煤矿深孔液爆压裂技术研发及应用

杨敬轩[1],郭宝伟[2],许文彪[3],卢　硕[1],姜显涛[1]
(1. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州　221116;2. 安徽雷鸣科化有限责任公司,安徽 淮北　235042;
3. 淮北矿业股份有限公司 杨柳煤矿,安徽 淮北　235135)

摘要: 深孔爆破是解决坚硬煤岩致裂、冲击地压防治、高应力围岩卸压、低透储层增裂的有效途径. 针对煤矿深孔爆破技术难题,研发了液爆压裂技术,实现了机械化泵注装药,解决了大角度深孔装药难题. 研究表明:煤矿液体炸药基于水胶炸药配方改进而来,炸药爆炸性能没有发生改变,具备煤矿炸药安全性的同时兼具二级炸药的高威力,药液爆速为3 650～4 450 m/s,密度为0.9～1.2 g/cm^3;通过调控药液中胶凝剂的含量将炸药黏度控制在1 000 mPa·s左右,既利于液体炸药的泵注,又方便炸药的稳定存储. 研发了适用于各种角度和含水条件炮孔的新型装药结构,通过调整孔内管线布置并辅以防水带,增强了液爆压裂技术的普适性. 在杨柳煤矿巨厚岩浆岩治理中,开展了煤矿深孔液爆压裂工程实践,实施了泵注装药工艺,降低了人工劳动强度,注浆封孔和泵注装药平均用时12～16 min,极大提高了煤矿深孔爆破效率,裂缝扩展长度为3～7 m,起到了良好的孔壁围岩致裂效果.

关键词: 煤岩预裂;深孔爆破;液体炸药;泵注装药;爆破卸压
中图分类号: TD 353　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)03-0750-11

Research and application of liquid explosive blasting fracturing technology in coal mine

YANG Jingxuan[1], GUO Baowei[2], XU Wenbiao[3], LU Shuo[1], JIANG Xiantao[1]
(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Anhui Leiming Chemical Co., Ltd., Huaibei, Anhui 235042, China; 3. Yangliu Coal Mine, Huaibei Mining Co., Ltd., Huaibei, Anhui 235135, China)

Abstract: Deep-hole blasting is an effective method for pre-splitting, preventing rock burst, relieving high-stress, and enhancing fractures in low-permeability reservoirs. To address the technical challenges of deep-hole blasting, liquid explosive blasting technology was developed, achieving mechanized pumping and charging, and solving the issue of large-angle deep-hole charging. The results show that coal mine liquid explosives are derived from improvements to water-gel explosive formulations, maintaining unchanged explosive performance while ensuring coal mine safety and the high power. The explosive velocity ranges from 3 650 to 4 450 m/s, with a density of 0.9 to 1.2 g/cm^3. By adjusting the gelant content in the explosive solution, the viscosity is controlled around 1 000 mPa·s, facilitating both pumping and stable storage. A new charging structure suit-

收稿日期: 2026-03-13　　**修回日期:** 2026-04-10　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20260114
基金项目: 国家自然科学基金项目(52074261)
通信作者: 杨敬轩(1986—),男,安徽省淮北市人,副教授,博士生导师. E-mail: jxyangcumt@126.com
引用格式: 杨敬轩,郭宝伟,许文彪,等.煤矿深孔液爆压裂技术研发及应用[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):750-760.
YANG Jingxuan, GUO Baowei, XU Wenbiao, et al. Research and application of liquid explosive blasting fracturing technology in coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 750-760.

able for various angles and water-bearing conditions is developed, enhancing the universal applicability of liquid explosive blasting technology through pipeline layout adjustments and the use of waterproof bands. In the treatment of thick magma rocks at Yangliu Coal Mine, deep-hole liquid explosive blasting engineering is implemented, utilizing the pump injection charging process to reduce manual labor intensity. The average time for grouting sealing and pump injection charging is 12—16 min, significantly improving the efficiency of deep-hole blasting. The crack extension length ranges from 3 to 7 m, achieving effective pre-splitting.

Key words: coal and rock pre-splitting; deep hole blasting; liquid explosive; pump injection charge; blasting pressure relief

中国煤炭资源丰富，随着煤矿开采深度的增加，煤矿开采条件日趋复杂，为解决煤矿采场矿压、巷道卸压等技术难题[1-2]，采用深孔爆破技术取得了岩体定向致裂效果，有效切断了高应力传载路径，减小了采场围岩变形[3-4]；低渗透油气藏开发难度大，储层孔隙度小、渗透率低、连通性差，深孔爆破实现了岩石体积压裂，极大提高了油气资源采收率[5-6]. 深孔爆破具有体积压裂效果，孔内炸药爆炸能量密度大，载荷强度高，但强动载作用持续时间短，后期破岩动力不足，裂缝扩展长度有限，爆破缝网空间小[7]. 同时，在深孔爆破过程中，还经常面临深孔装药困难、封孔难度大、拒爆等工艺问题，因此亟需研发新型煤矿深孔爆破技术.

目前符合行业标准(MT/T 61—1997)的煤矿炸药是直径为27～35 mm的卷状药，主要面向爆破掘进场景，最佳适用炮孔深度不超过3 m. 伴随煤矿生产机械化程度的提高，爆破掘进工法逐步退出历史舞台，对应的卷状炸药销售量递减. 随着矿井开采深度的增加，深部高应力显现及伴生灾害问题越发突出. 煤矿深孔爆破作为一项高效的预裂卸压技术，配套工艺与装备得到一定发展，是解决坚硬煤岩致裂、冲击地压防治、高应力围岩卸压、低透储层压裂等难题的有效途径[8-10]. 因此，适用于煤矿深孔爆破条件的炸药产品也亟待研发.

煤矿深孔爆破条件下，炮孔长度普遍在15 m以上，缺乏爆破自由面，加之钻孔深部三向应力夹持影响，必须采取大直径、大装药量、高威力炸药进行爆破[11]. 传统卷状炸药直径小、威力低，不耦合装药系数大，能量利用率低，不适用于深孔爆破条件；管柱炸药在一定程度上克服了卷状炸药缺陷，管柱直径达48～75 mm，孔内延米装药量显著提高，爆炸能量利用率进一步提升，体积压裂效果明显[12]，但由于管柱自身重量及长钻孔变形等因素影响，管柱炸药深孔装药难题迫在眉睫. 为此，根据煤矿深孔爆破技术特点和应用前景，结合煤矿水胶炸药组分特点，提出一种煤矿液爆压裂新技术、新工艺及液体炸药新产品研发思路.

液体炸药爆炸压裂技术出现时间较早，19世纪60年代，文献[13-14]就开展了液体炸药工程应用尝试，但仅局限于地面工程，煤矿液爆压裂技术和液体炸药的研发工作尚属首次. 关于液体炸药的研发，学者们曾以硝化甘油、硝酸肼、过氧化氢化合物、硝基甲烷、高氯酸盐等化学药品为主体成分进行探索，但受药液主体成分的稳定性、安全性及适用条件等因素影响，液体炸药成型产品研发尚不成熟，制约了液爆压裂技术的推广[15]. 近年来，随着油气开采、地热开发、军事研究等特殊领域的技术需求，液体炸药技术获得了长足发展，炸药性能、用途呈现系列化发展态势，组分灵活、可配可调[16-18]，为煤矿液体炸药研发提供了借鉴. 煤矿液体炸药具有流动性，采用泵注装药方式，可解决岩体大角度深孔装药难题；同时，液体炸药起爆临界直径小，钻入裂缝内能正常起爆[19-20]. 炸药缝内起爆能量直接作用于裂缝壁面，裂缝二次起裂扩展难度低，利于岩体缝网空间建设，拓展了孔壁围岩裂缝扩展范围，体积压裂效果显著.

煤矿液爆压裂技术的提出一方面实现了岩石体积压裂；一方面弥补了一次爆破缝网空间不足的缺陷，真正解决了岩体工程体积压裂难题，是一种安全高效且低成本的卸压、增裂、解堵技术[21-24]. 煤矿液体炸药具有流动特性，便于开展井下泵注作业，利于大角度深孔装药；孔内全耦合装药爆破，爆炸能量利用率高，裂缝扩展不受地应力影响. 同时，煤矿液体炸药新产品的研发不仅能开拓炸药市场，也是对民爆行业产品的一个补充，极大拓展了民爆产品适用技术领域.

1 煤矿液体炸药研发

煤矿液体炸药是实现液爆压裂的基本材料，是一种具有物理流动特性的炸药产品，同时还需兼具煤矿炸药的安全性. 常规液体炸药品种较多，一般分为单质液体炸药和混合液体炸药. 常见单质液体炸药有硝化甘油、硝基甲烷等；混合液体炸药有硝酸类、硝基甲烷类等. 单质液体炸药的机械感度高，不易输送保存；混合液体炸药通常较稳定，爆炸性能好、材料来源广，是煤矿液体炸药研发的重要方向. 煤矿许用型炸药要求炸药的爆炸性能好、安全性高，原材料易获取，无毒、无害、无污染，爆炸不易形成“热点”. 因此，煤矿液体炸药研发过程中，在考虑炸药爆炸性能的同时还要兼顾炸药的安全性，对炸药的爆热、爆温以及机械感度等参数严格控制.

煤矿水胶炸药属于含水炸药，以硝酸甲胺水溶液为敏化剂，与硝酸铵、硝酸钠溶液混合，密度均匀，符合煤矿液体炸药研发需求. 为此，以三级煤矿水胶炸药配方为基础，开展新型煤矿液体炸药研发工作[25]. 在 60 ℃恒温水浴环境中，依次向烧杯中加入 446 g 硝酸甲胺溶液、308 g 硝酸铵溶液和 63 g 水，待晶体完全溶解，自然冷却至 42 ℃，按顺序加入硝酸钠、田菁粉及相应的促进剂、发泡剂等，充分搅拌混合，完成液体炸药配制工作. 综合考虑液体炸药的气泡裹挟、药液稳定及黏度特性，设计了 4 种黏度的药液（田菁粉质量分数分别为 0.1%，0.2%，0.3% 和 0.4%），实测药液黏度分别为 303，591，689，784 mPa·s，药液放置 24 h 后的黏度分别为 762，1 805，2 015，3 621 mPa·s，药液基本趋于稳定，黏度不再增加，甚至在一定程度上略有降低，原因在于低黏度药液容易出现析晶分层现象，如图 1 所示.



(a) 析晶现象 (b) 静置分层

图 1 药液的析晶分层现象

Fig. 1 Crystallization and stratification phenomenon of liquid medicine

将配制完成的药液继续静置 7 d，再次测试药液黏度分别为 470，1 131，1 651，3 592 mPa·s. 由此可见，相较于低黏度药液存储条件，高黏度药液相对稳定. 液体炸药中田菁粉质量分数为 0.25%～0.30%，药液黏度控制在 1 000 mPa·s 左右时，静置 4 h 后发生分层，15 h 内无析晶现象，经过快速搅拌，分层气泡再度溶解，不影响炸药的正常使用. 据此，得到的药液密度区间为 0.9～1.2 g/cm^3，对应的爆速范围为 3 650～4 450 m/s. 根据炸药配方进行理论计算和爆速实测，所得炸药爆炸性能参数[15,25]见表 1.

表 1 不同配方条件下的炸药爆炸性能参数

Table 1 Explosion parameters of explosives under different formulation conditions

爆炸性能参数	方案一	方案二
密度/(g·cm^{-3})	1.2	0.9
爆速/(m·s^{-1})	4 450.0	3 650.0
理论爆热/(kJ·kg^{-1})	2 602.6	1 337.8
理论爆温/℃	1 834.9	1 236.9
理论爆容/(L·kg^{-1})	991.0	863.0
理论爆压/GPa	5.5	3.2

可以看出，2 种配方条件下的液体炸药爆温均低于 2 000 ℃. 对比常规煤矿炸药爆速、爆压、密度等参数特征值，确定方案一为煤矿液体炸药的基础配方. 考虑经济性，药液中的瓜尔胶和田菁粉灵活替换，均作为胶凝剂使用.

综上，煤矿液体炸药在水胶炸药配方基础上，通过适当降低胶凝剂含量，实现了药液的流动特性，药液主体化学成分及比例没有发生改变，配制完成的液体炸药在具备煤矿水胶炸药安全性的同时还兼具二级煤矿炸药的高威力.

煤矿液体炸药具有流动性，能够实现机械化泵注装药. 为明确液体炸药泵注工艺匹配特性，进一步开展药液的泵注试验，探索气源压力、管径、药液黏度这 3 个因素对药液泵注流量的影响. 通过控制胶凝剂（瓜尔胶、田菁粉）的用量，调配出不同黏度的药液类型，如图 2 所示. 实测药液黏度为 273，1 080，26 624 mPa·s，分别对应田菁粉质量分数 0.08%，0.7%，3.4%.



(a) 药液黏度调制 (b) 药液黏度测试

图 2 液体炸药黏度调制与测试

Fig. 2 Viscosity modulation and testing of liquid explosive

液体炸药为矿用火工品，泵注装药中须采用专用泵注装备．为保证药液泵注过程的安全，基于隔膜泵工作原理，采用煤矿气动隔膜泵进行泵注装药，该设备以带压气体为动力，适用于易燃易爆环境，安全可靠．为此，以BQG150/0.2型矿用隔膜泵为例，开展药液流量测试，对应的性能参数见表2.

表2　矿用隔膜泵性能参数

Table 2　Performance parameters of mining diaphragm pump

流量/($L\cdot min^{-1}$)	出口压力/MPa	耗气量/($m^3\cdot min^{-1}$)	额定风压/MPa
150	0.3	0.5～0.6	0.6

液体炸药泵注流量测试中，将气源压力分别设置为0.2，0.4，0.6 MPa共3个等级．注药管径应不超过炸药临界起爆直径，选择10，12，16 mm这3种管径．隔膜泵进液口连接吸液管伸入药液盛装容器，出液口通过异径接头连接注药管，如图3所示．采用秒表记录药液泵注时间，计算泵注流量，结果见表3.

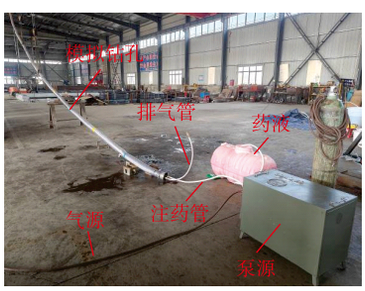


图3　药液泵注装备及管线连接

Fig. 3　Equipment and pipeline connection for liquid pump injection

表3　不同黏度和管径下的药液泵注流量

Table 3　Flow rates of medication pumps at different viscosities and pipe diameters

气压/MPa	黏度/mPa·s	不同管径下的泵注流量/($L\cdot min^{-1}$)		
		10 mm	12 mm	16 mm
0.2	26 624(高黏度)	0.395	1.716	4.688
0.4		1.300	4.525	10.952
0.6		2.557	6.824	16.631
0.2	1 080(中黏度)	3.040	6.456	15.441
0.4		5.173	10.870	23.430
0.6		7.361	15.954	29.412
0.2	273(低黏度)	5.837	11.196	25.000
0.4		11.111	19.732	36.603
0.6		14.697	25.000	46.904

可以看出，高黏度(26 624 mPa·s)药液的泵注效果不佳，0.6 MPa的气源压力配合16 mm管径的注药管，药液泵注流量仅为16.6 L/min．在工程实践中，注药、排气管线更长，泵注阻力更大，高黏度药液无法满足快速泵注装药需求；相反，低黏度(273 mPa·s)药液便于泵注装药，相同气源压力条件下，低黏度药液泵注流量达到46.9 L/min，显著提升了泵注装药效率．考虑到药液对气泡的裹挟，为保证炸药的正常起爆感度和稳定，通常将药液调制成中等黏度，即控制在1 000 mPa·s左右．

2　液爆压裂工艺研发

先封孔后装药和机械化泵注是煤矿深孔液爆压裂的技术特色，选择矿用隔膜泵作为泵源，以带压气体为动力，气源压力一般为0.4～0.6 MPa，对应的隔膜泵扬程一般不超过60 m，对于垂高较大的情况，需提前采取泵注增压措施．液爆压裂工艺流程包括“打钻—封孔—装药—起爆”4个主要工序．打钻方面，钻孔布置方式主要取决于煤岩致裂需求；封孔方面，根据浆液凝固时间(短时20～30 min，长时6～8 h)和工序衔接灵活配套封孔材料和封孔工艺；装药方面，采用矿用隔膜泵进行机械化泵注装药；起爆方面，采用煤矿安全导爆索非电起爆方式，保证孔内液体炸药的可靠起爆，特殊情况下采用“雷管＋药卷”的点起爆方法．

爆破实践中常遇仰孔、俯孔装药条件，基于液体炸药的流动性，均可实现机械化泵注装药．但是，炮孔的角度不同，孔内装药结构亦存在一定差异，主要体现在注药管和排气管的布置方面．仰孔装药条件下，排气管伸至孔底，注药管超出封孔段，如图4a所示；俯孔条件下，注药管和排气管同时超出封孔段一定距离，如图4b所示．考虑孔内渣粉堵管影响，排气管头部通常布设多排侧孔，防止渣粉堵塞管路．

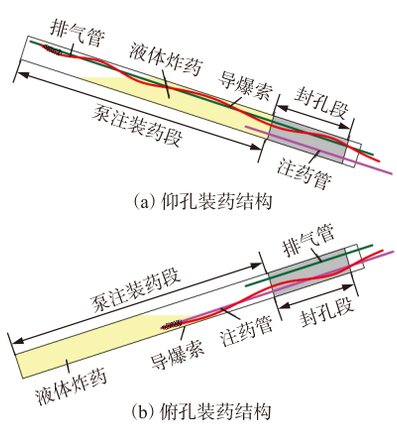


图4　不同角度炮孔的装药结构

Fig. 4　Charge structure of different angle boreholes

煤矿深孔爆破中常遇孔内含水情况，液体炸药本身为水溶液，遇水稀释后将进一步降低炸药的起爆感度及爆炸性能．为保证液爆压裂技术能较好地适应含水爆破环境，提出了一种含水孔内的液爆压裂装药结构[26]，如图5所示．

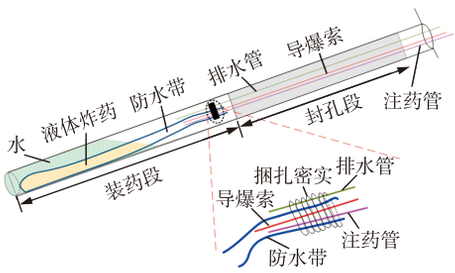


图5 含水孔泵注装药结构

Fig. 5 Pump injection charge structure of water containing hole

根据图5所示的含水孔装药结构，采取防水带辅助装药措施，对于各种角度炮孔，注药管、排水管(排气管)均不需要伸至孔底，可节省管材用量．同时，该装药结构还可推广应用于一般装药条件，极大提高了煤矿液爆压裂技术的普适性．

需要指出的是，采用阻燃防水带作为孔内装药的媒介，防水带直径一般需大于钻孔直径5～10 mm．封孔作业前，根据封孔装药长度计算防水带、注药管、排水管、导爆索、封孔器尺寸，并按序绑缚防水带、注药管、排水管、导爆索、封孔器，一并塞入孔内．注药管和导爆索伸入防水带1～2 m捆扎密实(孔内水压较大情况下，防水带内注药管需要伸至孔底位置)，排水管绑缚于防水带底部外侧．

采取矿用隔膜泵作为泵源，无机械摩擦，安全可靠，配合使用注药管和排气管(排水管)，解决了煤矿大角度深孔装药难题．以仰孔装药条件为例，煤矿深孔泵注装药结构，如图6所示．

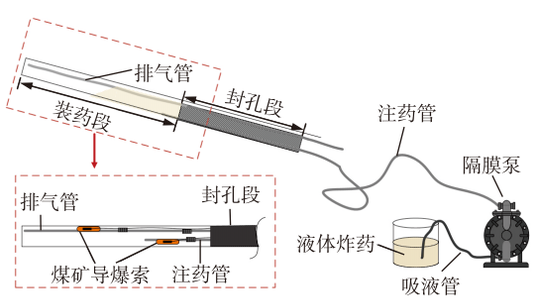


图6 仰孔泵注装药结构

Fig. 6 Injection and charging structure of uphole pump

仰孔装药前，提前布置孔内管线，待注浆封孔完毕，紧接着开展孔内机械化泵注装药．现场实践中，液体炸药采用防静电塑料桶盛装，敞口直径大于0.5 m，便于药液加注及搅拌；药液盛装桶与隔膜泵通过吸液管连接，吸液管具有钢丝骨架，管径为10 cm；隔膜泵出液口与孔内注液管连接，泵注装药过程中，观察排气管(排水管)末端返液情况，待排气管返液，继续泵注1 min，然后停泵、拔管，准备连线起爆作业．

3 液爆压裂原理分析

煤矿液体炸药基于水胶炸药配方改进而来，做功过程仍是源于剧烈的化学反应．深孔三向应力夹持作用明显，缺乏爆破自由面，孔内装药以内爆作用为主，爆破裂缝扩展不受地应力影响，孔壁围岩破坏呈现分区特征[27-28]．相较于常规深孔爆破条件，液爆压裂采用泵注工艺，实现了孔内全耦合装药，孔内装药一次起爆破岩仍可基于炸药内爆作用机理进行解释．为此，基于流体动力学理论，得到的孔壁围岩一次致裂有效半径为：

$$R_t = r_c + r_t, \tag{1}$$

式中：R_t为孔壁围岩一次致裂有效半径；r_c为炮孔破碎半径；r_t为拉伸破坏半径．

由此得到炮孔有效致裂范围与岩石强度之间的关系[29]，如图7所示．可以看出，深孔爆破由于缺乏自由面，爆破致裂范围有限，理论分析得到的孔壁围岩有效致裂半径仅是炮孔破碎半径的10～15倍．因此，为提高孔壁围岩破裂范围，一方面采取大装药量措施，增加炮孔延米装药量；另一方面，提出了单孔重复爆破增裂方法，在一次爆破裂缝基础上，开展2次甚至多次重复爆破作业，延伸孔壁围岩裂缝长度．但是，受炮孔变形破坏影响，基于固体炸药孔内装药的重复爆破难以实现．相反，液体炸药具有流动性，既能实现孔内全耦合大装药量目标，又能克服钻孔变形影响，为单孔重复爆破提供了条件．

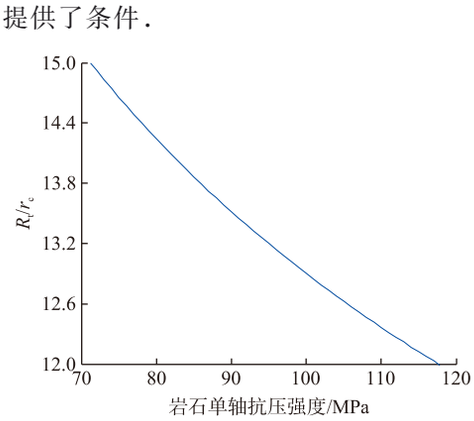
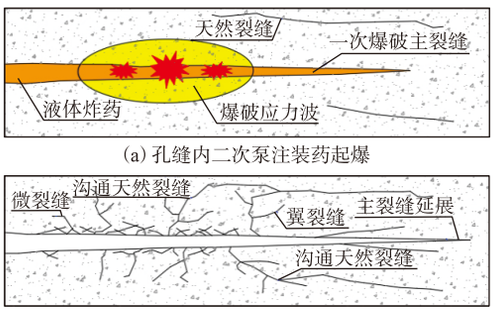


图7 孔壁围岩有效致裂范围

Fig. 7 Effective range of fracturing in the surrounding rock

液体炸药起爆临界直径小，钻入裂缝内能正常起爆，炸药在孔缝内爆炸做功破岩，“撕裂缝”比起“撕原岩”更容易，爆破增裂效果更显著，如图8所示.



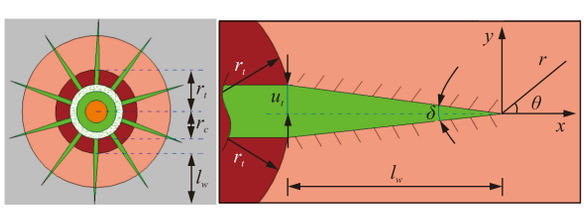
(a) 孔缝内二次泵注装药起爆

(b) 重复爆破条件下的裂缝扩展

图8　液爆压裂单孔重复爆破裂缝扩展

Fig. 8　Crack propagation caused by repeated blasting of liquid explosive blasting fracturing

深孔爆破条件下，液体炸药初次起爆瞬间，受爆炸高能量影响，裂缝扩展不受地应力影响，孔壁裂缝整体呈对称分布，如图9a所示；二次装药爆破情况下，液体炸药楔入孔壁裂缝，呈现耦合装药特点，液体炸药起爆临界直径大，孔缝内药液仅起到传载作用，因此重复爆破机理与充水承压爆破致裂原理相似，如图9b所示，图中u_t为裂缝宽度的一半；θ为极坐标角度；r为极坐标半径；δ为裂缝尖端夹角.



(a) 周边裂隙整体扩展　　(b) 单个裂隙扩展

图9　裂隙扩展模型

Fig. 9　Crack expansion model

假定重复爆破裂缝最终扩展长度为l_w，终止压力为p_w. 基于最大拉应力准则及爆生产物在高温高压条件下的等熵膨胀理论，最终确定围岩裂缝扩展长度关系式[30]为：

$$\begin{cases} p_w = \dfrac{K_I}{\sqrt{2\pi l_w}}, \\ u_t = \dfrac{K_I}{2G}\sqrt{\dfrac{l_w}{2\pi\cos\dfrac{\delta}{2}}}\cos\dfrac{\delta}{4}\left(\kappa+\cos\dfrac{\delta}{2}\right), \\ \dfrac{p_c}{p_w} = \left(\dfrac{s_c+ns_w}{s_c}\right)^k = \left[1+\dfrac{nu_t(2D_t+l_w)}{\pi r_c^2}\right]^k, \end{cases} \tag{2}$$

式中：p_c为破碎区压力；s_c为破碎区面积；s_w为药液充斥面积；n为裂缝总数；K_I为Ⅰ型裂隙应力强度因子；G为剪切模量；D_t为围岩破裂区厚度；k为爆轰产物绝热指数；κ为弹性平面应变/应力问题参量.

考虑到裂缝尖端夹角较小，对裂缝扩展长度关系式(2)进行简化，消去变量p_w与u_t，得到裂缝扩展长度关系式为：

$$\left(\frac{p_c\sqrt{2\pi l_w}}{K_I}\right)^{\frac{1}{k}} - \frac{nK_I\sqrt{l_w}(\kappa+1)(2D_t+l_w)}{2\sqrt{2\pi}\,G\pi r_c^2} = 1. \tag{3}$$

以砂质围岩为例，假定砂岩抗拉强度为24 MPa，泊松比为0.25，弹性模量为41 GPa，根据式(3)得到孔壁裂缝扩展特征，如图10所示.

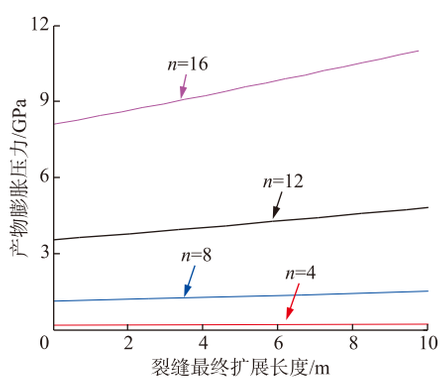
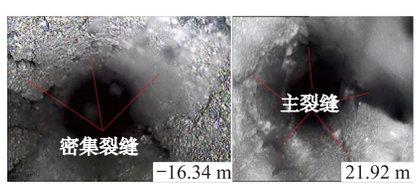


图10　膨胀压力对裂缝扩展的影响

Fig. 10　Effect of expansion pressure on crack expansion

由图10可以看出，裂缝条数较多情况下，裂缝起裂的初始膨胀压力较高；裂缝的终止扩展长度与产物膨胀压力线性相关，随着裂缝条数的减小，线性相关性减弱. 液爆压裂技术条件下，已爆孔内重复耦合装药，爆炸能量利用率高，产物膨胀压力大，由于起始裂缝的先导作用，次生裂缝产生量少，孔壁裂缝最终扩展长度大.

实践研究表明，深长钻孔三向应力夹持作用明显，爆破孔壁围岩以变形破裂为主，少有坍塌现象(如图11所示)，为孔内重复泵注装药提供了可能. 液体炸药钻入孔壁围岩缝网中起爆，岩石体积压裂效果更明显.



注：图中数据均表示探头距起始测量点的距离，由于起始点的设置问题导致正负号的出现.

图11　深孔爆破孔壁围岩破坏情况

Fig. 11　Damage to surrounding rock of deep hole blasting

煤矿液体炸药研发促成了单孔重复爆破技术的实现，能够取得良好的孔壁围岩增裂实践效果．同时，在理论方面也引出了重复爆破条件下的裂缝扩展规律这一新的科学问题，拓展了煤矿深孔爆破机理研究方向．基于此，进一步采用数值分析方法，探索单孔重复爆破条件下的裂缝扩展规律．

采用 Ls-Dyna 计算程序，建立尺寸为 20 m×20 m×20 m 的计算模型，炮孔深度为 15 m，直径为 60 cm，封孔长度为 3 m，装药长度为 12 m．考虑围压影响，建立 2 种侧压系数条件下的爆破模型：x 轴方向水平压力 P_x=10 MPa，y 轴方向水平压力 P_y=20 MPa，即侧压系数 λ=0.5；P_x=P_y=10 MPa，即 λ=1．沿装药段中部垂直于炮孔轴向取截面，对比孔内先后 2 次爆破条件下的孔壁围岩裂缝扩展情况，如图 12 所示．

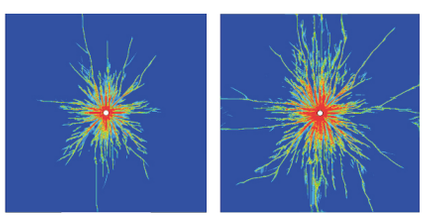


图 12 爆破裂缝扩展情况

Fig. 12 Expansion of blasting cracks

可以看出，围压和重复爆破对孔壁破碎区的影响并不明显，2 次爆破导致孔壁围岩裂缝密度增加，爆炸能量消耗较多，但破碎区整体尺寸及形态变化不大．重复爆破条件下，受 1 次爆破主裂缝的导向作用，2 次爆破在主裂缝尖端产生应力集中，引发主裂缝的继续延展，但由于前端破碎区的能耗高，主裂缝 2 次扩展长度受限；非主裂缝扩展方向由于能量消耗，对应该区域的裂缝扩展极大受限．不同围压加载条件下，模型 2 次爆破裂缝扩展长度普遍大于 1 次爆破情形，没有产生明显转向，主要沿着 1 次爆破主裂缝方向延展，说明高爆能瞬态作用下的裂缝扩展受天然地应力影响程度较小．

4 液爆压裂技术实践

淮北矿业股份有限公司杨柳煤矿 105 采区赋存巨厚岩浆岩，单层厚度为 60～80 m；该岩浆岩强度较高，普氏系数为 16～18；完整性较好，岩石质量指标（RQD 值）为 75% 以上；距离煤层 80～100 m．为消除厚硬顶板对工作面开采的潜在影响，提出了岩浆岩超前预裂断顶措施，在矿井东翼轨道大巷开展了坚硬顶板液爆压裂测试，以探索爆破裂缝扩展规律．

液爆压裂孔位于东翼轨道大巷 DG2＋15 m 处，共布置 8 个钻孔，其中 6 个为炮孔，2 个为观测孔，均垂直于巷道轴向呈扇形布置，钻孔直径为 94 mm，如图 13 所示，图中蓝色表示装药段，粉色表示封孔段，红色代表观测孔．1#～4#孔背向东翼胶带大巷，5#～8#孔朝向东翼胶带大巷．钻孔布置参数见表 4．

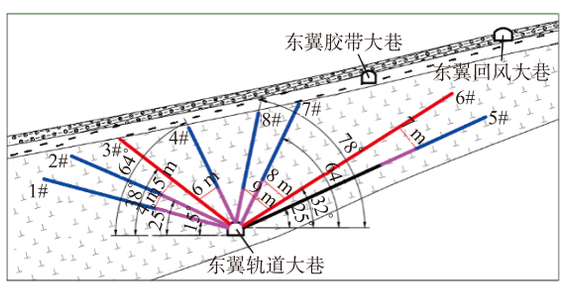


图 13 液爆压裂孔布置方式

Fig. 13 Layout of liquid explosive blasting fracturing holes

表 4 钻孔布置参数

Table 4 Drilling layout parameters

孔号	倾角/(°)	孔深/m	装药长度/m	封孔长度/m
1#	15	50	30	20
2#	25	45	25	20
3#(观测孔)	38	36		
4#	64	28	18	10
5#	25	70	45	25
6#	32	65	40	25
7#(观测孔)	47	46		
8#	73	30	20	10

煤矿深孔液爆压裂先封孔后注药，封孔作业前使用直径为 45 mm 的连续安装管进行透孔，无明显阻力，说明成孔质量较高．然后，按序在孔内分别安置排气管、导爆索、注药管、封孔器．考虑药液传爆风险，注药管直径不能大于液体炸药的起爆临界直径，据此确定注液管直径为 16 mm，排气管直径为 10 mm．

液爆压裂仰孔装药条件下，排气管绑缚煤矿导爆索送至孔底，推送中始终保持管线绷直状态，

防止打绕成结. 同时,为防止排气管在推送过程中堵塞,需在排气管前端开侧孔. 排气管和导爆索装设完毕,注药管绑缚封孔器(注药管头部超出封孔器 20～50 cm)推送至孔内封孔段.

记录孔内管线安装过程用时,结果见表 5. 统计分析得单孔内的管线平均安装时间在 21 min左右.

表 5　管线布置用时

Table 5　Pipeline layout time

孔号	1#	2#	4#	5#	6#	8#
用时/min	27	25	20	17	20	20

为保证深孔爆破质量和爆破效率,煤矿液爆压裂采取注浆封孔工艺. 采用“两堵一注”封孔器、425 标号水泥,浆料水灰质量比严格控制在 0.5左右,封孔长度不小于孔深的 1/3. 记录液爆压裂注浆封孔用时,结果见表 6. 统计分析得注浆封孔总用时为 96 min,平均用时 16 min,水泥用量共计 950 kg.

表 6　注浆封孔用时及水泥用量

Table 6　Time and cement consumption for grouting and hole sealing

孔号	注浆时间/min	封孔长度/m	水泥用量/kg
1#	21	20	150
2#	30	19	150
4#	7	10	100
5#	14	25	225
6#	16	25	225
8#	8	10	100

待封孔浆液凝固后,采用专用隔膜泵进行泵注装药,如图 14 所示. 液体炸药泵注过程中,人员撤离至安全地点,间隔观察排气管返液情况. 待孔内排气管返液,封闭排气管,隔膜泵继续泵注 1 min后停止注药.



(a) 专用隔膜泵　(b) 泵吸药液

(c) 注药准备　(d) 排气管返液

图 14　液体炸药泵注装药

Fig. 14　Liquid explosive pump charging

记录炮孔泵注装药时间和炸药用量,结果见表 7. 统计分析结果表明,采用泵注装药工艺,极大提高了深孔装药效率,单孔平均泵注装药时间为 12 min,炸药总用量约为 1.5 t. 深孔泵注装药完毕,导爆索绑缚数码雷管,连线远距离起爆.

表 7　泵注装药时间及炸药用量

Table 7　Pump charging time and explosive quantity

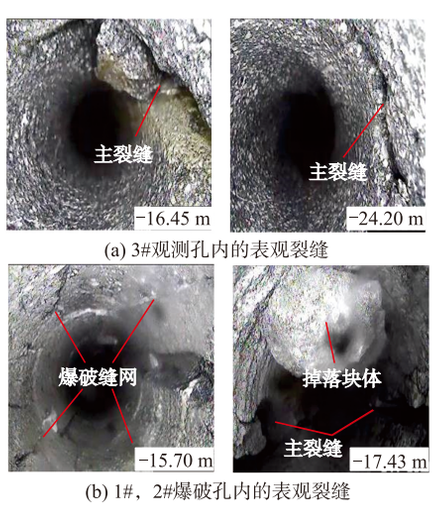
孔号	注药时间/min	装药长度/m	炸药用量/kg
1#	14	30	300
2#	10	26	250
4#	9	18	175
5#	15	45	325
6#	14	40	300
8#	10	20	225

采用钻孔窥视和注水观测方法,分析爆破裂缝扩展长度,探索孔壁围岩裂缝扩展规律. 按照表 8所示的钻孔窥视顺序,记录孔壁围岩裂缝发育情况. 受钻孔变形破坏影响,最大窥视深度为 36 m. 观测结果表明,孔壁围岩表观裂缝发育,沿钻孔径向呈发射状,如图 15所示.

表 8　窥孔用时及明显裂缝位置

Table 8　Time and obvious crack location of peephole

窥视顺序	窥视时间/min	窥视深度/m	备注
3#	18	36	16,24 m处有明显裂缝
2#	8	20	孔内堵塞
1#	7	18	孔内堵塞
4#	10	28	爆破段均可见明显裂缝
5#	6	23	孔内堵塞
6#	6	23	孔内堵塞
8#	7	25	爆破段均可见明显裂缝



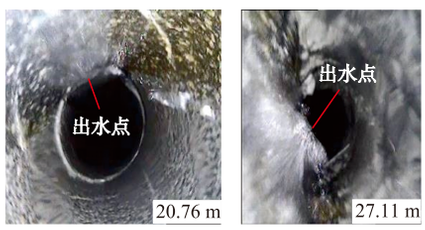
(a) 3#观测孔内的表观裂缝

(b) 1#，2#爆破孔内的表观裂缝

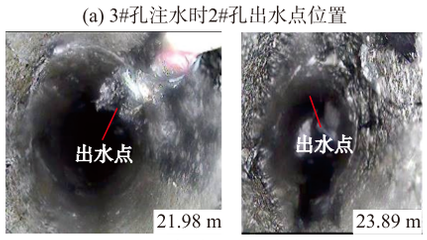
图 15　孔壁围岩破裂窥视结果

Fig. 15　Peeping results of surrounding rock fracture

液爆压裂孔窥视结果表明,液体炸药全耦合装药爆破能量利用率高,体积压裂效果显著,孔壁围岩多条主裂缝发育,但少有塌孔现象.结合注水观测法,记录邻近孔内的出水点位置,如图 16 所示.根据邻近孔的出水点位置和孔间几何关系,反演分析裂缝扩展长度,结果见表 9.



(a) 3#孔注水时2#孔出水点位置



(b) 6#孔注水时5#孔出水点位置

图 16 液爆压裂孔出水点位置

Fig. 16 Location of the water outlet point of liquid explosive blasting fracturing hole

表 9 液爆压裂孔压水试验数据

Table 9 Water pressure test data for liquid explosive blasting fracturing holes

注水孔	出水孔	注水时间/min	出水位置/m	裂缝长度/m	备注
3#	2#	13	20～27	5.0～6.6	3#为观测孔
4#	3#	10	7～15	4.5～7.0	3#为观测孔
7#	8#	16	7～11	4.5～6.0	7#为观测孔
6#	5#	17	21～25	3.0～4.0	均为爆破孔

综上,理论分析得到的裂缝扩展长度是炮孔半径的 10～15 倍,对应直径为 94 mm 的孔壁围岩裂缝扩展半径为 0.47～0.71 m. 表 9 中给出的液爆压裂实测裂缝扩展长度为 3～7 m,达到了裂缝理论扩展长度的 6～15 倍. 原因在于:液爆压裂实现了孔内全耦合装药,炮孔装药量大;液体炸药具有二级煤矿炸药的高威力,爆炸能量密度高;岩浆岩呈现硬脆性特点,硬岩破裂吸能损耗少,炸药爆炸能量主要用于裂缝延展.

5 结 论

1)基于煤矿水胶炸药改性研发得到一种新型煤矿液体炸药,具备煤矿炸药安全性的同时兼具二级煤矿炸药的高威力,具有优越的物理流动特性,药液爆速为 3 650～4 450 m/s,密度为 0.9～1.2 g/cm^3. 通过优化药液中胶凝剂的含量,将药液黏度控制在 1 000 mPa·s 左右,既能保证药液的良好泵注性能,又能实现炸药的长期存储.

2)研发了煤矿深孔液爆压裂技术及配套工艺. 创新了一类装药结构,通过调控孔内注药管、排气管(排水管)布置方式,较好地适应了各种角度炮孔的泵注装药条件. 同时,辅以防水带隔水措施,解决了含水孔的泵注装药难题,提高了液爆压裂技术的普适性.

3)液爆压裂单孔重复爆破条件下裂缝扩展长度大,体积压裂效果更显著. 在杨柳煤矿岩浆岩液爆压裂实践中,采用液体炸药泵注工艺解决了大角度深孔装药难题,注浆封孔和泵注装药平均用时为 12～16 min,实现了煤矿爆破机械化,孔壁围岩裂缝扩展长度达到 3～7 m.

6 研究展望

液爆压裂主要应用于矿井冲击地压防治、坚硬煤岩预裂、煤岩增裂增透等深孔爆破技术场景.

1)冲击地压防治方面:采用液体炸药进行泵注装药,能够实现超长孔内的耦合装药爆破,炸药爆炸能量利用率高,充分实现孔壁围岩体积压裂目标,爆破缝网为煤岩高应力提供了广泛卸压空间,较好地释放煤岩体内积聚的弹性能,解除高应力煤岩冲击风险.

2)坚硬煤岩预裂方面:基于液体炸药爆炸的体积压裂效果,裂缝扩展不受地应力影响,提高孔壁围岩缝网空间分布及裂缝扩展长度,破坏围岩完整性,主要用于断层、陷落柱等硬岩地质体以及坚硬煤岩(如坚硬顶板、顶煤和硬夹矸)等方面的深孔爆破预裂场景;或利用炮孔间的相互扰动,实现孔壁围岩定向致裂目标,实现煤岩平面致裂效果,满足煤矿切顶、放顶等技术需求.

3)煤岩增裂增透方面:增裂机理与坚硬煤岩预裂原理相似,凭借液体炸药体积压裂效果,形成体积压裂缝网,提高孔壁围岩渗透率,为煤岩瓦斯(天然气)抽采、探放水孔疏水提供通道,起到煤岩增透目的. 同时,基于液体炸药的流动特性及装药新工艺,能够实现单孔内重复爆破作业,充分提高爆破裂缝扩展长度及缝网空间分布范围,坚硬致密煤岩增裂增透效果更显著.

综上,煤矿深孔液爆压裂技术借助液体炸药优越的流动特性,采用深孔泵注工艺,解决了煤矿

大角度深孔装药难题，实现了煤矿井下爆破机械化作业，完成了煤矿爆破技术升级，降低了爆破劳动强度，改善了爆破作业环境，技术推广应用前景广阔，具有良好的社会经济效益.

参考文献：

[1] 赵善坤，申付新，贺光会，等. 厚煤层巷旁充填沿空留巷切顶卸压机制与防控技术[J]. 煤炭科学技术，2025，53(8)：102-114.
ZHAO Shankun, SHEN Fuxin, HE Guanghui, et al. Mechanism and control technology of roof cutting induced pressure relief in gob-side entry retaining with roadside backfill under thick coal seam conditions[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 102-114.

[2] 顾倩悦，曹安业，杨　耀，等. 高位长钻孔爆破防治冲击地压技术研究及应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报，2025，7(2)：125-135.
GU Qianyue, CAO Anye, YANG Yao, et al. Research and application of high-level long drilling blasting technology for preventing and controlling rockburst [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering，2025，7(2)：125-135.

[3] 徐　颖，杨敬轩，傅菊根，等. 综采面坚硬顶板超深孔预裂爆破远场解危控制技术[J]. 工程爆破，2024，30(5)：112-124.
XU Ying, YANG Jingxuan, FU Jugen, et al. The danger relief technology in far field of ultra-deep hole pre-splitting blasting in hard roof of fully mechanized mining face[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(5): 112-124.

[4] YANG X J, LIU C K, JI Y G, et al. Research on roof cutting and pressure releasing technology of directional fracture blasting in dynamic pressure roadway [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37: 1555-1567.

[5] 李海涛，罗　伟，姜雨省，等. 复合射孔爆燃气体压裂裂缝起裂扩展研究[J]. 爆炸与冲击，2014，34(3)：307-314.
LI Haitao, LUO Wei, JIANG Yusheng, et al. Initiation and extension of gas-driven fracture during compound perforation[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 307-314.

[6] 朱维耀，岳　明，刘昀枫，等. 中国致密油藏开发理论研究进展[J]. 工程科学学报，2019，41(9)：1103-1114.
ZHU Weiyao, YUE Ming, LIU Junfeng, et al. Research progress on tight oil exploration in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(9): 1103-1114.

[7] 李德聪，陈　力，林英松，等. 低渗透油田层内爆炸增产技术研究进展[J]. 中国工程科学，2010，12(9)：52-57.
LI Decong, CHEN Li, LIN Yingsong, et al. Advances in the technology of explosion in fractures used in low permeability reservoirs[J]. Engineering Science, 2010, 12(9): 52-57.

[8] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破力构协同防冲机理及工程实践[J]. 煤炭学报，2021，46(11)：3419-3432.
ZHAO Shankun. Mechanism and application of force structure cooperative prevention and control on rock burst with deep hole roof pre-blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3419-3432.

[9] 蒋廷学，王海涛，卞晓冰，等. 水平井体积压裂技术研究与应用[J]. 岩性油气藏，2018，30(3)：1-11.
JIANG Tingxue, WANG Haitao, BIAN Xiaobing, et al. Volume fracturing technology for horizontal well and its application[J]. Northwest Oil & Gas Exploration, 2018, 30(3): 1-11.

[10] 赵志鹏，闫瑞兵，丛俊余. 坚硬顶板超前深孔预裂爆破类型及效果评价分析[J]. 煤炭科学技术，2023，51(3)：68-76.
ZHAO Zhipeng, YAN Ruibing, CONG Junyu. Advanced deep hole pre-splitting blasting of hard roof type and effect evaluation analysis[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 68-76.

[11] 周为军，杨　峰，卢　硕，等. 临涣煤矿1067综采面断层硬岩多向聚能爆破预裂技术研究[J]. 煤炭技术，2022，41(10)：159-162.
ZHOU Weijun, YANG Feng, LU Shuo, et al. Research on multi-directional energy-accumulating blasting presplitting technology for fault hard rock in 1067 fully mechanized mining face of Linhuan coal mine [J]. Coal Technology, 2022, 41(10): 159-162.

[12] 杨　宇. 综采工作面斜穿性大断层构造深孔多向聚能爆破预裂技术研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.
YANG Yu. Research on pre-split technology of deep-hole multi-directional cumulative blasting in oblique penetrating fault[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[13] 吴晋军，刘　敬，徐东升，等. 水平井液态药爆炸压裂工艺试验应用研究[J]. 钻采工艺，2018，41(1)：38-41.
WU Jinjun, LIU Jing, XU Dongsheng, et al. Test study on application of liquid explosives in horizontal well fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(1): 38-41.

[14] 赵志红，郭建春. 层内爆炸压裂技术原理及分析[J]. 石油天然气学报，2008，30(2)：297-299.
ZHAO Zhihong, GUO Jianchun. Interlayer explosive fracturing principle and analysis[J]. Journal of

Oil and Gas Technology, 2008, 30(2): 297-299.

[15] 李文龙.煤矿用液体炸药配方设计及爆炸性能测试分析[D].徐州:中国矿业大学,2020.
LI Wenlong. Analysis on the formulation design and explosive performance test of liquid explosive used in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[16] 游定方,林 琅,刘治碧.液体炸药的发展及应用[J].化工技术与开发,2011,40(1):37-39.
YOU Dingfang, LIN Lang, LIU Zhibi. Development and application of liquid explosives[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2011, 40(1): 37-39.

[17] LIU J P. Liquid explosives[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[18] 丁伟兴,姬月萍,吴腾芳,等.液体炸药的发展及现状[J].爆破器材,2010,39(1):32-36.
DING Weixing, JI Yueping, WU Tengfang, et al. Development and present situation of liquid explosive [J]. Explosive Materials, 2010, 39(1): 32-36.

[19] 刘家通.低渗透油气藏开采用液体炸药的研究[D].南京:南京理工大学,2015.
LIU Jiatong. Liquid explosives for low permeability gas-oil reservoir[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015.

[20] WU J J, LIU L C. Feasibility study on technology named liquid explosive applied in volume fracturing transformation of shale gas reservoir[J]. Advanced Materials Research, 2012(6): 2281-2284.

[21] 刘立才.低渗油层层内爆炸动态裂缝力学模型研究[D].西安:西安石油大学,2013.
LIU Licai. Study on dynamic fracture mechanical model of in-fracture explosion in low permeability reservoir[D]. Xi′an: Xi′an Shiyou University, 2013.

[22] 赵志红,郭建春,王辰龙.层内爆炸压裂岩石破碎颗粒尺寸预测与影响因素分析[J].石油钻采工艺,2011,33(3):58-61.
ZHAO Zhihong, GUO Jianchun, WANG Chenlong. Rock particle size prediction model of in-fracture explosive fracturing and influencing factor analysis[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(3): 58-61.

[23] 吴晋军.低渗油层层内深度爆炸技术作用机理及工艺试验研究[J].西安石油大学学报,2011,26(1):48-50.
WU Jinjun. Action mechanism and technology test of the explosion technique in low-permeability oil layers [J]. Journal of Xian Shiyou University, 2011, 26(1): 48-50.

[24] 王聿超,鲁 强,杨敬轩,等.一种液体炸药深孔爆破方法:CN202411236277.4[P].2024-11-26.
WANG Yuchao, LU Qiang, YANG Jingxuan, et al. A deep hole blasting method for liquid explosive: CN202411236277.4[P]. 2024-11-26.

[25] 杨敬轩,于 斌,匡铁军,等.基于煤岩深孔爆破问题的液体炸药研发与技术[J].煤炭学报,2021,46(6):1874-1887.
YANG Jingxuan, YU Bin, KUANG Tiejun, et al. Development and technical practice of liquid explosive based on deep-hole blasting problem[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1874-1887.

[26] 张 杰,杨敬轩,倪锁红,等.硬岩巷道深孔液爆压裂辅助综掘技术研究及应用[J].山西焦煤科技,2025,49(12):1-4.
ZHANG Jie, YANG Jingxuan, NI Suohong, et al. Research and application of deep-hole hydraulic blasting-assisted comprehensive roadheader technology for hard rock roadway[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2025, 49(12): 1-4.

[27] 杨敬轩,刘长友,于 斌.围岩孔裂隙充水承压爆破过程分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):1024-1032.
YANG Jingxuan, LIU Changyou, YU Bin. Blasting process analysis of confined water filled in surrounding rock pores and fissures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 1024-1032.

[28] 刘长印,孙志宇,张汝生,等.水平井层内爆炸裂缝体模拟研究[J].油气井测试,2014,23(6):4-8.
LIU Changyin, SUN Zhiyu, ZHANG Rusheng, et al. Research on stimulated reservoir volume with exploding in horizontal well-bore[J]. Well Testing, 2014, 23(6): 4-8.

[29] 杨敬轩,张 瑞,卢 硕,等.工作面顶板超前预裂应力阻隔护巷机理[J].中国矿业大学学报,2024,53(2):264-276.
YANG Jingxuan, ZHANG Rui, LU Shuo, et al. Insight into the mechanism of roadway protection against high advance stress by roof pre-splitting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 264-276.

[30] 杨敬轩.安全高效能坚硬煤岩承压式爆破控制机理及试验分析[D].徐州:中国矿业大学,2015.
YANG Jingxuan. Study on confined blasting control mechanism of hard coal rock with high safety and efficiency and test analysis [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

(责任编辑 沈春妮 宋 爽)