

瓦斯爆炸冲击作用下巷道壁面损伤破坏评估

丁文学, 叶青, 贾真真, 刘佳林

湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年1月16日; 录用日期: 2024年2月5日; 发布日期: 2024年4月24日

摘要

矿井瓦斯爆炸会导致巷道产生严重破坏, 但是对于瓦斯爆炸冲击荷载对巷道壁面损伤破坏评估研究非常有限。针对现有研究的不足, 本文分析了巷道壁面损伤破坏准则并选择了壁面损伤评估方法(支座转角损伤评估法), 采取基于支座转角的超压-冲量损伤破坏准则来分析瓦斯爆炸冲击荷载作用下巷道壁面的动态响应数值数据, 拟合了瓦斯爆炸冲击荷载作用下巷道壁面 $P-I$ 曲线, 并将 $P-I$ 空间划分了以支座转角 2° , 4° , 6° 和 8° 为节点为5个区域, 这5个区分别为轻度损伤区、中度损伤区、重度损伤区、严重损伤区、坍塌破坏区。研究表明, 本次建立的 $P-I$ 曲线以及巷道壁面的损伤破坏等级能够反应巷道壁面的动响应情况和破坏特性, 研究结果能为瓦斯爆炸巷道壁面损伤破坏评估提供参考。

关键词

瓦斯爆炸, 巷道壁面, 破坏特征, 评估方法, $P-I$ 曲线

Analysis Damage Assessment of Roadway Wall Caused by Gas Explosion Impact

Wenxue Ding, Qing Ye, Zhenzhen Jia, Jialin Liu

School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Jan. 16th, 2024; accepted: Feb. 5th, 2024; published: Apr. 24th, 2024

Abstract

Mine gas explosions can cause severe damage to roadways, but the research on damage assessment of roadway walls by gas explosion impact loads is very limited. To address the shortcomings of existing studies, the damage criterion of roadway walls is analyzed and a wall damage assessment method (bearing angle damage assessment method) is selected. The overpressure-impulse

damage criterion based on the bearing angle is adopted to analyze the numerical data of the dynamic response of the roadway wall under the impact load of gas explosion. The $P-I$ curve of the roadway wall under the impact load of gas explosion is fitted. And the $P-I$ space is divided into 5 regions with the nodes of bearing angles of 2° , 4° , 6° and 8° . These 5 zones are mild damage zone, moderate damage zone, severe damage zone, serious damage zone, and collapse damage zone. The research results show that the $P-I$ curve and the damage grade of the roadway wall can reflect the dynamic response and damage characteristics of the roadway wall. The results of the study can provide a reference for damage assessment of gas explosions in roadway wall.

Keywords

Gas Explosion, Roadway Wall, Damage Characteristics, Assessment Method, $P-I$ Curve

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤矿瓦斯爆炸会导致巷道设施被严重破坏、给煤矿带来巨大财产损失[1] [2] [3]，为了掌握瓦斯爆炸破坏特性，国内外许多学者对此进行了大量研究[4] [5] [6]，并取得丰硕的研究成果。为了优化工程结构的抗爆性能、提高系统安全度，人们提出了许多损伤理论和评估方法，这些理论和方法广泛应用于指导工程实践，并为工程结构损伤破坏研究奠定了基础。例如，2004年，Soh等[7]进行了大量数值模拟试算，通过曲线拟合的方式获得了构件的 $P-I$ 曲线。2006年，孙建运等[8]研究了钢筋混凝土柱在爆炸冲击荷载作用下的响应特征，提出了钢筋混凝土柱的等效单自由度模型的等效屈服强度计算公式。2009年，李忠献等[9]研究了在爆炸荷载下钢筋混凝土板的破坏特性，提出了基于剩余承载力的破坏准则，建立了爆炸冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的 $P-I$ 曲线和拟合公式。2010年，蒋维等[10]建立了三轴压缩条件下岩石的损伤本构模型，结合试验曲线和多元函数极值条件验证了损伤本构模型参数。2011年，Mutalib等[11]对爆炸荷载作用下纤维增强混凝土柱的损伤评估进行了研究，以柱的剩余承载力为损伤指标，考虑了柱的尺寸、材料强度、纤维厚度及强度等参数，通过数值模拟得到了纤维增强混凝土柱的 $P-I$ 曲线。2012年，吴赛[12]研究了不同参数对复式钢管混凝土柱抗爆能的影响，以剩余承载力作为破坏准则，建立了 $P-I$ 曲线。2012年，汪维[13]分析了爆炸载荷形状及构件参数对各临界损伤程度 $P-I$ 曲线的两条渐近线的影响，提出了构件 $P-I$ 曲线的一种简化方法。2013年，汪[14]采用了Johnson-Cook强度模型，评估了爆炸作用下的方钢柱损伤情况，并提出了 $P-I-t$ 曲面计算式。2014年，丁阳等[15]提出了基于钢柱抗剪承载力的失效破坏准则，获得了爆炸荷载作用下钢柱的动态响应、损伤评估和失效情况。2014年，Dragos [16]提出了新式等效单自由度法，并获取了在爆炸荷载作用下的钢柱 $P-I$ 曲线。2016年，田志敏等[17]试验了钢板混凝土复合梁的承载性能，得到了爆炸荷载作用下钢板混凝土复合梁的 $P-I$ 曲线。2016年，陈俊杰等[18]基于单自由度等效体系运动方程和结构变形的理想弹塑性模型，运用图像法计算阻尼耗能，得到了 $P-I$ 曲线冲量区和准静态区的渐进线方程，并得到了 $P-I$ 曲线动态区的拟合公式。2016年，陈晔[19]模拟研究了室内爆炸波的传播以及爆炸诱发火灾发展过程，并建立了通过使用 $P-I$ 曲线预测爆炸荷载与火灾联合作用下钢柱的损伤程度的方法。2017年，师吉浩等[20]分析了不同爆炸载荷下的三种波纹板防爆墙的动态响应，拟合了三种类型波纹板防爆墙的抗爆评估 $P-I$ 曲线，获取了拟合不同防爆墙 $P-I$ 曲

线的统一经验方程形式。2017年, 闫秋实等[21]利用有限元分析方法, 建立了“炸药-空气-混凝土柱”耦合模型, 提出了基于承载能力的损伤评估方法。2018年, 潘建军等[22]构建了一种基于等效单自由度模型的钢管RPC柱抗爆超压-冲量($P-I$)曲线, 并对标准ISO-834火灾和爆炸作用后的4根钢管RPC柱进行损伤评估。

综上分析发现, 有关爆炸冲击荷载对工程结构损伤破坏的研究大多体现在固体炸药爆炸方面, 而且对地面设施的炸药爆炸破坏 $P-I$ 评估已经比较成熟, 但是对于矿井瓦斯爆炸冲击荷载对巷道壁面结构破坏的 $P-I$ 评估的研究十分有限。大量实验和数值模拟表明[23] [24] [25], 对矿井巷道破坏进行评估, $P-I$ 曲线也可以作为一个很好的方法。因此, 本文在分析 $P-I$ 曲线基本理论基础, 以支座转角作为损伤破坏指标判定巷道壁面损伤破坏等级, 并应用此方法评估不同瓦斯爆炸强度下的巷道损伤破坏程度。研究结果不但能为不同爆炸强度下的巷道损伤破坏提供防护依据, 而且能根据评估结果分析巷道在瓦斯爆炸荷载后的安全性及使用价值。

2. 巷道壁面损伤破坏准则和评估方法

2.1. 壁面破坏准则

常见的爆炸冲击波对物体的伤害评估准则有: 超压准则、冲量准则和超压-冲量准则。超压准则: 若目标物的损伤破坏主要由超压峰值造成的, 则适合采用超压准则。当物体在爆炸持续较小超压下发展破坏, 则不适应于单独使用超压准则评估损伤。冲量准则: 冲量破坏准则认为爆炸冲击波对受载物造成损伤破坏, 取决于爆炸冲量大小。如果冲量值越过损伤破坏临界值, 则受载物损伤破坏; 但超压峰值也有高低, 当超压很小即使荷载持时再长目标也不会产生任何损伤破坏, 故仅用冲量准则也是不全面的。冲量准则的适用目标通常达到损伤破坏需要经历比较长的时间。超压-冲量准则: 超压-冲量准则综合考虑了超压准则和冲量准则的优缺点, 该准则认为在超压和冲量共同满足某一临界条件时, 受载物就会产生损伤破坏。超压-冲量($P-I$)准则适合于爆炸荷载下大多数目标物的损伤破坏评估, 同时考虑超压和冲量两个重要的爆炸参数。所以本次对瓦斯爆炸冲击荷载下巷道壁面的损伤破坏评估采用超压-冲量准则, 即 $P-I$ 准则。

2.2. 壁面损伤评估方法

常见的爆炸冲击波对物体的损伤评估方法有支座转角损伤评估、剪切滑移量损伤评估、剩余承载力损伤评估和基于延性比的损伤评估等[26] [27]。

1) 支座转角损伤评估

壁面损伤破坏程度常和壁面最大动态响应相关联, 常用评估参数支座转角来评估壁面损伤破坏程度[26] [27], 支座转角大小来源于壁面单元的位移, 位移大小在爆炸试验的现场容易测量, 在数值模拟单元上也方便提取, 在抗爆设计标准中更容易于查找。

支座转角 θ 定义见图 1, 表达式为:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_m}{L_{\min}} \right) \quad (1)$$

θ 为支座转角, x_m 为变形位移量, L_{\min} 是峰值位移点距最近支座的距离, 等于单元长度的一半, 支座转角与最大弯矩处横截面转角相关。在张拉膜动态响应中, θ 随着峰值位移与长度的比。

可以通过对不同瓦斯爆炸强度下巷道壁面的损伤破坏程度进行粗略评估, 并选择支座转角 θ 的 $P-I$ 准则来评估巷道壁面损伤破坏程度, 损伤破坏等级和相关参数如表 1 所示。

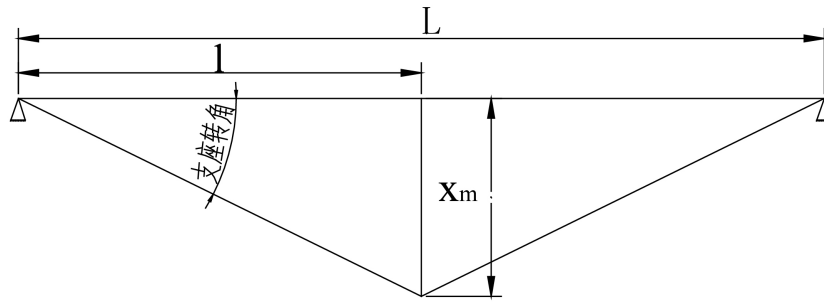


Figure 1. Schematic diagram of bearing angle
图 1. 支座转角示意图

Table 1. Criteria for damage assessment
表 1. 损伤破坏评估等级

损伤破坏级别	损伤描述	支座转角限值
轻度损伤	壁面出现小部分塑性变形, 没有明显的永久性损伤, 可以正常使用。	$\theta_{\max} \leq 2^\circ$
中度损伤	小范围内有塑性变形, 经修复后可以承受同样的瓦斯爆炸载荷, 可重复使用。	$2^\circ < \theta_{\max} \leq 4^\circ$
重度损伤	大范围上已经产生塑性变形, 可进行修复, 但不能承受同样的瓦斯爆炸载荷。	$4^\circ < \theta_{\max} \leq 6^\circ$
严重损伤	壁面未完全失效, 但已经产生显著塑性变形, 无法进行修复, 不能承受同样的瓦斯爆炸载荷。	$6^\circ < \theta_{\max} \leq 8^\circ$
坍塌	壁面坍塌	$\theta_{\max} > 8^\circ$

2) 剪切滑移量损伤评估

巷道壁面单元的剪切滑移量可以表示为:

$$W_s = 0.5SL \tag{2}$$

其中, W_s 是剪切滑移量, 表示单元剪切变形累积的滑移大小, S 是剪应变平均值, L 是单元长度。

3) 剩余承载力损伤评估

通过壁面煤岩体承载能力作为损伤破坏指标来评定巷道壁面的损伤破坏程度, 具有现实意义。剩余承载力损伤破坏参数如下:

$$W = 1 - r/R \tag{3}$$

其中, W 是剩余承载力, r 是壁面单元剩余承载力, R 是壁面单元基准极限弯矩。

4) 基于延性比的损伤评估

延性比 Q 对评估延性物体的低等级损伤破坏和脆性物体的所有等级损伤破坏较为适宜。称单元的挠度与屈服挠度的比为延性比:

$$Q = S/E \tag{4}$$

其中, Q 是延性比, E 是单元的屈服挠度, S 是单元的最大位移。

通过分析以上 4 种损伤评估参数指标, 发现损伤评估参数指标既有差别性(例如: 由于定义划分标准不太相同, 各损伤评估参数有所区别), 也有一致性(例如: 损伤等级和防护等级关联密切)。基于巷道壁面破坏特性及 ANSYS/LS-DYNA 特性, 结合 $P-I$ 评估办法, 本次选择支座转角作为损伤评估参数。

3. 壁面损伤破坏评定

为建立巷道壁面的 $P-I$ 损伤评估曲线, 本次利用瓦斯爆炸冲击荷载作用下巷道壁面的动态响应数值模拟

数据(由于篇幅限制,数据见附件),并根据表1中的损伤评估准则,经过多次模拟获得了一系列不同损伤程度区间边界点,将这些边界点连结成 $P-I$ 曲线,并通过 origin 进行曲线的公式拟合。 $P-I$ 曲线上的每一个点对应着特定的支座转角,也与特定损伤等级相关联,并且是在具体的瓦斯爆炸荷载下得到的。经过大量的反复试算,得到各损伤破坏等级的分界点,将各测点对应的超压和冲量标注在 $P-I$ 空间内,如图2所示。

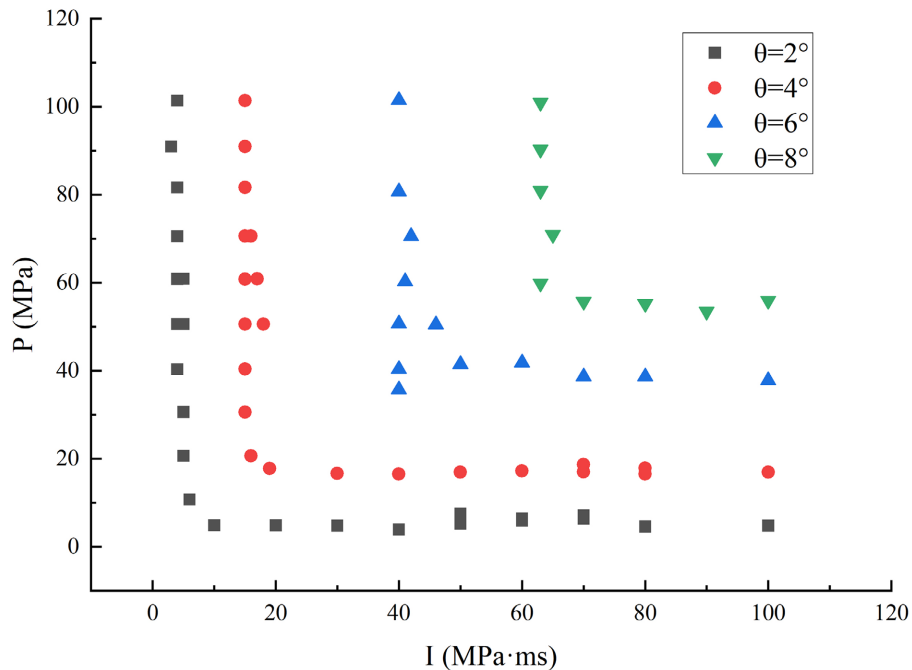


Figure 2. Measuring value of dividing point
图2. 分界点测值

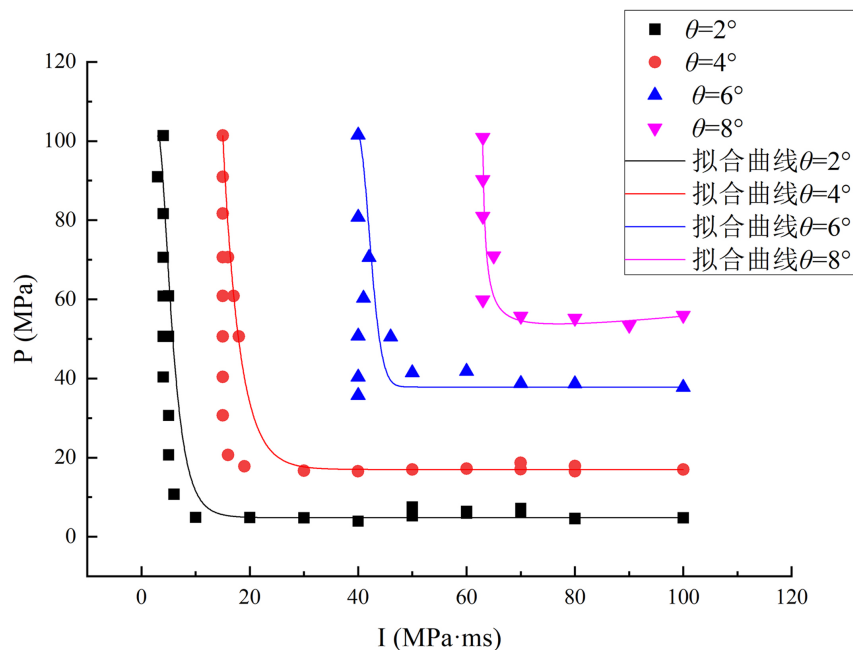


Figure 3. Fitting of $P-I$ curve
图3. $P-I$ 曲线的拟合

通过 origin 拟合得到的 $P-I$ 曲线如图 3 所示。图中 4 条 $P-I$ 曲线分别是 $\theta = 2^\circ$ 、 $\theta = 4^\circ$ 、 $\theta = 6^\circ$ 和 $\theta = 8^\circ$ 的损伤破坏程度临界值，将 $P-I$ 空间划分为 5 个区域，分别为轻度损伤区、中度损伤区、重度损伤区、严重损伤区、坍塌破坏区，损伤程度划分如表 2 所示。

Table 2. Damage degree division

表 2. 损伤程度划分

θ ($^\circ$)	<2	2~4	4~6	6~8	>8
损伤程度	轻度损伤	中度损伤	重度损伤	严重损伤	坍塌破坏

图 3 中每一个组合点表示一种瓦斯爆炸强度下的巷道壁面测点损伤情况，通过曲线拟合得到的 $P-I$ 曲线通常可以表示为：

$$(P - P_0)(I - I_0) = \mu \left(\frac{P_0}{2} + \frac{I_0}{2} \right)^\beta \quad (5)$$

其中， P_0 为极限超压， I_0 为极限冲量，即图 3 中超压渐近线和冲量渐近线所对应的数值。对于巷道壁面，各参数取值如表 3 所示。

Table 3. Curve parameters of $P-I$

表 3. $P-I$ 曲线参数

θ ($^\circ$)	P_0/MPa	$I_0/\text{MPa}\cdot\text{ms}$	μ	β
2	3.53	3.95	8.11	0.59
4	13.8	15.9	8.11	0.59
6	35.2	40.5	8.11	0.59
8	55.2	63.5	8.11	0.59

因此，曲线拟合公式可表达为：

$$(P - P_0)(I - I_0) = 8.11 \left(\frac{P_0}{2} + \frac{I_0}{2} \right)^{0.59} \quad (6)$$

将得到的 $P-I$ 损伤破坏曲线用于不同瓦斯爆炸强度下的巷道损伤破坏程度评估，不同爆炸强度(即 $P-I$ 组合)下封闭端面 41605 号测点位移响应如图 4 所示，由爆炸产生的最大位移量可对壁面损伤破坏进行等级评估。

当巷道内瓦斯爆炸强度为 $1.7\text{E}06\text{J}$ 时，数值模拟得到巷道壁面单元测点上的最大超压值为 3.45 MPa ，最大冲量值为 $3.91\text{ MPa}\cdot\text{ms}$ ，同时测得测点最大位移为 0.00085 m ，经计算得到支座转角为 1.95° 。将超压测值 - 冲量测值的组合点绘制在图 3 的 $P-I$ 曲线图中，得到的损伤破坏程度为轻度损伤。

当巷道内瓦斯爆炸强度为 $5.1\text{E}06\text{J}$ ，数值模拟得到巷道壁面单元测点上的最大超压值为 10.4 MPa ，最大冲量值为 $11.9\text{ MPa}\cdot\text{ms}$ ，同时测得测点最大位移为 0.00149 m ，经计算得到支座转角为 3.41° 。将超压测值和冲量测值的组合点绘制在图 3 的 $P-I$ 曲线图中，得到的损伤破坏程度为中度损伤破坏。

当巷道内瓦斯爆炸强度增加到 $17\text{E}06\text{J}$ 时，数值模拟得到巷道壁面单元测点上的最大超压值为 27.6 MPa ，最大冲量值为 $31.7\text{ MPa}\cdot\text{ms}$ ，同时测得测点最大位移为 0.00243 m ，经计算得到支座转角为 5.55° 。将超压测值和冲量测值的组合点绘制在图 3 的 $P-I$ 曲线图中，得到的损伤破坏程度为重度损伤破坏。

当巷道内瓦斯爆炸强度为 $20\text{E}06\text{J}$ 时，数值模拟得到巷道壁面单元测点上的最大超压值为 55.2 MPa ，

最大冲量值为 63.5 MPa·ms，同时测得测点最大位移为 0.00342 m，经计算得到支座转角为 7.78°。将超压测值和冲量测值的组合点绘制在图 3 的 $P-I$ 曲线图中，得到的损伤破坏程度为严重损伤破坏。

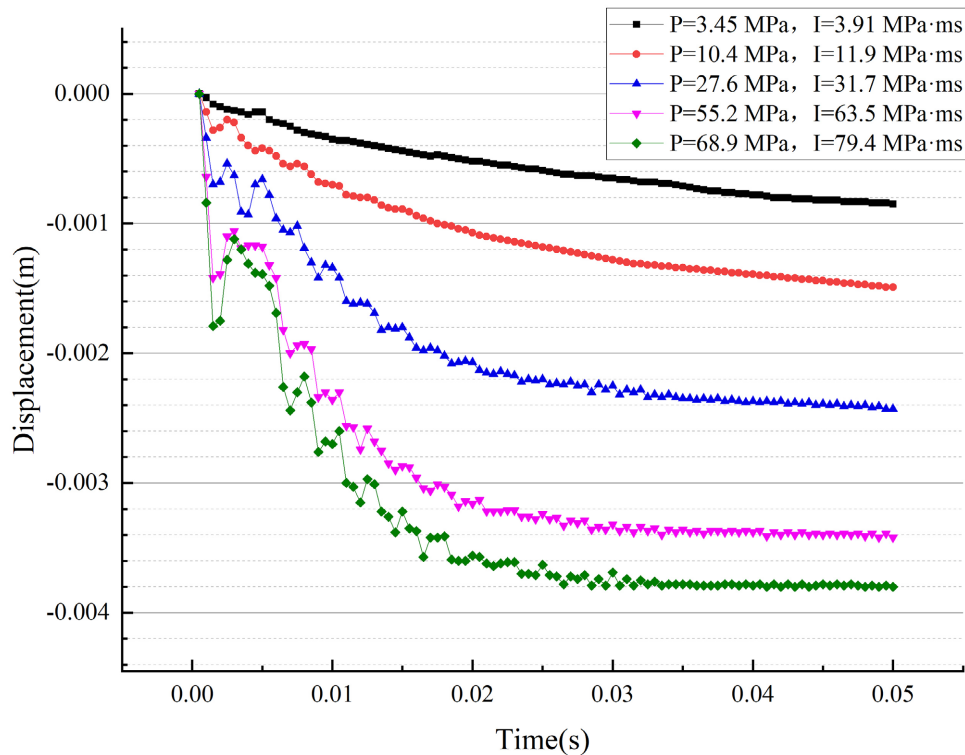


Figure 4. The displacement of different explosion
图 4. 不同爆炸强度时的位移

当巷道内瓦斯爆炸强度为 34E06J 时，数值模拟得到巷道壁面单元测点上的最大超压值为 68.9 MPa，最大冲量值为 79.4 MPa·ms，同时测得测点最大位移为 0.0038 m，经计算得到支座转角为 8.64°。将超压测值和冲量测值的组合点绘制在图 3 的 $P-I$ 曲线图中，得到的损伤破坏程度为坍塌破坏。5 组数值模拟动态响应与 $P-I$ 曲线评估结果基本一致。

4. 结论

1) 基于爆炸冲击荷载作用下巷道壁面的动态响应数值模拟数据，选取支座转角为巷道壁面损伤破坏评估参数，以 $P-I$ 为损伤破坏评估准则，获得不同损伤等级区间边界点，将连结边界点成 $P-I$ 曲线，并获得了曲线的拟合公式。

2) 建立了以支座转角 2°，4°，6°和 8°为节点的轻度损伤，中度损伤，重度损伤，严重损伤和坍塌破坏区域。

基金项目

国家自然科学基金项目“矿井多爆源瓦斯爆炸传播特性及热冲击动力学机制研究”(编号: 52174178)、“矿井瓦斯爆炸能量释放转化特性及热冲击能量损耗研究”(编号: 52174177)。

参考文献

[1] 叶青, 林柏泉. 受限空间瓦斯爆炸传播特性[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 35-46.

- [2] Ye, Q., Wang, G.G.X., Jia, Z.Z. and Zheng, C.S. (2017) Experimental Study on the Influence of Wall Heat Effect on Gas Explosion and Its Propagation. *Applied Thermal Engineering*, **118**, 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.084>
- [3] Ye, Q., Lin, B.Q., Jian, C.G. and Jia, Z.Z. (2012) Propagation Characteristics of Gas Explosion in Duct with Sharp Change of Cross Sections. *Disaster Advance*, **15**, 999-1003.
- [4] Gao, K., Liu, Z., et al. (2021) Effect of Low Gas Concentration in Underground Return Tunnels on Characteristics of Gas Explosions. *Process Safety and Environmental Protection*, **152**, 679-691. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.045>
- [5] Jiang, B.Y., Lin, B.Q., Shi, S.L., et al. (2012) Numerical Simulation on the Influences of Initial Temperature and Initial Pressure on Attenuation Characteristics and Safety Distance of Gas Explosion. *Combustion Science and Technology*, **184**, 135-150. <https://doi.org/10.1080/00102202.2011.622321>
- [6] Ye, Q., Jia, Z.Z., Wang, H.Z. and Pi, Y. (2013) Characteristics and Control Technology of Gas Explosion in Gob of Coal Mines. *Disaster Advance*, **6**, 112-118.
- [7] Tian, B. and Soh, K.T. (2004) Load-Impulse Diagrams of Reinforced Concrete Beams Subjected to Concentrated Transient Loading. Protective Technology Center, Pennsylvania State University, Pennsylvania.
- [8] 孙建运. 爆炸冲击荷载作用下钢管混凝土柱性能研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2006.
- [9] 李忠献, 师燕超, 史祥生. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板破坏评定方法[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 60-66.
- [10] 蒋维, 邓建, 李隐. 基于对数正态分布的岩石损伤本构模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1190-1194.
- [11] Mutalib, A.A. and Hao, H. (2011) Development of P-I Diagrams for Columns. *International Journal of Impact Engineering*, **38**, 290-304. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.10.029>
- [12] 吴赛. 爆炸荷载下复式钢管混凝土柱动力响应研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [13] 汪维. 钢筋混凝土构件在爆炸荷载作用下的毁伤效应及评估方法研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [14] Ding, Y., et al. (2013) Damage Evaluation of the Steel Tubular Column Subjected to Explosion and Post-Explosion Fire Condition. *Engineering Structures*, **55**, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.01.013>
- [15] 丁阳, 宋晓然, 师燕超. 爆炸荷载作用下基于抗剪承载力的钢柱失效准则[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(8): 1151-1155.
- [16] Dragos, J. and Wu, C.Q. (2014) Single-Degree-of-Freedom Approach to Incorporate Axial Load Effects on Pressure Impulse Curves for Steel Columns. *Journal of Engineering Mechanics*, **141**, Article ID: 04014098. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000818](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000818)
- [17] 田志敏, 章峻豪, 江世永. 钢板混凝土复合梁在爆炸荷载作用下的损伤评估研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 42-48.
- [18] 陈俊杰, 高康华, 孙敖. 爆炸条件下结构超压一冲量曲线简化计算研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 224-232. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2016.13.036>
- [19] 陈晔. 爆炸与次生火灾联合作用下钢结构损伤破坏及连续倒塌研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2016.
- [20] Shi, J.H., Zhu, Y., Chen, G.M., Fu, J.M. and Liu, S.J. (2017) Assessment of Blast Resistance Capacities of Corrugated Blast Walls Based on the P-I Model. *Vibration and Shock*, **36**, 188-195.
- [21] 闫秋实, 杜修力. 典型地铁车站柱在爆炸荷载作用下损伤评估方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(1): 1-7.
- [22] 潘建军, 陈万祥, 郭志昆, 周子欣. 基于 P-I 曲线的火灾后钢管 RPC 柱抗爆损伤评估方法[J]. 防护工程, 2018, 40(5): 16-26.
- [23] Ye, Q. and Jia, Z.Z. (2014) Effect of the Bifurcating Duct on the Gas Explosion Propagation Characteristics. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, **50**, 424-428. <https://doi.org/10.1134/S0010508214040108>
- [24] Yang, Z.H., Ye, Q., Jia, Z.Z. and Li, H. (2020) Numerical Simulation of Pipeline-Pavement Damage Caused by Explosion of Leakage Gas in Buried PE Pipelines. *Advances in Civil Engineering*, **10**, Article ID: 4913984. <https://doi.org/10.1155/2020/4913984>
- [25] Ye, Q., Jia, Z.Z. and Zheng, C.S. (2017) Study on Hydraulic-Controlled Blasting Technology for Pressure Relief and Permeability Improvement in a Deep Hole. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **159**, 433-442. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.045>
- [26] Dusenberry, D.O. (2010) Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings. John Wiley & Sons, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9780470549070>
- [27] Jia, Z.Z., Ye, Q. and Li, H. (2023) Damage Assessment of Roadway Wall Caused by Dynamic and Static Load Action of Gas Explosion. *Processes*, **11**, Article No. 580. <https://doi.org/10.3390/pr11020580>