

高温砂岩动态力学特性研究综述

陈星光

中国煤炭科工集团重庆设计研究院 重庆 400042

摘要: 深部地下工程岩体涉及高温、高应力环境问题,给工程实际带来不可预见的灾害。为认识高温条件下砂岩的动态压缩、拉伸、剪切特性,从高温条件下岩石静态力学试验出发,简要介绍高温砂岩在准静态力学特性,在此基础上进一步介绍高温岩石动力学试验系统:霍普金森压杆(SHPB)试验系统;并综合论述了诸多学者在砂岩动态压缩、拉伸、剪切特性研究成果,最后对高温岩石在围压作用下的研究提出展望。

关键词: 高温砂岩; 动态力学特性; 霍普金森压杆

Review on Dynamic Mechanical Properties of High-Temperature Sandstones

Xingguang Chen

Chongqing Design and Research Institute, China Coal Science and Industry Group, Chongqing 400042

Abstract: Deep underground engineering rock mass involves high temperature and high stress environment problems, which brings unforeseeable disasters to engineering practice. In order to understand the dynamic compression, tensile and shear characteristics of sandstone at high temperature, the quasi-static mechanical properties of high-temperature sandstone are briefly introduced based on the static mechanical test of rock at high temperature. On this basis, the high-temperature rock dynamic test system: Hopkinson pressure bar (SHPB) test system is further introduced. The research results of many scholars on the dynamic compression, tensile and shear characteristics of sandstone are comprehensively discussed. Finally, the prospect of the research on confining pressure of high-temperature rocks is put forward.

Key words: High-temperature sandstone; Dynamic mechanical properties; Hopkinson pressure bar

1. 引言

随着人类对深部资源探索开发,必然要面临深部岩体随着深度的增加温度升高的问题。特别是在能源、地质、采矿等领域中,深部采矿、高放射性核废料深埋处置、地热资源的开发利用、岩石地下工程灾后重建以及煤炭地下气化等工程的地质环境中涉及到高温动荷载下岩石的力学特性。高温引起的岩石工程安全问题已成为岩石力学研究的重要课题^[1-2]。高温岩石的力学行为不同于常温,其物理力学性能与温度密切相关。因此,研究高温后岩石的力学行为具有重要的理论和工程意义^[3-5]。

目前,已经对高温下岩石的力学性能进行了许多实验研究。在静态力学上,陈友亮等^[6]利用水力试验系统对花岗岩在 20° C 至 1000° C 后的力学性能进行了实验研究。得出了峰值应力,峰值应变和弹性模量的变化规律;通过回归分析得到了三种性质随温度变化的回归公式。苏承东^[7]等对细砂岩在 400° C 至 1000° C 下进行 X 射线衍射,电子显微镜扫描和单轴压缩试验,以及在高温下样品的

矿物成分,结构特征和力学参数之间的关系。研究结果表明,600 °C 是临界强度和变形温度。当高温超过 400 °C 时,峰值应变随温度的升高单调增加。Lü 等^[8]用高温炉将砂岩样品加热到 900° C,然后用液压万能试验机进行了巴西试验,以研究纵向波速,每单位厚度圆盘吸收的总能量以及质量损失率。研究表明,在 300° C 至 600° C 和 800° C 至 900° C 两个阶段,抗拉强度迅速降低,并且抗拉强度、纵波速度和吸收的总能量的变化趋势在两个温度阶段,单位厚度的磁盘都相似。Sun 等^[9]研究了高温加热下砂岩的导热系数,热扩散系数和热容量的变化。测试结果表明,从室温到 400° C,变化对应于附着水,混合水和结构水的蒸发。在 400° C 至 600° C 的阶段,特别是在 500° C 至 600° C 之间,砂岩中的矿物会发生热反应,表现为孔隙率增加,电导率降低和热量变化容量。

在动态力学方面,许金余等^[10]在 25° C 至 1000° C 的大理石上进行了冲击压缩试验,并比较了不同加载速率下大理石的峰值应力,峰值应变和弹性模量的变化规律。结果表明,高温下大理石的

峰值应力和峰值应变表现出明显的加载速率强化作用,而弹性模量加载速率的强化作用并不明显。尹士兵^[11]等在 25° C 至 800° C 的砂岩上进行了静态和动态试验;结果表明,随着温度的升高,砂岩的静态和动态力学性能发生明显变化。岩石的破坏模式是分裂破坏和拉伸破坏。峰值强度随温度的升高而降低,峰值应变随温度的升高而升高。Wang^[12]等在 25° C 至 1000° C 的温度范围内对砂岩标本进行了单轴动态压缩试验。研究表明,在 100° C 和 200° C 前后,砂岩试样的动态力学性能发生了显著变化。在 200° C 下,峰值应力和弹性模量下降,峰值应变迅速增加。另外,与室温相比,砂岩在高于 600℃ 的温度下的动态力学性能显著降低。平琦^[13]研究了在 25° C 至 1000° C 不同冲击载荷下砂岩的动态峰值应力,动态峰值应变,弹性模量动态以及试样破坏形式的变化规律。结果表明,动弹性模量随温度的升高而减小,破坏模式随温度的升高从脆性变为延性。Wu 等^[14]研究了砂岩在 25° C 至 1000° C 不同载荷率下的动态单轴压缩试验,结果表明,峰值强度和载荷率由二次多项式增加,峰应变和载荷率线性增加,并且动弹性模量在不同温度范围内变化很大。平琦等^[15]研究砂岩在 400° C 下进行 10 次高温循环作用后进行动力学试验,分析高温循环后砂岩的动力学特性以及能量耗散特性。

从以上结果可看出,岩石在高温条件下岩石的动态特性研究、微观上的损伤在宏观上的表现已有一定成果。目前而言,对于高温岩石的动力学特性研究通常是采用分离式霍普金森压杆(SHPB)进行试验研究,研究方向主要集中在无围压条件下的压缩特性的研究。由于不同岩石的物质组成和内部结构有所差异,不同的岩石在高温条件下的特性有所差异,本文就高温砂岩的动态力学特性研究,从试验方法、试验设备及试验研究成果三个方面阐述高温砂岩的单轴、三轴压缩特性、拉伸特性、剪切特性。

2. 高温岩石动力试验

2.1 试样制备

由于岩石内部存在各种微孔隙、裂隙等微观结构,不同的岩石因内部微观结构及成分的不同,导致在宏观性质的表现差异很大,因此,试验要求岩石取自同一块岩块。根据国际岩石动力学委员会的建议,用于冲击试验的圆柱试样直径为 50mm 左右,长径比为 0.5~1^[17],为满足 SHPB 试验中试件应力均匀性和减小惯性效应,试件长径比控制在 0.5 左右^[18]。

2.2 试样加热系统

岩石高温试验按照试验时的温度条件分为实时高温、高温后岩石特性试验,实时高温即保证试验过程中,试样的温度始终保持恒定的温度;而高温条件后的岩石高温试验是对试样进行一定高温条件的处理,再进行动力学试验。

实时高温下的动力学试验一般在试样安放的位置配备一个加热炉(如图 2-1)或在试样上缠上电阻丝,或者在高温电阻炉中加热后迅速转移到配有高温环境箱的入射杆和透射杆之间,再通过控温系统,控制试样温度恒定进行动态加载试验,SHPB 与试样会被同时加热。诸多结果证明,实时加热的方式由于高温条件对压杆的性质具有较大的影响,试验所得结果与岩石试样实际的特性偏差较大。

高温后岩石特性的研究是岩石在高温处理后再进行动力学试验,相对实时条件而言更容易实现,仅需要在预设温度处理相应的时间后,放入入射杆与透射杆之间进行动态压缩试验即可。但是由于试件与压杆之间存在温度梯度,会对试验结果产生一定的影响,目前而言,普遍忽略这一效应对试验结果产生的影响。

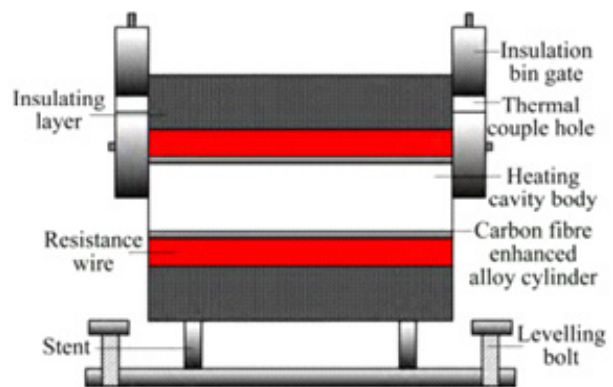


图 2-1 试件加热装置示意图^[19]



图 2-2 高温电阻炉^[13]

2.3 SHPB 试验系统

配有加热装置的分离式霍普金森压杆（如图 2-3）与配有保温装置的 SHPB（如图 2-4）实验系统。前者主要由主轴冲头、发射腔、气枪、入射杆、透射杆、吸收杆组成。还包括数据处理设备、信号记录设备、轴向压力加载设备，加热装置和温度-压力耦合设备。后者与前者的不同点在于加热装置是一个高温环境箱，作用是为高温试件在转移安装过程中热量损失提供温度补偿，保证高温 SHPB 试验时试件环境温度维持在预设温度值，同时防止冲击过程中试件碎块的飞出，保证试验安全。杆件由高强度合金制成，目前常见的 SHPB 主要适用于 50mm 直径试样的动力学特性研究。

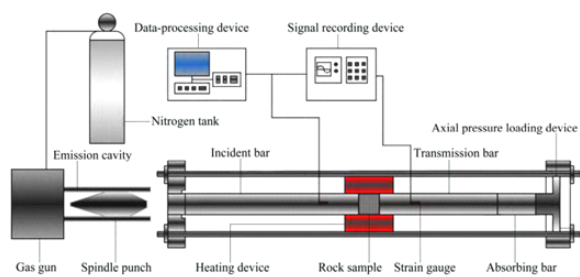


图 2-3 实时高温 SHPB 装置^[19]

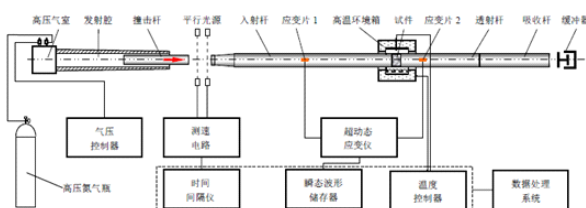


图 2-4 含保温装置的 SHPB^[13]

3 高温砂岩动态力学特性研究进展

3.1 动态压缩特性研究

受到试验设备的限制，目前高温岩石的压缩特性仅限于单轴条件下的压缩试验。诸多学者^[11, 13, 21, 22]经过大量试验得到高温砂岩在不同温度、不同冲击载荷下的应力-应变曲线，与准静态试验结果类似存在四个阶段：初始压实阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段、破坏阶段，但是由于应变需要一定的时间，在试样还未被压实时载荷已撤除，初始压实阶段并不明显。砂岩强度在 200℃左右存在一个阈值（如图 3-1），这是因为岩石存在大量微孔隙，热膨胀作用使试样中的微孔隙闭合，增大了岩石颗粒间的摩擦力，从而使试样强度增大；当高于这个阈值时，高温使内部某些物质熔化，试样强度降低，温度增加至 1000℃时，降低效应尤为显著。随着温度的增加，

试样的峰值应变也随之增加，在温度较高时这一特点极为显著；动态弹性模量随温度的增加整体呈减小趋势。冲击载荷对试样的峰值应力具有明显的强化效应，特别是在温度较低的情况下。

综上所述，对于单轴条件下的高温砂岩压缩特性研究成果颇多，也有部分岩石表现出类似的特征，对涉及到高地应力、高温条件下岩土工程的研究具有一定的意义。但是在实际的工程中，岩石的受力状态往往是三轴应力状态，研究该状态下的砂岩动力学特性才能为工程实际提供更为准确的理论支撑。目前而言，真三轴围压 SHPB 试验系统已研制完成，但是对于高温这一条件尚未有较好的解决办法，高温条件在岩石动力学应用上问题的解决，对高温岩石动力学特性的研究具有极为重要的推动作用。

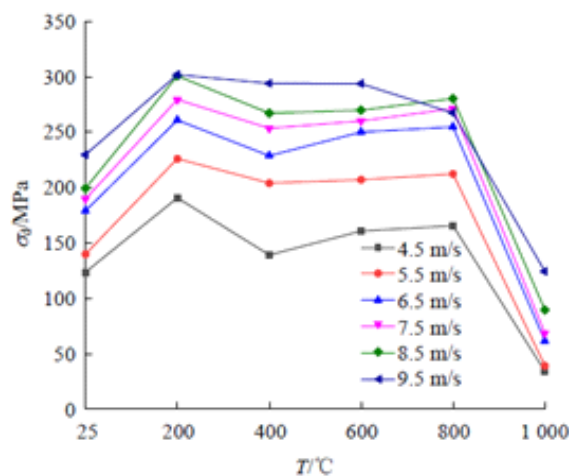


图 3-1 不同加载速率下峰值强度与温度的关系^[13]

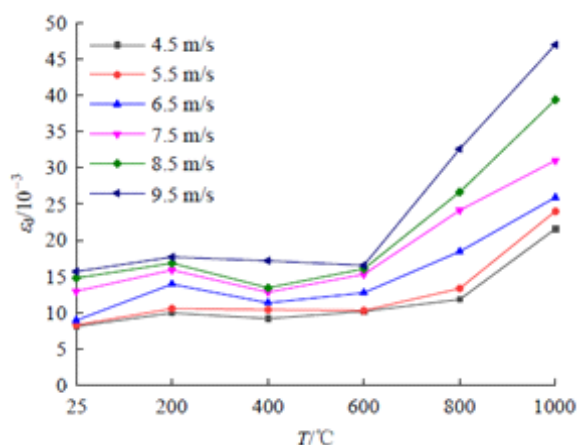


图 3-2 不同加载速率下峰值应变与温度的关系^[13]

3.2 动态拉伸特性研究

岩石的动态拉伸研究的成果较少，通常是采用 SHPB 对岩石试样进行动态拉伸试验研究。尹士兵^[23]分别采用巴西圆盘动态劈裂试

验与半圆盘三点弯矩动态拉伸加载试验,吴明静^[23]等对高温砂岩进行动态劈裂拉伸试验,得出高温砂岩动态拉伸强度是静态拉伸强度的2~3倍,且与加载速率呈线性增长趋势;在同一加载速率下与动态压缩特性类似,砂岩动态拉伸强度在200℃左右存在阈值,当低于该阈值时,动态拉伸强度随着温度的升高而增加;当高于该阈值时,动态拉伸强度减小。

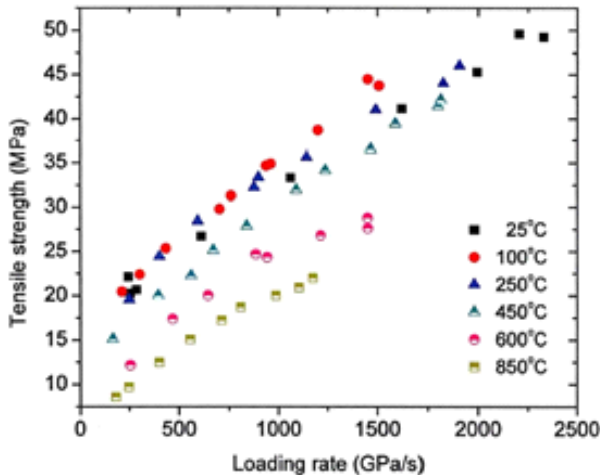


图 3-3 不同加载速率下拉伸强度与温度的关系^[23]

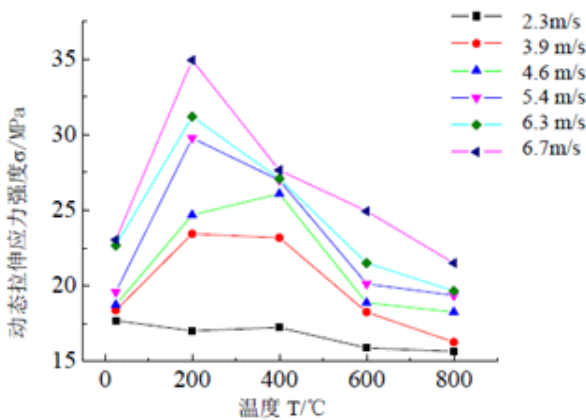


图 3-4 不同加载速率下拉伸强度与温度的关系^[23]

3.3 动态剪切特性研究

目前尚无高温岩石动态剪切特性的试验研究,仅有少数在常温条件下岩石的动态剪切特性研究。Ying Xu 等^[24]在采用常规 SHPB 作为加载设备进行动态冲剪实验,得出常温砂岩在不同围压条件下,剪切应力于加载速率之间的关系(如图 3-5):砂岩动态剪切强度与加载速率呈线性增长的关系,并且围压的作用对岩石的动态抗剪强度具有明显的强化效应。随着动态剪切设备的研发,高温条件下岩石的动态剪切特性研究不失为一个良好的研究方向。

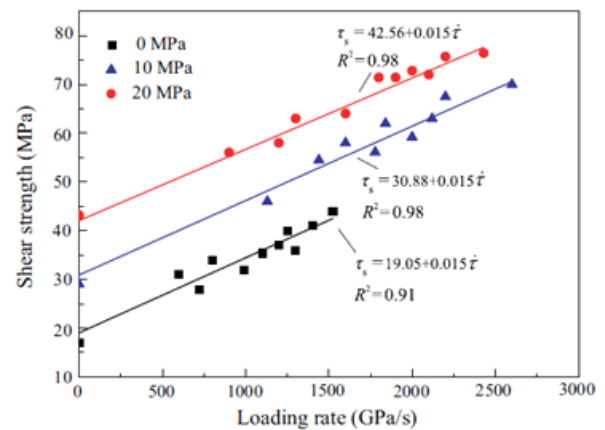


图 3-5 不同围压下剪切强度与加载速率的关系^[24]

4 总结展望

本文基于学者对砂岩开展的动态力学特性研究,简要介绍了岩石动力学试验设备及试验方法,着重介绍了高温砂岩在 SHPB 不同冲击载荷作用下压缩、拉伸、剪切特性,得出动载荷作用对砂岩的压缩、拉伸、剪切均具有强化效应,即相同条件下,岩石的动载荷强度高于岩石的静载荷强度,并且加载速率对砂岩强度也具有强化相应;温度对砂岩动态抗压、抗拉强度影响存在阈值,强度随着温度的升高先增大后减小。

虽然在岩石动力学特性的研究已经有了很多成果,但大多集中在无围压、常温条件下的抗压和抗拉强度的研究。但是在实际的工程应用中,往往伴随着围压的作用,且岩石的破坏以拉剪破坏为主,研究围压作用下高温岩石的动态拉剪特性具有重大的工程指导意义。目前真三轴围压条件下的岩石动力学试验设备已研发完成,但是面为围压设备是否能保证高温条件下正常运行还有待商榷,因此对于实时高温条件岩石的真三轴动力学特性研究还有一定的差距,仍需进一步研发或者进一步研究温度对设备的影响,以解决实际工程中高温岩石动力学特性研究的难题。

参考文献:

- [1]S. Liu and J. Xu, "Investigation of impact compressive mechanical properties of sandstone after as well as under high temperature," High Temperature Materials and Processes, vol. 33, no. 6, pp. 585-591, 2014.
- [2]W. Yao, Y. Xu, W. Wang, and P. Kanopolous, "Dependence of dynamic tensile strength of longyou sandstone on heat-tre

- atment temperature and loading rate,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49, no. 10, pp. 3899–3915, 2016.
- [3]曹丽丽, 浦海, 仇陪涛, 张连英. 基于函数阶微积分的泥岩高温蠕变特性分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34 (01): 148–154.
- [4]R. Lei, Y. Wang, L. Zhang et al., “The evolution of sandstone microstructure and mechanical properties with thermal damage,” *Energy Science & Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 3058–3075, 2019.
- [5]S. Liu and J. Xu, “Effect of strain rate on the dynamic compressive mechanical behaviors of rock material subjected to high temperatures,” *Mechanics of Materials*, vol. 82, pp. 28–38, 2015.
- [6]陈有亮, 邵伟, 周有成. 高温作用后花岗岩力学性能试验研究[J]. *力学季刊*, 2011, 32 (03): 397–402.
- [7]苏承东, 韦四江, 秦本东, 杨玉顺. 高温对细砂岩力学性质影响机制的试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38 (03): 623–630.
- [8]C. Lü, Q. Sun, W. Zhang, J. Geng, Y. Qi, and L. Lu, “The effect of high temperature on tensile strength of sandstone,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 111, pp. 573–579, 2017.
- [9]Q. Sun, C. Lü, L. Cao, W. Li, J. Geng, and W. Zhang, “Thermal properties of sandstone after treatment at high temperature,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 85, pp. 60–66, 2016.
- [10]许金余, 刘石. 加载速率对高温后大理岩动态力学性能的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35 (05): 879–883.
- [11]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*, 2012, 31 (2): 273–279.
- [12]P. Wang, J. Y. Xu, S. Liu et al. “Research on dynamic mechanical properties of sandstone at high temperature,” *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, vol. 34, no. 2, pp. 203–208, 2013.
- [13]平琦, 吴明静, 袁璞, 张欢. 冲击载荷作用下高温砂岩动态力学性能试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38 (04): 782–792.
- [14]M. J. Wu, Q. Ping, and H. Zhang, “Experimental study of effects of loading rates on sandstone dynamic mechanical properties at high temperature,” *Science Technology and Engineering*, vol. 18, no. 24, pp. 281–287, 2018.
- [15]X. H. Ni, X. J. Li, and D. W. Huang, “Uniaxial compression tests on mechanical properties of marble after undergoing different numbers of temperature cycling,” *Journal of Hydroelectric Engineering*, vol. 35, no. 9, pp. 95–100, 2016.
- [16]ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and Mode I fracture toughness of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49 (1): 105–112.
- [17]平琦. 煤矿深部岩石动态力学特性试验研究及其应用[博士学位论文][D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [18]尹士兵, 李夕兵, 叶洲元, 宫凤强, 周子龙. 温-压耦合及动力扰动下岩石破碎的能量耗散[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32 (06): 1197–1202.
- [19]Tu-bing YIN, Rong-hua SHU, Xi-bing LI, Pin WANG, Long-jun DONG. Combined effects of temperature and axial pressure on dynamic mechanical properties of granite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26 (8).
- [20]范超, 余克服, 孟庆山, 曾卫星. SHPB 在岩石动态力学性能测试中的应用成果综述[J]. *土工基础*, 2018, 32 (05): 552–558.
- [21]尹士兵, 李夕兵, 宫凤强, 周子龙, 高科. 温压耦合作用下岩石动态破坏过程和机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31 (S1): 2814–2820.
- [22]尹士兵. 考虑温度效应的岩石动力学特性研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [23]吴明静. 高温状态下岩石的动态力学特性试验与研究[D]. 安徽理工大学, 2018.
- [24]Ying Xu, Wei Yao, Kaiwen Xia, Hamed. O. Ghaffari. Experimental Study of the Dynamic Shear Response of Rocks Using a Modified Punch Shear Method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52 (8).