

突出煤层大直径钻孔防突机理研究

曹喜金

云南恩洪煤业有限公司

摘要：大直径钻孔是一种有效的防突手段。通过研究钻孔围岩塑性区形态特征及演化规律，揭示了大直径钻孔防突机制。结果表明：（1）钻孔围岩塑性区有圆形、椭圆形和蝶形三种形态，其中蝶形塑性区蝶叶最大尺寸可达钻孔直径的数倍。（2）在一定的应力条件下，布置在突出煤层内的多个大直径钻孔会产生大范围的蝶形塑性区并相互连通，能够有效增加煤层透气性，从而消除煤层的突出危险性。

关键词：大直径钻孔；防突；塑性区；蝶形；突出危险煤层

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.08.042

引言

长期以来，煤矿防治煤与瓦斯突出作为矿山灾害防控的重大研究课题之一，一直受到国内外学者和工程技术专家的广泛关注。目前，这一研究领域对“通过人工手段提高煤层透气性，从而实现煤与瓦斯突出的有效防控”已达成共识，此类煤层防突手段主要包括水力压裂、大直径钻孔消突等。由于大直径钻孔具有施工方便、快捷且扰动小等独特优点，已作为常规防突手段在我国绝大多数煤与瓦斯突出矿井得到广泛应用^[1]。因此，研究大直径钻孔防突机制，对进一步丰富煤与瓦斯突出防控理论和促进煤与瓦斯突出矿井的安全高效开采具有重要意义。

在大直径钻孔防突机制及效果评价方面，已有许多学者从不同角度开展了卓有成效的研究^[2-6]。

已有成果为本文的研究指明了方向并奠定了基础。本文基于蝶形塑性区理论，通过研究钻孔围岩塑性区形态特征及其演化规律，分析大直径钻孔防突机制。

一、大直径钻孔塑性区形成机制及形态特征

在煤层中施工大直径钻孔类似于布置一条小型巷道^[7]，在煤岩体内开掘巷道或者施工钻孔后，会造成巷道或钻孔围岩中应力发生重新分布，并在围岩浅部出现塑性区。因此，可以取半径为 a 的钻孔所处区域为分离

体（一般取5倍钻孔半径），建立非等压应力场中钻孔围岩力学模型（如图1所示），模型边界载荷为 P_1 和 P_3 。

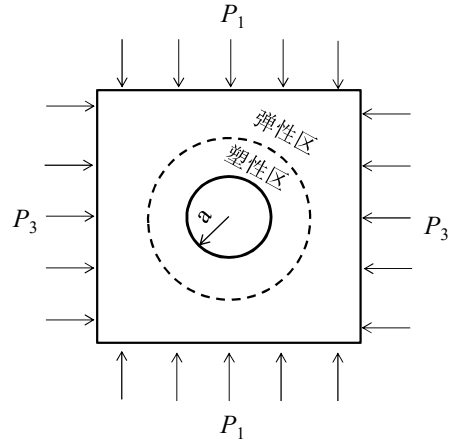


图1 非等压应力场中钻孔围岩力学模型

根据文献[8]推导出的非均匀应力场条件下圆形钻孔围岩塑性区边界方程：

$$9\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \left(\frac{a}{r}\right)^8 + \left[-12\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 + 6\left(1 - \frac{P_1^2}{P_3^2}\right) \cos 2\theta\right] \left(\frac{a}{r}\right)^6 + \left[10\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos^2 2\theta - 4\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \sin^2 \varphi \cos^2 2\theta - 2\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \sin^2 2\theta - 4\left(1 - \frac{P_1^2}{P_3^2}\right) \cos 2\theta + \left(1 + \frac{P_1}{P_3}\right)^2\right] \left(\frac{a}{r}\right)^4 + \left[-4\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos 4\theta + 2\left(1 - \frac{P_1^2}{P_3^2}\right) \cos 2\theta - 4\left(1 - \frac{P_1^2}{P_3^2}\right) \sin^2 \varphi \cos 2\theta - \frac{4C(P_3 - P_1) \sin 2\varphi \cos 2\theta}{P_3^2}\right] \left(\frac{a}{r}\right)^2 + \left[\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 - \sin^2 \varphi \left(1 + \frac{P_1}{P_3} + \frac{2C \cos \varphi}{P_3 \sin \varphi}\right)^2\right] = 0 \quad (1)$$

式中： C 、 φ —钻孔围岩的粘聚力与内摩擦角； r 、 θ —钻孔围岩塑性区边界的极坐标； a —钻孔半径； P_1 、 P_3 —模型边界载荷。

因此，在围岩力学性质（ C 、 φ ）一定的条件下，钻孔围岩塑性区形态特征及尺寸取决于钻孔所处的应力环境（即双向边界载荷比值 P_1/P_3 ）。

采用数值模拟方法分析钻孔围岩塑性区的形态特征。建立尺寸为 $40\text{m} \times 40\text{m} \times 1\text{m}$ （长 \times 宽 \times 厚）的数值计算模型（见图2），钻孔直径为 153mm ，模型四周固定 x 、 y 、 z 三个方向的位移，前后边界固定 y 方向的位移。

模型中直接底和煤层的物理力学参数一致，垂直和水平边界载荷分别为 P_1 和 P_3 。

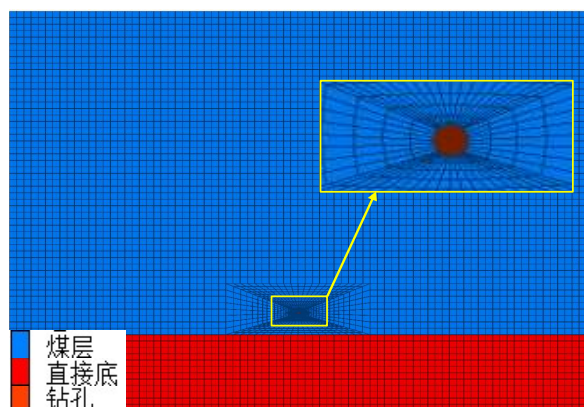


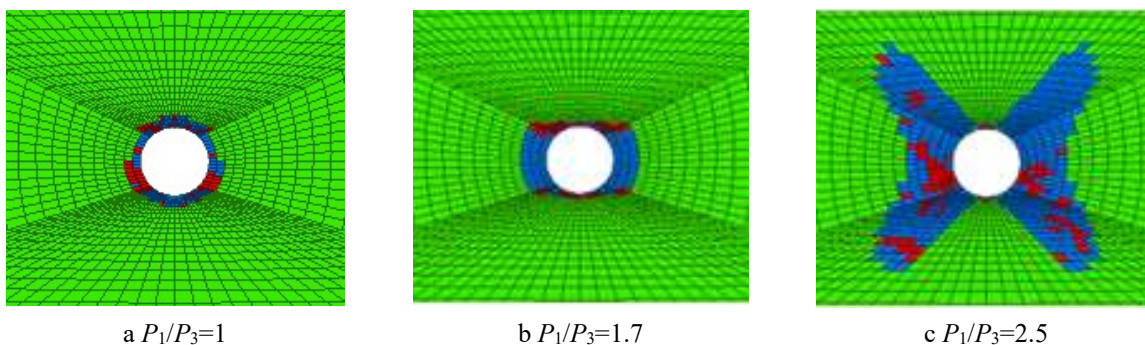
图2 钻孔数值计算模型

在不同应力的条件下，钻孔围岩塑性区形态特征有明显差异，如图3所示。从图中可以看出，当双向载荷

比值 $P_1/P_3=1$ 时，图1为双向等压受力模型，钻孔围岩塑性区边界方程(1)即为圆的标准方程，此时塑性区边界为圆形(见图3a)。若 P_3 大小保持不变， P_1/P_3 增大到1.7时，水平方向逐渐变宽，相对来说，垂直方向则逐渐变窄，而塑性区边界最大半径和最小半径分别在横轴和纵轴上，塑性区边界呈类似椭圆的形状(见图3b)。当 P_1/P_3 达到2.5时，塑性区边界轮廓在坐标轴处凹陷、4个象限内凸出，呈类似蝴蝶的形状(即蝶形，见图3c)，并且蝶形塑性区边界最大半径的位置在坐标轴夹角平分线附近。

二、大直径钻孔塑性区演化规律

以金发煤矿某工作面推进30m、钻孔直径为153mm时，到工作面不同距离处钻孔塑性区的形态特征，如图4所示。



$P_3=11\text{MPa}$, $C=3\text{MPa}$, $\varphi=25.1^\circ$, $a=200\text{mm}$

图3 不同应力条件下钻孔围岩塑性区形态特征

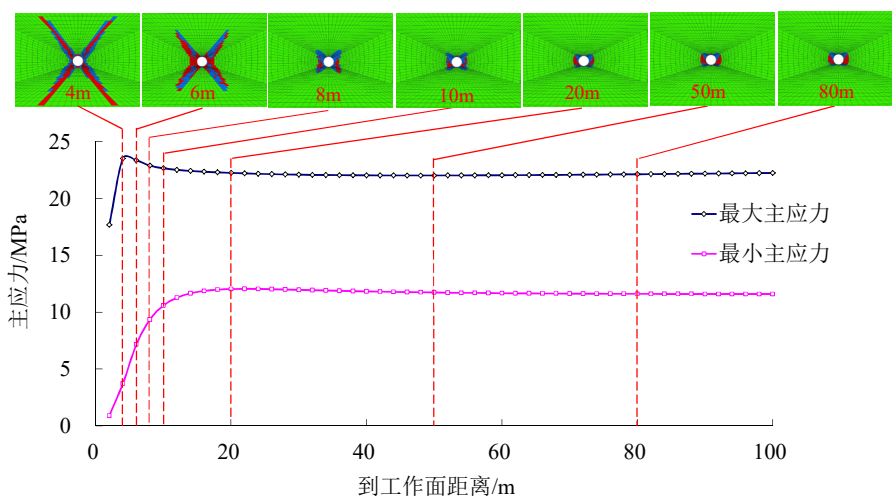


图4 钻孔塑性区演化规律

从图4中可以看出，到工作面距离不同，最大主应力和最小主应力的大小不一致，而大直径钻孔塑性区形态特征也有明显差异。当到工作面距离不小于20m时，最大主应力和最小主应力比值约为1.9，塑性区呈椭圆形分布，其最大半径位于横轴上。

距离工作面10m时，钻孔四个肩角处的塑性区向外凸起。随着到工作面距离的减小，最大主应力和最小主应力比值逐渐增大，竖直和水平方向上的塑性区边界变化较小，最大尺寸沿着坐标轴夹角平分线逐渐向深部延伸，塑性区形态逐渐扩展成蝶形，到工作面距离为4m和6m处，塑性区塑叶最大尺寸分别为0.91m和0.65m，分别是钻孔半径的11.9和8.5倍。

三、大直径钻孔防突机制

在突出危险煤层内施工大直径钻孔时，钻孔周围的煤体受到采动应力的作用后，会产生一定范围的塑性区，在一定的应力条件下，单个钻孔塑性区最大半径可达钻孔直径的数倍。当多个大直径钻孔均产生大范围的塑性区且能够互相连通时（见图5），煤层的透气性显著增加，从而降低煤层的突出危险性。因此，大直径钻孔在煤与瓦斯突出防控方面的主要作用有两个，一是卸压，相互连通的钻孔塑性区能够降低煤层的应力集中程度；二是改变煤层的力学性质，钻孔塑性区的产生增加了煤层的透气性，从而降低发生煤与瓦斯突出的可能性^[9, 10]。

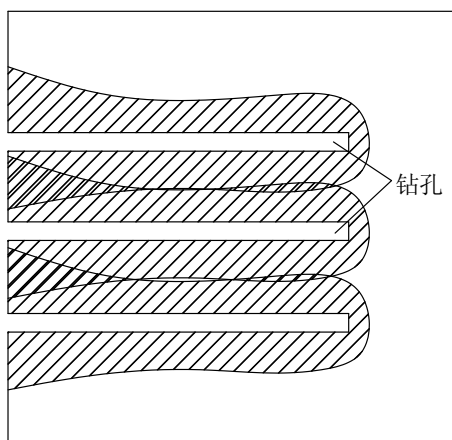


图5 大直径钻孔防突原理

四、结论

(1) 钻孔围岩塑性区有圆形、椭圆形和蝶形三种形态，双向载荷比值达到某一值时，蝶形塑性区蝶叶长度可达钻孔直径的数倍。

(2) 在一定的应力条件下，布置在突出危险煤层内的多个大直径钻孔会产生大范围的蝶形塑性区并相互连通，能够提高煤层的透气性，从而降低煤层的突出危险性。

参考文献

[1]程远平,王海锋,王亮,等.煤矿瓦斯防治理论与工程应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.

[2]王思元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(2):297-322.

[3]郭品坤.煤与瓦斯突出层裂发展机制研究[D].徐州,中国矿业大学.2014.

[4]单智勇.煤巷掘进煤与瓦斯突出事故抑制技术研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2009.

[5]李泉新,许超,刘建林,等.煤矿井下全域化瓦斯抽采定向钻进关键技术与工程实践[J/OL].煤炭学报.https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2021.1412.

[6]林海飞,季鹏飞,孔祥国,等.顺层钻孔预抽煤层瓦斯精准布孔模式及工程实践[J].煤炭学报,2022,47(3):1220-1234.

[7]韩颖,张飞燕.煤层钻孔失稳机理研究进展[J].中国安全生产科学技术,2014,10(4):114-119.

[8]于学馥,郑颖人,刘怀恒,等.地下工程围岩稳定分析[M].北京:煤炭工业出版社,1983.

[9]林海飞,刘思博,李树刚,等.稳压条件下煤体稳定特性钻孔倾角效应的试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(3):575-583.

[10]石智军,姚克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4):1-34.

*作者简介:曹喜金(1988-),男,云南楚雄人,本科,工程师,主要从事矿井技术管理方面的工作。