

文章编号: 1673-3363-(2013)03-0463-05

泡沫金属抑制瓦斯爆炸火焰的实验及机理研究

孙建华¹, 曲征¹, 魏春荣^{1,2}, 王树桐³, 张锦鹏¹

(1. 黑龙江科技学院安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027; 2. 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 哈尔滨第一机械集团公司哈尔滨北方特种车辆研究院, 黑龙江 哈尔滨 150056)

摘要 为探求新型有效阻隔瓦斯爆炸装置, 研究适合煤矿使用的阻隔爆材料, 利用自行设计制作的 30 cm×30 cm 方形实验管道进行瓦斯爆炸实验研究工作。文中测试放置 0.3 g/cm³ 泡沫铁镍金属材料后的管道火焰温度数据, 并结合火焰大小, 共同作为判定该材料对爆炸波能量控制能力的指标。实验表明, 0.3 g/cm³ 泡沫铁镍金属具有抑制瓦斯爆炸火焰波的作用和较强的阻火能力, 对管道内瓦斯爆炸火焰温度最大衰减率在 7.1%~70.7%之间。研究发现, 厚度、孔径及基体材料成分对火焰波的抑制效果存在一定的影响, 厚度大、孔径小、含镍成分高的多孔泡沫铁镍金属材料有利于火焰波的衰减。

关键词 瓦斯爆炸; 泡沫金属; 火焰波; 抑爆; 衰减

中图分类号 TD 724

文献标志码 A

Experimental and mechanism study on gas explosion flame suppressed by foam metal

SUN Jian-hua¹, QU Zheng¹, WEI Chun-rong^{1,2}, WANG Shu-tong³, ZHANG Jin-peng¹

(1. Department of Safety Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150027, China;
2. School of Astronautics Hit, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China; 3. Harbin Institute of Northern Special Vehicles, Harbin First Machinery Manufacturing Company, Harbin, Heilongjiang 150056, China)

Abstract In this paper, by using self-designed 30cm×30cm square piping experimental study on gas explosion, the new and effective gas explosive device was explored, and the barrier burst material suitable for use in coal mines was studied. In the tests, density of 0.3 g/cm³ foam iron-nickel metal materials were placed in the pipe, and the flame temperature data and flame size were considered together as the judgment of the target material on the explosive wave energy control. The experiment results show that 0.3g/cm³ bubble iron-nickel metal have the inhibitory effect of gas explosion flame wave and strong fire resistant capacity, and the maximum decay rate of gas explosion flame temperature in the pipe is between 7.1~70.7%. Studies have also found that the thickness, diameter and substrate material composition have certain influences on the inhibition effect of flame wave, and the porous foamed iron-nickel metal with high thickness, small aperture, and high nickel-containing compositions is favorable for the flame wave attenuation.

Key words gas explosion; foam metal; flame wave; explosion suppression; attenuation

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 2011 黑龙江研究生创新科研项目(YJSCX2011-176HLJ); 2010 黑龙江省东部煤电化在研项目

作者简介: 孙建华(1966-), 男, 山东省日照市人, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事矿井瓦斯灾害防治, 安全评价方面的研究。

E-mail: sunjianhua501@163.com

Tel: 13766886405

瓦斯爆炸是造成煤矿群死群伤的首要灾害,随着煤矿开采深度的加大和产量的增加,瓦斯压力和涌出量越来越大,瓦斯爆炸事故几率急剧增加,严重制约着煤矿的安全生产,煤矿现采用的阻隔爆设施,如水棚、岩粉棚等在实际使用中,不能达到预期的阻隔爆效果^[1],为探求新型有效阻隔瓦斯爆炸装置,研究适合煤矿使用的阻隔爆材料尤为重要。多孔泡沫金属是一种金属基体中含有一定数量、一定尺寸孔径、一定孔隙率的金属材料,具有重量轻、隔音、隔热、防震、耐冲击等特点,国外用于防弹衣、汽车前部防撞装置,在航空、航天、海陆空武器装备、通信、能源等方面也有着潜在的用途。国内外一些学者对瓦斯爆炸机理、多孔材料对瓦斯爆炸传播过程的影响进行了研究^[2-10],但对泡沫金属作为抑爆材料抑制瓦斯爆炸传播的研究还罕见报道。本文以 0.3 g/cm³ 多孔泡沫铁镍金属作为实验材料,研究不同参数的多孔泡沫铁镍金属对管道内瓦斯爆炸火焰波的抑爆效果,通过分析实验结果,结合材料特点,总结其抑爆规律和机理。

1 实验材料的选取

本次实验选取泡沫铁镍材料,相对体积密度 0.3 g/cm³,材料成分比(材料中含镍和铁比例)分别为 1/9, 2/8, 3/7, 通孔率为 80%~90%,孔径(2.54 cm 长内排列的孔数)为 30 ppi(小孔), 20 ppi(中孔), 10 ppi(大孔), 3 种规格,厚度分别为 3, 6, 8 cm。泡沫铁镍金属材料见图 1。



图 1 多孔泡沫铁镍金属材料
Fig.1 Porous bubble iron nickel metal material

2 实验方案的设计

利用自行设计加工的断面为 30 cm×30 cm 方形钢板管道(如图 2),总长为 6.5 m,工作压力 10 MPa。全管道由长度为 0.3 m 气室和 4 节长度为 1.55 m 管道组成,法兰连接,可分装拆卸,气室与每节管道各有 4 个测试孔,选用其中 8 个测孔,安装火焰温度传感器(量程 0~2 300 ℃,响应时间 10 μs,精度 ±1%),通过采集卡采集电压数值,转化为火焰温度值,传感器安装位置如表 1 所示。



图 2 瓦斯爆炸实验管道
Fig.2 Gas pipeline explosion experiment pipeline

表 1 传感器安装位置表
Table1 Collocation of sensors

传感器 安装孔组号	1	2	3	4	5	6	7	8
距引爆点 距离/cm	60	155	215	310	370	465	525	620

选用体积分数为 7.68% 的瓦斯混合气体,管道抽真空后,全管充入瓦斯混合气体,管道后端用强力胶粘牛皮纸封闭,前端点火。先进行空管实验,然后在管道中距引爆点 3.5 m 处,用钢管支架固定试件,泡沫和密封胶密封边缘空隙,进行抑爆效果实验测试放置不同试件后管道内火焰温度分布情况,用所测火焰温度数据衡量试件的阻火效果,结合管道出口端火焰大小的摄像,共同作为判定爆炸火焰波能量控制能力的指标^[11-12]。

3 实验现象

如图 3a,管道中放置 0.3 g/cm³ 多孔泡沫铁镍金属材料后,爆炸声音锐减,说明材料具有较好的吸收声波能力;爆炸火焰喷出管道出口亮度和长度明显降低,火焰多集中在中下部;实验中材料强度较好,无碎裂,无变形,抗烧结能力比较强,基本无烧结现象,27 组实验中,仅有 7 组实验中出现点状烧痕或发散状点烧痕,烧结最为严重 2 块材料 0.3 g/cm³/20 ppi/3 cm/2/8, 0.3 g/cm³/30 ppi/6 cm/2/8(如图 3b)。实验结束后,多孔泡沫铁镍金属靠近气室面温度升高,而出口面温度变化较小,说明多孔泡沫铁镍金属材料阻火能力较强。

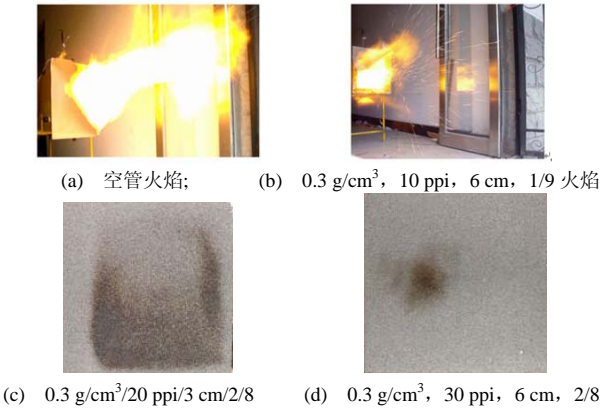


图 3 抗烧结情况

Fig.3 Anti-sintering degree

4 实验测试结果

文中以各测点温度传感器所测最大值绘制温度曲线,对比空管和放置不同参数多孔材料后管道内瓦斯爆炸火焰温度,定义以空管所测最大火焰温度减去衰减后最大火焰温度,然后再除以空管所测最大火焰温度表示火焰温度最大衰减率。

如图4所示,管道内放置 0.3 g/cm^3 多孔泡沫铁镍金属材料后,火焰温度增长趋势明显低于空管的火焰温度增长趋势,尤其在管道后半部分衰减效果

明显。3 cm 火焰温度最大衰减率在 42.9%~65.7%之间;6 cm 在 7.1%~52.7%之间;8 cm 在 14.8%~70.7%之间;总体衰减率在 7.1%~70.7%之间。对 3 种厚度泡沫铁镍金属阻火性能进行优选,按优劣顺序依次为 $0.3 \text{ g/cm}^3/8 \text{ cm}/30 \text{ ppi}/2/8$, $0.3 \text{ g/cm}^3/8 \text{ cm}/30 \text{ ppi}/3/7$, $0.3 \text{ g/cm}^3/8 \text{ cm}/10 \text{ ppi}/1/9$, $0.3 \text{ g/cm}^3/3 \text{ cm}/20 \text{ ppi}/1/9$, $0.3 \text{ g/cm}^3/6 \text{ cm}/30 \text{ ppi}/3/7$ 多孔泡沫铁镍金属。

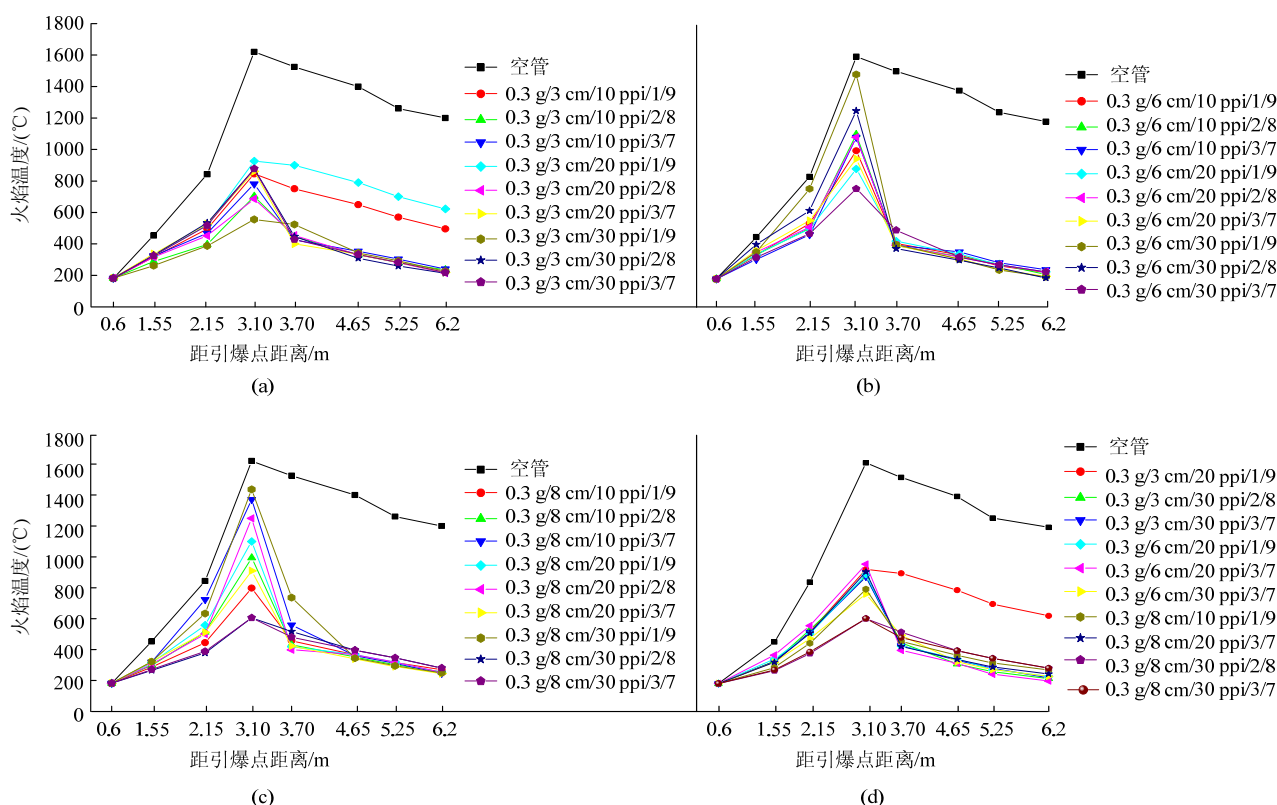


图4 0.3 g/cm^3 多孔泡沫铁镍金属管道内火焰温度分布;

Fig.4 0.3 g/cm^3 porous foam iron nickel metal pipe flame temperature distribution

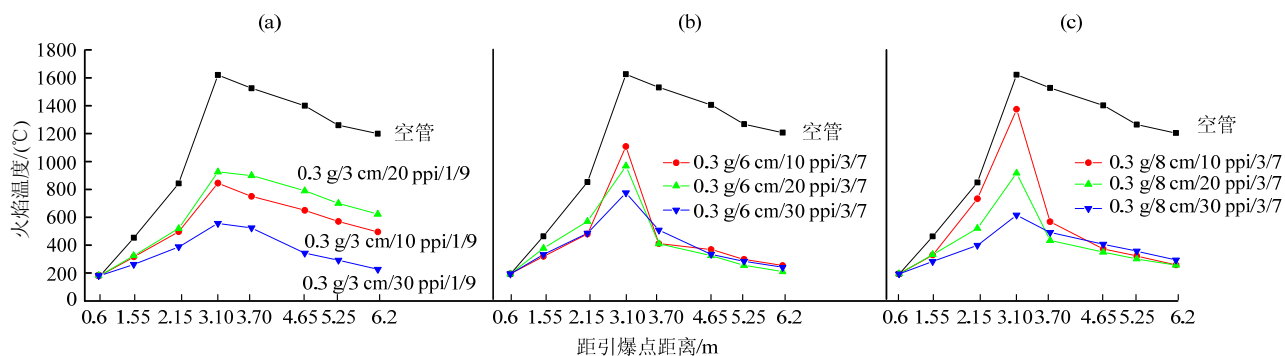
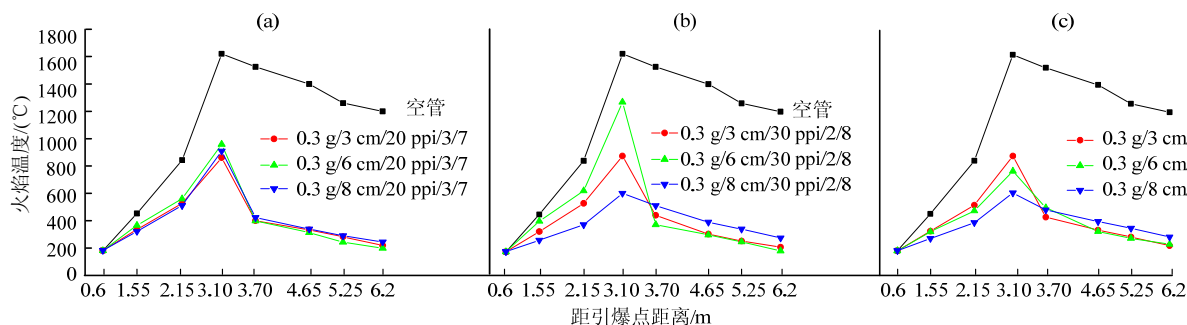
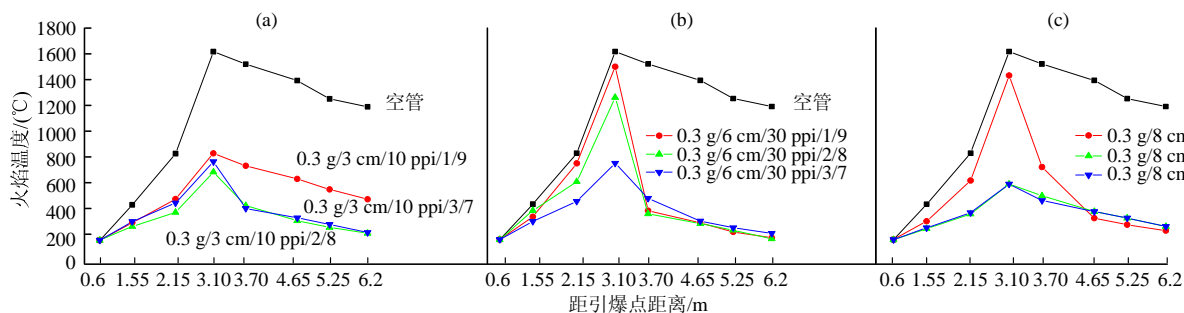
5 对瓦斯爆炸火焰波抑制规律

如图5,固定 0.3 g/cm^3 多孔泡沫铁镍金属材料厚度和基体材料组成成分,改变孔径单一参数时,孔径率越小,阻火性能越强,对火焰波衰减效果越好。整体上,30 ppi 多孔泡沫铁镍金属对火焰温度衰减效果略优越些,20 ppi 和 10 ppi 相差不大。

如图6,固定 0.3 g/cm^3 多孔泡沫铁镍金属材料孔径和基体材料成分,改变厚度单一参数时,厚度越大,阻火性能越强,对火焰波衰减效果越好。但

材料厚度变化对瓦斯爆炸火焰温度衰减效果影响规律并不十分明显。

如图7,固定 0.3 g/cm^3 多孔泡沫铁镍金属材料厚度和孔径,改变基体材料组分单一参数时,铁镍基体材料组成成分的改变对火焰温度衰减效果影响不大。整体来看,含镍成分多的材料阻火效果强,对火焰温度衰减效果好,3/7 泡沫铁镍金属阻火效果略优于 2/8 泡沫铁镍金属,二者总体优于 1/9 泡沫铁镍金属。

图5 0.3 g/cm³多孔泡沫铁镍金属孔径率对管道内火焰温度分布影响Fig.5 0.3 g/cm³ porous foam iron nickel metal aperture rate pipe flame temperature distribution图6 0.3 g/cm³多孔泡沫铁镍金属厚度对管道内火焰温度分布影响Fig.6 0.3 g/cm³ porous foam iron nickel metal thickness pipe flame temperature distribution图7 0.3 g/cm³多孔泡沫铁镍金属基体材料成分对管道内火焰温度分布影响Fig.7 0.3 g/cm³ porous foam iron nickel metal substrate material pipe flame temperature distribution

6 泡沫金属对火焰波的衰减机理

瓦斯爆炸传播是火焰和冲击波传播过程的耦合, 爆炸火焰和冲击波相互影响, 共同作用构成强烈的破坏效应。所以同时抑制爆炸火焰和冲击波是减小瓦斯爆炸危害最为有效的方法^[13]。泡沫金属材料具有材料和结构上的双重优势, 可同时抑制爆炸火焰和冲击波的传播发展。实验中, 0.3 g/cm³多孔泡沫铁镍金属对管道火焰温度增长有明显的抑制作用, 对管道瓦斯爆炸最大火焰温度衰减率集中在7.1%~70.7%之间, 并且在实验过程中表现出较好的抗冲击性能和抗烧结能力, 未发生大面积烧结以及材料碎裂现象。

泡沫金属的结构特征使其具有良好的热传导及热吸收性能, 可迅速传导、吸收燃烧释放的绝大部分热量。爆炸火焰通过泡沫金属材料细小的三维贯通孔隙结构时, 被分化成若干细小股火焰, 使得火焰锋面不能连续, 并对火焰通过造成阻力, 与孔壁的碰撞、摩擦导致参加燃烧反应的自由基数量急剧减少, 削弱了反应强度。

多孔泡沫铁镍金属内部存在着大量相互连通的气孔, 气体可以在空隙内自由流动, 这些气孔的存在使得多孔泡沫铁镍金属传热特性区别于实体金属, 其热传导是由金属骨架和气体共同作用下的结果。金属骨架具有高的导热系数, 孔洞相互连通,

又使其具有大的比表面积和良好的流通性能,使得流体从通孔多孔材料中通过时有着极大的热交换面积,而且金属材料良好的导热性能使得温度能更均匀地分布,在强迫对流条件下流体在多孔金属内产生的复杂紊流运动都促进了热量的交换,泡沫金属内部孔隙结构是复杂的三维立体结构,气体在其中流动的过程中会产生非线性效果,湍流程度加强,使热量交换更加强烈。此外试样孔壁之间将产生辐射传热。因此多孔泡沫铁镍金属内热量的传递是传导、对流和辐射3种方式作用的总和。爆炸火焰与大量金属孔壁及毗邻结构产生的热交换效应使火焰热量大量散失,大部分小股火焰温度迅速降低到淬熄温度以下而熄灭,阻止火焰的继续传播。

7 结 论

1) 0.3 g/cm^3 多孔泡沫铁镍金属材料具有良好的吸收声波能力,表现出较好的抗冲击性能和抗烧结能力。

2) 通过对管道火焰温度的研究表明,多孔泡沫铁镍金属对火焰温度有一定的衰减效果,降低了相同无障碍物条件下的火焰温度, 0.3 g/cm^3 多孔泡沫铁镍金属对管道内瓦斯爆炸火焰温度最大衰减率在7.1%~70.7%之间。

3) 实验数据表明:基体材料成分、厚度和孔径,对瓦斯爆炸火焰温度的衰减效果存在一定的影响。孔径小、厚度大、含镍成分高的 0.3 g/cm^3 多孔泡沫铁镍金属对火焰温度衰减效果好。

4) 实验中由于温度传感器长度所限,布置在管道内靠近顶部处,而爆炸火焰主要沿管道中下部传播,由此对火焰温度数据产生一定影响,管道截面阻塞率对泡沫金属抑爆效果的影响还需探讨。

参考文献:

- [1] 王从银, 何学秋. 瓦斯爆炸阻隔爆装置失效原因的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(2): 60-64.
WANG Cong-yin, HE Xue-qiu. Experimental study on the failure cause of suppression and isolation apparatus for gas explosion[J]. China Safety Science Jour, 2001, 11(2): 60-64.
- [2] 曲志明, 周心权, 王海燕, 等. 瓦斯爆炸冲击波超压的衰减规律[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 410-414.
QU Zhi-ming, ZHOU Xin-quan, WANG Hai-yan, et al. Overpressure attenuation of shock wave during gas explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 410-414.
- [3] 何学秋, 杨艺, 王恩元, 等. 障碍物对瓦斯爆炸火焰结构及火焰传播影响的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 186-189.
HE Xue-qiu, YANG Yi, WANG En-yuan, et al. Effects of obstacle on premixed flame microstructure and flame propagation in methane/air explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 186-189.
- [4] 聂百胜, 何学秋, 张金锋, 等. 泡沫陶瓷对瓦斯爆炸过程影响的实验及机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 903-907.
NIE Bai-sheng, HE Xue-qiu, ZHANG Jin-feng, et al. The experiments and mechanism of foam ceramics affecting gas explosion process[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 903-907.
- [5] 喻健良, 蔡涛, 李岳, 等. 丝网结构对爆炸气体淬熄的试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(2): 97-100.
YU Jian-liang, CAI Tao, LI Yue, et al. Experiment to quench explosive gas with structure of wire mesh[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(2): 97-100.
- [6] CALIMIDI V V, MAHAJAN R L. Forced convection in high porosit metal foams[J]. ASMEJ Heat Transfer, 2000, 122: 557-558.
- [7] BOOMSMA K, POULIKAKOS D. On the effective thermal conductivtof a three-dimensionally structured fluid-saturated metal[J]. Int Heat Mass Transfer, 2001, 44: 827-828.
- [8] BHATTACHARYA A, CALMIDI VV, MAHAJAN R L. Thermophysic properties of high porosity metal foams[J]. Int Heat Mass Transfer, 2002, 45: 1017.
- [9] ZHAO C Y, KIM T, LU T J, et al. Thermal transport in hig porosity cellular metal foams[J]. Thermophys Heat Transfer, 2004, 18(3): 309-310.
- [10] RAMVIR S, KASANA H K. Computational aspects of effective the mal conductivity of highly porous metal foams[J]. Appl Therm Eng, 2004, 24: 1841-1842.
- [11] 林柏泉, 菅从光. 爆炸波能量变化特征及壁面热效应[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 429-433.
LIN Bai-quan, JIAN Cong-guang. Energy changing characteristics of explosion wave and heating effect of wall[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 429-433.
- [12] 曹立宏, 马颖. 多孔泡沫金属材料的性能及其应用[J]. 甘肃科技, 2006, 22(6): 117-121.
CAO Li-hong, MA Ying. Properties and application on porous foam metall[J]. Gansu Science and Technology, 2006, 22(6): 117-121.
- [13] 胡铁柱. 瓦斯爆炸传播规律数值模拟研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 2008.