2024 年 第 24 卷 第 20 期
2024, 24(20):08479-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2306155
引用格式:豆旭谦. 煤矿井下气动冲击回转钻进工艺参数试验[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(20): 8479-8486.
Dou Xuqian. Experimental study on the process parameters of pneumatic percussive rotary drilling in ccoal Mine[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(20): 8479-8486.

煤矿井下气动冲击回转钻进工艺参数试验

豆旭谦[1,2]
(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 西安 710077)

摘 要 冲击回转钻进方法是解决硬岩层钻进效率低问题的主要技术方法之一。为了对煤矿井下穿层钻孔硬岩钻进采用的气动冲击回转钻进工艺参数进行优化,通过采集试验地层岩芯,制样并进行单轴抗压强度测试,将试验岩层分为下层泥质砂岩、中层石英砂岩和上层泥质砂岩;讨论气动冲击回转钻进方法的工作原理和钻具组合特点,分析影响钻进效率的主要工艺参数,包括气体压力、钻机转速和给进压力,并给出了在正交试验设计时各参数水平的选择;采用“纵向机械钻速对比、横向工艺参数优化”的技术思路,运用正交试验设计方法进行了工艺参数优化研究,分析了各岩层机械钻速及差异性原因。结果表明:气体压力对机械钻速的影响具有显著性,钻机转速和给进压力不显著,但钻机转速对机械钻速的敏感性比给进压力明显。通过工艺参数研究,在试验设备和钻具条件下,得出最优工艺参数:气体压力为 1 MPa,钻机转速为 40 r/min,给进压力为 3.0 MPa。通过对各层机械钻速的研究,得到下层泥质砂岩机械钻速最高、上层泥质砂岩次之和中层石英砂岩机械钻速最低,分析认为对于两种泥质含量较大的砂岩,泥质含量越高,岩石相对越软,相应塑性增大,对于以冲击为主碎岩的方法,塑性越大对机械钻速越不利,钻进效率相对更低;上层泥质砂岩处于试验钻孔的最深孔段,钻头磨损较多,对深孔处的钻进效率有不利影响。

关键词 正交设计; 冲击回转钻进; 气动冲击回转; 气动冲击器; 工艺参数
中图法分类号 TD41; **文献标志码** A

Experimental Study on the Process Parameters of Pneumatic Percussive Rotary Drilling in Coal Mine

DOU Xu-qian[1,2]
(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2. Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

[**Abstract**] The impact rotary drilling method is one of the main technical methods to solve the problem of low drilling efficiency of hard rock formations. In order to optimize the pneumatic percussive rotary drilling process parameters used for the drilling of hard rock through strata boreholes of coal mine underground, the test rock strata was divided into lower argillaceous sandstone, middle quartz sandstone and upper argillaceous sandstone by collecting the core of the test formation, preparing samples and conducting uniaxial compressive strength tests. The working principle of pneumatic percussive rotary drilling method and the characteristics of drilling tool combination were discussed. The main process parameters affecting drilling efficiency were analyzed, including gas pressure, drilling rig speed and feed pressure, and the level selections of each parameter in orthogonal test design were given. Using the technical idea of "longitudinal rate of penetration comparison and horizontal process parameter optimization", the process parameter optimization study was carried out by using the orthogonal experimental design method, and the rate of penetration and difference of each rock formation were analyzed. The results show that the influence of gas pressure on rate of penetration is significant, and the drilling rig speed and feed pressure are not significant, but the sensitivity of the drilling rig speed to the rate of penetration is obvious than the feed pressure. Through the study of process parameters, under the conditions of test equipment and drilling tools, the optimal process parameters are obtained: gas pressure is 1 MPa, drilling rig speed is 40 r/min, and feed pressure is 3.0 MPa. Through the study of the rate of penetration of each strata, it is obtained that the rate of penetration of the lower argillaceous sandstone is highest, the upper argillaceous sandstone is followed and the rate of penetration of the middle quartz sandstone is the lowest. The analysis believes that for the two kinds of sandstone with large argillaceous content, the higher the argillaceous content, the softer the rock, and the corresponding plasticity increases. For the method of percussive-based crushing, the greater the plasticity, the more unfavorable for the rate of penetration, and the drilling efficiency is relatively lower. The upper argillaceous sandstone is in the deepest section of the test boreholes, and the drill bit wears more, which has an adverse impact on the drilling efficiency at the deep hole.

[**Keywords**] orthogonal design; percussive rotary drilling; pneumatic percussive rotary; pneumatic impactor; process parameters

收稿日期: 2023-08-10 **修订日期**: 2024-04-30
基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC30059000);中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目(2024XAJS08)
作者简介: 豆旭谦(1987—),男,汉族,甘肃静宁人,博士研究生,副研究员。研究方向:煤矿井下钻探技术。E-mail:douxuqian@cctegxian.com。

冲击回转钻进方法是解决硬岩层钻进效率低问题的主要技术方法之一。冲击回转钻进机理的研究方面,王晓雨等[1]对不同冲击速度、不同轴压、不同轴压和围压组合下进行砂岩损伤规律研究。张晓东等[2]探讨了气动冲击回转钻进的破岩特点和破岩机理,将破碎坑的形态分为断裂破碎区和无损区,对影响钻速效果的工艺参数进行了讨论。李昌盛等[3]通过引入冲击效率和冲击速度等参数修正完善机械比能计算模型,提出了能量传递效率,用于辅助分析空气锤的钻进效率。鄢泰宁等[4]建立了球体冲击器冲击频率与风压、风量之间高度显著的相关关系式,可用于冲击频率及其他重要工艺参数的预测与控制。孙源秀等[5]对比分析了锥形聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact, PDC)齿与常规 PDC 齿在不同岩样上的破岩效果,通过单齿破岩试验,分析了不同磨损高度的常规 PDC 齿与锥形 PDC 齿在钻压影响下的破岩规律。在数值模拟研究揭示冲击回转钻进机理和工艺参数的优化方面,林元华等[6]建立了冲击旋转钻井系统仿真模型,用计算机仿真方法预测冲击器的冲击力、冲击功和空气冲旋钻井机械钻速。朱海燕等[7]分别建立牙齿和钻头有限元模型,分析了单齿破岩分区和钻头破岩过程,认为岩石的破碎主要发生在岩石的拉应力失效阶段和卸载后的静压-旋转剪切破岩阶段。黄志强等[8]利用 LS-DYNA 软件仿真分析了冲击回转钻进的破岩机理,认为破岩的深度主要靠钻头冲击,脊部主要靠旋转刮削形成,且脊部的周围存在着大量的裂纹和间隙,降低了岩石的强度;同时,得出钻头在冲击回转作用下破碎岩石的体积要比单纯冲击作用下体积大一倍。

随着中国对“双碳”目标的深入推进,在地热能钻井中,近年对气动冲击器的应用研究较多。许军富等[9]采用 KQC 型气动冲击器,采用低钻压、低转速、高频率冲击的破岩方式,在准噶尔盆地哈深 201 井火成岩中应用,将井斜控制在 2°以内,平均机械钻速和单趟进尺都有了很大的提高。赵华宣等[10]将空气潜孔锤钻井技术应用在贵州省复杂碎屑岩层地热深井中,通过优选钻进设备机具和钻进参数,应用效果表明其钻速是牙轮钻头的 12.4 ~ 35 倍,降低了钻进成本。苏宁等[11]在贵州遵义县 ZK1 井,采用气动冲击回转钻进工艺开孔,使用螺杆钻具孔底动力钻井工艺钻井,在无法使用气动冲击器和螺杆钻具或钻井效率过低的复杂地层,采用牙轮钻正循环的钻井工艺,能够提高复杂多变的贵州地热钻井的钻井效率和钻井效益。

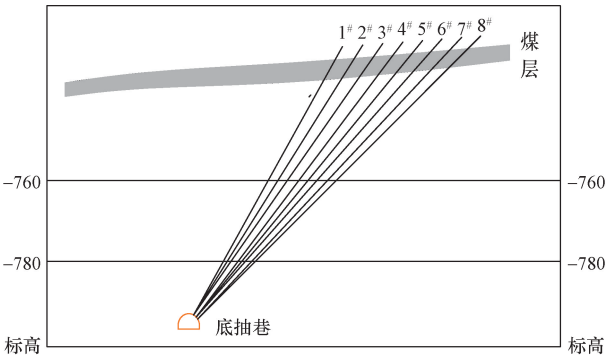
煤矿井下在施工穿层钻孔时,遇到硬岩地层,钻进过程中效率低下、钻头磨损较快,影响到矿井的安全高效生产。通过在煤矿井下引入气动或者液动冲击器,采用现场试验的方法对冲击回转钻进技术进行了应用研究,解决了一部分钻进效率低下的问题[12-13]。气动冲击回转钻进技术已在安徽、河南等一些矿区井下进行了试验并取得了良好的推广应用效果[14-18]。

以上研究成果多通过物理模拟或者数值模拟的方法,对冲击回转钻进的破岩机理、破碎坑的形态、破岩动力学过程及工艺参数进行理论研究;通过现场实践进行工业应用研究,显示在硬岩层中相比普通牙轮或者 PDC 钻头回转钻进提高了钻进效率,但是缺乏对气动冲击回转钻进方法在工艺参数优化方面的系统性研究,缺乏对生产实践的实用性指导。鉴于此,拟采用正交试验方法设计气动冲击回转钻进工艺参数试验方案,在试验中采集数据,通过“纵向机械钻速对比、横向工艺参数优化”的技术思路,针对煤矿井下穿层钻孔 3 类不同岩层研究气动冲击回转钻进工艺参数对钻进效率的影响规律,可为煤矿井下相似地质条件气动冲击回转钻进提供技术指导。

1 试验条件

1.1 试验地层条件

某矿所采煤层为 13-1 煤,煤层均厚为 4.6 m,倾角平均 4°,标高约 -750 m。在煤层底板开掘瓦斯治理巷道,采用上向穿层钻孔进行煤层巷道条带预抽,每组设计 8 个钻孔(1# ~ 8#),设计钻孔倾角 40° ~60°,钻孔设计示意图如图 1 所示,终孔间距为 6 m。巷道顶部岩层可划分为 3 类,下层为泥质砂岩,层厚约 16 m;向上中间层为石英砂岩,均厚为 28 m;上层是泥岩砂质,层厚为 12 m;其顶部即为 13-1 煤层,底抽巷顶部岩层性质如图 2 所示。



1# ~ 8#为钻孔编号

图 1 钻孔设计示意图

Fig. 1 Diagram of designed boreholes

岩层	厚度/m	柱状	岩性描述
泥质岩层	12		灰色,砂泥质结构,砂质含量分布不均,层内见植物化石碎片
石英砂岩	28		灰白色,中粒结构为主,石英含量较高,内含少量金属矿物,分选性中等,致密,坚硬
泥质砂岩	16		灰色,砂泥质结构,局部夹薄层细砂岩,可见少量植物化石碎片

图 2　巷道顶部主要岩性柱状图

Fig. 2　Main lithologic columnar diagram at the top of the roadway

1.2　地层岩芯测试

为了掌握试验地层中钻进岩层的力学性质,在瓦斯综合治理巷进行了钻孔取芯,在获得的岩芯中选取结构完整、尺寸满足测试要求的岩芯进行制样,样品的选择原则为在巷道顶部的 3 层主要岩层中各取 3 个岩芯。岩芯在 SC-200 型立式取芯机、SCQ 型岩石切割机和 SHM-200 型双端面磨石机进行钻取切割、打磨成圆柱形试件,试件两端研磨抛光,保证其平行度、平整度和光洁度。制作成直径为 50 mm 的圆柱体,高径比为 2,岩芯试样如图 3 所示。

在材料试验机上做单轴抗压强度测试,测得直接顶 16 m 厚泥质砂岩的平均单轴抗压强度为 80 MPa;

图 3　制作的岩心试样

Fig. 3　A sample of the core of the rock

均厚 28 m 石英砂岩的平均单轴抗压强度为 111 MPa;上部 12 m 厚泥质砂岩的平均单轴抗压强度为 62 MPa。可见,在该巷道顶部的钻进地层中,石英砂岩地层为最硬的岩层段。

1.3　试验设备和钻具

试验采用中煤科工西安研究院(集团)有限公司生产的硬岩冲击回转钻进专用 ZDY4000 LPS 双速全液压钻机,该钻机具备动力头回转转速高低双速调节功能,低速档转速为 20 ~ 60 r/min,高速档转速为 60 ~ 120 r/min,可适用不同工艺方法钻进的需要,在硬岩钻孔工程中可方便及时切换转速档位。选用的空压机排气压力≥2.0 MPa,排气量≥20 m^3/min。钻杆采用 φ73 mm 宽翼片螺旋钻杆(φ 为外径)。冲击器型号为 CIR90 型,冲击器的主要技术参数如表 1 所示。钻头选用φ100 mm 和φ90 mm两种,在单孔首次硬岩冲击回转钻进中采用 φ100 mm 钻头,如果未钻穿硬岩段时,第二次下钻时采用 φ90 mm 钻头,避免下钻时出现卡钻,导致钻头损坏或出现孔内事故。

表 1　气动冲击器主要技术参数

Table 1　Main technical parameters of pneumatic impactor

参数	数值	参数	数值
型号	90 A	总长/mm	628
外径/mm	80	总重/kg	19.76
推荐风压/MPa	0.7 ~ 1.0	耗风量/(m^3·min^{-1})	5 ~ 7

1.4　钻进工艺流程

(1)回转开孔:使用“φ113 mm PDC 钻头 + φ73 mm 宽翼片螺旋钻杆 + 送水器”钻具组合回转钻进 0.5 m。

(2)冲击回转钻进:采用“φ100 mm 钻头 + φ80 mm 气动冲击器 + 变径接手 + φ73 mm 宽翼片螺旋钻杆 + 送水器”钻具组合冲击回转钻进。

(3)回转终孔:钻穿硬岩层段后,换用“φ94 mm PDC 钻头 + φ73 mm 宽翼片螺旋钻杆 + 送水器”钻具组合穿煤,回转钻进至设计孔深,提钻终孔。

根据钻孔设计倾角和方位的不同,冲击回转钻进穿过硬岩层段的长度也不相同,大倾角钻孔需要穿过的硬岩层段较短,小倾角钻孔需要穿过的硬岩层段较长。

2　钻进方法和工艺参数选择

2.1　气动冲击回转钻进方法

冲击回转钻进有机地综合了冲击钻进和回转钻进的特点,钻头在承受一定静荷载的基础上,在纵向冲击力和回转切削力共同作用下破碎岩石,是一种以冲击为主、回转为辅的钻进方法,主要靠专用钻头的

冲击碎岩,轴向静压力主要用来克服冲击产生的反弹力[19-20],冲击荷载碎岩的特点是接触应力瞬间可达到极高值,应力比较集中,所以尽管岩石的动硬度比静硬度大,仍易产生裂纹,而且岩石的脆性愈大,冲击速度愈大,硬岩的裂隙发育愈显著,钻进效果越好。因此,冲击回转钻进用不大的冲击能,就可以破碎坚硬的岩石,一般适用于坚硬的脆性岩石[21]。

气动冲击回转钻进是在普通回转钻进的钻具组合中连接了气动冲击器。需要配套空压机来提供相适应的风压和风量。钻进时将压缩空气的能量通过气动冲击器作为中间能量转换介质作用在孔底的岩石上,通过高频率的冲击作用,配合回转时施加给钻头的推进力和回转力钻进,并使用压缩空气作为冷却钻头和冲孔介质,将孔底的岩屑携带出钻孔[16]。

2.2 工艺参数选择

2.2.1 风压和风量

气动冲击回转钻进的风压和风量主要受冲击器的结构所决定,风量是保证冲击器正常工作的基本条件,是保证钻孔正常排粉的重要因素,同时能够决定冲击器工作风压的高低。一般认为,压缩空气的压力高,则冲击器的钻进效率也高,而且钻头的使用寿命也长。由于管路、接头、钻具有沿程压力损失,风压还决定了冲击器钻进的孔深[22]。CIR90 型气动冲击器推荐的风压为 0.7 ~ 1.0 MPa,因此,在正交试验设计时采用 0.5、0.7、0.9、1.1 MPa 4 个水平。

2.2.2 钻机给进压力

钻头在钻柱推进力的作用下与岩石孔底接触,施加预紧力,同时钻柱的推进力需要克服钻进时的冲击反弹力。根据实验研究显示,随着轴压的增大,破碎坑深度和破碎体积逐步增加,如果太大,破岩效果将不会有很大的提高;如果太小,破岩效果会更差,冲击回转钻进存在合理的推进力值[23]。合理的钻柱推进力可保证冲击功的有效传递,根据前期试验情况[19],在正交试验设计时选择钻机给进压力为 2.0、2.5、3.0、3.5 MPa 4 个水平。

2.2.3 钻机转速

钻机的转速提供了钻头上柱齿在孔底冲击面上冲击位置的移动,转速过高会使柱齿两次冲击之间的岩脊过大,在回转力的作用下岩脊不易剪切掉,将不能产生高效的碎岩效果,会降低冲击回转钻进效率;转速过低,会使柱齿 2 次冲击之间间隔太小,出现重复破碎,导致钻头柱齿磨损过快,降低钻头的使用寿命。根据对气动冲击器推荐转速的理论研究和应用实践,结合钻进岩石硬度、可钻性以及所采用的冲击器结构的不同,一般认为转速在 20 ~ 50 r/min 为合理[22, 24-26],因此,在正交试验设计时选择钻机转速为 20、30、40、50 r/min 4 个水平。

根据前述分析,在采用正交试验设计方案时,参数水平表按表 2 所示。

表 2 正交试验参数水平值

Table 2 Level values of orthogonal test parameters

水平	气体压力(因素 A)/MPa	钻机转速(因素 B)/(r·min^{-1})	给进压力(因素 C)/MPa
1	0.5	20	2.0
2	0.7	30	2.5
3	0.9	40	3.0
4	1.1	50	3.5

3 试验方案设计

研究目的是得出不同岩性岩层在采用气动冲击回转钻进时的工艺参数最优值,主要工艺参数为空气压力、钻机转速和给进压力,按照前述工艺参数的选择,每个参数选择 4 个水平,如果按各参数组合逐个进行试验,试验的次数太多,处理起来会相当麻烦。采用正交试验设计方法[27],可以通过较少的试验工作量达到对工艺参数优化的目的。

在考虑空气压力、钻机转速和给进压力对气动冲击回转钻进机械钻速的影响时,不考虑各参数水平间的相互作用。因此,采用 5 因素 4 水平的正交表 $L_{16}(4^5)$ 进行方案设计,将 5 个因素的前 3 列作为参数列,多余的两列空列,试验方案正交表如表 3 所示。

表 3 试验方案正交表 $L_{16}(4^5)$

Table 3 $L_{16}(4^5)$ orthogonal table of the test program

序号	气体压力(A)/MPa	钻机转速(B)/(r·min^{-1})	给进压力(C)/MPa	空列 1(D)	空列 2(E)
1	0.5	20	2.0	1	1
2	0.5	30	2.5	2	2
3	0.5	40	3.0	3	3
4	0.5	50	3.5	4	4
5	0.7	20	2.5	3	4
6	0.7	30	2.0	4	3
7	0.7	40	3.5	1	2
8	0.7	50	3.0	2	1
9	0.9	20	3.0	4	2
10	0.9	30	3.5	3	1
11	0.9	40	2.0	2	4
12	0.9	50	2.5	1	3
13	1.1	20	3.5	2	3
14	1.1	30	3.0	1	4
15	1.1	40	2.5	4	1
16	1.1	50	2.0	3	2

4　结果与讨论

试验采用钻孔各孔段岩层机械钻速作为结果衡量指标。在试验前,根据底抽巷顶部各岩层的厚度和钻孔的设计倾角、方位,计算钻孔在各层钻进的实际孔深。试验过程中,根据表 3 的方案逐一进行试验,通过记录每个钻孔各岩层的钻进孔深和纯钻进时间,计算钻进相应岩层的机械钻速,得到的正交试验结果如表 4 所示。根据试验结果,进行极差和方差分析,讨论各工艺参数对试验结果的显著性,对各工艺参数进行优化。

4.1　级差分析

由表 4 可知,共完成 16 组试验,试验时气体压力为 0.5 ~ 1.1 MPa,钻机转速为 20 ~ 50 r/min,给进压力为 2 ~ 3.5 MPa,3 个工艺参数的数据点分布均匀。由表 5 可知,下层泥质砂岩的 R_A、R_B、R_C 分别为 11.09、1.767、0.653,中层石英砂岩的 R_A、R_B、R_C 分别为 7.233、1.51、0.77,上层泥质砂岩的 R_A、R_B、R_C 分别为 9.903、1.597、0.667,可见对 3 种岩层而言,均有 $R_A > R_B > R_C$,即对机械钻速影响的显著性依次为:气体压力、钻机转速、给进压力,且气体压力是主要影响因素。

4.2　方差分析

根据正交试验结果分析后,所得的工艺参数对下层泥质砂岩、中层石英砂岩和上层泥质砂岩的方差分析如表 6 所示。

分析表 6 可知,3 种岩层的方差分析结果具有相同的规律;在给定的水平参数取值范围内,气体压力对 3 种岩层的 F 值分别为 4.809、4.413 和 4.709,气体压力参数的影响最为显著;钻机转速和给进压力参数不显著,钻机转速对 3 种岩层的 F 值分别为 0.139、0.213 和 0.127,给进压力对 3 种岩层的 F 值分别为 0.016、0.058 和 0.023,可见钻机转速对机械钻速的敏感性比给进压力明显,与极差分析结果一致。

4.3　工艺参数分析

对正交试验结果分析后,所得的工艺参数对下层泥质砂岩、中层石英砂岩、上层泥质砂岩的影响关系如图 4 所示。

表 4　正交试验结果

Table 4　Results of the orthogonal tests

试验组数	工艺参数			试验结果		
	A	*B*	*C*	下层机械钻速/(m·s^{-1})	中层机械钻速/(m·s^{-1})	上层机械钻速/(m·s^{-1})
1	0.5	20	2.0	15.18	7.92	12.76
2	0.5	30	2.5	16.17	8.33	14.13
3	0.5	40	3.0	16.55	9.12	13.05
4	0.5	50	3.5	16.98	8.50	13.55
5	0.7	20	2.5	18.01	10.43	14.79
6	0.7	30	2.0	17.68	9.79	15.47
7	0.7	40	3.5	19.00	11.56	17.79
8	0.7	50	3.0	18.70	10.64	16.67
9	0.9	20	3.0	21.00	12.18	19.01
10	0.9	30	3.5	20.66	13.28	18.65
11	0.9	40	2.0	22.76	12.26	19.81
12	0.9	50	2.5	22.12	11.00	20.00
13	1.1	20	3.5	25.34	13.07	21.56
14	1.1	30	3.0	27.62	17.07	24.83
15	1.1	40	2.5	28.29	16.70	23.86
16	1.1	50	2.0	27.99	15.96	22.85

表 5　试验结果极差分析

Table 5　Analysis of the extreme difference of the test results

因素	下层泥质砂岩			中层石英砂岩			上层泥质砂岩		
	A	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*
K_1	16.220	19.883	20.902	8.467	10.900	11.482	13.372	17.030	17.723
K_2	18.348	20.533	21.148	10.605	12.117	11.615	16.180	18.270	18.195
K_3	21.635	21.650	20.968	12.180	12.410	12.252	19.367	18.627	18.390
K_4	27.310	21.447	20.495	15.700	11.525	11.603	23.275	18.267	17.887
R	11.090	1.767	0.653	7.233	1.510	0.770	9.903	1.597	0.667

注:K_i 为试验参数第 i 个水平的试验结果的均值;R 为 4 个水平的试验参数各水平均值的极差。

表 6 岩层方差分析

Table 6 Analysis of variance of rock layers

岩层	因素	偏差平方和	自由度	F	$F_{0.05}$	显著性
下层泥质砂岩	A(气体压力)	280.176	3	4.809	3.29	*
	B(钻机转速)	8.123	3	0.139	3.29	—
	C(给进压力)	0.912	3	0.016	3.29	—
	误差	291.310	15	—	—	—
中层石英砂岩	A(气体压力)	111.491	3	4.413	3.29	*
	B(钻机转速)	5.373	3	0.213	3.29	—
	C(给进压力)	1.454	3	0.058	3.29	—
	误差	126.310	15	—	—	—
上层泥质砂岩	A(气体压力)	217.649	3	4.709	3.29	*
	B(钻机转速)	5.878	3	0.127	3.29	—
	C(给进压力)	1.081	3	0.023	3.29	—
	误差	231.120	15	—	—	—

注:F 为 F 分布两个均方之比;$F_{0.05}$ 为 0.05 显著性水平的 F 值;* 表示 F 达到 0.05 水平(即 $F_{0.05}$),表示显著;若 F 达到 0.01 水平,即 $F_{0.01}$,表示极显著,用 ** 表示。

分析图 4 可知,不同工艺参数对各岩层机械钻速的影响程度不同,但相同工艺参数对 3 种岩层机械钻速的影响规律具有相似性;气体压力与机械钻速近似呈正线性关系,随着气体压力的升高,机械钻速增大,综合考虑气动冲击器结构的承载能力,要获得最高效的钻进效率,同时要避免气体压力过大损坏冲击器,可将气体压力维持在冲击器推荐工作压力的最大值,本试验采用的冲击器在最优工效时需要保证气体压力在 1 MPa。

钻机转速对下层泥质砂岩和上层泥质砂岩的影响不是非常明显,20 ~ 40 r/min,机械钻速有增大趋势,到 50 r/min 时机械钻速反向减小。对于中层石英砂岩,20 ~ 30 r/min 机械钻速有大幅的提高,在 30 ~ 40 r/min 增加幅度降低,到50 r/min时机械钻速降幅较大。综合以上分析可见,在采用冲击回转钻进方法在同一钻孔钻进 3 种岩层时,即使机械钻速变化幅度各异,但是总体具有相同的变化规律。在钻孔工程施工时,一般不经常切换钻机转速,可选择最优转速为 40 r/min。

给进压力对下层泥质砂岩和上层泥质砂岩的影响同样较弱,2.0 ~ 3.5 MPa 机械钻速的变化较小,认为主要是由于钻进岩石硬度相对较低,泥质成分含量较大影响了岩石的脆性,岩石对给进压力的反应不敏感。对于中层石英砂岩,岩石硬度较大,脆性明显,在 2.0 MPa 和 2.5 MPa 时,机械钻速没有明显变化,在 3.0 MPa 时,机械钻速具有最大值,然后在 3.5 MPa 时,机械钻速明显降低,即在过大的给进压力条件下,钻进时转矩较大,钻头磨损加剧,影响了钻进效率。因此,在脆性岩石中,合适的给进压力是获得较高钻进效率的关键因素,可优选钻机给进压力为 3.0 MPa。

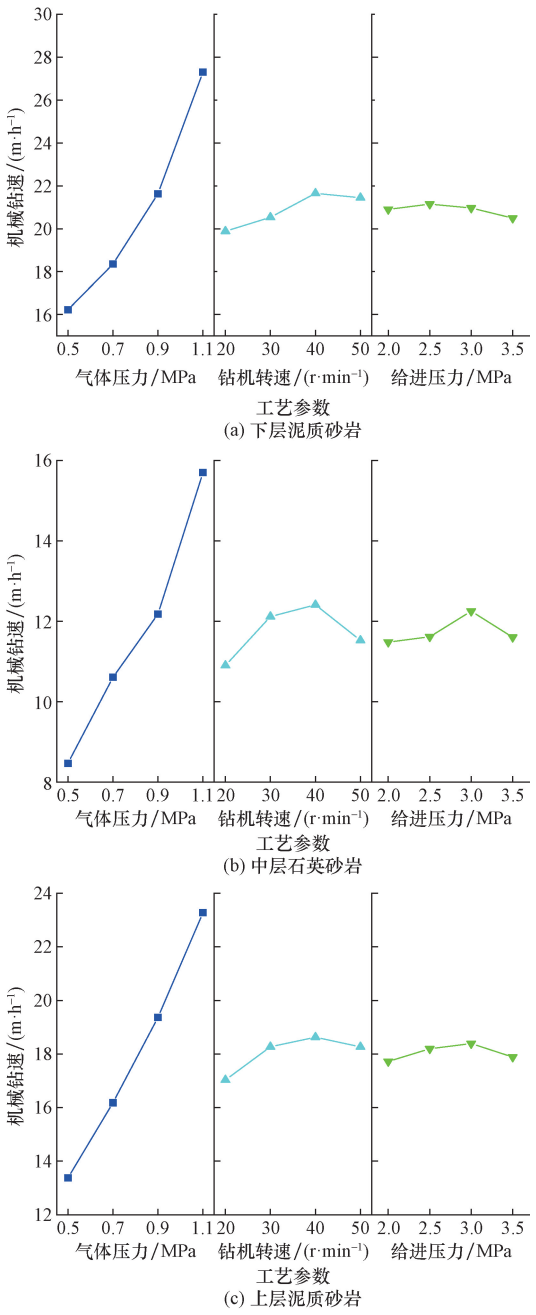


图 4 下层、中层、上层岩层机械钻速与工艺参数的关系

Fig. 4 Relationships between rate of penetration and process parameters of lower, middle, upper rock formation

4.4 机械钻速综合分析

分析可知,相同工艺参数在同一钻孔中不同岩层的机械钻速具有较大差异,为了从钻孔纵向上对比各岩层的机械钻速特点,根据试验数据分析结果,将不同岩层中获得的机械钻速进行对比,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,每个数据点是在正交设计方案中不同工艺参数组合下得到的机械钻速数据,因此,每个数据点都隐含有一组工艺参数组合,通过按序排列形成不同岩层机械钻速对比图,通过工艺

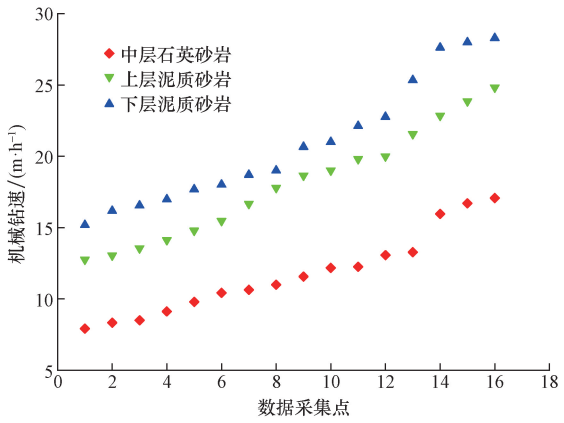


图 5　不同岩层机械钻速对比图

Fig. 5　Comparison of rate of penetration in different rock formations

参数的优化,气动冲击回转钻进方法在 3 类岩层中的机械钻速都有了较大提高,增大的幅度基本接近。中层石英砂岩的机械钻速最低,16 组数据的平均值为 11.74 m/h,最大值为 17.07 m/h,主要是因为石英砂岩的单轴抗压强度为 111 MPa,岩石坚硬,在试验设备和钻具条件下破岩效率相对较低。上层泥质砂岩的机械钻速次之,平均值为 18.05 m/h,最大值为 24.83 m/h。下层泥质砂岩的机械钻速最高,平均值为 20.88 m/h,最大值为 28.29 m/h。下层泥质砂岩的单轴抗压强度为 80 MPa,上层泥质砂岩的单轴抗压强度为 62 MPa,但上层泥质砂岩的机械钻速相对却更低。分析认为,一方面,对于两种泥质含量较大的砂岩来讲,泥质含量越高,岩石相对越软,相应塑性增大,对于冲击回转以冲击碎岩为主的方法,塑性越大对机械钻速越不利,钻进效率更低[28-29];另一方面,上层泥质砂岩处于各试验钻孔的最深孔段,冲击钻头在经历中间坚硬石英砂岩层段的钻进,钻头磨损较多,对深孔处的钻进更加不利。

5　结论

(1)根据试验矿井地层条件,在底抽巷向上取芯,通过对地层岩性的识别和测试分析,将试验地层分为下层泥质砂岩、中层石英砂岩和上层泥质砂岩层,其平均单轴抗压强度分别为 80、111、62 MPa;根据试验条件,优选了 ZDY4000 LPS 钻机、CIR90 型气动冲击器、2.0 MPa 空压机、钻杆、钻头等试验设备和钻具,给出了钻进工艺流程。

(2)讨论了气动冲击回转钻进方法的工作原理和钻具组合特点,分析了影响钻进效率的主要工艺参数,包括气体压力、钻机转速和给进压力,并给出了在正交试验设计时各参数水平选择,气体压力为 0.5、0.7、0.9、1.1 MPa,钻机转速为 20、30、40、50 r/min,给进压力为 2、2.5、3、3.5 MPa,并采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表,给出了试验设计方案。

(3)根据试验方案,逐一完成所有试验,采用“纵向机械钻速对比、横向工艺参数优化”的方法,研究钻进工艺参数和机械钻速之间的关系。通过极差和方差分析,认为气体压力对机械钻速的影响具有显著性,钻机转速和给进压力不显著。通过工艺参数研究,在试验设备和钻具条件下,得出最优工艺参数:气体压力为 1 MPa,钻机转速为40 r/min,给进压力为 3.0 MPa。通过对各层机械钻速的研究,得出下层泥质砂岩机械钻速最高、上层泥质砂岩次之和中层石英砂岩的机械钻速最低的结果,讨论了影响各层钻进效率的原因。

参　考　文　献

[1] 王晓雨, 李骞, 王伟, 等. 动静组合加载数值模拟砂岩损伤演化规律[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6248-6254.
Wang Xiaoyu, Li Qian, Wang Wei, et al. Numerical simulation of damage evolution of sandstone under combined dynamic and static loading[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15): 6248-6254.

[2] 张晓东, 章靖, 徐铣. 带空气锤的空气钻井破岩机理[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 55-57.
Zhang Xiaodong, Zhang Jing, Xu Yao. Rock breaking mechanism of air drilling with air hammer[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(1): 55-57.

[3] 李昌盛, 杨传书, 马英. 空气锤钻井机械比能计算方法[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(2): 167-171.
Li Changsheng, Yang Chuanshu, Ma Ying. A method for calculating the mechanical specific energy of air hammer drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(2): 167-171.

[4] 鄢泰宁, 吴翔, 卢春华. 球体冲击器及其在回转冲击钻进中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2008(2): 97-100.
Yan Taining, Wu Xiang, Lu Chunhua. Steel ball percussion device and its application[J]. Geology and Prospecting, 2008(2): 97-100.

[5] 孙源秀, 邹德永, 徐城凯, 等. 锥形聚晶金刚石复合片钻头(PDC)齿与常规 PDC 齿破岩效果对比试验[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(36): 159-162.
Sun Yuanxiu, Zou Deyong, Xu Chengkai, et al. Contrast experiment on conical PDC cutter and convetional PDC cutter[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(36): 159-162.

[6] 林元华, 施太和, 李润方, 等. 空气冲旋钻井冲击力和机械钻速仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3337-3341.
Lin Yuanhua, Shi Taihe, Li Runfang, et al. Simulation of impact force and penetration rate rate of air hammer bit drilling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3337-3341.

[7] 朱海燕, 刘清友, 邓金根, 等. 冲旋钻井条件下的岩石破碎机理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 622-631.
Zhu Haiyan, Liu Qingyou, Deng Jin'gen, et al. Rock-breaking mechanism of rotary-percussive drilling[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4): 622-631.

[8] 黄志强, 范永涛, 魏振强, 等. 冲旋钻头破岩机理仿真研究

[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(1): 148-150.
Huang Zhiqiang, Fan Yongtao, Wei Zhenqiang, et al. Emulation study on rock-breaking mechanism of percussion-rotary bit[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2010, 32(1): 148-150

[9] 许军富, 赵洪山, 于海叶, 等. 空气锤钻井技术在哈深201井火成岩地层的应用[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6): 683-687.
Xu Junfu, Zhao Hongshan, Yu Haiye, et al. Application of air hammer drilling technology in the igneous strata of Well Hashen 201[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(6): 683-687.

[10] 赵华宣, 王玉军, 陈涛, 等. 贵州碎屑岩层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(5): 942-949.
Zhao Huaxuan, Wang Yujun, Chen Tao, et al. Application of air DTH hammer drilling technology to deep geothermal wells in clastic rock strata in Guizhou Province[J]. Geology and Prospecting, 2016, 52(5): 942-949.

[11] 苏宁, 王虎, 王剑, 等. 多工艺钻井技术在贵州省遵义县ZK1井施工中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(1): 165-172.
Su Ning, Wang Hu, Wang Jian, et al. Application of multi-process drilling technology to the well ZK1 in Zunyi, Guizhou Province[J]. Geology and Prospecting, 2016, 52(1): 165-172.

[12] 豆旭谦. 煤矿井下穿层钻孔高效钻进方法[J]. 煤矿安全, 2020, 51(5): 126-129.
Dou Xuqian. High efficiency drilling methods for penetration boreholes in coal mine underground[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(5): 126-129.

[13] 杨冬冬, 赵江鹏, 赵建国, 等. 煤矿井下硬岩层快速成孔钻进技术与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 136-140.
Yang Dongdong, Zhao Jiangpeng, Zhao Jianguo, et al. Fast drilling technology and development tendency of hard rock in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 136-140.

[14] 刘卫亮. 气动冲击旋转钻进在煤矿硬岩钻进中的应用[J]. 煤矿机械, 2019, 40(2): 128-129.
Liu Weiliang. Application of pneumatic impact rotary drilling in hard rock drilling of coal mine[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(2): 128-129.

[15] 杨冬冬, 王四一. 多工艺冲击回转钻进技术在硬岩钻进中的应用[J]. 煤矿机械, 2018, 39(1): 112-114.
Yang Dongdong, Wang Siyi. Application of multi-technology impact and rotary drilling technology in hard rock drilling[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(1): 112-114.

[16] 豆旭谦, 金新, 童碧, 等. 气动潜孔锤在淮南潘三矿上仰穿层孔硬岩钻进中的应用[J]. 煤炭技术, 2016, 35(1): 201-203.
Dou Xuqian, Jin Xin, Tong Bi, et al. Application of pneumatic DTH hammer on hard rock drilling of upward layer-through borehole in Huainan Pansan coal mine[J]. Coal Technology, 2016, 35(1): 201-203.

[17] 唐大勇. 冲击-回转钻进在复杂岩层中的应用[J]. 煤矿机械, 2013, 34(6): 201-202.
Tang Dayong. Application of impact rotation drilling in complicated rock[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(6): 201-202.

[18] 李彦明. 冲击-回转钻进工艺在超硬岩层中的应用[J]. 煤矿机械, 2011, 32(3): 210-212.
Li Yanming. Application of impact-rotary drilling technology in superhard rock[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(3): 210-212.

[19] 豆旭谦, 金新, 童碧, 等. 淮南矿区硬岩穿层钻孔钻进方法对比试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 151-156.
Dou Xuqian, Jin Xin, Tong Bi, et al. Comparative experimental study on drilling methods of hard rock borehole passed through strata in Huainan mining area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 151-156.

[20] 张世阔, 王力, 李秀山, 等. 煤矿井下硬岩气动冲击回转钻进技术与装备[J]. 煤炭技术, 2022, 41(11): 5-8.
Zhang Shikuo, Wang Li, Li Xiushan, et al. Pneumatic percussive rotary drilling technology and equipments for hard rock in underground coal mine[J]. Coal Technology, 2022, 41(11): 5-8.

[21] 卢春华. 工程钻探与取样技术[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2018.
Lu Chunhua. Engineering drilling and sampling technology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.

[22] 许刘万, 刘智荣, 赵明杰, 等. 多工艺空气钻进技术及其新进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(10): 8-14.
Xu Liuwan, Liu Zhirong, Zhao Mingjie, et al. Alternative process air-drilling technology and its new development[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(10): 8-14.

[23] 赵伏军, 李夕兵, 冯涛. 动静载组合破碎脆性岩石试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1038-1042.
Zhao Fujun, Li Xibing, Feng Tao. Research on experiments of brittle rock fragmentation by combined dynamic and static loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1038-1042.

[24] 刘家荣, 王建华, 王文斌, 等. 气动潜孔锤钻进技术若干问题[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(5): 40-44.
Liu Jiarong, Wang Jianhua, Wang Wenbin, et al. Some problems on pneumatic DTH drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(5): 40-44.

[25] 祝效华, 罗衡, 贾彦杰. 考虑岩石疲劳损伤的空气冲旋钻井破岩数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 754-761.
Zhu Xiaohua, Luo Heng, Jia Yanjie. Numerical analysis of air hammer bit drilling based on rock fatigue model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 754-761.

[26] 罗整, 徐忠祥, 李晓慧, 等. 空气锤钻井技术在气体钻井中的应用[J]. 钻采工艺, 2007(6): 9-10.
Luo Zheng, Xu Zhongxiang, Li Xiaohui, et al. Application of pneumatic hammer drilling technology in gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2007(6): 9-10.

[27] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Chen Kui. Experiment design and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[28] 赵伏军, 李夕兵, 冯涛, 等. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1315-1320.
Zhao Fujun, Li Xibing, Feng Tao, et al. Theoretical analysis and experiments of rock fragmentation under coupling dynamic and static loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1315-1320.

[29] 李清, 侯健, 王梦远, 等. 弱胶结砂质泥岩渐进性破坏力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 385-392.
Li Qing, Hou Jian, Wang Mengyuan, et al. Experimental investigations on mechanical characteristics of weakly cemented sandy mudstone under progressive failure[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 385-392.