

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0531

不同迎爆面结构的泡沫金属对甲烷气体爆炸传播阻隔性能的实验研究*

张保勇, 崔嘉瑞, 陶 金, 王亚军, 秦艺峰, 魏春荣, 张迎新
(黑龙江科技大学安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要: 通过自行设计的爆炸管网设备进行实验, 提出通过改变泡沫金属迎爆面的结构来增大与爆炸火焰的接触面积, 结合爆炸超压、火焰传播速度和火焰温度等参数来评价不同迎爆面设计结构的泡沫金属的阻隔爆性能。结果表明, 在相同厚度的前提下, 在材料迎爆面增加一定的锯齿形波纹会使整体的阻隔爆性能有所提升, 爆炸超压、火焰传播速度和火焰温度的衰减率随着迎爆面锯齿角度的减小而增大。当泡沫金属迎爆面锯齿角度为 30°时, 爆炸超压、火焰传播速度和火焰温度的衰减率分别为 74.0%、76.18% 和 91.93%, 爆炸超压下降速率为 30.76 MPa/s, 材料后端熄爆参数为 17.68 MPa·°C, 阻隔爆效果较好。

关键词: 气体爆炸; 泡沫金属; 迎爆面结构; 阻隔爆; 衰减率

中图分类号: O381; X932 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Experimental study on barrier performances of foamed metals with different blast front structures to prevent methane explosion propagation

ZHANG Baoyong, CUI Jiarui, TAO Jin, WANG Yajun, QIN Yifeng, WEI Chunrong, ZHANG Yingxin
(Department of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology,
Harbin 150022, Heilongjiang, China)

Abstract: The shock waves and flame produced by explosions of methane (CH₄) and other combustible gas explosion can cause huge casualties and property damage. Therefore, the explosion-proof isolating technologies have always been a hotspot in the fields of industrial explosion protection. Foamed metal has attracted attention as a new type of explosion-isolating material which can simultaneously block the propagation of gas explosion shock waves and flame waves. Its explosion-isolating performance is a key factor affecting its application. However, there are few researches on improving the explosion-isolating performances of materials by changing the overall structures of foamed metals. A new method was proposed to change the structure of the blast front of a foamed metal and increase the contact area of the blast front with the explosion flame, so as to improve the flame-proof performance of the foamed metal. In this experiment, the experimental material with the thickness of 20 mm was prepared by wire cutting. Under the premise of the foundation thickness of 15 mm, the explosive effect surface was prepared into serrated ripples with the thickness of 5 mm and the angles of 30°, 60° and 90°. The processed foamed metal materials with different explosive effect surfaces were installed in the diffusion pipe near the end of the experimental equipment. The sensors placed at different positions and with different distances were used to collect the relevant data, and thereby the attenuation ratios of explosion overpressure, flame propagation velocity and flame temperature were

* 收稿日期: 2021-12-27; 修回日期: 2022-08-06

基金项目: 黑龙江省重点研发计划(GA21C023)

第一作者: 张保勇(1982—), 男, 博士, 教授, byzhang1982@163.com

calculated. The explosion-proof performances of the foamed metal with different saw tooth angles were evaluated by combining the explosion-extinguishing parameters. The results show that under the premise of the same thickness, the increase of a certain zigzag wave on the explosive effect surface of the material will improve the overall isolating explosion performance. The attenuation ratios of explosion overpressure, flame velocity, and flame temperature increase with the decrease of the sawtooth angle. When the front surface of the foamed metal has a sawtooth of 30° , the attenuation ratios of explosion overpressure, flame velocity, and flame temperature are 74.0%, 76.18%, and 91.93%, respectively. The explosion overpressure decay rate is 30.76 MPa/s, and the explosion is extinguished at the rear end of the material. The quenching parameter at the rear-end of the material is 17.68 MPa \cdot °C, and the isolating explosion effect is better.

Keywords: gas explosion; foamed metal; explosive effect surface structure; isolating explosion; attenuation ratio

甲烷作为一种清洁能源,具有高热能、绿色环保、应用广泛等优点,但也存在着气态条件下与空气混合易燃易爆的危险与隐患。对于煤矿而言,甲烷是瓦斯的主要成分,作为矿井灾害之一,瓦斯爆炸会严重影响从业人员的生命安全以及对井下设备造成严重破坏^[1-3]。对于城市安全与发展而言,当以甲烷为主要成分的天然气能源在城市人口密集区发生燃气爆炸事故时,会给社会造成严重的恐慌。例如:2021年6月13日,湖北省十堰市发生重大燃气爆炸事故造成26人死亡,138人受伤,其中重伤37人;2021年10月24日,辽宁省大连市瓦房店市发生燃气闪爆事故,对人民的生命财产安全构成了巨大威胁。因此,阻隔爆减灾技术是气体爆炸防治工作的重点^[4-7]。

多孔材料^[8-11]具有独特的物理力学特性和优异的能量吸收性能,被广泛应用于矿井与工程防护领域。Nie等^[12]发现金属丝网可以加速火焰的传播速度,但火焰的能量会在穿过金属网格的过程中有所消耗,因此金属丝网可有效减少瓦斯爆炸造成的损伤。程方明等^[13]通过实验研究了多孔材料对气体爆炸火焰传播的影响,发现多孔材料是导致火焰面破碎以及面积褶皱率增大的直接原因。Duan等^[14]研究了不同孔径的多孔材料对气体爆炸的阻隔爆效果,发现具有大孔径的多孔材料能加速火焰不同形式的转变。Grigory等^[15]通过实验研究了不同孔径聚氨酯泡沫对爆炸冲击波的阻隔爆性能,并给出了不同孔径实验材料对爆炸超压和火焰传播速度阻隔效果的变化规律。Ousji等^[16]通过自行设计的实验装置研究了聚氨酯材料在爆炸载荷下的受力作用和该材料对爆炸冲击波的缓冲效果。周尚勇等^[17]通过填充金属丝网进行了密闭性爆炸实验,发现金属丝网能够有效抑制可燃气体的爆炸,并且不同金属丝网的抑爆效果也有明显差异。在众多多孔材料中,泡沫金属作为一种新型功能材料,具有密度低、比表面积大和热导率高等优点,近年因其可靠的阻隔爆性能成为研究的热点^[18-20]。Zhuang等^[21]研究了不同性能参数泡沫金属对可燃气体爆炸的抵挡作用,发现不同厚度和孔径的泡沫金属对气体爆炸有着不同的阻隔爆效果。Wang等^[22]通过自行设计实验装置研究了不同泡沫金属材料的阻隔爆性能,发现当泡沫金属的体密度较高时,其阻隔爆性能较好,但在爆炸设备中加入一定量煤尘会降低泡沫金属的抑爆性能。Santosa等^[23]通过改变爆炸载荷与泡沫金属夹芯板的冲击距离,研究了不同厚度、材料和体密度的泡沫金属夹芯板的阻隔爆性能,发现泡沫金属夹层结构能更有效地吸收爆炸所传递的能量,对爆炸有更好的防护效果。魏春荣等^[24]利用自行设计加工的断面为30 cm \times 30 cm方形爆炸实验管道,对不同参数的金属丝网、泡沫陶瓷和泡沫铁镍金属的阻隔爆效果进行了对比。余明高等^[25]通过探究超细水雾与泡沫金属在协同作用下对爆炸超压的影响,发现改变材料孔隙度等参数可以提升实验材料的阻隔爆效果。

然而,上述研究均采用平整的迎爆面结构,通过筛选不同材料的强度和参数来评价整体材料的阻隔爆性能,对材料本身设计结构的相关研究较少,但材料结构是控制阻隔爆效果的关键因素。因此,本文中,通过加工泡沫金属迎爆面来增大泡沫金属迎爆面与爆炸冲击波和火焰的接触面积,利用爆炸超压、火焰传播速度和火焰温度等参数来研究不同迎爆面设计结构的泡沫金属的阻隔爆性能,以期工程防爆设计提供参考。

1 实 验

1.1 材料

实验材料为泡沫铁镍合金, 孔隙密度为 30 PPI (pores per inch), 体密度为 $0.4\sim 0.5\text{ g/cm}^3$, 拉伸强度不低于 50 MPa, 抗压强度不低于 250 kPa(材料压缩应变为 0.5 时的应力值)。如图 1 所示, 泡沫铁镍合金试样由前后面板两部分组成, 试样材料整体侧视图拍摄时利用台钳进行固定。对前面板, 在实验前通过线切割的方法, 将厚度为 20 mm 的实验材料在基础厚度为 15 mm 的前提下, 在迎爆面制备成厚度均为 5 mm、角度分别为 30° 、 60° 、 90° 的锯齿形波纹。后面板厚度统一为 10 mm, 用于比较前面板的防护性能。实验具体设计参数如表 1 所示, 实验 1 作为参考实验, 前面板基础厚度为 15 mm 并且未在其迎爆面进行处理。

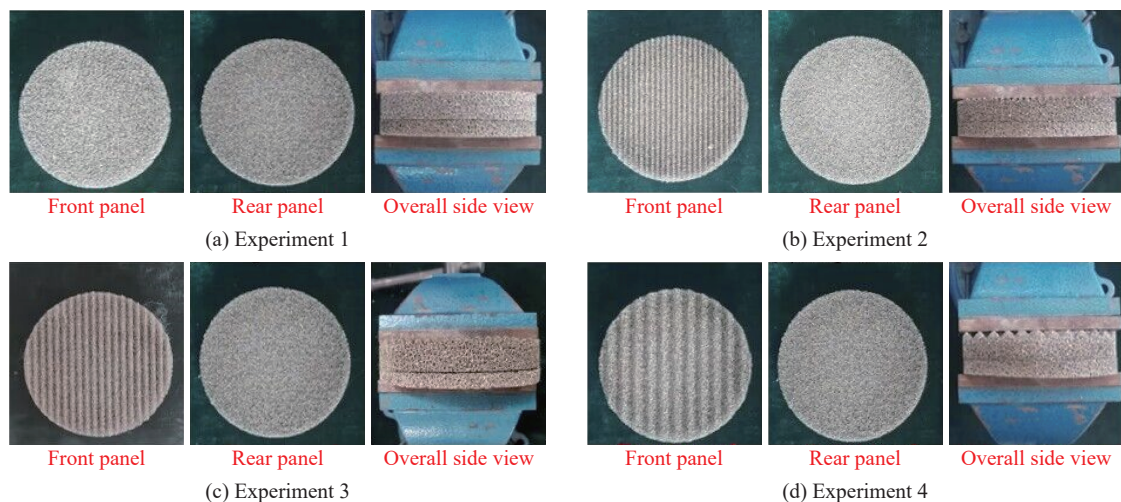


图 1 实验材料

Fig. 1 Experimental materials

表 1 实验材料迎爆面设计参数

Table 1 Design parameters of the blast front for the experimental material

| 实验 | 材料 | 体密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 锯齿角度/($^\circ$) | 锯齿厚度/mm | 材料厚度/mm | 被破坏 |
|----|------|---------------------------------------|-------------------|---------|---------|-----|
| 1 | | | 0 | 0 | 15 | 是 |
| 2 | 泡沫铁镍 | 0.5 | 30 | 5 | 15+5 | 否 |
| 3 | | | 60 | 5 | 15+5 | 是 |
| 4 | | | 90 | 5 | 15+5 | 是 |

1.2 设备

实验系统如图 2 所示, 由点火系统、配气系统、爆炸腔体、数据采集系统和爆炸扩散管路 5 个部分组成。爆炸腔体为长度 1600 mm、外径 300 mm 的空心柱体, 容积为 109 dm^3 , 用于存储甲烷混合气并进行点火。爆炸腔体末端由直径 300 mm、厚度 40 mm 的圆形钢板焊接密封, 在圆形钢板中心处留有直径 118 mm 的圆孔与后端扩散管路进行连接。爆炸腔体末端与扩散管路连接处装有厚度为 0.3 mm、破膜压力为 90 kPa 的聚四氟乙烯薄膜封闭, 并在夹持器边缘由橡胶圈进行密封, 用来确保腔体内部的密封性。配气系统主要设备为真空泵, 在常温常压条件下由真空泵将爆炸腔体部分空气抽出, 使腔体形成一个相对负压状态, 所需可燃气体在此状态下被填充到爆炸腔体中, 依据实验所需充入纯度 99.99% 的甲烷气体制备甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气混合气体。在爆炸腔体前端装配有点火电压为 220 V、点火能

量为 440 J 的电火花发生器, 点火电极由末端点火系统负责远距离充能与点火。本实验爆炸腔体的后端连有扩散管路, 管路内径为 118 mm, 由 3 段单管长度为 2.2 m 的空心钢管拼接而成, 爆炸扩散管路总长度为 6.6 m。

在实验管道的不同位置上安装火焰传感器(F1~F6)、压力传感器(P1~P6)和温度传感器(T1~T3), 如图 2 所示。实验中压力传感器型号为 CT100T, 量程为 0~2 MPa; 火焰传感器型号为 CKG100, 响应光谱为 450~980 nm; 温度传感器型号为 C2 快响应温度热电偶, 量程为 0~2 500 °C; 以上 3 种传感器的响应时间均小于 100 μs。泡沫金属安装在材料夹持器中, 位于火焰传感器 F5~F6 以及压力传感器 P5~P6 之间, 到火焰传感器 F5 的距离为 0.15 m。数据采集采用 TST6300 数据采集系统, 采集对象为火焰传播速度、爆炸超压和火焰温度, 数据采集频率为 100 kHz, 采集方式为内触发, 记录时间从触发点火开始, 整个记录过程小于 2 s。

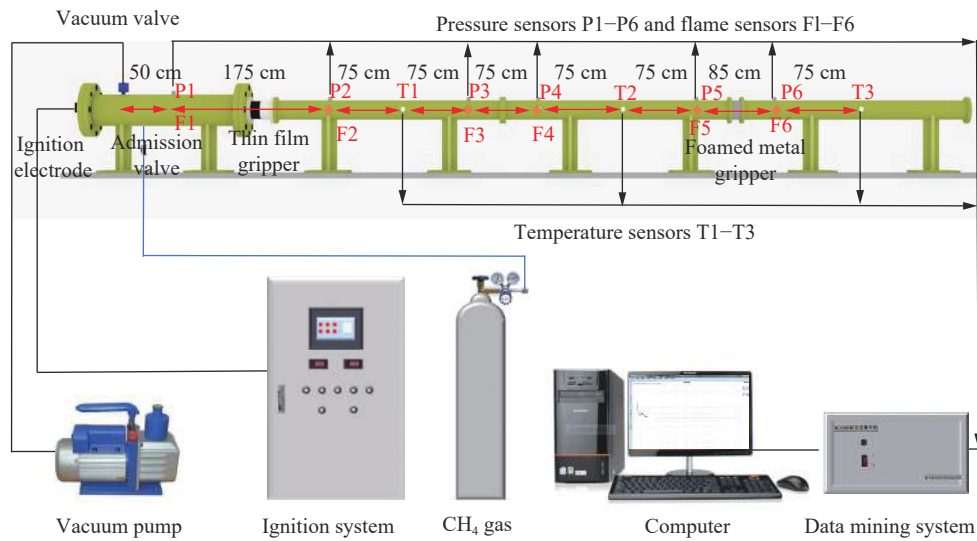


图 2 实验设备

Fig. 2 Experimental equipment

1.3 方案

采用图 2 所示的爆炸管网设备, 通过气体爆炸的方式来测试不同迎爆面结构材料的阻隔爆性能。

首先, 清理爆炸腔体和爆炸管网, 将爆炸腔体与隔爆膜夹持器连接处用厚度为 0.3 mm 的薄膜密封, 并在隔爆膜夹持器周围用密封胶圈对夹持器边缘进行封闭。然后, 在爆炸腔体中充入一定体积的甲烷气体, 使腔体内部充满甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气混合气体后进行爆炸实验。在正式实验前, 需要进行无材料阻隔爆的空管实验。最后, 将实验材料安装在距爆炸腔体 4.4 m 处的管道中进行阻隔爆实验。在整个实验过程中, 利用数据采集系统采集各测点不同传感器数据进行对比, 以便观察不同实验材料对火焰温度传播的阻滞变化、实验材料前后爆炸超压变化及管道中火焰传播的变化, 作为判断材料阻隔爆性能指标。

主要通过对爆炸超压、火焰传播速度和火焰温度 3 个方面的数据进行研究, 对比不同实验材料对爆炸超压等参数的抑制作用。关于爆炸超压、火焰传播速度以及火焰温度相关公式^[26-27] 如式 (1)~(5) 所示。

实验材料对爆炸超压的阻滞效果可通过超压下降速率 dp/dt 和超压衰减率 ζ 进行对比:

$$dp/dt = (p_{\max} - p_i) / \Delta t = \Delta p / \Delta t \quad (1)$$

$$\zeta = (p_{\max} - p_i) / p_{\max} \quad (2)$$

式中: p_{\max} 为实验材料前端道内出现的最大超压, p_i 为爆炸条件下实验材料后端的最大爆炸超压。

实验材料对火焰传播速度的阻滞效果, 可通过火焰传播速度衰减率 μ 进行对比:

$$\mu = \Delta v / v_{\max} \quad (3)$$

式中: Δv 为实验材料前后的火焰传播速度差, v_{\max} 为实验材料迎爆面前端火焰传播速度最大值。

实验材料对火焰温度的阻滞效果, 可通过火焰温度的衰减率 η 进行对比:

$$\eta = (T_{\max} - T_i) / T_{\max} \quad (4)$$

式中: T_{\max} 为实验材料前端的最高温度, T_i 为实验材料后端出现的最高温度。

实验材料的整体防护效果可通过熄爆参数 θ 进行对比:

$$\theta = T p \quad (5)$$

2 阻隔效果分析

2.1 爆炸超压

图 3 给出了不同迎爆面前后爆炸超压-距离数据。由图 3 可知, 当迎爆面表面为锯齿波纹时, 实验材料对爆炸超压的阻滞效果要好于平整迎爆面实验。锯齿形迎爆面爆炸超压衰减率分别为 74.0%(实验 2)、71.3%(实验 3)、30.4%(实验 4), 均高于平整迎爆面的爆炸超压衰减率(11.2%)。压力传感器 P5 之前, 空管实验与泡沫金属实验体系爆炸超压差别较小。而压力传感器 P5~P6 位置处, 空管实验与泡沫金属实验体系爆炸超压差别较大, 这是由于泡沫金属在阻隔爆的过程中起到相对密封作用, 导致了泡沫金属前后端爆炸超压波动较大。

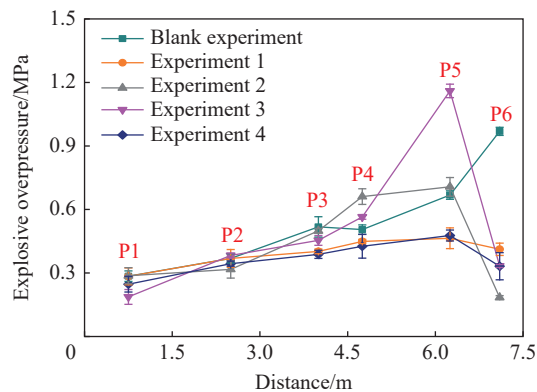


图 3 爆炸超压随传播距离的变化

Fig. 3 Explosive overpressure varied with propagation distance

锯齿角度越小, 锯齿形迎爆面对爆炸超压阻隔效果越好。当锯齿角度由 90° 减小至 30° , 爆炸超压衰减率由 30.4% 升高至 74.0%。此外, 爆炸实验之后, 仅锯齿角度最小的实验 2 泡沫金属未破坏, 保持材料完整。分析认为, 在相同锯齿厚度条件下, 锯齿角度越小, 锯齿数量越多, 爆炸冲击波与迎爆面接触面积越大, 爆炸冲击波经过泡沫金属迎爆面时衰减越大, 锯齿形迎爆面泡沫金属对爆炸超压阻隔爆效果就越好。

不同结构迎爆面前后爆炸超压的演化如图 4 所示, 由图数据分析可得, 实验 1 中(见图 4(a))爆炸超压下降速率为 4.12 MPa/s , 当迎爆面锯齿角度由 30° 增大到 90° 时, 实验 2(图 4(b))~4(图 4(d))爆炸超压下降速率依次为 30.76 、 54.53 和 26.18 MPa/s 。实验 2(图 4(b))与实验 3(图 4(c))爆炸超压下降速率较大, 这是由于材料在阻隔爆的过程中出现爆炸超压在短时间内上升导致的。在实验过程中, 90° 锯齿材料爆炸超压积聚时间相较于 30° 和 60° 有所增长, 爆炸超压上升速率减缓, 导致迎爆面前端传感器检测到爆炸

超压数值较小。在爆炸超压冲击的过程中 90° 材料被破坏, 材料末端爆炸超压下降幅度不大, 相较于 30° 和 60° 而言防护效果较差。

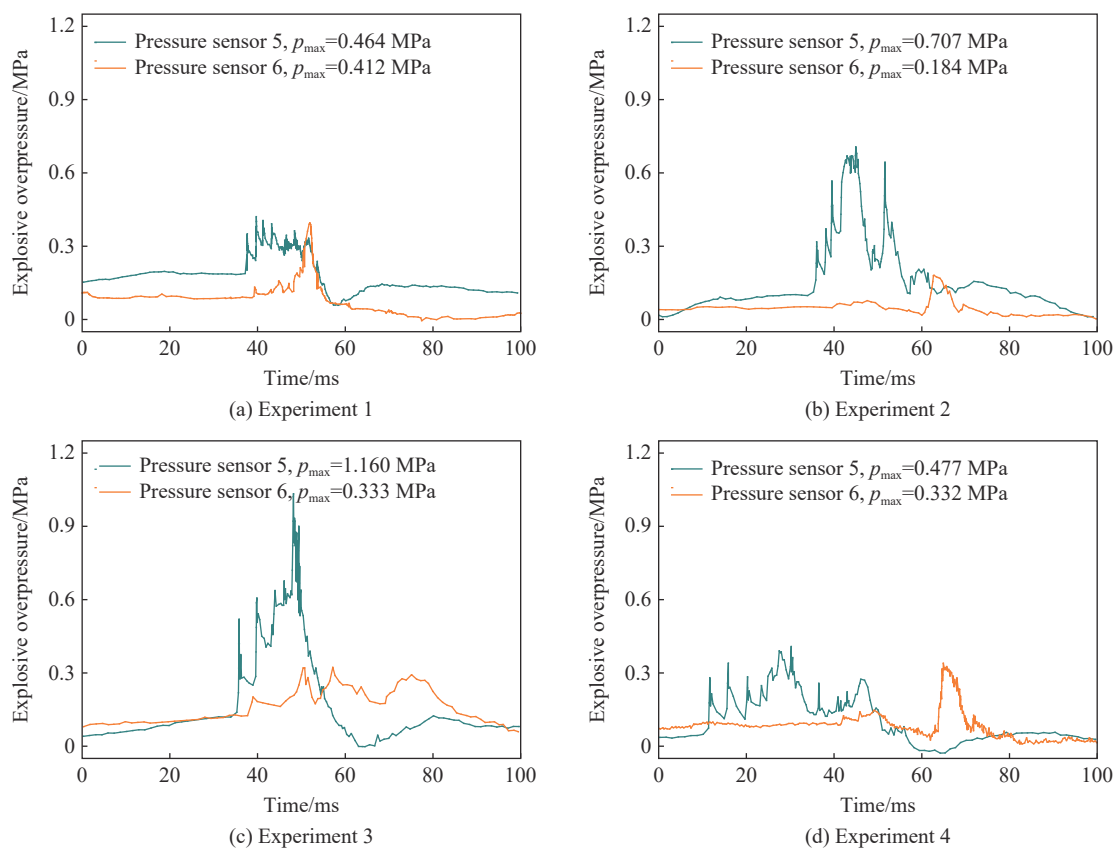


图 4 不同锯齿角度对爆炸超压的影响

Fig. 4 Effect of different zigzag angles on explosion overpressure

2.2 火焰传播

火焰传播速度与传播距离的关系如图 5 所示, 由图可知, 锯齿迎爆面实验材料对火焰传播速度的阻滞效果随着锯齿角度的减小而增大。前期火焰传播速度均随着传播距离的增加而上升, 这是由于在火焰传播初期未通过泡沫金属材料时火焰速度整体传播趋势与空管实验相差不大, 均随着传播距离的增加而递增。当火焰经过实验材料时传播速度有所下降, 结合图 6 可知参考实验对火焰传播速度抑制效果最差。在另外 3 组实验中, 火焰传播速度下降幅度取决于迎爆面锯齿角度的大小, 角度越小, 材料整体对火焰传播的抑制效果越好。在实验 1~4 中, 迎爆面后端传感器检测到的火焰传播速度依次为 221.15、65.28、105.46 和 201.59 m/s, 火焰传播速度下降幅度依次为 35.00、216.27、216.01 和 67.36 m/s。泡沫金属由于本身的多孔性结构特征, 在爆炸火焰通过材料时能将其划分为若干细小部分, 并快速的传导和吸收火焰热量, 降低火焰传播速度, 达到阻滞传播的效果。通过改变迎爆面设计结构可以提高材料与火焰整体的接触面积, 起到更好的阻隔火焰的效果。结合图 3 和图 5 可以发现, 在一定范围内, 气体在爆炸过程中火焰传播速度与超压之间成正关系, 这与林柏泉^[28]的研究结果一致。

通过图 5 中不同迎爆面火焰传播速度-传播距离关系分析发现, 材料前后端火焰传播速度数据误差相比于其他位置数据误差较大, 说明在材料前后端火焰传播速度不稳定。这是由于火焰通过实验材料时出现阻滞作用而造成的。

实验材料对火焰传播速度的抑制效果如图 6 所示, 由图可知, 在爆炸发生过程中实验材料迎爆面后端火焰传播速度均有所下降, 衰减率为 13.67%~76.18%。其中, 实验 1 作为参考实验迎爆面前后火焰传

播速度衰减率为 13.67%, 最大火焰传播速度为 256.15 m/s, 对爆炸火焰传递阻滞效果最差。实验 2 迎爆面前后火焰传播速度衰减率为 76.18%, 最大火焰传递速度为 281.56 m/s, 对爆炸火焰传递阻滞效果最好。实验 3 的最大火焰传播速度比实验 4 的更大, 分别为 321.48 和 268.95 m/s, 并且实验 3 比实验 4 迎爆面前后火焰传播速度衰减率更高, 分别为 67.19% 和 25.04%。这说明, 在火焰冲击作用下实验 2 和实验 3 中实验材料的防护效果要优于实验 1 和实验 4 中的。

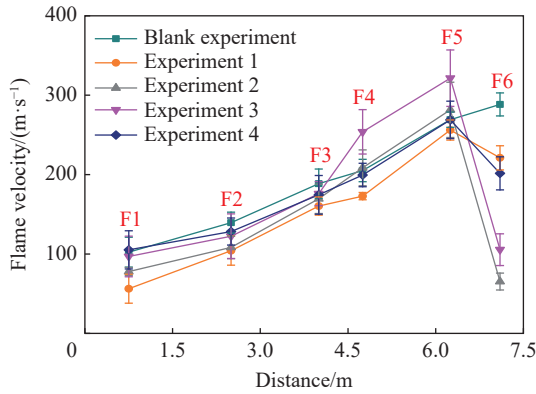


图 5 火焰传播速度与传播距离的关系

Fig. 5 Relation of flame propagation velocity with propagation distance

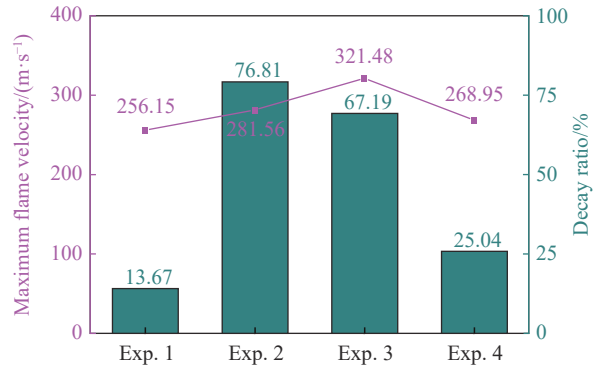


图 6 火焰传播速度抑制效果

Fig. 6 Flame velocity suppression effect

2.3 火焰温度

不同结构迎爆面前后火焰温度随火焰传播距离的变化如图 7 所示, 火焰温度传播趋势整体与爆炸超压、火焰传播速度相似, 火焰温度的下降幅度随着迎爆面锯齿角度的减小而增大。实验 1~4 中材料迎爆面后端检测的温度依次为 423.52、96.11、235.09 和 453.78 °C, 火焰温度下降幅度依次为 643.90、1094.93、839.67 和 560.78 °C, 温度衰减率依次为 60.23%、91.93%、78.13% 和 55.27%。

通过数据对比可知, 实验 2 中实验材料对火焰温度的阻隔性能优于其他 3 组实验中的, 实验 3 和实验 4 中的实验材料对火焰温度的阻隔性能次之, 实验 1 中实验材料对火焰温度的阻隔性能最差。分析认为, 泡沫金属具有良好的热传导及热吸收性能, 可迅速传导和吸收燃烧释放的绝大部分热量。基于此, 通过锯齿结构来改变材料迎爆面整体结构, 使金属材料在良好导热性能的基础上, 让温度能分布更均匀, 并且迎爆面锯齿角度越小, 材料后端温度传感器检测到的温度越低、火焰温度下降幅度越大、衰减率越高和对爆炸火焰温度传播的阻碍效果越好。

图 8 给出了不同迎爆面熄爆参数数据对比, 根据熄爆参数的定量评估结果^[29], 当爆炸超压

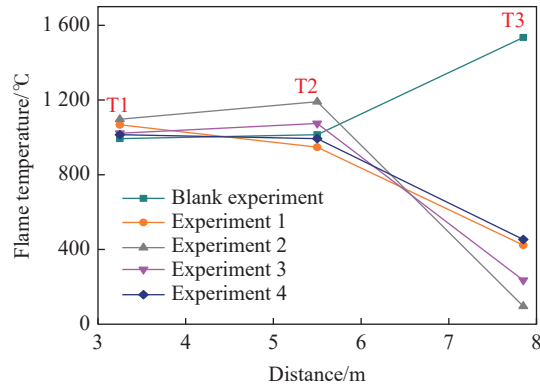


图 7 火焰温度随火焰传播距离的变化

Fig. 7 Relation of flame temperature with flame propagation distance

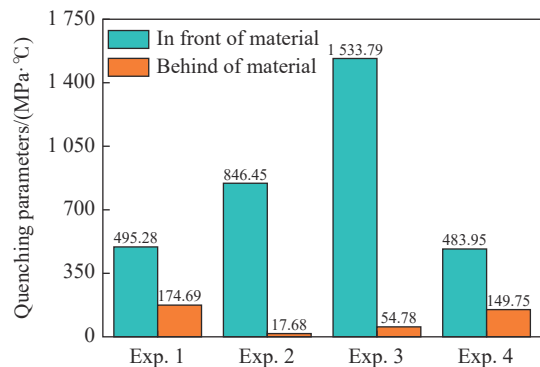


图 8 熄爆参数

Fig. 8 Quenching parameters

超过 0.65 MPa 时,气体爆炸会完全破坏巷道设备,火焰温度超过 595 ℃ 时,瓦斯会被火源引爆。通过计算得出,当熄爆参数低于 390 MPa·℃ 时,人与设备处于相对安全界限内,并且熄爆参数越低则表明防护效果越好。在气体阻隔爆实验过程中,锯齿角度越小,对气体爆炸的阻隔效果越好。实验 2 中材料后端熄爆参数为 17.68 MPa·℃,阻隔爆效果最好。实验 1 中材料后端熄爆参数为 174.69 MPa·℃,阻隔爆效果最差。其中,实验 2~4 中材料前后端熄爆参数分别下降 828.77、1479.01 和 334.20 MPa·℃,这表明材料在爆炸过程中均起到保护作用。

2.4 不同结构迎爆面

通过实验研究,得到了不同结构迎爆面的阻隔爆效果,如图 9 所示。当爆炸冲击波和火焰与迎爆面接触时,锯齿形迎爆面会将火焰分化为多股细小火焰,使得火焰锋面不能连续。此外,由于锯齿状迎爆面相较于平整迎爆面,有更大的接触面积,在爆炸冲击波和火焰更深入地进入泡沫金属的过程中,泡沫金属材料本身具有细小的多孔孔隙结构,因此火焰和冲击波被不同的孔隙结构弱化成若干的细小部分。在此期间,爆炸冲击波和火焰在此区域内大幅集中,并在进入泡沫金属内部的过程中造成变形或在壁面处产生能量的反射和散射作用,从而起到材料阻隔爆的效果。火焰和冲击波通过材料粗糙孔隙时造成的阻力以及与孔壁的碰撞和摩擦,导致参加燃烧反应的自由基数量急剧减少,削弱了整体爆炸反应强度^[30]。

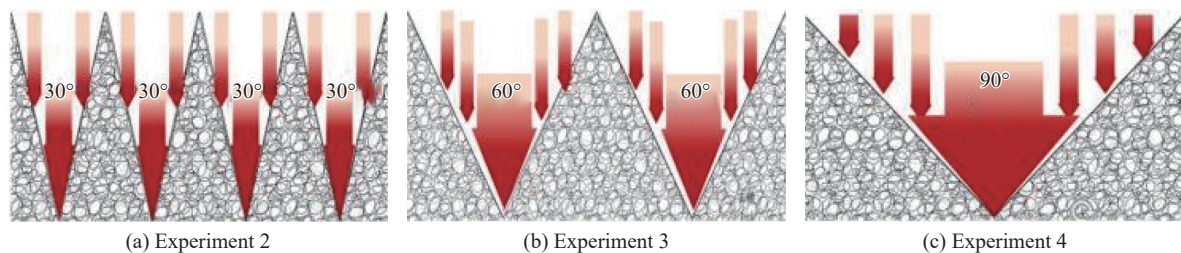


图 9 不同迎爆面的阻隔爆效果

Fig. 9 Effect of blocking explosion of different surfaces

另外,刘庆刚等^[31]研究了不同角度 V 形缺口对集中应力的影响,发现角度与集中应力呈正相关。爆炸冲击波和火焰向迎爆面锯齿内部深入,会在锯齿深处切点形成应力集中区域。锯齿形缺口(V 形缺口)在迎爆面底部尖端处的应力集中程度较高,并且锯齿底部角度越大,即在锯齿边缘两端的过渡半径越大,会导致在该区域范围内的应力集中系数也会相应越大。这就会造成更多的应力集中在锯齿底部。在相同锯齿切入深度和相同材料厚度的条件下,不同锯齿形迎爆面实验材料随着锯齿角度的减小和锯齿齿数的增多,迎爆面与爆炸冲击波接触的面积越大,相同外在应力条件下作用在迎爆面和材料内部的应力越分散,进一步促进泡沫金属整体阻隔爆效果的提升。

3 结 论

通过自主设计的爆炸管网实验平台,研究了不同角度的锯齿形迎爆面泡沫金属对气体爆炸阻隔爆性能的影响,得到如下结论。

(1) 在泡沫金属外侧添加锯齿形迎爆面,能有效提高材料的阻隔爆性能。相较于平整迎爆面实验材料,锯齿形迎爆面泡沫金属在爆炸超压、火焰速度和传播温度的衰减率以及熄爆参数等方面均有不同程度的改善。

(2) 随着锯齿角度变小,泡沫金属材料整体的阻隔爆效果会有所提升。超压衰减率、火焰传播速度衰减率和火焰温度衰减率会随着锯齿角度的减小而提高,其中实验 2 中爆炸超压衰减率、火焰传播速度衰减率和火焰温度衰减率分别为 74.0%、76.18% 和 91.93%,阻隔爆效果最好。

(3) 减小泡沫金属迎爆面锯齿角度,可以有效降低材料后端熄爆参数。实验 2 中材料后端熄爆参数为 17.63 MPa·℃,熄爆参数最低。

参考文献:

- [1] 汪腾蛟,周西华,白刚,等. 煤矿火灾诱发瓦斯爆炸危险性预测 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(12): 4104–4110. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1389.
WANG T J, ZHOU X H, BAI G, et al. Hazard prediction of gas explosion induced by coal mine fire [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(12): 4104–4110. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1389.
- [2] 王秋红,王二飞,陈晓坤,等. 管道内瓦斯爆炸火焰传播压力与温度特性 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(1): 239–247. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.01.027.
WANG Q H, WANG E F, CHEN X K, et al. Pressure and temperature characteristics of flame propagation of gas explosion in pipeline [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(1): 239–247. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.01.027.
- [3] 李润之. 瓦斯煤尘共存条件下的煤尘云爆炸下限 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 913–917. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0331.
LI R Z. Minimum explosive concentration of coal dust cloud in the coexistence of gas and coal dust [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 913–917. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0331.
- [4] 余明高,阳旭峰,郑凯,等. 障碍物对甲烷/氢气爆炸特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.
YU M G, YANG X F, ZHENG K, et al. Effect of obstacles on explosion characteristics of methane/hydrogen [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.
- [5] 秦毅,陈小伟,黄维. 密闭空间可燃气体爆炸超压预测 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(3): 032202. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0175.
QIN Y, CHEN X W, HUANG W. Overpressure prediction of combustible gas explosion in confined space [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(3): 032202. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0175.
- [6] 时本军,穆朝民,马海峰,等. 腔体影响全巷道甲烷爆炸冲击波传播的特性 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 841–849. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0791.
SHI B J, MU C M, MA H F, et al. Cavity effect on the characteristics of methane blast wave propagation in the whole roadway [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 841–849. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0791.
- [7] 薛少谦,黄子超,杜宇婷,等. 基于爆炸强度与隔爆屏障作用技术的巷道隔爆实验 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1791–1798. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.HZ21.0438.
XUE S Q, HUANG Z C, DU Y T, et al. Roadway explosion isolation technology based on explosion intensity and flame-proof barrier [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1791–1798. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.HZ21.0438.
- [8] 尹德军,郑坚,熊超,等. 基于弹丸爆炸毁伤效应的复合材料与结构研究进展 [J]. *材料导报*, 2018, 32(5): 815–821,827. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.05.018.
YIN D J, ZHENG J, XIONG C, et al. Research progress on composite materials and structures used for protection against damage effect of projectile explosion [J]. *Materials Review*, 2018, 32(5): 815–821,827. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.05.018.
- [9] 张博一,高金涛,王理,等. 粉煤灰空心球/Al 复合泡沫材料准静态力学性能及本构模型 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(8): 2655–2665. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.003.
ZHANG B Y, GAO J T, WANG L, et al. Quasi-static mechanical properties and constitutive model of fly ash cenosphere/aluminum syntactic foam [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(8): 2655–2665. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.003.
- [10] 王建忠,许忠国,敖庆波,等. 金属纤维多孔材料力学性能研究现状 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(6): 1636–1640.
WANG J Z, XU Z G, AO Q B, et al. Status quo of mechanical properties of porous metal fibrous materials [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(6): 1636–1640.

- [11] 贾海林, 项海军, 李第辉, 等. 含 NaCl 超细水雾对不同阻塞率管道内爆炸的抑制 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(4): 042201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0268.
JIA H L, XIANG H J, LI D H, et al. Suppression of explosion in pipelines with different blocking ratios by ultrafine water mist containing sodium chloride [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(4): 042201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0268.
- [12] NIE B S, HU S T, YANG L L, et al. Characteristics of flame velocity of gas explosion with obstruction in pipeline [J]. *Perspectives in Science*, 2016, 7: 277–281. DOI: 10.1016/j.pisc.2015.12.003.
- [13] 程方明, 常助川, 史合, 等. 多孔障碍物对预混火焰传播的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(8): 082103. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0480.
CHENG F M, CHANG Z C, SHI H, et al. Multi-hole obstacles' effects on premixed flame's propagation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(8): 082103. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0480.
- [14] DUAN Y L, WANG S, YANG Y L, et al. Experimental study on methane explosion characteristics with different types of porous media [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 69: 104370. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104370.
- [15] BIVOL G, GOLOVASTOV S. Effects of polyurethane foam on the detonation propagation in stoichiometric hydrogen-air mixture [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 130: 14–21. DOI: 10.1016/j.psep.2019.06.032.
- [16] OUSJI H, BELKASSEM B, LOUAR M A, et al. Air-blast response of sacrificial cladding using low density foams: experimental and analytical approach [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 128/129: 459–474. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.05.024.
- [17] 周尚勇, 高建村, 胡守涛, 等. 金属丝状材料对预混气体爆炸影响规律研究 [J]. *北京石油化工学院学报*, 2019, 27(2): 62–65, 76. DOI: 10.12053/j.issn.1008-2565.2019.02.011.
ZHOU S Y, GAO J C, HU S T, et al. Study of the effect of metal filamentary materials on premixed gas explosion [J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2019, 27(2): 62–65, 76. DOI: 10.12053/j.issn.1008-2565.2019.02.011.
- [18] 王曦浩, 夏志成, 孔新立, 等. 钢板夹泡沫铝组合板抗接触爆炸性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(13): 86–91. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.13.013.
WANG X H, XIA Z C, KONG X L, et al. Anti-contact blast performance of steel-aluminum foam-steel sandwich panels [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(13): 86–91. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.13.013.
- [19] 张健, 赵桂平, 卢天健. 泡沫金属在冲击载荷下的动态压缩行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(3): 278–284. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0278-07.
ZHANG J, ZHAO G P, LU T J. High speed compression behaviour of metallic cellular materials under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(3): 278–284. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0278-07.
- [20] 孙建华, 曲征, 魏春荣, 等. 泡沫金属抑制瓦斯爆炸火焰的实验及机理研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(3): 463–467.
SUN J H, QU Z, WEI C R, et al. Experimental and mechanism study on gas explosion flame suppressed by foam metal [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2013, 30(3): 463–467.
- [21] ZHUANG C J, WANG Z R, ZHANG K, et al. Explosion suppression of porous materials in a pipe-connected spherical vessel [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 65: 104106. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104106.
- [22] WANG Y J, JIANG S G, WU Z Y, et al. Study on the inhibition influence on gas explosions by metal foam based on its density and coal dust [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 56: 451–457. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.09.009.
- [23] SANTOSA S P, ARIFURRAHMAN F, IZZUDIN M H, et al. Response analysis of blast impact loading of metal-foam sandwich panels [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173: 495–502. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.073.
- [24] 魏春荣, 徐敏强, 孙建华, 等. 多孔材料抑制瓦斯爆炸传播的实验及机理 [J]. *功能材料*, 2012, 43(16): 2247–2250, 2255. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2012.16.031.
WEI C R, XU M Q, SUN J H, et al. Experiment and mechanism of porous materials for suppressing the gas explosion [J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(16): 2247–2250, 2255. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2012.16.031.
- [25] 余明高, 刘梦茹, 温小萍, 等. 超细水雾-多孔材料协同抑制瓦斯爆炸实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1562–1569. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0795.

- YU M G, LIU M R, WEN X P, et al. Synergistic inhibition of gas explosion by ultrafine water mist-porous materials [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1562–1569. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0795.
- [26] 余明高, 万少杰, 徐永亮, 等. 荷电细水雾对管道瓦斯爆炸超压的影响规律研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(2): 227–232, 261. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000301.
- YU M G, WAN S J, XU Y L, et al. Study on the overpressure of gas explosion in the pipeline affected by charged water mist [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(2): 227–232, 261. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000301.
- [27] 魏春荣. 多孔材料对瓦斯爆炸抑制作用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 84–105.
- WEI C R. Porous materials inhibition on gas explosion [D]. Harbin, Heilongjiang, China: Harbin Institute of Technology, 2012: 84–105.
- [28] 林柏泉. 瓦斯爆炸动力学特征参数的测定及其分析 [J]. *煤炭学报*, 2002, 27(2): 164–167. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2002.02.011.
- LIN B Q. The measurement and analysis of dynamics feature parameter in gas explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(2): 164–167. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2002.02.011.
- [29] 魏春荣, 李晓光, 孙建华, 等. 多孔材料阻隔爆效果评估方法 [J]. *湖南科技大学学报 (自然科学版)*, 2014, 29(4): 1–6. DOI: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2014.04.001.
- WEI C R, LI X G, SUN J H, et al. Research on evaluation method of suppression and isolation of explosion based on porous material [J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 29(4): 1–6. DOI: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2014.04.001.
- [30] 魏春荣, 徐敏强, 王树桐, 等. 多孔材料抑制瓦斯爆炸火焰波的实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2): 206–213. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2013.02.008.
- WEI C R, XU M Q, WANG S T, et al. Experiment of porous materials for suppressing the gas explosion flame wave [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2013, 42(2): 206–213. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2013.02.008.
- [31] 刘庆刚, 魏青, 韩伟信, 等. 基于有限元法的 V 型缺口平板应力集中系数研究 [J]. *河北工业科技*, 2019, 36(4): 240–245. DOI: 10.7535/hbgykj.2019yx04003.
- LIU Q G, WEI Q, HAN W X, et al. Study of the stress concentration factors of a V-notched plate by using finite element method [J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2019, 36(4): 240–245. DOI: 10.7535/hbgykj.2019yx04003.

(责任编辑 张凌云)