

文章编号:1001-4888(2020)04-0695-07

## 不同温压超临界 CO<sub>2</sub> 气爆喷孔 冲击应力变化规律实验研究<sup>\*</sup>

孙可明<sup>1,2</sup>, 周航<sup>2</sup>, 谢萌<sup>2</sup>, 冀洪杰<sup>2</sup>, 陈帅<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学 理学院, 山东青岛 266520; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:** 为研究不同温压条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆过程中气爆管喷孔喷射的爆生气体对被爆物体产生的冲击应力变化规律, 自主设计了超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验系统及数据采集装置, **实验得到了在不同初始温度和压力下对称双喷孔喷射的超临界 CO<sub>2</sub> 气爆爆生气体冲击应力变化规律**: 喷孔喷出的爆生气体作用于被爆物体的冲击应力经历应力激增、应力剧减和应力减速衰减三个阶段。冲击应力时程变化曲线呈脉冲波形曲线特征, 且冲击应力衰减阶段持续时间大于冲击应力激增持续时间。冲击应力随初始温度和初始压力的增大而增加, 初始压力变化引起的气爆冲击应力变化比初始温度变化明显, 增大超临界态 CO<sub>2</sub> 的初始压力提高气爆冲击应力优于提高超临界态 CO<sub>2</sub> 的初始温度。最后得到了冲击应力峰值  $P_{\max}$  与初始温度  $T$  和初始压力  $P$  的关系  $P_{\max} = aT + bP + C$ 。

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆; 爆生气体; 冲击应力; 喷孔

中图分类号: TD8

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-19-010

### 0 引言

随着爆破需求及爆破环境的多样化, 如高瓦斯煤矿工作面坚硬顶板切顶、石门揭煤、井下煤仓解堵; 水泥、钢铁、电力等行业中的旋窑、炉窑钢渣等设备设施的清堵; 城市热电厂垃圾燃烧炉的结块解堵处理等, 传统炸药爆破技术受到限制, 寻找一种高效、安全、清洁的高能气体爆破技术显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。因此超临界 CO<sub>2</sub> 气爆技术应运而生, 该技术的主要原理是将耐高压气爆管中的液态 CO<sub>2</sub> 通过激发放热材料使其变成超临界状态, 通过卸能机构控制管内初始压力, 气爆管对称喷孔产生急剧膨胀的高压爆生气体, 利用其冲击作用对被堵物体做功使之变形、破裂、解堵<sup>[4-6]</sup>。与传统炸药爆破相比, CO<sub>2</sub> 气爆技术具有使用安全、高效经济、绿色环保、适应性强等优点, 同时 CO<sub>2</sub> 气爆技术和设备应用广泛, 凡利用传统炸药的领域均适用, 在非民用爆破领域的特殊环境下使用更具优越性。目前国内采用的 CO<sub>2</sub> 爆破技术主要是借鉴英国卡尔道克斯的 CO<sub>2</sub> 爆破技术, 对爆生气体冲击应力及其影响因素缺乏较系统的认识, 因此研究超临界 CO<sub>2</sub> 气爆冲击应力变化及其影响因素具有重要意义<sup>[7-11]</sup>。

气爆系统核心元件喷嘴的主要作用是将高压流体的压力能转化为动能, 形成能量高度集中的冲击柱, Quinn<sup>[12]</sup>等利用数值计算方法对不可压缩的低速射流下的不同喷嘴进行了研究, 指出射流初始段截面及轴心速度衰减与喷嘴内流道型线有关。Khan<sup>[13]</sup>等利用连续性方程、动量方程等, 预测了不同喷嘴内紊流的动力学行为。Katsuya<sup>[14]</sup>等对“喇叭”型喷嘴进行切割实验, 得出此喷嘴的冲蚀量是“非喇

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51574137)

通讯作者: 孙可明(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事多场耦合渗流理论及应用的研究。Email: sskkmm11@163.com

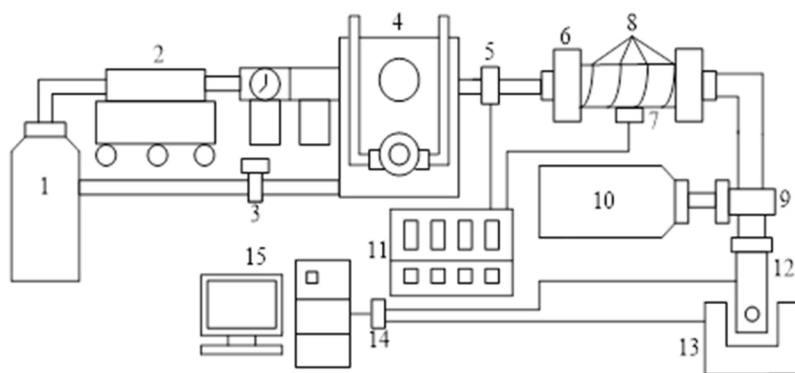
叭”型喷嘴的 14 倍。Schadow<sup>[15]</sup> 等对三角形喷嘴射流进行实验研究后认为尖角的存在使得流场因喷嘴处流速和压力不再对称而显示出高度非稳定性,从而增加细小尺度的流体混合和减少流场大尺度拟序结构。程宇雄<sup>[16]</sup> 等使用数值模拟的方法验证了与传统水射流相比,超临界  $\text{CO}_2$  射流具有更大的冲击破坏效果,超临界  $\text{CO}_2$  射流冲击力随着喷嘴压降的增大而增大。杜玉坤<sup>[17]</sup> 等使用超临界  $\text{CO}_2$  射流破岩实验得出射流压力随喷嘴直径的增加先增加后降低,存在最优值,且当温度超过临界值后射流效果增强明显。邓嵘<sup>[18]</sup> 等通过数值模拟的方式对不同腔室脉冲喷嘴的打击力进行对比分析,得到了最佳喷嘴腔室形状,并通过实验加以验证。

由于实际工程中超临界  $\text{CO}_2$  气爆产生的冲击应力较大,为避免爆破过程中出现爆破管弯曲破坏及纵向飞管等现象,故选择对称圆形喷孔使喷射的爆生气体产生的横向应力互相抵消、平衡。本文自行设计的气爆装置与实际气爆设备结构一致,在分别控制初始压力变量和初始温度变量的前提下,研究超临界  $\text{CO}_2$  在不同初始温度和压力下对称双喷孔喷射的爆生气体冲击应力变化规律,对提高超临界  $\text{CO}_2$  气爆技术的应用水平具有参考价值。

## 1 实验装置及实验步骤

### 1.1 实验装置与实验方案

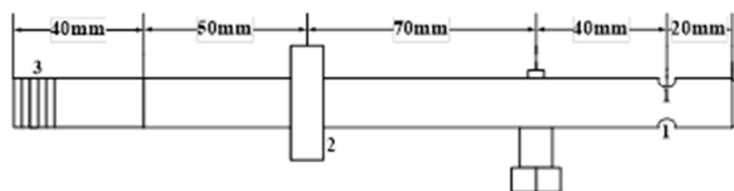
实验装置包括三个部分:由压力泵、空气压缩机、压力釜、加热带等组成的注气系统;气爆系统;温度传感器、压力传感器以及由多通道数据记录仪、高速采集卡等组成的数据采集系统。实验装置如图 1 所示。



1. 液态  $\text{CO}_2$  钢瓶;2. 空气压缩机;3. 压力阀;4. 压力泵;5. 压力传感器;6. 压力釜;7. 温度传感器;8. 加热带;9. 电磁阀;  
10. 平衡气体(氮气)钢瓶;11. 多通道数据记录仪;12. 双孔喷嘴;13. 被爆试件;14. 高速采集卡;15. 计算机

图 1 超临界  $\text{CO}_2$  气爆装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of supercritical  $\text{CO}_2$  gas explosion device



1. 对称喷孔 2. 喷嘴固定圆环 3. 外螺纹

图 2 双孔喷嘴示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-hole nozzle

实验使用的气爆管由 304 无缝钢管加工而成,管长 220mm,内径 10mm,外径 16mm,气爆管设计尺寸如图 2 所示;管头焊接封堵,钻一对对称的直径 7mm 圆孔作为气爆喷孔,气爆管实物如图 3 所示。被爆试件由直径 50mm、高 70mm 的圆柱型钢锭加工而成,在钢锭的一端加工一个直径 20mm、高 50mm 的同心圆柱空腔用来放置双孔喷嘴,钢锭侧面钻对称的两个孔与压力传感器连接,被爆试件实物图如图 4 所示,安装喷嘴后测试打击力装置实物图如图 5 所示。

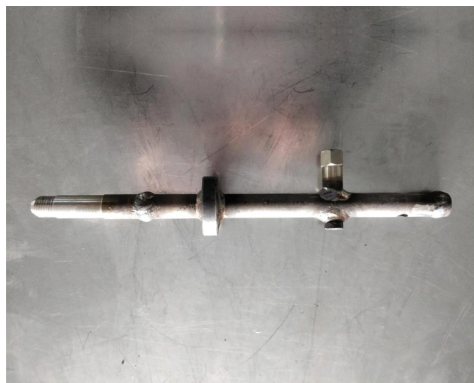


图 3 双孔喷嘴实物图

Fig. 3 Physical map of two-hole nozzle



图 4 被爆试件的实物图

Fig. 4 Physical map of impact test piece

考虑到实验的安全性,以及要满足超临界  $\text{CO}_2$  临界温压条件(临界温度  $31.2^\circ\text{C}$ , 临界压力  $7.38\text{ MPa}$ ),故实验初始温度选择  $34^\circ\text{C}$ 、 $37^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$  的近临界区温度,初始压力选择  $12\text{ MPa}$ 、 $14\text{ MPa}$ 、 $16\text{ MPa}$  的较低压力,由于气爆是一个瞬间的过程,为较准确地得到冲击应力的变化规律,选择  $30000\text{ Hz}$  的高速采集卡,以获取丰富的实验数据。

## 1.2 实验步骤

(1)连接实验装置并检查各接口密闭性,确保实验装置正常工作。

(2)打开  $\text{CO}_2$  气瓶开关,对喷嘴进行排气处理排出残留空气,减少其他气体对超临界  $\text{CO}_2$  气爆的影响。

(3)关闭电磁阀向压力釜内注入  $\text{CO}_2$ ,启动空气压缩泵和压力泵向压力釜内施加压力,控制压力阀使压力釜内  $\text{CO}_2$  达到实验初始压力。

(4)启动加热带,使压力釜内温度达到实验初始温度,此时压力釜内  $\text{CO}_2$  由液态转化为超临界态。

(5)打开电磁阀,使压力釜内超临界  $\text{CO}_2$  瞬间进入气爆管并从喷孔喷射,使用高速采集卡记录被爆试件上压力传感器监测的数据,气爆现场图如图 6 所示。

(6)改变实验的初始温度和压力,重复实验步骤(2)~(5),记录不同初始条件下被爆试件的应力变化情况。

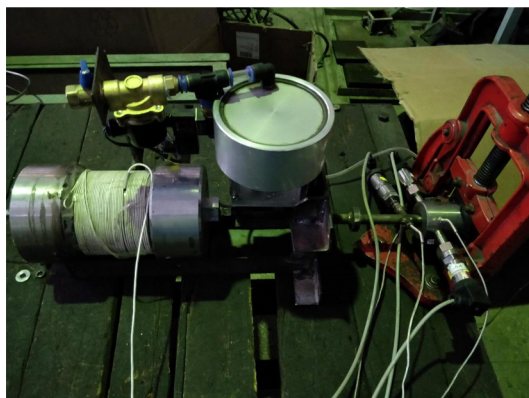


图 5 气爆喷嘴组装图

Fig. 5 Assembly diagram of gas explosion nozzle



图 6 气爆现场图

Fig. 6 Gas explosion scene

## 2 实验结果

由图 7 中的曲线可以看出,压力釜内的超临界  $\text{CO}_2$  经电磁阀瞬间释放,高速流经气爆管再经对称

双喷孔喷射爆生气体的过程中,冲击应力变化情况为先平稳波动,然后瞬间达到峰值,此后随着气爆管内气源消耗,冲击应力衰减直至趋近于 0。为得到冲击应力在不同初始温度和初始压力下的变化规律,取每组数据的冲击应力的波形段进行比较分析。由于气爆喷嘴的喷射孔为两个对称的圆孔,理论上被爆试件上两个压力监测点冲击应力相等,为了提高实验精度,取同时刻被爆试件上两个压力监测点的压力平均值进行分析,得到图 8 和图 9 中的曲线。

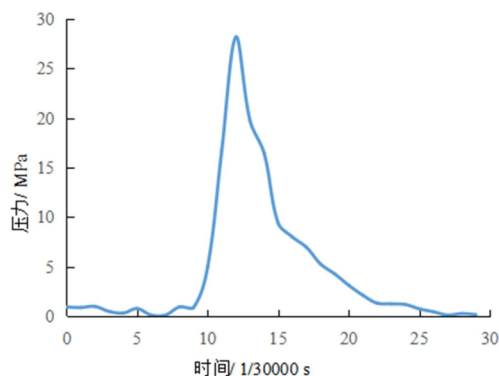


图 7 初始压力 14MPa、初始温度 40℃ 下的冲击应力变化时间历程曲线

Fig. 7 Time history curve of impact stress change at initial pressure of 14MPa and initial temperature of 40℃

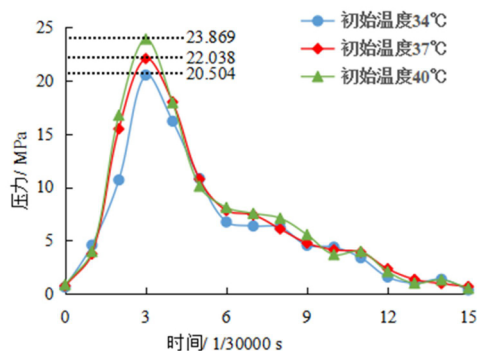


图 8 初始压力 14MPa 时不同温度下的冲击应力变化时间历程曲线

Fig. 8 Time history curve of impact stress change under different temperatures at initial pressure of 14MPa

图 8 为初始压力为 14MPa 时不同初始温度下对称双喷孔喷射的超临界  $\text{CO}_2$  爆生气体冲击应力变化规律。在初始压力等影响因素不变的条件下,对称双喷孔喷射的爆生气体的冲击应力变化规律为随喷射时间的增加,先急速升高到峰值后快速衰减直至趋于 0,且在冲击应力衰减的过程中经历了剧烈降低和减速衰减两个阶段,冲击应力衰减持续时间大于激增时间,初始温度升高,冲击应力及其峰值应力也随之升高。

图 9 为初始温度为 40℃ 时不同初始压力下对称双喷孔喷射的超临界  $\text{CO}_2$  爆生气体冲击应力变化规律。在初始温度等影响因素不变的条件下,爆生气体的冲击应力变化规律仍然表现为随喷射时间的增加,先激增到峰值此后衰减直至趋于 0,冲击应力衰减同样可分为剧烈降低和减速衰减两个阶段,且冲击应力衰减持续时间大于激增时间。初始压力升高,冲击应力及其峰值应力也随之升高。对比图 8 和图 9 中的曲线可以看出,图 8 中由初始温度变化引起的冲击应力变化幅度比图 9 中由初始压力变化引起的冲击应力变化幅度小,因此初始压力变化相较于初始温度变化对气爆冲击应力的影响更为明显。

冲击应力变化的整个过程可大致分为三个阶段,分别为应力激增段、应力剧减段和应力减速衰减段。由超临界  $\text{CO}_2$  气爆产生的爆生气体从对称双喷孔释放到冲击应力达到峰值阶段为应力激增段;由冲击应力峰值到其降低且降低率尚未发生较大变化阶段为应力剧减段;此后直到喷射结束,冲击应力缓慢降低至趋于 0 阶段为应力减速衰减段。冲击应力各阶段分布情况如图 10 所示。

为进一步确定冲击应力峰值随初始温度变化及初始压力变化的规律,使用 MATLAB 对实验中的数据点进行拟合,得到拟合曲线图 11 和公式(1),拟合误差为 18.54%,拟合系数  $a$  和  $b$  分别表示升高单位初始温度和增加单位初始压力引起的冲击应力峰值变化量,拟合系数的数值  $b > a$  表明初始压力变化相较于初始温度变化对冲击应力的影响更大。式(1)可用于超临界条件下,不同初始温压产生的冲击应力峰值计算。

$$P_{\max} = aT + bP + C \quad (1)$$

式中,  $P_{\max}$  为冲击应力峰值, MPa;  $T$  为超临界  $\text{CO}_2$  初始温度, °C;  $P$  为超临界  $\text{CO}_2$  初始压力, MPa; 拟合系数  $a = 0.3457 \text{ MPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $b = 1.961$ , 无量纲;  $C = -18.54 \text{ MPa}$ 。



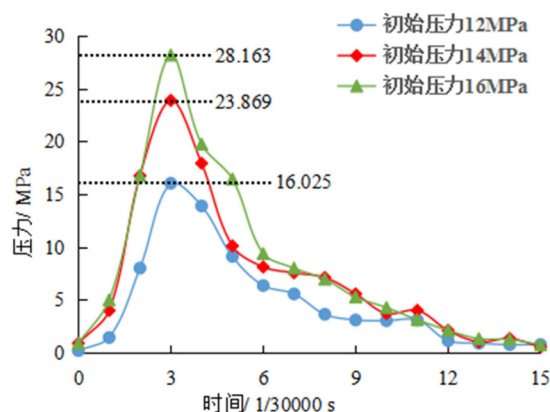


图9 初始温度 40℃ 时不同压力下的冲击应力变化时间历程曲线

Fig. 9 Time history curve of impact stress change under different pressures at initial temperature of 40℃

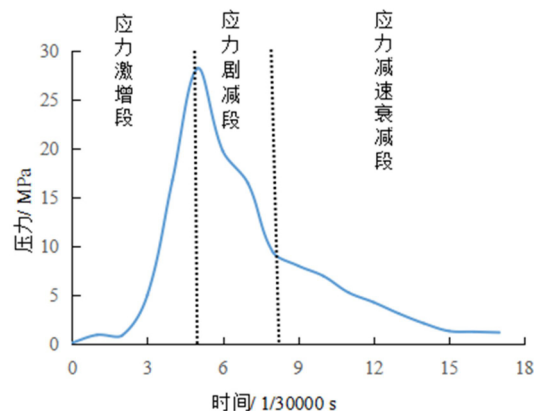


图10 被爆试件冲击应力阶段图

Fig. 10 Impact stress stage diagram of the test piece

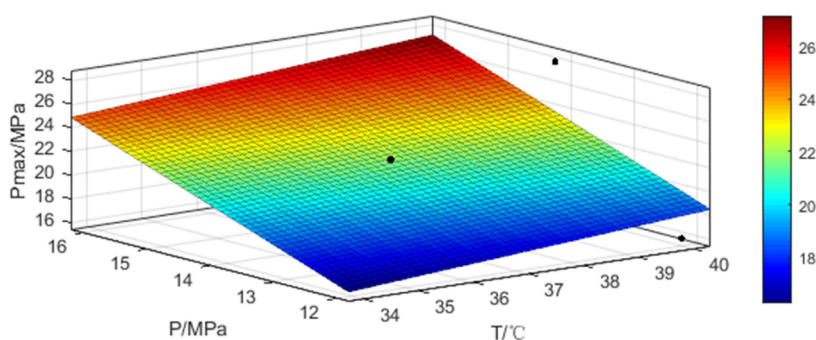


图11 冲击应力峰值随初始压力和初始温度变化关系图

Fig. 11 Relational diagram between peak value of impact stress and initial pressure and initial temperature

### 3 结论

利用自主设计的超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验系统及数据采集装置,对气爆过程中对称双喷孔喷射的爆生气体在不同初始温度和初始压力下产生的冲击应力变化规律进行实验研究,得出如下结论:

(1) 对称双喷孔喷射的爆生气体冲击应力变化经历应力激增、应力剧减和应力减速衰减三个阶段,冲击应力时程变化曲线呈脉冲波形曲线特征,冲击应力衰减持续时间大于激增时间。

(2) 冲击应力随初始温度和初始压力的增大而增加,初始压力变化引起的气爆冲击应力变化比初始温度变化明显,增大超临界态 CO<sub>2</sub> 的初始压力提高气爆冲击应力优于提高超临界态 CO<sub>2</sub> 的初始温度,为提高冲击应力的峰值应力,可优先提高初始压力。

(3) 冲击应力峰值  $P_{\max}$  与初始温度  $T$  和初始压力  $P$  的关系满足  $P_{\max} = aT + bP + C$ 。

#### 参考文献:

- [1] 孔祥瑞. 精细爆破在地铁硬岩深基坑开挖中的应用探究[J]. 湖北理工学院学报, 2018, 34(6):48—49 (KONG Xiangrui. Application of fine blasting in excavation of hard rock deep foundation pit in subway[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2018, 34(6):48—49 (in Chinese))
- [2] 罗福友, 周浩仓, 陶明, 等. 爆破工程分级及安全评估方法[J]. 现代矿业, 2018, 7(7):189—190 (LUO Fuyou, ZHOU Haocang, Tao Ming, et al. Classification and safety evaluation method of blasting engineering[J]. Modern

- Mining, 2018, 7(7):189—190 (in Chinese))
- [3] 王磊, 苏强, 欧明启, 等. 复杂周边环境下的深基坑岩石爆破施工技术[J]. 施工技术, 2016(s2):908—911 (WANG Lei, SU Qiang, OU Mingqi, et al. Construction technology of rock blasting of deep foundation excavation in complex environment[J]. Construction Technology, 2016(s2):908—911 (in Chinese))
- [4] 孙可明, 辛利伟, 王婷婷, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂规律模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 501—502 (SUN Keming, XIN Linwei, WANG Tingting, et al. Simulation research on law of coal fracture caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3):501—502 (in Chinese))
- [5] 孙可明, 辛利伟, 吴迪, 等. 初应力条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律模拟研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 232—233 (SUN Keming, XIN Linwei, WU Di, et al. Simulation of fracture law of supercritical CO<sub>2</sub> explosion under initial stress condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12):232—233 (in Chinese))
- [6] 孙可明, 辛利伟, 吴迪, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂机理实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2):302—303 (SUN Keming, XIN Linwei, WU Di, et al. Fracture mechanism of coal caused by supercritical carbon dioxide explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2):302—303 (in Chinese))
- [7] 李云. 气爆低渗透煤层增透规律数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015:1—7 (LI Yun. The numerical simulation research on the law of improving the permeability of low permeability coal seam by air blasting[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015:1—7 (in Chinese))
- [8] 孙可明, 辛利伟, 张树翠, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(7):27—28 (SUN Keming, XIN Linwei, ZHANG Shucui, et al. Experimental study on laws of crack caused by gas burst of supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7):27—28 (in Chinese))
- [9] 孙可明, 李天舒, 辛利伟, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 作用下煤体膨胀变形规律试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1):94—95 (SUN Keming, LI Tianshu, XIN Linwei, et al. Experimental study of coal swelling deformation under supercritical carbon dioxide action[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):94—95 (in Chinese))
- [10] 孙可明, 任硕, 张树翠, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 在低渗透煤层中渗流规律的实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(1):117—120 (SUN Keming, REN Shuo, ZHANG Shucui, et al. Experimental study of supercritical carbon dioxide seepage flow in low permeability coal seam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1):117—120 (in Chinese))
- [11] 岳立新, 孙可明. 超临界 CO<sub>2</sub> 作用后煤微观结构与渗透率变化规律实验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(3):397—406 (YUE Lixin, SUN Keming. Experimental study of coal microstructure and permeability variation after of supercritical CO<sub>2</sub> penetration[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(3):397—406 (in Chinese))
- [12] Quinn W R, Militzer J. Effects of nonparallel exit flow on round turbulent free jet international[J]. Heat and Fluid Flow, 1989, 10(2):375—383.
- [13] Khan M E H, Geskin E S. A Numerical investigation of turbulent behaviors of water flow inside nozzle[C]. Proc 7th US Water Jet Conference, Seattle, Washington, 1993:273—285.
- [14] Katsuya Y, Masao N, Kensaku E. Water jet cavitation performance of submerged horn shaped nozzles[D]. Osaka Prefectural Technical College, 2004:92—107.
- [15] Schadow K C, Gutrnark E, Parr D M, et al. Selective control of flow coherence in triangular jets[J]. Experiments in Fluids, 1988, 6:129—135.
- [16] 程宇雄, 李根生, 沈忠厚, 等. 超临界二氧化碳射流冲击压力参数影响规律[J]. 石油学报, 2014, 35(4):756—769 (CHEN Yuxiong, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Impact pressure and parametric sensitivity analysis of supercritical CO<sub>2</sub> jet[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4):756—769 (in Chinese))
- [17] 杜玉坤, 王瑞和, 倪红坚, 等. 超临界二氧化碳射流破岩试验[J]. 中国石油大学学报, 2012, 36(4):93—96 (DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Rock-breaking experiment with supercritical carbon dioxide jet[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 36(4):93—96 (in Chinese))
- [18] 邓嵘, 李向东, 丰波. 双腔室自振脉冲喷嘴数值分析与实验研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(12):1817—1821 (DENG Rong, LI Xiangdong, FENG Bo, et al. Numerical analysis and experimental research of a dual chamber self-excited oscillation pulsed jet nozzle [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace

Engineering, 2017, 36(12):1817—1821 (in Chinese))

## Experimental study on variation rules of impact stress for the supercritical CO<sub>2</sub> explosion nozzle at different temperatures and pressures

SUN Ke-ming<sup>1,2</sup>, ZHOU Hang<sup>2</sup>, XIE Meng<sup>2</sup>, JI Hong-jie<sup>2</sup>, CHEN Shuai<sup>2</sup>

(1. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; 2. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to study the variation rules of impact stress on the object from the explosive gas injected by the gas detonation tube during the supercritical CO<sub>2</sub> explosion under different temperature and pressure conditions, we have designed the supercritical CO<sub>2</sub> explosion experimental system and the data acquisition unit independently. The results show that the variation rules of impact stress of the explosive gas injected by the symmetric double nozzle under different initial temperatures and pressures can be obtained. The variation of impact stress on the explosive object generated by the explosive gas from nozzle undergoes the stress surge, stress drop and stress deceleration processes. The impact stress time history curve is characterized by a pulse waveform, and the duration of the impact stress deceleration process is greater than that of the stress surge process. The impact stress increases with the increase of the initial temperature and the initial pressure. The influence of the initial pressure change on the explosive impact stress is more obvious than that of the initial temperature change. Increasing the initial pressure of supercritical CO<sub>2</sub> is better than increasing the initial temperature to increase the gas explosion impact stress. The relationship between the peak value of the impact stress  $P_{\max}$  and the initial temperature  $T$  and the initial pressure  $P$  can be given as  $P_{\max} = aT + bP + C$ .

**Keywords:** supercritical CO<sub>2</sub> explosion; explosive gas; impact stress; nozzle