损伤变量为 0.18，600℃的损伤变量为 0.34，800℃的损伤变量为 0.56。处理温度为 200℃和 400℃后，损伤变量较小，说明在这个温度下砂岩的损伤较小。在 600℃和 800℃后，损伤变量剧烈增加，这表明砂岩的结构在这个温度下受到严重破坏。

3.2 力学性能

岩石的力学性能受到许多因素的影响，大致可分为内在因素和外在因素。外在因素包括岩石的矿物成分、岩石颗粒的排列方式以及内部结构、岩石的历史变形（如地质沉积和变质过程）及其在不同应力状态下的疲劳也会影响其当前的力学性能等。外在因素包括温度、加载速率、岩石所处的化学环境等。这些因素相互作用，决定了岩石在自然环境和工程应用中的力学行为。

不同温度处理后砂岩的应力应变曲线如图 2 所示。砂岩轴向应力应变曲线可分为：压实阶段、弹性变形阶段、裂纹生长阶段、不稳定裂缝发展阶段和峰后变形阶段。在第一阶段，试样的应力-应变曲线呈凹形和向上，呈非线性增加。许多研究表明，这种非线性变形与岩石中已存在的微裂缝的闭合有关。在第三阶段和第四阶段，封闭的裂纹随着载荷的增加而膨胀，形成新的裂纹，随着温度的升高和化学侵蚀，产生更多的裂纹。之后，试样达到峰值强度，进入峰值后变形阶段。如图 2 所示，随着轴向应力的持续加载，试样由脆性变为延展性。在 800℃时，砂岩的应力应变曲线与对照组的区别最大。说明此时温度对砂岩的结构改变最大。

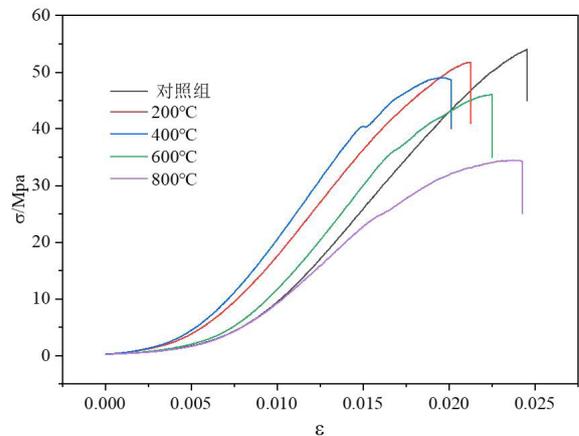


图 2 不同温度处理后砂岩的应力应变曲线

试验结果表明,砂岩的抗压强度随着温度的上升而下降。对照组的峰值强度为 54.9MPa, 200℃峰值强度为 51.7MPa, 400℃峰值强度为 48.7MPa, 600℃峰值强度为 46.1MPa, 800℃峰值强度为 34.7MPa。在 200℃时砂岩的强度降低 5.8%, 在 400℃强度降低了 11.3%, 在 600℃强度降低了 16.0%, 在 800℃强度降低了 36.8%。砂岩在 800℃时的强度相比于 600℃、400℃和 200℃时大幅度下降。这可能是 800℃条件下,砂岩中的主要矿物(如石英和长石)可能发生物理和化学变化。尤其是石英会相变,这种相变伴随着体积变化,可能导致内部应力集中,影响结构稳定性。随着温度继续升高,更多的矿物可能会开始发生变化,从而显著降低强度。不同矿物在加热时的热膨胀系数不同。随着温度升高,砂岩中的不同矿物膨胀程度不同,这种不匹配会导致内部应力的增加,进而可能导致微裂纹的产生和扩展,尤其是在 800℃时,这种效应更加明显。在高温下,砂岩中现有的微裂纹会因温度效应而扩展,或者新的微裂纹可能在应力作用下形成。高温使砂岩的断裂韧性降低,这使得裂纹更容易在外部负载下扩展,导致强度显著下降。

高温对砂岩的力学性能造成影响的原因与很多因素有关。砂岩由多种矿物组成,这些矿物在高温下会发生热膨胀。不同矿物的热膨胀系数不同,这会导致岩石内部产生热应力。如果这种应力超过了岩石的抗拉强度或抗剪强度,可能会导致微裂纹的形成或扩展,从而降低砂岩的力学强度。在高温条件下,砂岩中的某些矿物可能发生相变或分解。例如,石英在 573℃左右会发生 α - β 相变,这种相变伴随着体积变化,可能导致岩石的内部结构变得不稳定。此外,一些矿物可能在高温下分解成其他矿物或产物,这会改变砂岩的整体力学性能。高温会导致砂岩中的水分蒸发,从而改变其孔隙压力和孔隙率。水分的流失可能导致砂岩的结构更加脆弱,因为水的存在可以在一定程度上减缓裂缝的扩展并增强岩石的黏结力。水分蒸发后形成的孔隙会降低砂岩的整体强度。高温通常会降低砂岩的弹性模量,使其表现出更明显的塑性变形特征。这意味着砂岩在高温下更容易发生永久变形而不是恢复到原来的形状。这种变形不仅会影响砂岩的强度,还可能导致局部应力集中,进而引发破坏。高温环境下,砂岩中现有的微裂纹可能会扩展,或者新的裂纹可能会形成。这是因为高温会降低材料的断裂韧性,使其更容易在应力作用下发生裂纹扩展。此外,岩石在循环的温度变化(如昼夜温差)中可能会经历热疲劳,进一步降低其力学性能。高温可能加速砂岩的化学风化过程,特别是在与其他化学物质(如水、二氧化碳等)共同作用时。这些反应可能会导致砂岩的矿物成分发生变化,从而削弱其结构强度。

综上所述,高温通过影响矿物相变、热膨胀、水分含量、裂纹扩展等多个方面,显著改变了砂岩的力学性能。因此,

在高温环境下(如火山活动、地下深处工程、隧道掘进等),砂岩的力学性能通常会显著降低,必须在工程设计和施工中加以特别考虑。

4 结论

论文对砂岩进行了不同高温处理。对砂岩试样开展了超声波测试和单轴抗压强度测试。通过波速和应力应变曲线分析了高温后砂岩的损伤情况,主要结论如下:

①高温后砂岩的波速随着温度的升高而降低。通过波速变化来定义损伤变量 D , 在 800℃时损伤变量剧烈增加。

②砂岩的抗压强度随着温度的增加而下降,在 200℃时砂岩的强度降低 5.8%, 在 400℃强度降低了 11.3%, 在 600℃强度降低了 16.0%, 在 800℃强度降低了 36.8%。

研究高温后砂岩的波速变化和力学性能对工程实际具有重要意义,尤其在地下工程、地质灾害防治以及能源开采等领域中尤其突出。在矿山和隧道工程中,岩石常常暴露于高温环境,了解其力学性能的变化可以帮助预测和评估工程稳定性,防止塌方等安全隐患。此外,在地热能和深层油气开采中,岩石在高温条件下的物理属性变化直接影响资源的开采效率和储层稳定性,从而优化开采技术。与此同时,高温可能引发的地质灾害,如崩塌和滑坡等,通过对砂岩性能变化的研究,可以更好地预测风险并制定有效的预防措施。因此,全面研究高温后砂岩的波速变化和力学性能,不仅能够提高工程设计的安全性和实用性,还有助于优化资源利用并有效预防和减少地质灾害的发生。

参考文献

- [1] H.R. Rong, H.L. Wang, J.H. Fang, et al. Experimental study of influence of fire temperature change on sandstone structure of tunnel[J]. Ind. Saf. Environ. Protect, 2018, 44(8): 4-8.
- [2] G.S. Han, H.W. Jing, H.J. Su, et al. Effects of thermal shock due to rapid cooling on the mechanical properties of sandstone[J]. Environ. Earth Sci, 2019, 78(5): 146.
- [3] Luo N, Liang H, Shen T. temperature dependence of young's modulus of red sandstone[J]. THERMAL SCIENCE, 2019, 23(3A): 1599-1606.
- [4] Serdengecti S, Boozer G. The effects of strain rate and temperature on the behavior of rock subjected to triaxial compression[J]. The 4th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 1961(3): 61-83.
- [5] Liu S, Xu J. An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks[J]. Engineering Geology, 2015(185): 63-70.
- [6] 李长春, 付文生, 袁建新, 等. 考虑温度效应的岩石损伤[J]. 岩土力学, 1991, 12(3).
- [7] 吕超, 孙强, 邓舒, 等. 砂岩热物理性质的温度作用效应试验研究[J]. 地质与勘探, 2017, 53(4): 780-787.