文章编号：1001-1455(2014)02-0195-07

经历不同高温后砂岩的动态力学特性实验研究*

陈腾飞[1,2]，许金余[1,3]，刘 石[1]，王 鹏[1]，方新宇[1]

(1. 空军工程大学工程学院机场建筑工程系，陕西 西安 710038；
2. 中国人民解放军 91531 部队，海南 三亚 572000；
3. 西北工业大学力学与土木建筑学院，陕西 西安 710072)

摘要：运用 RX3-20-12 型箱式电阻炉将砂岩试样分别加热至 100、200、400、600、800 和 1 000 ℃，然后自然冷却至常温，制成经历不同温度的砂岩试件。运用直径为 100 mm 的分离式 Hopkinson 压杆装置，用薄圆形紫铜片作为波形整形器，以不同弹速轴向冲击砂岩试样，测试经历不同温度后砂岩试样在不同冲击荷载下的动态力学性能，得出了砂岩的应力-应变曲线及各自的破坏形态。结果表明：常温下砂岩的动态压缩破坏的应力-应变曲线具有明显的 4 阶段特征，但经历 100～400 ℃作用的砂岩应力-应变曲线的平台段消失，温度继续升高时平台段又重新出现；砂岩的峰值应变随温度升高而升高，动态压缩强度也随温度升高而升高，但在 800 ℃以后陡然下降；砂岩的动态压缩破坏形态受温度和冲击荷载的共同影响，冲击荷载越大破碎程度越大，而且破坏过程总是由外层向内芯发展。

关键词：固体力学；应力-应变曲线；SHPB；砂岩；破坏形态；高温

中图分类号：O346.5；TU45　　**国标学科代码**：1301540　　**文献标志码**：A

地热是岩体赋存的地质环境中重要的因素之一，温度是影响岩石力学性质的重要因素。温度对岩石的作用主要表现在两个方面，一方面是物理化学作用，使岩石风化，力学性质蜕化，另一方面表现在温度变化引起热应力的物理作用上[1]。实际工程中，也会经常遇到井下煤与瓦斯爆炸、岩石地下工程火灾后重建等情况，这些都不可避免地涉及高温及冲击荷载条件下岩石的强度及变形特性，相关力学参数是地下工程火灾后围岩稳定性分析、修复加固支护设计等方面不可或缺的基本依据。

在高温后岩石的静态物理力学参数测定、变形机制、岩石破坏准则、本构关系、热裂化及岩石损伤破坏机制等方面，已有了大量实验研究和理论探讨[2-7]，关于岩石动态冲击荷载下的研究也比较多[8-11]，但针对岩石高温后的动态力学性能的研究却较少。

本文中，将选取地质工程中比较常见的砂岩，采用∅100 mm SHPB 实验装置，研究经历不同温度后的砂岩在不同冲击荷载作用下的动态力学性能。对 SHPB 实验数据进行处理，得出砂岩在冲击荷载作用下的应力-应变曲线，对砂岩试样不同温度不同冲击荷载下的破坏形态进行详细的对比分析。

1 实 验

1.1 砂岩试样

试样取自陕西省秦岭太白山区的天然砂岩，砂岩呈灰白色，具体矿物组成分别为：w(石英)=52%，w(方解石)=27%，w(斜长石)=8%，w(钾长石)=6%，w(蒙脱石)=1%，w(绿泥石)=2%，w(伊利石)=3%，w(白云石)=1%。试样经 ZS-100 型立式取芯机取样、DQ-1 型岩石切割机切割、SHM-200 型双端面磨石机端面打磨等专业岩石加工工序精加工而成。为了满足 SHPB 实验中试件应力状态均匀性的假定，并减少由试件厚度引起的惯性效应和端面摩擦效应，参考相关文献[12-15]，确定试件的最佳尺寸，最终采用∅100 mm×50 mm 的圆柱体，长径比为 0.5。

* **收稿日期**：2012-09-24；**修回日期**：2012-11-13
基金项目：国家自然科学基金项目(51078350，51378497)
作者简介：陈腾飞(1989—)，男，博士研究生。

根据 JTG E41-2005《公路工程岩石试验规程》,采用电液伺服压力机对砂岩的基本力学性能进行单轴抗压强度实验、劈裂抗拉强度实验及岩石软化系数的测定。通过实验确定,该批砂岩的平均密度为 2.596 g/cm^3,单轴抗压强度为 59.69 MPa,劈裂抗拉强度为 4.02 MPa,软化系数为 0.794 6。

1.2 高温处理

试件的加热设备采用武汉华中电炉设备有限公司的 RX3-20-12 型箱式电阻炉,该设备由高温炉和温度控制器组成,如图 1 所示,设计最高温度为 1 200 ℃。根据实验设计,将试件按温度分为 7 组,每组 7 个试样,常温试件不作处理,将 100、200、400、600、800 和 1 000 ℃这 6 个不同温度等级下的试件分别加热至相应温度后恒温 3 h,升温速率为 10 ℃/min,然后自然冷却至常温,制成经历不同温度后的砂岩试样。

1.3 SHPB 实验

∅100 mm SHPB 设备主要由主体设备、能源系统、测试系统等 3 大部分组成,如图 2 所示。系统压杆直径为 100 mm,入射杆长为 4 500 mm,透射杆长为 2 500 mm,撞击杆长为 500 mm,弹性模量为 210 GPa,密度为 7 850 kg/m^3,理论波速为 5 172 m/s,实测波速为 5 200 m/s。使用灯距 100 mm 的激光测速仪测量撞击速度。为减少压杆与试件的接触面之间的摩擦效应,在试件的两端面上均匀涂抹了用润滑油和石墨配置的润滑剂。通过测量入射杆和透射杆上应变片的电压,可计算试件的应力、应变率和应变等动态力学参数[16]。选用屈服强度较低的 T2 紫铜作为波形整形器[13,17-18]。针对每个温度等级下的砂岩试样进行 7 次实验,弹速设计为 11、12、13、14 和 15 m/s,其中弹速实验不理想的则用余下的 2 个试件做补充实验。



图 1 箱式电阻炉

Fig. 1 Box-type resistance furnace

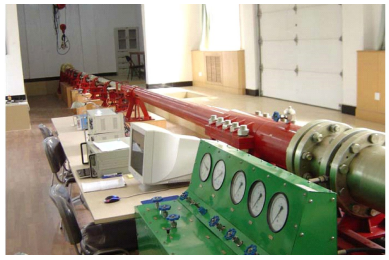


图 2 ∅100 mm SHPB 实验装置

Fig. 2 Apparatus of 100-mm-diameter SHPB

2 结果及分析

2.1 应力-应变曲线

根据 SHPB 实验系统所采集的数据,得出 7 个温度等级下砂岩试件在 5 个设计弹速下的应力-应变曲线,如图 3 所示。

当温度等级为 25 ℃时,砂岩动态压缩破坏具有明显的 4 阶段特征,即弹性阶段、平台阶段、屈服阶段和破坏阶段,而初始弹性阶段只占很小一部分。而且在峰前,不同弹速下的应力-应变曲线能较好重合,说明这时砂岩对外界冲击荷载的反应比较一致,砂岩整体具有较好的线弹性。在峰后,应力-应变曲线变化则与弹速密切相关,当弹速较小时,试件破坏后有较大的留芯,在应力-应变曲线中表现出明显的回弹现象;当弹速较高时,砂岩试件完全破碎,破坏过程中随着应力的不断降低,变形仍能持续增加。

当温度等级为 100～400 ℃时,砂岩试样动态压缩破坏应力-应变曲线的平台阶段消失,而是由弹性阶段直接进入到屈服阶段,2 个阶段的临界点处存在明显的拐点,屈服阶段的应力-应变曲线迅速变陡,表现为弹性模量增大;由峰后应力-应变曲线发现,在弹速 11～14 m/s 时,试件破坏都具有回弹,且随温度的升高,回弹更加明显,对比常温下回弹只发生在 11～12 m/s 的情况,说明在这一温度范围内,砂岩的动态抗压强度随温度的升高而增强。

当温度等级为 600～1 000 ℃时,应力-应变曲线又开始重新出现平台段,且平台段长度先随温度的升高而增大,800 ℃以后又开始随温度升高而减小,屈服阶段的应力-应变曲线变陡,600 ℃时最陡。

总体而言，除了 1 000 ℃时的峰值应力迅速减小，砂岩动态压缩破坏的峰值应力、峰值应变都随温度的升高而增大，随弹速的增大，峰值应力、峰值应变也增大。

对比峰后破坏阶段无回弹现象的应力-应变曲线，随着温度的升高，破坏阶段的应力-应变曲线变陡，说明破坏段的应变变化越来越小，破坏过程呈现为随温度升高而变短的趋势。

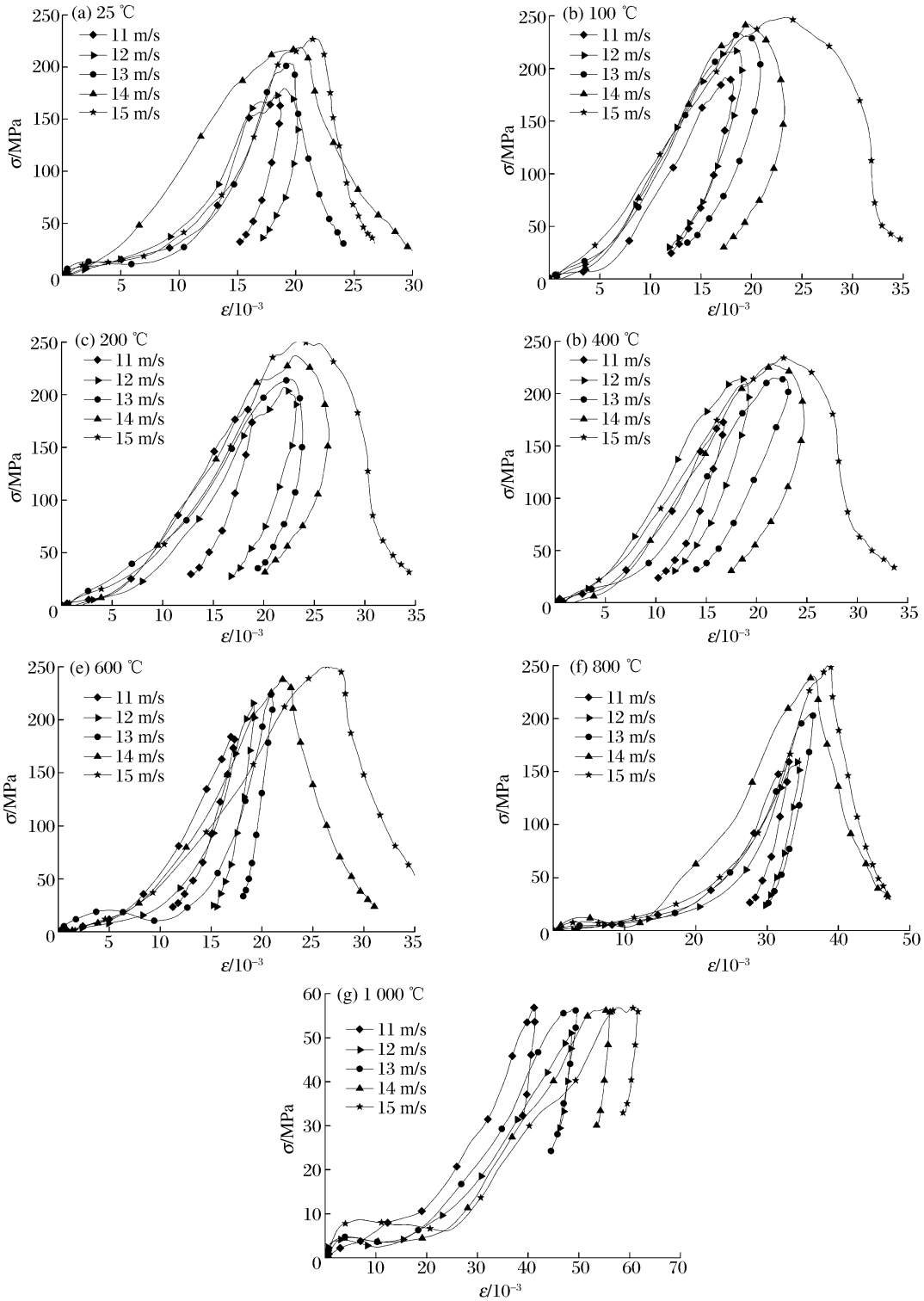


图 3　砂岩的应力-应变曲线

Fig. 3　Stress-strain curves of sandstone

2.2 破坏形态

图 4 为砂岩经历不同温度后在不同弹速下的破坏形态，对比各个温度等级、各个弹速的破坏形态差异，可以发现：(1)同一温度等级下，砂岩试样随着弹速的增加破坏越来越严重；(2)同一弹速下，在 25～800 ℃范围，随着温度的升高，砂岩破坏后的留芯有增大趋势，特别是在 11、12 和 15 m/s 时最明显，这也说明在这个温度范围砂岩的抗冲击能力随温度升高而增强；(3)在 1 000 ℃时，砂岩虽有一定的强度，但内部损伤已经很严重，一旦承受冲击荷载，整个砂岩结构将发生全局脆性破碎；(4)随着温度的升高，

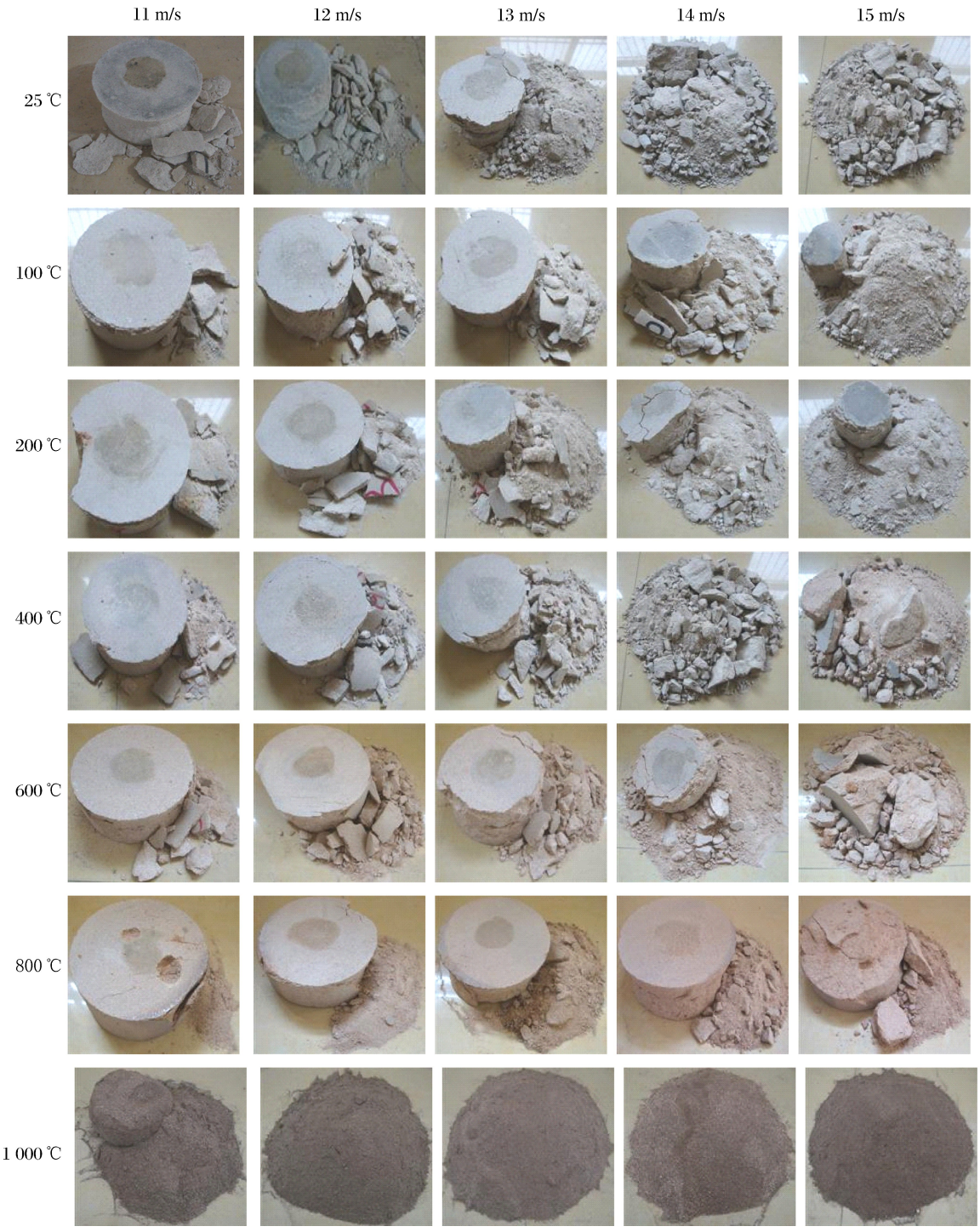


图 4 砂岩的破坏形态

Fig. 4 Failure modes of sandstone samples

砂岩破坏后的剥落碎片的破碎程度越来越严重，温度越高，破碎后的粉末状程度越明显；(5)随着所经历温度的升高，砂岩表面颗粒变细，砂岩的颜色加深，600 ℃以后开始变为暗黄色，1 000 ℃时变为黄褐色，说明温度升高已使砂岩内部矿物质发生了化学变化；(6)砂岩的动态压缩破坏总是由外向内发展的，弹速较小时，外层剥落破碎，内芯完整，弹速增大时外层破碎成小块，内芯裂成大块。

3　讨　论

实验中，为了研究经历不同温度后砂岩对冲击荷载的动力响应，设计了不同的温度等级和弹速，弹速主要控制冲击荷载的大小，使砂岩发生不同程度的破坏。得出了不同温度等级下砂岩在不同弹速下的应力-应变曲线，并对破坏后的形态进行比较。虽然岩石类材料的组成成分和结构都不具有完全均一性，并且试样加工精度和仪器误差等也有影响，个别数据有一定离散性，但总体而言，实验数据比较理想，存在较强的规律性。

天然的地壳结构是通过建造和改造形成的，天然的岩石内部存在着许多随机分布的微裂隙。随着温度的升高，岩石产生热熔变形，矿物颗粒受热膨胀，原生的微裂隙闭合，裂隙数量减少，从而改善矿物颗粒之间的接触状态，摩擦特性增强，试样的承载能力得到强化。但另外，随着温度的升高，岩石内部孔隙的自由水和结合水蒸发，产生蒸压，内部产生损伤积累。当温度升高到一定程度后，高温也会引起岩石内部矿物结构的化学反应，起到煅烧作用，使某些原生的矿物质分解，强度丧失。可见，温度对岩石的物理力学性质的影响是多方面的，不同温度条件下所起到的作用也是不同的。通过实验可以发现，在 100～400 ℃时，温度的主要作用是引起砂岩试样的微裂隙闭合，使结构密实，因为这一阶段的应力-应变曲线没有了平台段，也就是跳过了塑性压密阶段直接进入屈服强化阶段。而在 400～800 ℃时，平台段又出现了，这主要是因为砂岩矿物颗粒的不同热膨胀率引起了跨颗粒边界的热膨胀不协调，从而引起结构热应力，试样内部结构热应力过大会产生新的微裂隙，同时胶结物刚度降低，水分的蒸发及过度的膨胀使结构变脆。而且温度继续升高时，颗粒间或颗粒内应力将进一步增大，砂岩内部产生更多微裂隙或原生裂纹扩展、加宽和连通，表现为砂岩在冲击荷载下经过很短的弹性阶段就进入到了塑性压实段。在 1 000 ℃以后，砂岩内部水分基本蒸发，矿物颗粒部分分解，内部热应力引起的扩展裂纹迅速发展，颗粒间的胶结状态极差，结构变得松散，直接表现为冲击荷载作用下的强度迅速降低，试样经过屈服阶段后迅速破坏，并碎成粉末状。

4　结　论

运用∅100 mm SHPB 实验装置对经历不同温度的砂岩进行了冲击压缩实验，得出了砂岩试样在不同温度等级不同弹速(冲击荷载)下的应力-应变曲线关系，并分析了砂岩试样的破坏形态规律。

(1)常温下砂岩的动态压缩破坏的应力-应变曲线具有明显的 4 阶段特征，即弹性阶段、平台阶段、屈服阶段和破坏阶段。

(2)在 100～400 ℃时，温度的作用使砂岩内部微裂隙闭合，结构密实，整体具有良好的弹性，应力-应变曲线的平台段消失，在 400～800 ℃时，热应力又会引起新的裂隙产生，应力-应变曲线的平台段将会重新产生，并且屈服段的曲线变陡。

(3)在 800 ℃以前，温度的升高可以使砂岩的动态抗压强度提高，冲击荷载作用下，应力峰值、应变峰值都随温度的升高而增大，800℃以后，砂岩内部的损伤积累，新的裂隙产生，结构变脆，动态抗压强度迅速降低，但总体仍表现为砂岩在冲击荷载下的变形能力随温度升高而增大。

(4)砂岩的动态压缩破坏总是由外向内发展的，冲击荷载越大破碎程度越大，冲击荷载较小时，外层剥落破碎，内芯仍能保持完整，冲击荷载增大时外层破碎成小块，内芯裂成大块，外层仍较严重破坏。

(5)温度对岩石动态压缩性能的影响是多方面的，较低温度时能使岩石内部微裂隙闭合，强度提高，较高温度时会使岩石内部水分蒸发，结构变脆，产生热应力引起新的裂隙，矿物颗粒的胶结能力变弱，强度降低。

参考文献:

[1] 孙光忠,孙毅. 岩体力学原理[M]. 北京:科学出版社,2011.

[2] 何国梁,吴刚,黄醒春,等. 砂岩高温前后超声特性的试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(4):779-784.
He Guo-liang, Wu Gang, Huang Xing-chun, et al. Experimental study on ultrasonic properties of sandstone before and after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(4):779-784.

[3] 邱一平,林卓英. 花岗岩样品高温后损伤的试验研究[J]. 岩土力学,2006,27(6):1005-1010.
Qiu Yi-ping, Lin Zhuo-ying. Testing study on damage of granite samples after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(6):1005-1010.

[4] 杜守继,马明,陈浩华,等. 花岗岩经历不同高温后纵波波速分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1803-1806.
Du Shou-ji, Ma Ming, Chen Hao-hua, et al. Testing study on longitudinal wave characteristics of granite after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(11):1803-1806.

[5] 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.
Du Shou-ji, Liu Hua, Zhi Hong-tao, et al. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(14):2359-2364.

[6] 支乐鹏,许金余,刘军忠,等. 花岗岩高温后的超声特性及力学性能研究[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(4):716-721.
Zhi Le-peng, Xu Jin-yu, Liu Jun-zhong, et al. Research on ultrasonic characteristics and mechanical properties of granite under post-high temperature[J]. Chinese Journal of Underground Space Engineering, 2012,8(4):716-721.

[7] 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.
Zhu He-hua, Yan Zhi-guo, Deng Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, granite and breccia after high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(10):1945-1950.

[8] 许金余,吕晓聪,张军,等. 围压条件下岩石循环冲击损伤的能量特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):4159-4165.
Xu Jin-yu, Lü Xiao-cong, Zhang Jun, et al. Research on energy properties of rock cyclical impact damage under confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(2):4159-4165.

[9] 单仁亮,陈石林,李宝强. 花岗岩单轴冲击全程本构特性的试验研究[J]. 爆炸与冲击,2000,20(1):32-37.
Shan Ren-liang, Chen Shi-lin, Li Bao-qiang. Experimental study of granite constitutive properties under uniaxial impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(1):32-37.

[10] 许金余,吕晓聪,张军,等. 循环冲击作用下围压对斜长角闪岩动态特性的影响研究[J]. 振动与冲击,2010,29(8):60-63;72.
Xu Jin-yu, Lü Xiao-cong, Zhang Jun, et al. Fast algorithm for calculation of structural dynamic response in frequency domain under one-dimensional distributed random load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(8):60-63;72.

[11] 刘石,许金余,刘军忠,等. 绢云母石英片岩和砂岩的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(9):1864-1871.
Liu Shi, Xu Jin-yu, Liu Jun-zhong, et al. SHPB experimental study of sericite-quartz schist and sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(9):1864-1871.

[12] 陶俊林. SHPB 实验技术若干问题研究[D]. 四川:中国工程物理研究所,2005.

[13] 李为民,许金余,沈刘军,等. ∅100 mm SHPB 应力均匀及恒应变率加载试验技术研究[J]. 振动与冲击,2008,27(2):129-132.
Li Wei-min, Xu Jin-yu, Shen Liu-jun, et al. Study on 100-mm-diameter SHPB techniques of dynamic stress equilibrium and nearly constant strain rate loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008,27(2):129-132.

[14] 陶俊林,陈裕泽,田常津,等. SHPB 系统圆柱形试件的惯性效应分析[J]. 固体力学学报,2005,26(1):107-110.
Tao Jun-lin, Chen Yu-ze, Tian Chang-jin, et al. Analysis of the inertial effect of the cylindrical specimen in SHPB

system[J]. Acta Mechanica Solid Sinica, 2005,26(1):107-110.
[15] Davies E D H, Hunter S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1963,11(3):155-179.
[16] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
[17] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2002,42:93-106.
[18] Chen W, Lu F, Frew D J. Dynamic compression testing of soft materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002, 69(3):214-223.

Experimental study on dynamic mechanical properties of post-high-temperature sandstone*

Chen Teng-fei[1,2], Xu Jin-yu[1,3], Liu Shi[1], Wang Peng[1], Fang Xin-yu[1]
(1. *Department of Airfield and Building Engineering, Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an* 710038, *Shaanxi, China*;
2. *Unit* 91531 *of PLA, Sanya* 572000, *Hainan, China*;
3. *School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *Shaanxi, China*)

Abstract: The sandstone samples were heated at the rising temperature rate of 10 ℃/min from 25 ℃ to 100, 200, 400, 600, 800 and 1 000 ℃, respectively, by using a RX3-20-12 box-type resistance furnace. They were being kept at the corresponding temperatures for 3 h. Then the heated sandstone samples were naturally cooled to 25 ℃. All the sandstone samples were divided into seven groups according to the temperatures undergone by them. By using a thin red copper circular plate as the pulse shaper, the sandstone samples were impacted by the different-velocity projectiles driven by a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar setup. And the stress-strain curves of the sandstone samples subjected to impact were obtained as well as their failure modes. Experimental results show that the stress-strain curves of the sandstone samples at constant temperature obviously take on four stages, but the platform stages disappear in the stress-strain curves of the sandstone samples undergoing 100 −400 ℃ and they appear again when the temperatures undergone by the sandstone samples continue to rise. As the temperatures undergone by the sandstone samples rise, their peak strains and stresses increase; but when the temperatures undergone exceed 800 ℃, the peak stresses fall suddenly. The impact load and the heat temperature can affect the failure mode of sandstone, the break degree increases with the increasing of the impact load and the damage develops from the outer of sandstone to the core.

Key words: solid mechanics; stress-strain curve; SHPB; sandstone; failure mode; post-high temperature

* Received 24 September 2012; Revised 13 November 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51078350,51378497)
Corresponding author: Xu Jin-yu, jyx369@yeah.net

(责任编辑　丁　峰)