

松软煤层液压芯杆瓦斯增透机械造穴装备研发与应用

王海峰 王海瑞 刘垒 王刚 邱立新 乔占义

在突出煤层中施工钻孔预抽煤体中的瓦斯是降低煤体瓦斯含量、瓦斯压力的有效措施，对煤矿安全生产至关重要，钻孔周围煤体的透气性系数是影响瓦斯抽放效果的重要因素。我国煤层地质条件复杂，煤体的透气性普遍较低，透气性系数为 $0.004 \sim 0.040 \text{ m}^2/(\text{MPa}\cdot\text{d})$ ，导致钻孔抽采影响范围小、抽采效果差、瓦斯治理周期长，严重影响矿井的安全生产。近年来，国内众多研究人员围绕煤矿井下瓦斯抽采钻孔增透问题开展了大量研究，不仅丰富了瓦斯抽采理论，在工程实践中也取得了有益效果。大量研究和实践表明，对煤矿井下瓦斯抽采钻孔造穴增透可大幅提高瓦斯抽采效果，有助于扩大钻孔抽采影响范围，缩短瓦斯治理周期，具有显著的安全效益和经济效益。

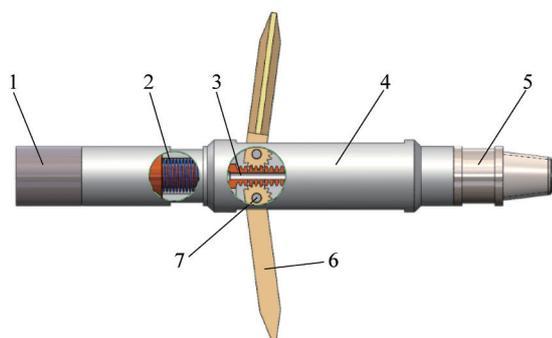
目前，国内矿井为了提高瓦斯抽采钻孔周围煤体的透气性，常采用水力化增透、孔内高压机械造穴等技术来实现煤体卸压增透。水力化增透如水力割缝、水力冲孔造穴等是种有效的煤层增透技术，使用高压水射流冲击破碎钻孔周围煤体，使钻孔周围形成空洞，实现煤体卸压，释放大量瓦斯。孔内高压机械造穴是利用高压泵和高压密封钻杆向扩孔装置提供高压液体驱动机械扩孔装置张开来进行造穴。水力化增透和孔内高压机械造穴技术在提高煤层透气性方面取得了一定的效果，但使用中也存在诸多问题，主要表现在：①上述2种造穴增透工艺均需通过高压泵和高压密封钻杆向钻孔内输送高压流体作为动力，其施工过程全程处于高压状态，作业危险系数高，钻杆接头密封圈易损坏，频繁更换影响施工效率，且一旦出现泄漏，孔内流体将不能形成高压，无法实施水力化增透或机械扩孔施工；②需要结构复杂的高低压转换阀来实现正常钻进和扩孔2个过程的供液问题，高低压转换阀主

要通过弹簧调节转换压力，容易出现压力控制不精准、压力流体流失、可靠性低等问题；③高压水射流冲孔造穴期间产渣量和瓦斯涌出量不可控，钻孔局部垮落导致排渣通道堵塞时，钻孔内将积聚大量瓦斯和高压流体，钻孔突然疏通时，较易发生喷孔瓦斯超限事故。因此，针对水力化增透和孔内高压机械造穴技术存在的问题，需对突出煤层气抽采钻孔造穴增透装备进行创新，研发性能可靠、施工效率高、造穴过程可控的瓦斯增透机械装备并进行现场效果检验。

芯杆顶进式机械扩孔器研制及其结构原理

扩孔器是实现随钻扩孔施工的关键，其性能决定了能否顺利完成正常钻进和扩孔。为了克服水力冲孔造穴和孔内高压机械造穴存在的问题，笔者基于齿轮齿条传动原理，研制了一种芯杆顶进式机械扩孔器，钻孔内采用机械顶进式控制结构，扩孔器仅通过钻杆中心的活动芯杆传递机械推力便可进行扩孔造穴，采用低压水或压风进行降温排渣，避免使用高压流体造成的风险。芯杆顶进式机械扩孔器模型结构如图1所示，芯杆顶进式机械扩孔器实物如图2所示。

芯杆顶进式机械扩孔器主要由后接头、复位弹簧、机械芯杆、刀体、前接头、铰接刀翼、铰接轴等组成，刀体外端设有外接头，与可提供中心轴向推力的造穴钻杆连接，刀体另一端设有前接头，与钻头连接；刀体为中空结构，机械芯杆与刀体同轴安装且可以在刀体中轴向滑动；机械芯杆中间部设有齿条结构，机械芯杆的中心设有轴向供水孔，机械芯杆的中部设有多个径向冷却水道，



1—后连接头；2—复位弹簧；3—机械芯杆；
4—刀体；5—前连接头；6—铰接刀翼；7—铰接轴

图1 芯杆顶进式机械扩孔器模型结构



图2 芯杆顶进式机械扩孔器

用于扩孔时对铰接刀翼降温；铰接刀翼的外部设有多个耐磨切削合金，铰接刀翼的根部设有与机械芯杆上齿条啮合的局部齿轮结构，2个铰接刀翼通过铰接轴分别安装于刀体中部镂空的长方体刀仓中，并与机械芯杆的齿条配合；机械芯杆前后移动时，通过齿轮传动结构使对称的2个铰接刀翼同步张开或闭合；正常钻进时，造穴钻杆对机械芯杆无推力，机械芯杆在刀体内部安装的复位弹簧作用下处于左侧位置，此时，铰接刀翼处于闭合状态，隐藏于刀仓中。机械扩孔器闭合状态最大旋转直径为 $\phi 108$ mm，铰接刀翼张开后最大扩孔直径可达 $\phi 500$ mm。

芯杆顶进式扩孔器前端安装直径为 $\phi 113$ mm PDC钻头，用于正常钻进时破煤，后端连接有可提供中心轴向推力的造穴钻杆，钻孔施工结束后利用扩孔器对钻孔进行扩孔造穴或在钻孔进行中任意目标段进行定点造穴，芯杆顶进式机械扩孔器的具体工作状态包括以下2种：

(1) 正常钻进状态。造穴钻杆带动芯杆顶进式机械扩孔器及钻头进行正常打钻，造穴钻杆将压力水流经扩孔器的机械芯杆中心供水孔供至钻头处，用于排渣降温，此时铰接刀翼在复位弹簧作用下处于闭合状态。

(2) 扩孔状态。当达到扩孔位置后，可提供中心轴向推力的造穴钻杆向芯杆顶进式机械扩孔器的机械芯杆提供中心轴向推力，机械芯杆向前运动，齿条齿轮传动机构使2个铰接刀翼同步张开，在钻杆带动作用铰接刀翼旋转破煤扩孔。当造穴

完成后，撤销外部轴向推力，机械芯杆在复位弹簧的作用下复位，铰接刀翼闭合。

配套造穴装备研发

芯杆顶进式机械扩孔器前端安装钻头，后端与钻杆连接，为了实现扩孔器在不退钻的情况下通过刀体两侧铰接刀翼的闭合、张开动作完成钻孔、扩孔施工，其配套装备主要有三棱芯杆造穴钻杆、三棱螺旋芯杆式造穴钻杆、多棱异型截面芯杆式造穴钻杆、液力推进器和全方位液压履带式机械造穴钻机。

三棱芯杆造穴钻杆

安装于芯杆顶进式机械扩孔器中心的机械芯杆能够前移和后退是机械扩孔器扩孔施工的关键，为实现此功能，研发了具有活动芯杆的三棱芯杆造穴钻杆，三棱芯杆造穴钻杆可通过芯杆传递轴向推力推动扩孔器的机械芯杆前移，卸除外部轴向推力后通过芯杆在复合弹簧作用下复位。三棱芯杆造穴钻杆的外径为 $\phi 73$ mm，长度为1 000 mm，其结构原理如图3所示。

三棱芯杆造穴钻杆为双层结构，主要由外杆体、芯杆、复位弹簧和支撑环等组成，外杆体为三棱状空心结构，两端分别设置公母螺纹接头，用于多根钻杆连接；芯杆为外径 $\phi 28$ mm的合金钢圆

杆, 芯杆两端通过支撑环与外杆体同轴装配, 支撑环上设有多个轴向供流孔, 压力流体可经过支撑环的供流孔进行传输; 芯杆能够在钻杆的中心轴向滑动, 活动行程 ≥ 70 mm, 多根钻杆连接后, 相邻钻杆的芯杆前后相互接触, 活动芯杆在钻杆尾部受到外部轴向推力作用下, 三棱芯杆造穴钻杆的芯杆相互顶推传递推力, 芯杆推动扩孔器的机械芯杆向前移动, 进而使扩孔器两侧的铰接刀翼逐步打开, 钻杆旋转推进过程中完成对钻孔扩孔造穴。当造穴完成, 卸除钻杆尾部的轴向推力, 三棱芯杆造穴钻杆的活动芯杆在复位弹簧的作用下进行复位, 扩孔器的铰接刀翼闭合。

根据煤层地质条件可选用三棱芯杆式造穴钻杆或三棱螺旋芯杆式造穴钻杆或多棱异型截面芯杆式造穴钻杆等具有中心活动芯杆结构的造穴钻杆, 使其钻进排渣性能更佳。

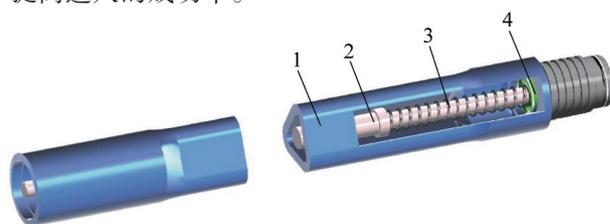
液力推进器

根据芯杆顶进式机械扩孔器的结构原理, 研制了专用的液力推进器。液力推进器安装于三棱芯杆造穴钻杆的尾部, 液力推进器不仅具有向钻头处供压力水的功能, 还具有液压芯杆机构, 用于向造穴钻杆提供中心轴向推力, 其结构原理如图4所示。

液力推进器主要由进回油接头、液压缸、活塞、液压芯杆和供水口等组成。钻孔正常钻进时可通过液力推进器的供水接头向钻头处输送压力水进行降温排渣, 当对钻杆扩孔造穴时, 通过向液力推进器的液压缸内供液压油使活塞向前运动, 使液压芯杆与活塞同步运动, 液压芯杆前移时可向三棱芯杆造穴钻杆的芯杆提供轴向推力, 芯杆之间顶推前移, 扩孔器两侧铰接刀翼打开; 当扩孔施工结束后, 调整液压缸的进回油方向, 使活塞及液压芯杆后退复位, 三棱芯杆造穴钻杆的芯杆以及扩孔器的机械芯杆在弹簧的作用下复位, 完成该处扩孔造穴施工。液力推进器的液力驱动机构采用液压油作为动力输出, 可向造穴钻杆芯杆提供50 kN的轴向推力, 适用于普氏系数小于8的煤体进行机械造穴, 且该液力推进器结构紧凑, 驱动可靠, 操作简便, 便于在井下狭小空间进行安装、拆卸。

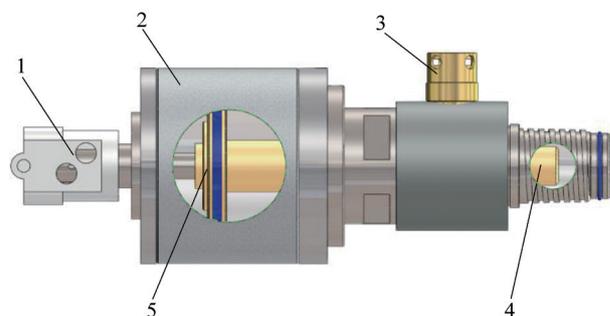
全方位液压履带式机械钻穴钻机

研发了ZDY4200L型矿用全方位液压履带式机械造穴钻机, 钻机实物如图5所示, 配合液压芯杆机械造穴装置可以实现360°全方位钻孔、造穴施工。机械造穴钻机设置有多个液压控制阀组, 利用控制阀组进行液压油路、冷却水、压力水(压风)等的控制, 并设有机械造穴专用控制阀路, 配合专用液力推进器提供轴向推力, 通过造穴钻杆的芯杆相互顶推实现远距离高推力输出, 使机械扩孔器在造穴目标位置主动打开, 造穴结束后主动关闭。机械造穴钻机可实现正常钻进和造穴增透的一键切换, 自动调节机械造穴时钻机的转速和给进速度。通过孔外机械控制造穴过程, 可靠性高, 大幅提高造穴的成功率。



1—外杆体; 2—芯杆; 3—复位弹簧; 4—支撑环

图3 三棱芯杆造穴钻杆结构原理



1—进回液接头; 2—液压缸; 3—供水接头;

4—液压芯杆; 5—活塞

图4 液力推进器模型



图5 全方位液压履带式机械钻穴钻机

液压芯杆机械扩孔装置模拟扩孔试验如图6所示，在实验室利用液压芯杆瓦斯增透机械造穴装备进行了模拟扩孔试验，用相似材料模拟煤体，相似材料的坚固性系数为3.5，煤体为长×宽×高为1 200 mm×1 200 mm×1 200 mm的立方体结构，该试验扩孔器最大扩孔直径为 $\phi 350$ mm，前端安装 $\phi 113$ mm三翼PDC钻头。试验中垂直煤壁钻进扩孔，钻机转速约90 r/min，钻机匀速推进条件下扩孔器用时15 min可将模拟煤体中部扩出直径为 $\phi 350$ mm的钻孔，钻进过程中排屑顺利，扩孔器张开、闭合作可靠，通过该试验初步验证了液压芯杆瓦斯增透机械造穴装置的工作原理和扩孔效果。

现场试验及效果

为了检验研发的液压芯杆瓦斯增透机械造穴装备在煤矿井下复杂环境中的扩孔造穴效果，在潞安化工集团李村煤矿2301回风巷进行了井下现场试验，试验钻机为ZDY4200L型矿用全方位液压履带式机械造穴钻机，芯杆推进式机械扩孔造穴装置组合依次为： $\phi 113$ mm PDC钻头+芯杆顶进式机械扩孔器+多根 $\phi 73$ mm三棱芯杆造穴钻杆+液力推进器。

现场施工试验钻孔5个，采用前进式造穴方式，在钻孔内共造穴45处，其中95#钻孔自24 m至110 m区间，共造穴9个，造穴期间使用平均压力为1.5 MPa的静压水进行排渣，排渣均匀可控，未出现喷孔瓦斯超限情况，造穴总出煤量 9.2 m^3 ，平均单穴出渣量约 1 m^3 ，单穴作业时间25~30 min，



图6 液压芯杆机械扩孔装置模拟扩孔试验

顺利完成了矿方设计的造穴目标，整套设备未出现明显缺陷和损坏。为了检验机械扩孔造穴的增透效果，对机械造穴钻孔及邻近的普通钻孔进行了抽采数据测量对比，机械造穴钻孔相比普通钻孔单孔初始平均抽采浓度由78.6%增加至87.4%，增幅11.2%；平均初始抽采纯量由 $0.136 \text{ m}^3/\text{min}$ 增加至 $0.178 \text{ m}^3/\text{min}$ ，增幅30.9%，抽放效果大幅提升。

现场试验结果表明：①研制的芯杆顶进式机械扩孔器利用机械芯杆驱动结构，具有结构简单、工作可靠、造穴效率高、随钻造穴等优点，利用该设备可在井下瓦斯抽采钻孔内连续或分段形成直径500 mm的洞穴，孔内造穴过程在低压水或压风状态下完成，能够减少煤体扰动，使瓦斯得到缓慢释放，减少了喷孔瓦斯超限事故，钻孔造穴增透后有利于提高钻孔瓦斯抽采效果；②液力推进器和三棱芯杆造穴钻杆采用孔外液压驱动、孔内芯杆远距离机械传输轴向推力，可靠性高，推力大，使芯杆顶进式机械扩孔器能够适应不同强度的煤层；③与常规水力冲孔造穴和孔内高压机械造穴工艺相比，该液压芯杆瓦斯增透机械造穴装置无需高压泵、高压密封钻杆等设备，操作简单，辅助作业时间少，能够满足快速造穴和低风险作业要求，为其他矿区低透气性煤层扩孔造穴提供了实践依据。

通过对试验所得技术数据进行分析，松软煤层液压芯杆瓦斯增透机械造穴装备在满足造穴施工的同时，通过低压水或压风进行孔内排渣，防止高压水对孔壁造成不规则破坏，减少瓦斯喷孔现象，降低瓦斯游离活跃度。就经济价值而言，研发的液压芯杆瓦斯增透机械造穴装置无需额外增加高压泵站，可节省部分施工成本，单孔成孔效率高。孔内低压排渣具有护孔、防塌孔的优势，钻孔规整程度高，从而保持瓦斯的长期有效抽采，间接提高了瓦斯抽采工效。

■ 责任编辑：李艾稣

作者简介：

第一作者：王海峰，高级工程师，山东益矿钻采科技有限公司创始人，现任山东邦弘中创智能装备有限公司董事长，贵州理工学院矿业工程学院企业导师。E-mail: sdykzckj@163.com

作者单位：山东益矿钻采科技有限公司