



移动阅读

张常光, 祁航, 蔡明明, 等. 基于统一强度理论的煤层平动冲击失稳解答 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2589-2596. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0970

ZHANG Changguang, QI Hang, CAI Mingming, et al. Instability solution of translatory coal seam bumps based on the unified strength theory [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2589-2596. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0970

基于统一强度理论的煤层平动冲击失稳解答

张常光, 祁航, 蔡明明, 高本贤

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:以统一强度理论作为煤层塑性区的屈服判据, 考虑中间主应力对煤层强度的提高作用, 建立了平动冲击失稳之前煤层的应力统一解、扰动深度解析式以及塑性区宽度统一解, 对其进行可比性分析、文献已有解答的对比验证, 探讨了中间主应力效应、煤层埋深与厚度、煤层强度参数对平动冲击失稳的影响特性。研究表明: 本文所得应力统一解和塑性区宽度统一解均是一系列有序解答的集合, 并得到文献 Mohr-Coulomb 准则解答、Hoek-Brown 准则解答以及 Lippmann 理论的验证, 具有广泛的理论意义和良好的工程应用前景; 当统一强度理论参数 b 从 0 增加到 1 时, 煤层发生冲击失稳的破坏范围减小了 25.3%, 冲击倾向性即塑性区扩展率由 0.63 减小到 0.47, 这表明中间主应力对煤层平动冲击失稳的影响显著, 应合理考虑中间主应力效应, 以充分发挥煤层的承载潜力; 支护力对煤层的塑性区宽度影响较大, 当支护力从 0 增加到 1 MPa 时, 塑性区宽度平均减小了 21.3%, 需切实构筑有效支护以减小煤层平动冲击失稳的破坏范围; 深埋煤层的稳定性较差、冲击失稳时破坏范围较大, 另外厚煤层相比于薄煤层的稳定性较高, 但发生冲击失稳的破坏范围更大; 黏聚力和内摩擦角作为煤层的重要强度参数, 对煤层平动冲击失稳的影响十分显著, 开挖设计时应充分考虑煤层强度参数的变化, 特别是内摩擦角。

关键词:冲击地压; 平动失稳; 统一强度理论; 扰动深度; 塑性区宽度; 中间主应力

中图分类号: TD324.1 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2019)08-2589-07

Instability solution of translatory coal seam bumps based on the unified strength theory

ZHANG Changguang, QI Hang, CAI Mingming, GAO Benxian

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The unified strength theory was adopted as a yield criterion to describe an improving effect of intermediate principal stress on the coal seam strength for the determination of plastic zone in coal seam. Then, instability solutions such as the coal seam stress, the disturbance depth and the width of plastic zone were derived for preceding translatory coal seam bumps. Furthermore, the comparability analysis and verification of the proposed solution were compared with existing results available in the literature. Finally, parametric studies were carried out to investigate the intermediate principal stress effect, the depth and thickness of coal seam, and the strength parameters of coal seam. It is found herein that the solutions proposed for the coal seam stress and the width of plastic zone are a set of orderly serialized results, so they have wide theoretical value and good engineering applications. Meanwhile, the validity of the proposed so-

收稿日期: 2018-07-23 修回日期: 2018-11-13 责任编辑: 郭晓伟

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41202191); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(SKLG2017K025); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(310828173402)

作者简介: 张常光(1982—), 男, 山东菏泽人, 教授, 博士。Tel: 029-82337238, E-mail: zcg1016@163.com

lution is demonstrated by comparing it with the results from Mohr-Coulomb criterion, Hoek-Brown criterion and Lippmann's theory. In addition, when the unified strength theory parameter b increases from 0 to 1, the damage range is decreased by 25.3%, and the expansion rate of plastic zone is decreased from 0.63 to 0.47. It means that the intermediate principal stress has a significant impact on the translatory coal seam bump. Therefore, the intermediate principal stress effect should be reasonably considered to achieve more potentials of coal seam. Moreover, when the support force increases from 0 to 1 MPa, the width of plastic zone is averagely decreased by 21.3%, which indicates that the support needs to firmly and effectively be constructed to reduce damage ranges. Besides, a deep coal seam has poor stability and its damage range is large, while a thin coal seam is more prone to display small-scale bumps and instability. It is profound to account for the changes of coal seam strength parameters including cohesion and internal friction angle as important strength indexes, due to that their influences are very significant in excavation designs, especially for the internal friction angle of coal seam.

Key words: coal bumps; translatory instability; unified strength theory; disturbance depth; width of plastic zone; intermediate principal stress

冲击地压是指一定范围内煤(岩)体突然发生破坏的现象,表现为煤(岩)体瞬间失稳涌入开采空间,破坏范围可长达数百米,导致巷道严重破坏甚至完全封死,是目前采矿工程中世界性的自然灾害^[1-3]。顶底板为岩石的深埋煤层整体平动冲击失稳属于典型的煤岩冲击地压,众多学者深入研究了此类冲击地压的失稳机理与影响因素,代表性成果有:LIPPMANN H等^[4-5]基于 Mohr-Coulomb (MC) 准则,建立了煤层平动冲击失稳的 Lippmann 理论;姜耀东等^[6]同样基于 MC 准则,提出了深埋煤层平动冲击失稳的三维模型;孙路路等^[7]基于 MC 准则,获得了含瓦斯煤层的平动冲击失稳解答。祝捷等^[8]采用 Hoek-Brown (HB) 准则来反映煤体结构的影响,推导了煤层平动冲击失稳的应力新公式。姜福兴等^[9]将外接圆 Druker-Prager (DP) 准则用于分析煤层的平动冲击失稳,得到了考虑中间主应力的煤层应力、扰动深度和塑性区宽度。祁航等^[10]基于 MC 准则引入 2 种分布形式的瓦斯压力,对 Lippmann 理论进行了有效拓展。WANG J 等^[11]从能量释放的角度,讨论了煤层平动冲击失稳的影响因素及规律。

上述对深埋煤层平动冲击失稳的理论研究,大多采用的是不考虑中间主应力的 MC 准则和 HB 准则,忽略了中间主应力对煤层强度的提高作用,所得结果将偏于保守;相反,外接圆 DP 准则视中间主应力效应与小主应力的围压作用相等,又高估了中间主应力的强度提高作用,实际工程应用时所得结果将偏于危险。统一强度理论是系列化线性强度准则的集合,能合理反映岩土类材料强度的中间主应力效应及其影响程度^[12-13],已在条带煤柱、煤炭巷道与地下隧道等工程中得到了较广泛的应用。

因此,笔者基于统一强度理论和煤层平动冲击失

稳模型,推导了深埋煤层整体平动之前的应力统一解、扰动深度解析式以及塑性区宽度统一解,继而分析所得结果的可比性,并与文献中的 MC 准则解答、HB 准则解答、外接圆 DP 准则解答和 Lippmann 理论进行验证与适用性比较,最后探讨了各因素的影响特性。

1 煤层平动冲击失稳

1.1 问题描述

深埋煤层一般纵向长度远大于厚度,常按平面应变状态分析其平动冲击失稳问题,如图 1 所示。根据煤层平动冲击失稳的 Lippmann 理论^[4-5],图 1 中有一条顶底板均为岩石的水平煤层,其厚度为 $2h$ 、埋深为 H ,受上覆岩层竖向应力 γH 和水平应力 $\lambda\gamma H$ 的作用。开挖一宽度为 $2D$ 的巷道后,周围煤层的应力将随之调整,受到该开挖扰动影响的区域称为煤层扰动区,其宽度记为扰动深度 L 。图 1 中区域 I、II 和 III 分别对应煤层的塑性区、弹性区和原岩应力区,扰动区包括塑性区 I 与弹性区 II; x_p 为塑性区宽度; P_x 为支护力; γ 为上覆岩层的容重; λ 为侧压力系数; σ_x 、 σ_y 分别为煤层的水平应力和竖向应力。

以压应力为正,平面应变状态下统一强度理论的表情式^[13-15]为

$$\sigma_1 = M\sigma_3 + Y \quad (1)$$

$$M = \frac{(2+b) + (2+3b)\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)},$$

$$Y = \frac{4(1+b)c\cos\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}$$

其中, M 、 Y 为方程参数; c 为煤层的黏聚力; φ 为煤层的内摩擦角; b 为统一强度理论参数,反映中间主应力对煤层屈服或破坏的影响程度即中间主应力效应,

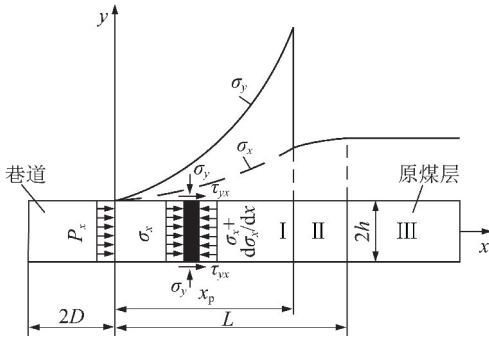


图 1 煤层平动冲击失稳的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of translatory coal seam bumps and instability

取值范围为: $0 \leq b \leq 1$ 。不同的 b 值对应不同的屈服或强度准则; $b=0$ 时统一强度理论退化为不考虑中间主应力的 MC 准则, $b=1$ 时为中间主应力效应最大的双剪应力准则, $0 < b < 1$ 时为一系列新的准则。

设煤层强度可由统一强度理论来描述, 且 $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_3 = \sigma_x$, 代入式(1)得塑性区煤层的应力关系为

$$\sigma_y = M\sigma_x + Y \quad (2)$$

在煤层的弹性区, 其应力增量符合平面应变弹性本构方程^[4-5], 即

$$\frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_y} = \frac{\sigma_x - \lambda\gamma H}{\sigma_y - \gamma H} = \frac{1 - \mu}{\mu} \quad (3)$$

式中, μ 为煤层的泊松比。

1.2 平衡方程和边界条件

根据图 1 取高度为 $2h$ 的煤层单元体, 作用在单元体上的应力如图 2 所示。

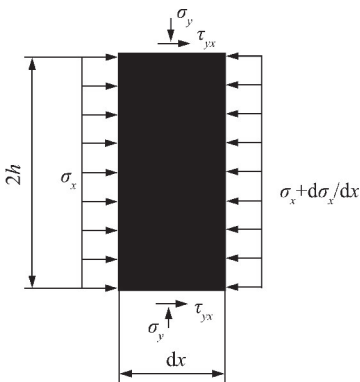


图 2 单元体应力分析

Fig. 2 Stress analysis of an element

在 x 方向上作用有水平应力 σ_x 和界面剪应力 τ_{yx} , 根据平衡条件可得 x 方向的应力平衡方程为

$$\frac{\partial\sigma_x}{\partial x} = \frac{\tau_{yx}}{h} \quad (4)$$

另外, 煤岩界面处的应力满足滑动摩擦定律, 即

$$\tau_{yx} = \sigma_y \tan \varphi_0 + c_0 \quad (5)$$

式中, c_0 为界面黏聚力; φ_0 为界面摩擦角。

巷道开挖以后, 开挖范围内原有煤层所承受的上覆岩层自重将改由扰动区煤层来承担^[4-5], 则巷道一侧的煤层应力调整需满足竖向应力扰动增量平衡, 即

$$D\gamma H = \int_0^L (\sigma_y - \gamma H) dx \quad (6)$$

该问题在水平方向上有明确的应力边界条件, 即

$$\begin{cases} \sigma_x^I = P_x & (x = 0) \\ \sigma_x^I = \sigma_x^{II} & (x = x_p) \\ \sigma_x^{II} = \sigma_x^{III} = \lambda\gamma H & (x = L) \end{cases} \quad (7)$$

2 煤层应力及分布范围

2.1 煤层应力

(1) 塑性区 ($0 < x \leq x_p$)。

联立式(2), (4), (5), 并利用边界条件即式(7)中的第 1 式, 求得煤层塑性区的应力为

$$\sigma_x^I(x) = \left(P_x + \frac{Y \tan \varphi_0 + c_0}{M \tan \varphi_0} \right) e^{\frac{M \tan \varphi_0}{h} x} - \frac{Y \tan \varphi_0 + c_0}{M \tan \varphi_0} \quad (8)$$

$$\sigma_y^I(x) = M\sigma_x^I(x) + Y \quad (9)$$

(2) 弹性区 ($x_p < x \leq L$)。

联立式(3) ~ (5), 并利用边界条件即式(7)中的第 3 式, 求得煤层弹性区的应力为

$$\sigma_x^{II}(x) = \left[\lambda\gamma H + \frac{c_0(1 - \mu)}{\mu \tan \varphi_0} + \frac{\gamma H \tan \varphi_0 (1 - \mu - \mu\lambda)}{\mu \tan \varphi_0} \right] e^{\frac{\mu \tan \varphi_0}{h(1 - \mu)}(x - L)} - \frac{\gamma H \tan \varphi_0 (1 - \mu - \mu\lambda) + c_0(1 - \mu)}{\mu \tan \varphi_0} \quad (10)$$

$$\sigma_y^{II}(x) = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_x^{II}(x) + \gamma H \left(1 - \frac{\mu\lambda}{1 - \mu} \right) \quad (11)$$

(3) 原岩应力区 ($L < x$)。

原岩应力区与弹性区交界处的应力连续, 即

$$\sigma_x^{III}(x) = \sigma_x^{II}(L) = \lambda\gamma H \quad (12)$$

$$\sigma_y^{III}(x) = \sigma_y^{II}(L) = \gamma H \quad (13)$$

2.2 扰动深度与塑性区宽度

塑性区宽度 x_p 可作为煤层巷道动力失稳破坏范围的度量指标, 同时塑性区扩展率 ($Q = x_p/L \in [0, 1]$) 能用来判定煤层的整体冲击失稳倾向性^[8], 即 Q 值越大, 表明煤层发生整体冲击失稳的倾向性越高。

(1) 扰动深度。

联立式(4)和式(5), 并利用边界条件即式(7)中的第 1, 3 式, 求得扰动深度 L 为

$$L = \frac{hc \cot \varphi_0 (\lambda\gamma H - P_x) - D\gamma H}{c_0 \cot \varphi_0 + \gamma H} \quad (14)$$

(2) 塑性区宽度。

由于煤层水平应力在 $x=x_p$ 处连续即式(7)中的

$$\left(P_x + \frac{Y \tan \varphi_0 + c_0}{M \tan \varphi_0} \right) e^{\frac{M \tan \varphi_0}{h} x_p} - \left[\lambda \gamma H + \frac{\gamma H \tan \varphi_0 (1 - \mu - \mu \lambda) + c_0 (1 - \mu)}{\mu \tan \varphi_0} \right] e^{\frac{\mu \tan \varphi_0}{h(1-\mu)} (x_p - L)} = \frac{Y \tan \varphi_0 + c_0}{M \tan \varphi_0} - \frac{\gamma H \tan \varphi_0 (1 - \mu - \mu \lambda) + c_0 (1 - \mu)}{\mu \tan \varphi_0} \quad (15)$$

3 结果讨论

3.1 可比性分析

式(8)~(11)和式(15)即为本文基于统一强度理论所得深埋煤层平动冲击失稳之前的应力统一解和塑性区宽度统一解,考虑了中间主应力 σ_2 效应即参数 b 的影响,具有广泛的理论意义。当参数 b 取不同值时,本文公式可退化为众多解答。例如,参数 $b=0$ 时,本文公式退化为文献[4-5]的 MC 准则解答;参数 $b=1$ 时为双剪应力准则解答, $0 < b < 1$ 时为一系列有序的新准则解答。因此,本文结果具有很好的可比

性,还包括许多未见发表的新解答,可根据实际情况合理选择,工程应用前景良好。

第2式,联立式(8)和式(10),可得关于塑性区宽度 x_p 统一解的隐式求解方程为

性,还包括许多未见发表的新解答,可根据实际情况合理选择,工程应用前景良好。

3.2 对比验证

孙路路等^[7]基于 MC 准则获得了瓦斯煤层平动冲击失稳之前的应力分布及塑性区宽度,其瓦斯压力为 0 时对应本文式(8)~(11)和式(15)中参数 $b=0$ 时的结果;姜福兴等^[9]基于外接圆 DP 准则,建立了中间主应力效应等于小主应力围压作用时煤层平动冲击失稳之前的应力公式和塑性区宽度解答。将文献[7,9]的解答与本文结果(参数 b 取 0 和 1)进行比较,如图 3 所示。所用计算参数源自文献[7],见表 1。

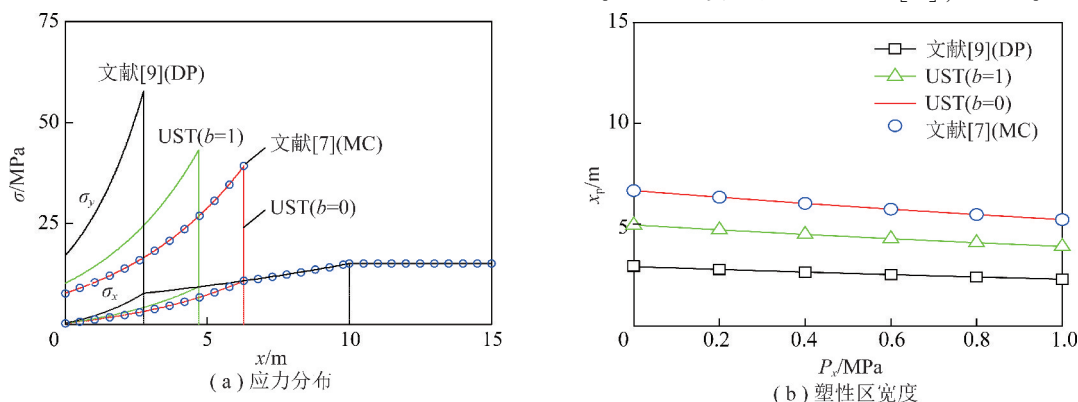


图3 本文结果与文献[7,9]解答的对比验证

Fig. 3 Comparisons and verifications of this study with the results from the References[7,9]

表1 煤层的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal seam

| H/m | h/m | D/m | $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$ | λ | c/MPa | $\varphi/(^\circ)$ | c_0/MPa | $\varphi_0/(^\circ)$ | P_x/MPa | μ |
|-------|-------|-------|----------------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|----------------------|-----------|-------|
| 600 | 2.4 | 1.5 | 25 | 1 | 2 | 30 | 0.5 | 10 | 0.24 | 0.5 |

由图 3 可知,参数 $b=0$ 时本文统一解与文献[7]的 MC 准则解答在应力分布和塑性区宽度上都吻合的很好,验证了本文解答的正确性。同时,文献[9]的外接圆 DP 准则解答,相比本文参数 $b=1$ 时(理论上最大的中间主应力效应)的双剪应力准则解答,表现出了更强的中间主应力效应,对应的塑性区应力最高、塑性区宽度最小,且与 MC 准则解答的差异最为明显。这是由于外接圆 DP 准则假定中间主应力效应与小主应力的围压作用一样,过高估计了中间主应力的真实作用,故对外接圆 DP 准则的选用需十分谨慎。

另外,图 3(a)中煤层的应力分布和图 1 中 LIPP-MANN 等^[4-5]的理论模型预测相一致,竖向应力在弹-塑性区交界处存在跳跃现象,这在一定程度上也说明了本文应力解答的合理性。在图 3(b)中,支护力 P_x 从 0 增加到 1 MPa,塑性区宽度平均减小了 21.3%,表明支护力能较大幅度地减小煤层的塑性区宽度,可通过构筑有效支护来减小煤层冲击失稳的破坏范围。

祝捷等^[8]采用非线性 HB 准则替代 Lippmann 理论中最初的线性 MC 准则,提出了煤层平动冲击失稳的应力新解答。因 HB 准则和 MC 准则(即参数 $b=0$

时)都未考虑中间主应力,故将文献[8]的 HB 准则解答与本文结果(参数 b 取 0)进行比较,如图 4 所示。此处计算参数源自文献[8]: $\sigma_c = 20$ MPa; $\gamma H = 25$ MPa; $\mu = 0.5$; $\lambda = 1$; $D/h = 1$; $m = 5$; $s = 0.082$; $c_0 = 0.2$ MPa; $\tan \varphi_0 = 0.1$; $c = 1.7$ MPa; $\varphi = 40^\circ$ 。其中, σ_c 为煤层的单轴抗压强度; m 和 s 为 HB 准则的强度参数; c 和 φ 为由 RocLab 软件将非线性 HB 准则转化为线性 MC 准则而得的煤层抗剪强度参数。

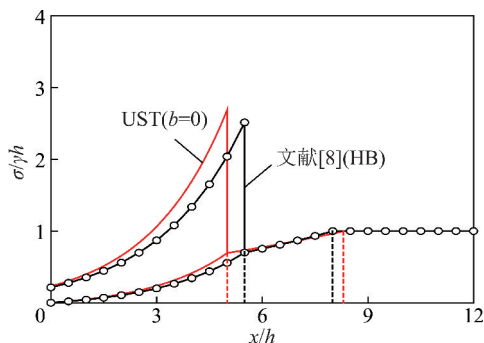


图 4 本文结果与文献[8]解答的对比验证

Fig. 4 Comparisons and verifications of this study with the result from the reference[8]

由图 4 可知,本文参数 $b = 0$ 时统一强度理论(UST)的结果与文献[8]的 HB 准则解答在应力曲线的整体走势上是一致的,且塑性区宽度、扰动深度和竖向应力峰值的相对误差分别仅为 9.1%、3.6% 和 6.7%,这进一步验证了本文解答的正确性。另外,图 4 中两种解答之间的差异主要由非线性 HB 准则转化为线性 MC 准则的煤层抗剪强度参数偏高造成的,而不是因为二者基本假定和推导过程的不同。

4 参数分析

主要探讨中间主应力效应即参数 b ,煤层的埋深 H 、厚度 $2h$ 以及强度参数(即黏聚力 c 与内摩擦角 φ)对煤层平动冲击失稳的影响特性。由式(14)知:煤层扰动深度 L 与参数 b 、煤层黏聚力 c 及内摩擦角 φ 无关。所用煤层的基本参数及取值同表 1。

4.1 中间主应力效应

参数 b 能反映煤层强度的中间主应力效应大小,可以连续取 0~1,参数 $b = 0$ 表示煤层强度与中间主应力无关、符合 MC 准则,参数 $b = 1$ 表示煤层强度的中间主应力效应最大、符合双剪应力准则。图 5 给出了参数 b 取 0、0.5 和 1.0 时煤层的塑性区宽度 x_p 、扰动深度 L 和塑性区扩展率 Q 随参数 b 的变化关系。

由图 5 可知,参数 $b = 1$ 时煤层的塑性区宽度 x_p 比 $b = 0$ 时减小了 25.3%,这表明中间主应力效应的增加,能明显减小煤层冲击失稳的破坏范围。另外,

当参数 b 从 0 增加到 1 时,扰动深度 L 保持不变,而塑性区扩展率 Q 将从 0.63 减小到 0.47,即随着中间主应力效应的增加,煤层冲击失稳的倾向性显著下降。应充分考虑煤层强度的中间主应力效应,更好地发挥煤层的强度潜能。

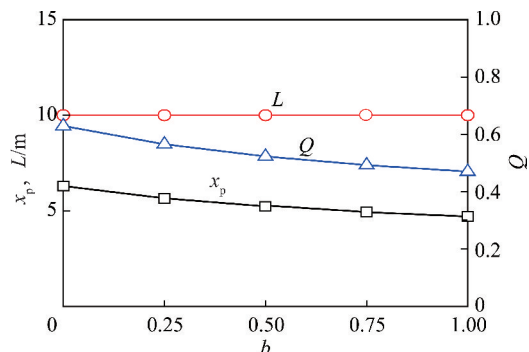


图 5 中间主应力效应的影响

Fig. 5 Influence of the intermediate principal stress effect

4.2 煤层埋深与厚度

埋深 H 决定了煤层所受上覆岩层的初始应力大小,图 6 给出了参数 $b = 0.5$, $H = 200, 600$ 和 1 000 m 时煤层的塑性区宽度 x_p 、扰动深度 L 和塑性区扩展率 Q 随煤层埋深的变化关系。

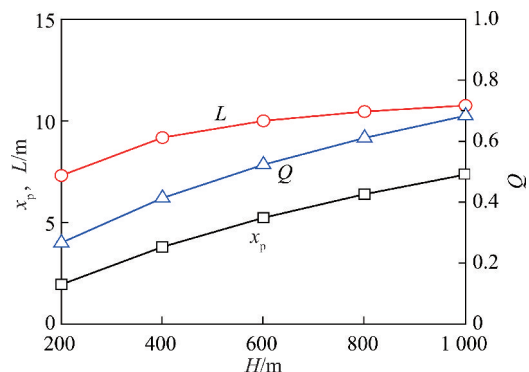


图 6 煤层埋深的影响

Fig. 6 Influence of the depth of coal seam

由图 6 可知, $H = 1 000$ m 时煤层的塑性区宽度 x_p 比 $H = 200$ m 时增大了 2.7 倍,说明深埋煤层的冲击失稳破坏范围将成倍扩增。另外,当埋深 H 从 200 m 增加到 1 000 m 时,扰动深度 L 增大了 3.85 m,塑性区扩展率 Q 从 0.27 增大到 0.68,这是由于埋深较大的煤层,其初始应力亦较大,使得深埋煤层更容易发生冲击失稳。

厚度 $2h$ 是表征煤层几何尺寸的重要参数,图 7 给出了参数 $b = 0.5$, $2h = 2, 4$ 和 6 m 时煤层的塑性区宽度 x_p 、扰动深度 L 和塑性区扩展率 Q 随煤层厚度的变化关系。

由图 7 可知, $2h = 6$ m 时煤层的塑性区宽度 x_p 比 $2h = 2$ m 时增大了 1.6 倍,即厚煤层相比薄煤层发生

冲击失稳时的破坏范围将显著增大。另外,当厚度 $2h$ 从2 m增加到6 m时,扰动深度 L 增大了9.39 m,而塑性区扩展率 Q 却从0.72减小为0.50,这意味着薄煤层更容易发生小范围的冲击失稳破坏,厚煤层的失稳倾向性虽然小了些,但失稳的破坏范围却会更大。

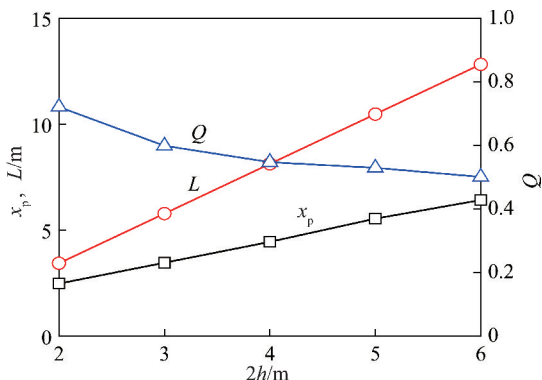


图7 煤层厚度的影响

Fig. 7 Influence of the thickness of coal seam

4.3 煤层强度参数

黏聚力 c 是代表煤层内部颗粒咬合力的强度参数,图8给出了参数 $b=0.5$, $c=1.5, 2.5$ 和 3.5 MPa时煤层的塑性区宽度 x_p 、扰动深度 L 和塑性区扩展率 Q 随煤层黏聚力的变化关系。

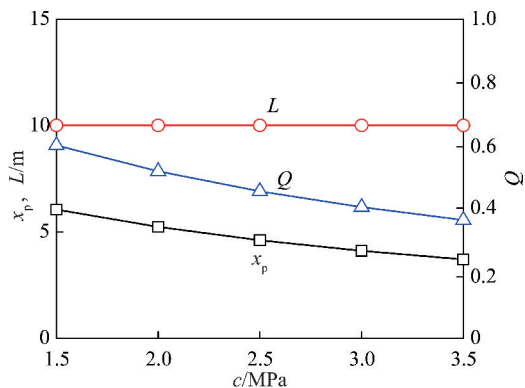


图8 煤层黏聚力的影响

Fig. 8 Influence of the cohesion of coal seam

由图8可知, $c=3.5$ MPa时煤层的塑性区宽度 x_p 比 $c=1.5$ MPa时减小了38.7%,表明黏聚力对煤层冲击失稳的破坏范围有一定影响。另外,当黏聚力 c 从1.5 MPa增加到3.5 MPa时,扰动深度 L 保持不变,而塑性区扩展率 Q 却从0.60减小到0.37,这是由于黏聚力增大提高了煤层的稳定性,使得煤层冲击失稳的倾向性有所减弱。

内摩擦角 φ 是体现煤层内部颗粒摩擦效应的强度参数,图9给出了参数 $b=0.5$, $\varphi=20^\circ, 30^\circ$ 和 40° 时煤层的塑性区宽度 x_p 、扰动深度 L 和塑性区扩展率 Q 随煤层内摩擦角的变化关系。

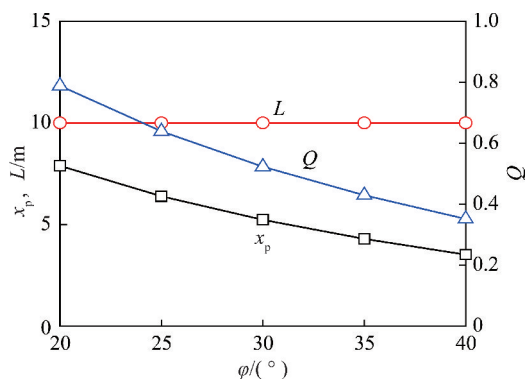


图9 煤层内摩擦角的影响

Fig. 9 Influence of the internal friction angel of coal seam

由图9可知, $\varphi=40^\circ$ 时煤层的塑性区宽度 x_p 比 $\varphi=20^\circ$ 时减小了55.4%,说明内摩擦角对煤层冲击失稳破坏范围的影响较大。另外,当内摩擦角 φ 从 20° 增加到 40° 时,扰动深度 L 保持不变,而塑性区扩展率 Q 却从0.79减小到0.35,即煤层冲击失稳的倾向性明显减小,且内摩擦角 φ 为 20° 时 Q 为0.79,此时煤层发生冲击失稳的倾向性极高。

因此,应考虑煤层强度参数即黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的实际变化范围,才能更好地预测煤层冲击失稳的破坏范围,且对比图8和图9可知内摩擦角较黏聚力的影响更为显著。

5 结 论

(1) 基于统一强度理论,本文所建立的深埋平动冲击失稳之前煤层应力统一解和塑性区宽度统一解考虑了中间主应力的影响,可退化为MC准则解答、双剪应力准则解答且包括很多未见发表的新解答,并能充分发挥煤层的强度潜能,具有广泛的理论意义和良好的工程应用前景。

(2) 通过与文献[7-8]基于MC准则、HB准则的煤层应力与塑性区宽度对比,验证了本文解答的正确性。文献[9]采用外接圆DP准则高估了中间主应力的真实作用,所得煤层竖向应力明显偏大、塑性区宽度明显偏小,选用时需非常谨慎。支护力对煤层塑性区宽度的影响较大,应合理构筑有效的支护。

(3) 中间主应力效应对煤层冲击失稳的影响显著,煤层塑性区宽度和冲击倾向性均随中间主应力效应的增加而减小;深埋煤层的冲击倾向性高,且冲击失稳的破坏范围较大,同时薄煤层易发生小范围的冲击失稳;煤层强度参数的影响明显,应考虑其变异性,特别是煤层的内摩擦角。

鉴于煤层冲击失稳问题的动力学属性,本文对所建立的煤层平动冲击失稳(拟静力)解答只进行了退化特例分析以及与文献中已有的MC准则解答、HB

准则解答、外接圆 DP 准则解答和 Lippmann 理论等的初步对比验证,应深入开展有关工程现场或模型试验实测数据和有限元数值模拟结果的充分性验证,找出适合不同煤层强度特性的参数 b 大小,进而给出合理的本构模型来更好地反映真实情况。

参考文献 (References):

- [1] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [2] DOU L M, MU Z L, LI Z L, et al. Research progress of monitoring, forecasting, and prevention of rockburst in underground coal mining in China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 278-288.
- [3] MARK C. Coal bursts in the deep longwall mines of the United States[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2016, 3(1): 1-9.
- [4] LIPPMANN H, 张江, 寇绍全. 关于煤矿中“突出”的理论-对慕尼黑工业大学矿业力学研究的介绍(特约稿)[J]. 力学进展, 1990, 20(4): 452-467.
LIPPMANN H, ZHANG Jiang, KOU Shaoquan. The theory of bumps in coal mines-An introduction to the study of mining mechanics at the T. U. Munich, F. R. Germany (invited)[J]. Advances in Mechanics, 1990, 20(4): 452-467.
- [5] BURGERT W, LIPPMANN H. Models of translatory rock bursting in coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 285-294.
- [6] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 深采煤层巷道平动式冲击失稳三维模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2864-2869.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, LIU Wengang, et al. Investigation on three-dimensional model of instability of translatory coal bumps in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2864-2869.
- [7] 孙路路, 程卫民, 武猛猛, 等. 基于 Mohr-Coulomb 准则的含瓦斯煤层巷帮侧塑性区宽度的探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5): 955-961.
SUN Lulu, CHENG Weimin, WU Mengmeng, et al. Study on the width of plastic zone in coal rib with containing gas based on Mohr-Coulomb yield criterion[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(5): 955-961.
- [8] 祝捷, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 改进的 Lippmann 煤层平动突出模型[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 353-357.
ZHU Jie, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, et al. The improved Lippmann's translatory model of coal bumps [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 353-357.
- [9] 姜福兴, 刘金海, 王平. 基于 Druker-Prager 准则的煤层冲击失稳模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 727-731.
JIANG Fuxing, LIU Jinhai, WANG Ping. Model of coal burst and instability based on Druker-Prager yield criterion[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 727-731.
- [10] 祁航, 张常光, 蔡明明. 考虑瓦斯影响的煤层平动突出计算[C]. 第 27 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册), 西安, 2018: 65-70.
QI Hang, ZHANG Changguang, CAI Mingming. Calculation of translational bump for coal seam considering the effect of gas [C]. Proceedings of the 27th National Conference on Structural Engineering(No. II), Xi'an, 2018: 65-70.
- [11] WANG J, YAN Y B, JIANG Z J, et al. Mechanism of energy limit equilibrium of rock burst in coal mine [J]. Mining Science and Technology (China), 2011, 21(2): 197-200.
- [12] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1-10.
YU Maohong. Unified strength theory for geomaterials and its applications [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1-10.
- [13] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [14] 张常光, 范文, 赵均海. 深埋圆形巷道围岩塑性区位移及特征曲线新解和参数分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 12-24, 32.
ZHANG Changguang, FAN Wen, ZHAO Junhai. New solutions of rock plastic displacement and ground response curve for a deep circular tunnel and parametric analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 12-24, 32.
- [15] 尹万蕾, 潘一山, 李忠华. 考虑塑性区强度参数劣化的圆形巷道冲击地压临界条件研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 348-355.
YIN Wanlei, PAN Yishan, LI Zhonghua. Critical condition of rock burst in the circular tunnel based on the strength parameters of the degradation in the plastic zone [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 348-355.