

深矿钻孔帷幕灌浆的数值模拟与应用

李粮纲, 唐平, 何维山, 张晓静

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:深矿钻孔帷幕灌浆受到钻孔的垂直度、钻孔灌浆压力和扩散半径等因素的影响,使得灌浆的技术难度加大,直接影响帷幕的形态及防渗效果。采用基于 UDEC 离散单元程序的数值模拟方法,对深孔帷幕灌浆压力的扩散分布及浆液的流动扩散形态进行模拟,可以为深孔帷幕注浆工程设计和施工提供参考和指导。

关键词:钻孔;帷幕灌浆;数值模拟

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2010)12-0036-05

Numerical Simulation of Curtain Grouting in Deep Borehole and the Application/LI Liang-gang, TANG Ping, HE Wei-shan, ZHANG Xiao-jing (Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Influenced by the facts of verticality of the borehole, grouting pressure and diffusion radius, technical difficulty is increased in grouting, which directly influences the curtain shape and seepage control effect. Based on the numerical simulation method of Universal Distinct Element Code, pressure distribution and grout diffusion in deep hole are simulated, which can give reference and guidance to the design and construction for curtain grouting.

Key words: borehole; curtain grouting; numerical simulation

1 概述

深部矿藏的开采工程有可能由于过度抽排地下水使该区域地下水位严重下降,导致地表干旱,植被枯死,地面沉陷等环境问题。采用钻孔帷幕灌浆技术,在地下形成一道防渗帷幕,把矿体开采区的地下水与周围隔离开,这样可以大幅度降低开采区的抽排水工程费用,同时较好的保护开采区周边的地下水资源和水环境。因此随着我国矿产资源开采步伐的不断加快,钻孔帷幕灌浆技术在矿山堵水防渗中的应用也越来越多。以邯郸中关铁矿帷幕灌浆工程为例,该工程设计灌浆孔平均深度为 549.5 m,最大设计深度 810.6 m,地下帷幕形成后预计可以每年节约抽排水费 5000 多万元。同时较好的保护了当地的水资源和水环境。但是由于帷幕钻孔的深度增加,帷幕灌浆的技术难度也就增大。钻孔的垂直度、钻孔灌浆压力和扩散半径等因素对帷幕的形态及防渗效果有直接关键的影响。

采用数值模拟的方法,对深孔帷幕灌浆压力的扩散分布及浆液的流动扩散形态进行模拟,可以为深孔帷幕注浆工程设计和施工提供参考和指导。

2 数值模拟方法

UDEC(Universal Distinct Element Code)是 Cun-

dall 博士和 ITASCA 公司开发的一个处理不连续介质的二维通用离散元程序。UDEC 基于“拉格朗日”算法,能很好地模拟块体系统的变形和大位移。UDEC 采用显示时间步进行运动方程的求解算法允许进行动态或静态分析,用于模拟非连续介质(如岩体中的节理裂隙等)承受静载或动载作用下的响应。应用于岩土边坡的渐进破坏研究及评价岩体的节理、裂隙、断层、层面对地下工程和岩石基础的影响,还能够通过模型中的孔隙和不连续面的流体流动进行力学—流体耦合分析,该软件是岩土工程界一种重要的数值研究工具。

3 帷幕灌浆模型设计与参数选取

3.1 模型设计

深孔帷幕灌浆的深度远远大于钻孔(注浆孔)的孔径,因此可以将其转化为平面二维问题来研究浆液的扩散状态。在已知岩体、裂隙、地下水、浆液及浆压等的性能和参数条件下,对帷幕灌浆模型做如下假设:

(1)浆液为稳定的非压缩的宾汉姆流体,层流,裂隙内流动无粘时变性效应;

(2)岩块渗透系数为 0,浆液在岩块间的裂隙内流动;

收稿日期:2010-09-10

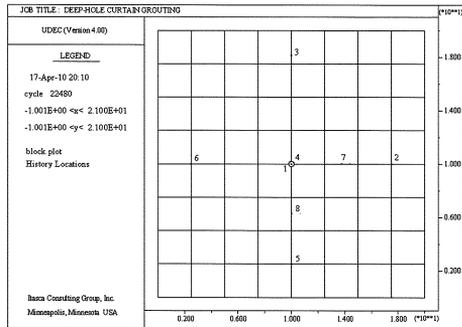
作者简介:李粮纲(1961-),男(汉族),湖南长沙人,中国地质大学(武汉)教授,地质工程专业,博士(后),从事地质工程教学与科研工作,湖北省武汉市鲁磨路,ligang@cug.edu.cn。

(3) 裂隙粗糙等宽,为不连续介质,满足库仑滑动准则(coulomb model),而裂隙的初始变形为约束状态,在初始应力状态下的裂隙宽度等于实测平均裂隙宽度值,其余参数根据地质勘察数据和经验数据进行设置^[1~3];

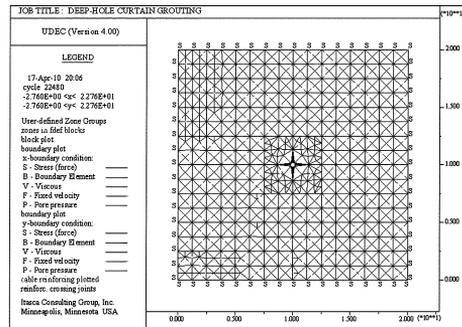
(4) 不考虑重力的影响,岩体为各向同性弹性

材料(elastic model),满足平面地应力状态($S_x = S_y$),地应力大小根据深度和重力大小进行经验换算;

(5) 模型中岩体主要裂隙用两组间距为 2.5 m 的规则正交节理来模拟,在模型中央包含一个直径 75 mm 的圆形钻孔,如图 1 所示。



(a) 灌浆模型(含 8 个检测点)



(b) 网格划分及边界条件

图 1 UDEC 帷幕灌浆数值模拟建模界面

在模型中距离注浆孔 4 m 处(hist 7、hist 8)、8 m 处(hist 2、hist 3、hist 5、hist 6)及注浆孔处(hist 1、hist 4)设置了 8 个监测点,以便于比较分析灌浆压力扩散情况及便于验证和比较浆液扩散距离。

3.2 模型基本参数选取

为了保证模型计算的准确度,模型基本参数均尽可能使用实钻灌浆试验获得的数据,对部分无法直接获取的参数,则通过相关公式由试验参数换算求得^[4,5]。灌浆模型所取用的各种参数值详见表 1~3。

表 1 浆液参数

水灰比 (W/C)	密度 γ_g / (kg·m ⁻³)	粘滞系数 m /cp	粘聚力 c /Pa
5: 1	1125	1.4	0.1
3: 1	1200	2	0.5
2: 1	1286	2.5	0.7
1: 1	1500	6	0.8
0.8: 1	1586	10	2.1
0.5: 1	1800	37	3

表 2 岩体参数

密度 γ_g / (kg·m ⁻³)	体积模量 B /MPa	剪切模量 S /MPa	备注
2670	20000	10000	B, S 为换算值

表 3 节理参数

法向刚度 / (MPa·m ⁻¹)	10000
切向刚度 / (MPa·m ⁻¹)	10000
渗透系数 / (pa ⁻¹ sec ⁻¹)	由立方定律计算(由裂隙宽度和浆液粘滞系数决定)
零法向应力下裂隙宽度 a_{zero} /m	0.0015(取裂隙平均宽度值)
残余裂隙宽度 a_{res} /m	0.0001
内摩擦角 / (°)	30

由于建立模型时节理面为无水状态,但地下水静水压力对灌浆影响很大,模型必须考虑静水压力因素,因此,采用设计压力减去静水压力后的压力值,即有效设计压力进行模拟计算(见表 4)。

表 4 设计压力和有效设计压力对比 /MPa

灌浆深度/m	130	160	190	220	250	280	310	340	370	400	430
设计压力	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
有效设计压力	3.20	3.40	3.6	3.8	4.0	4.20	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2

4 数值模拟分析与实际应用

4.1 裂隙内灌浆压力数值模拟

4.1.1 灌浆压力扩散图

采用 UDEC 对所建模型及所选参数进行分析计算,可得到不同孔内压力下的裂隙内灌浆压力扩散结果图。图中用线条的粗细代表裂隙内灌浆压力的大小,线条的长度则代表灌浆压力的扩散和影响范围。当浆液水灰比为 0.5 时,灌浆压力在岩体裂隙内的扩散分布情况如图 2~7 所示。

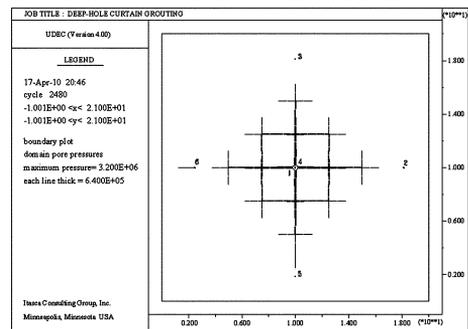


图 2 $P = 3.2$ MPa 时裂隙灌浆压力分布

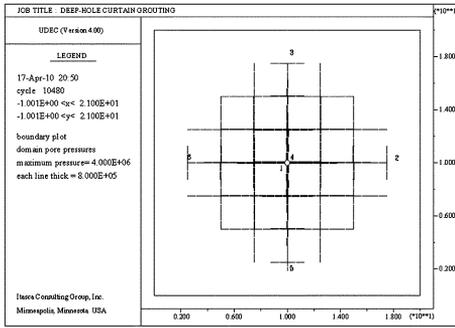


图3 P = 5 MPa 时裂隙灌浆压力分布

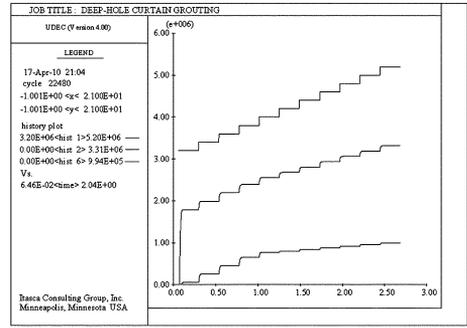


图7 hist 1、hist 2 及 hist 3 处灌浆压力曲线

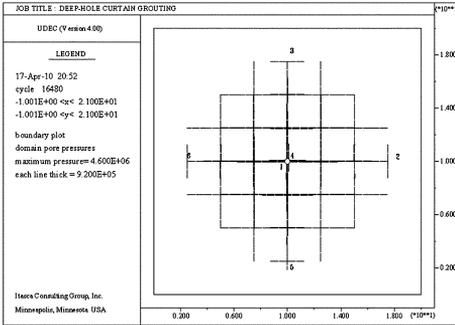


图4 P = 6.5 MPa 时裂隙灌浆压力分布

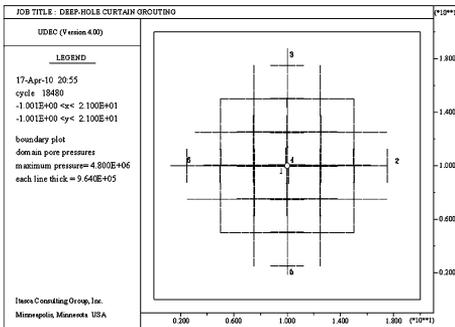


图5 P = 7.0 MPa 时裂隙灌浆压力分布

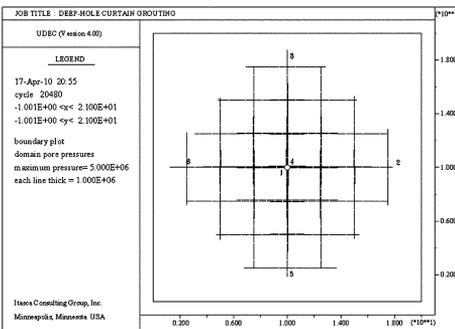


图6 P = 7.5 MPa 时裂隙灌浆压力分布

的趋势,距离钻孔越远,裂隙内的灌浆压力也越小。

(3) 裂隙内灌浆压力的扩散分布范围与灌浆压力值成正比,灌浆压力越大,灌浆压力分布范围越大。

(4) 灌浆压力从 5.0 MPa 增大到 6.5 MPa 时,压力的扩散范围无明显增大,这说明灌浆压力用于使岩体发生形变,在裂隙内的流动对岩体产生挤压作用;当灌浆压力增大到 7.0 MPa 时,裂隙内的灌浆压力分布范围又随着灌浆压力的增大而增大,这说明岩体的形变已非常明显,由于主控裂隙具有较大的压力优势,其受挤压变化幅度也相应是最大的。

比较分析图 7 中不同监测点处的灌浆压力关系可以得出以下结论。

(1) 灌浆压力在裂隙内扩散具有时效性。灌浆开始时($t = 0$),孔内灌浆压力为 3.2 MPa,距离注浆孔 8 m 处的裂隙内的灌浆压力为 0,0.22 s 后孔内压力才扩散至该点处,这说明岩体裂隙内的灌浆压力扩散的速度与灌浆压力成正比,与扩散距离成反比。

(2) 灌浆压力在裂隙内存在消散效应。当孔内灌浆压力为 3.5 MPa 时,距离注浆孔 8 m 处的裂隙内的灌浆压力(hist 6)为 0.35 MPa 左右,仅为孔内压力的 1/10。

(3) 对岩体裂隙内某一处而言,其灌浆压力的增幅逐渐减小,说明灌浆开始阶段,浆液在裂隙中的灌浆机理为渗透灌浆,未对裂隙产生较大的挤压作用而引发裂隙及岩体发生形变,当灌浆压力增大到一定值后,浆液对岩体和裂隙产生挤压、甚至劈裂作用,在这个过程中触发各相应的灌浆效应而引发裂隙变形,由于受到变形岩体的反挤压作用力,裂隙中的灌浆压力增幅呈递减趋势。

4.2 裂隙内浆液扩散数值模拟

4.2.1 浆液流动扩散图

当浆液水灰比为 0.5 时,浆液在岩体裂隙内的流动扩散分布情况如图 8~12 所示。图中采用线条

4.1.2 灌浆压力分析

比较图 2~6 中不同孔内压力下的裂隙内灌浆压力扩散情况,可知:

(1) 压力的优势跟裂隙与注浆孔之间的位置关系有关。在所有的裂隙中,两条与注浆孔相交的正交裂隙具有压力优势。

(2) 随着距离的增大,灌浆压力值呈逐渐减小

的粗细代表浆液流量的大小,而线条的长短则代表浆液扩散距离。

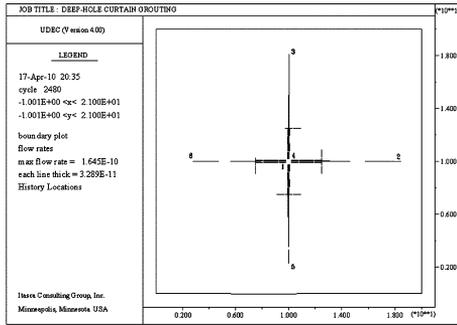


图 8 P = 3.2 MPa 时浆液流动扩散图

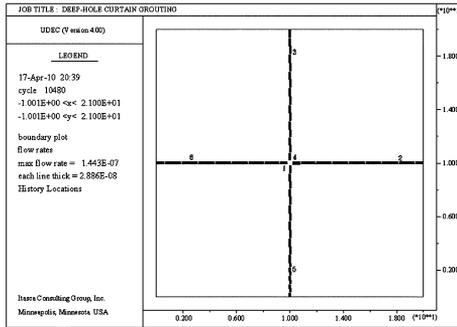


图 9 P = 5.0 MPa 时浆液流动扩散图

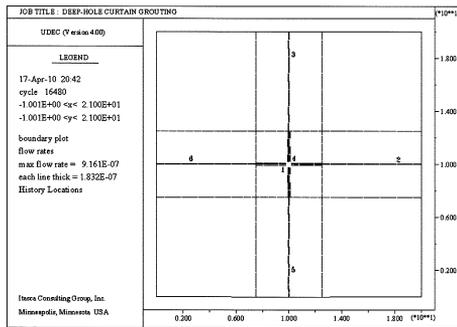


图 10 P = 6.5 MPa 时浆液流动扩散图

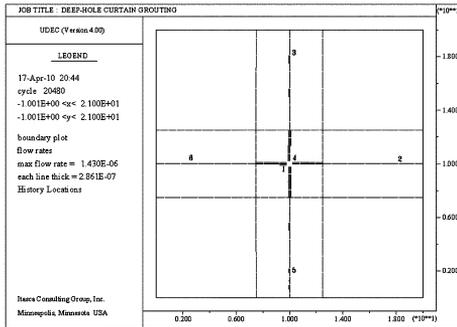


图 11 P = 7.5 MPa 时浆液流动扩散图

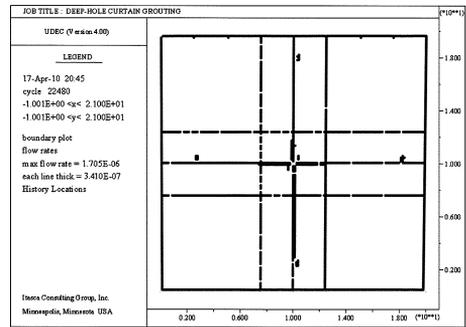


图 12 P = 8.0 MPa 时浆液流动扩散图

(2)受前述的主控裂隙内的灌浆压力优势影响,浆液在两条正交主控裂隙的扩散优势非常明显,浆液绝大部分沿两条主控裂隙呈线性流动扩散;

(3)浆液的扩散形态与灌浆压力的扩散形态不一致,前者呈线性,而后者则呈似圆状,二者扩散形态不一致的原因:浆液的流动跟灌浆压力和裂隙宽度有关,而裂隙内灌浆压力的扩散则受灌浆压力及裂隙、岩体的受力状态控制;

(4)浆液在裂隙中的扩散距离与灌浆压力成正比,随着灌浆压力的增大,浆液在裂隙中的扩散距离也相应变大。

4.3 灌浆试验与理论计算对比分析

据数值分析结果图 8 可知,灌浆压力为 3.2 MPa 的状态下,浆液的扩散距离已接近 8 m,当灌浆压力增为 3.5 MPa 时,浆液扩散距离超过 8 m。随着压力的增大,在 4.0 ~ 6.0 MPa 压力的作用下浆液均沿主控裂隙面扩散流动,距离超过 10 m。水灰比为 0.5 时,不同方法所得的浆液扩散半径值列于表 5。

表 5 水灰比为 0.5 时各方法所得的浆液扩散半径值比较

灌浆深度	经验公式	扩展隆巴迪公式	数值模拟	灌浆试验
130	9.3	8.1	7.9	
160	9.5	8.6	9.5	
190	9.7	9		
220	10	9.5		
250	10.4	10.4		
280	10.6	10.6		
310	10.8	11.2	> 10	8
340	11.1	12		
370	11.3	12.3		
400	11.5	13.1		
430	11.6	13.4		

4.2.2 浆液扩散分析

分析图 8 ~ 12 可知:

(1)在所有的裂隙中,两条与注浆孔相交的正交裂隙具有绝对的流动扩散优势,浆液在其内部的扩散流动要明显优于其他裂隙;

根据以上分析,可以推断:

(1)中关铁矿深孔帷幕灌浆施工中,选用试验所采用的灌浆压力值,可以使浆液扩散半径达到 8

m,即可以采用12 m的设计孔距进行灌浆施工;

(2)从对水灰比为0.5的浆液扩散流动分布的模拟可看出,数值模拟结果与前期灌浆试验值基本相符,中关铁矿灌浆采用的浆液最小水灰比为0.5,可推断在相同的灌浆压力下,水灰比大于0.5的浆液其扩散半径将大于8 m的试验值。

但是,在数值模型中,浆液沿两主控裂隙表现为线性扩散流动为主,这与实际情况有出入^[6],在实际的灌浆过程中,浆液在岩体裂隙空间中的流动形态是非常复杂的。此外在灌浆模型中将裂隙简化为等宽、等间距的规则形态,这也使数值分析与实际情况产生误差。

5 结论

(1)帷幕灌浆数值模型能较好的对灌浆压力扩散分布及浆液的流动扩散形态进行模拟,直观形象的将深孔帷幕灌浆的压力扩散、浆液扩散规律反映出来,对帷幕灌浆试验结果进行数值分析;

(2)根据矿区地质条件与前期试验所获取的各项参数建立帷幕灌浆数值模型,可以对各阶段、各分区、各钻孔的灌浆效果进行对比分析,可以为下一阶

段的灌浆试验或施工确定合理的灌浆参数提供指导、为类似的灌浆工程提供建模初选参数和参考计算,因此,数值模拟方法在帷幕灌浆的设计、试验及施工当中具有非常重要的理论意义;

(3)由于深孔灌浆的地质水文条件及浆液性能的多变性和复杂性,目前灌浆理论计算公式受诸多理想假设条件的限制,其计算准确性与工程适用性受到较大影响。深孔帷幕灌浆机理有待开展进一步深入的研究。

参考文献:

- [1] 李宁,张平,闫建文. 灌浆的数值仿真分析模型探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3):326-327.
- [2] 郝哲,何修仁,刘斌. 基于岩体注浆理论的可靠性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),1999,20(2):160-161.
- [3] 许光祥,张永兴,哈秋. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报,2003,(3):74-78.
- [4] 刘孔凡,焦莉莉. 普通水泥稳定浆液的研究[J]. 水利水电技术,1998,29(12):49.
- [5] 卢央泽,苏建军,姜仁义. 地表移动区内建、构筑物稳定性模拟分析[J]. 金属矿山,2008,382(4):131.
- [6] 朱焕春,Andrieux Patrick,钟辉亚. 节理岩体数值计算方法及其应用(二):工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):90-91.

阿特拉斯·科普柯移动空气业务部举行“新品发布会暨亚太区客户大会”

本刊讯 2010年11月23~26日,在上海新国际博览中心举行的“2010年Bauma国际工程机械展”上,阿特拉斯·科普柯不仅展示了其主力产品,还以“活力体验之旅(Experience our Energy)”为主题推出XAXS 600 CD7 17 bar、QAS FLX 125KVA、XAS87和XRVS 976等新设备。

阿特拉斯·科普柯移动空气业务部举办的“活力体验之旅”VIP客户活动上展示其最新产品,其中包括QAS FLX系列的扩展机型QAS FLX 125发电机组和新型XAXS移动空压机以及初次亮相的XAS 27移动空压机和移动式水泵。此外,XAS 87小型移动空压机租赁设备也将登陆亚洲市场。

为满足亚洲、非洲、澳大利亚和南美洲日益增长的功率需求,阿特拉斯·科普柯推出了标准规格的QAS发电机组附加机型。这款新型QAS发电机名为QAS FLX,特别适用于各类重载应用场合,例如租赁、建筑、采矿和造船厂。阿特拉斯·科普柯QAS系列移动式发电机组专为进行快速、方便和安全的运输以及在几乎任何未预备的地表上进行现场作业而设计。实际提供的QAS系列机组具有经验证的良好性能,现已提供额定功率为14~571 kVA的多种型号。

鉴于市场对发动机压力在8.6~14 bar的移动空压机不

断增长的需求,单轴移动空压机系列现已扩展至压力达17 bar(XAXS 600)。XAXS 600也是阿特拉斯·科普柯首款单级螺杆压缩压力达到17 bar的移动式压缩机,这款紧凑高效的压缩机是小型履带式钻机的理想匹配产品。

新式XAS 27压缩机(27 L/s,7 bar)是阿特拉斯·科普柯移动式压缩机系列尺寸最为紧凑的产品,具有卓越的多功能特性,可用于气动破碎机、凿岩机、破碎锤和其它手工工具,能够轻松处理拆除、整修和改建等项目。该压缩机易于操作和维护,其动力系统采用了驱动C55新气缸的本田GX630汽油发动机。XAS 27压缩机还含有阿特拉斯·科普柯最小的油气分离器容器,充分利用便于维护的旋装式过滤器设计。

对于租赁和建筑应用领域,新型的阿特拉斯·科普柯轻型压缩机XAS 87拥有坚固耐用的设计,而且操作十分简单。此外,该产品便于异地运输,质量不到750 kg,具有完整的可选功能。XAS 87 Kd由额定功率为33 kW的四缸水冷Kubota V1505涡轮柴油发动机提供动力。该压缩机在7 bar压力下的充气流量为5 m³/min(83 L/s),可驱动3种工具:气动破碎机、破碎锤和小型气动工具。