

引用格式: 金学伟, 邢明扬, 刘浩, 等. 采矿气液破碎锤液压系统性能仿真与分析[J]. 有色设备, 2025, 39(5): 33-40.

JIN Xuewei, XING Mingyang, LIU Hao, et al. Performance simulation and analysis of hydraulic system for mining gas-liquid breaking hammer[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(5): 33-40.

# 采矿气液破碎锤液压系统性能仿真与分析

金学伟, 邢明扬, 刘浩, 张晨, 丁云龙

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁鞍山 114051)

**[摘要]** 气液破碎锤是一种大型、高效的采矿冲击破碎设备, 广泛应用于有色矿山开采、海洋工程以及建筑施工领域。目前, 在镁矿的开采过程中, 受到地质和施工条件的影响, 气液破碎锤存在破碎冲击力不足、锤击频率低以及功率利用低的问题。为此, 本文对气液破碎锤的结构和液压系统进行优化设计, 通过建立的液压系统动力学模型分析液压缸回程和打击阶段各性能参数关系, 并采用 AMESim 对气液破碎锤各工况参数进行模拟分析。结果表明, 建立的气液破碎锤模型, 可求解出回程和打击阶段的速度、位移、冲击能量、液压缸内压力与作用时间的曲线, 优化后的液压系统可有效提高破碎冲击力和锤击频率。当在供油能力和行程长度不变时, 基于单因素控制变量法, 可得出: 气液破碎锤的速度和冲击力随氮气室初始压力的增大而增大, 随初始容积的增大而减小; 锤击频率随氮气室的初始容积的增加而增加, 随初始压力的增大而减少。

**[关键词]** 气液破碎锤; 液压系统; 优化设计; 数学模型; AMESim 仿真; 单因素控制变量法

**[中图分类号]** TH137      **[文献标志码]** A      **[文章编号]** 1003-8884(2025)05-0033-08

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.05.004

## 0 引言

气液破碎锤是一种液压振动冲击装置, 由于其载体设备的多样性、工作的灵活性及稳定性等优点, 广泛用于市政道路破碎, 矿山、冶金、铁路、公路建设, 楼房拆毁等工程<sup>[1-3]</sup>。

破碎锤采用液压驱动, 选择工程中应用比较广泛的冲击式破碎锤<sup>[4]</sup>。工作过程中, 活塞、钎杆和矿石之间的相互作用十分复杂, 容易出现打击力不足、锤击次数低的问题。因此, 提高破碎锤冲击力和能量利用率是一个重要的研究内容。Gorodilov 等<sup>[5-6]</sup>开发了液压冲击装置的试验研究台, 通过仿真和试验数据对比, 研究了不同的冲击原理, 测量了活塞和控制阀的位移, 以及活塞和进口流量中的压力。Giuffrida A 等<sup>[7]</sup>在液压破碎冲击锤的非线性模型的基础上, 建立了详细的参数化数学模型模拟其工作性能, 通过试验仿真结果对比, 得出的动态特性与试验波形基本一致的结论, 为破碎锤液压系统的

优化以及结构功能的改进提供了一些参考。Oh J<sup>[8-9]</sup>等使用多域系统模拟工具对用于建筑和采矿应用的凿岩机进行了建模, 研究设计变量的灵敏度, 使用液压系统的一维组件和代表机器结构部件的一维刚体组件定义仿真模型。引入岩石的简化材料模型, 研究反射应力波的影响和阻尼器的性能, 发现这种液压冲击装置建模方法工作良好, 液压和机械部件的结果满足建议的性能。陈家林等<sup>[10]</sup>分析了液压冲击器工作原理, 建立了液压冲击器活塞、换向阀阀芯运动数学模型, 为获得液压冲击器最佳结构参数, 提高其工作性能, 并利用遗传算法求解了冲击器结构参数优化值。张明松等<sup>[11]</sup>利用 AMESim 模型分析了输入流量、冲击活塞的质量、后腔的活塞杆径与冲击活塞速度极值、冲击频率和单次冲击能间的变化关系。

本文以镁矿开采重型气液破碎锤为研究对象, 以提高破碎锤的冲击力、锤击频率、工作效率等性能指标为目的, 构建了气液破碎锤的数学模型。优化

**[收稿日期]** 2025-07-06

**[基金项目]** 辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ212410146074)。

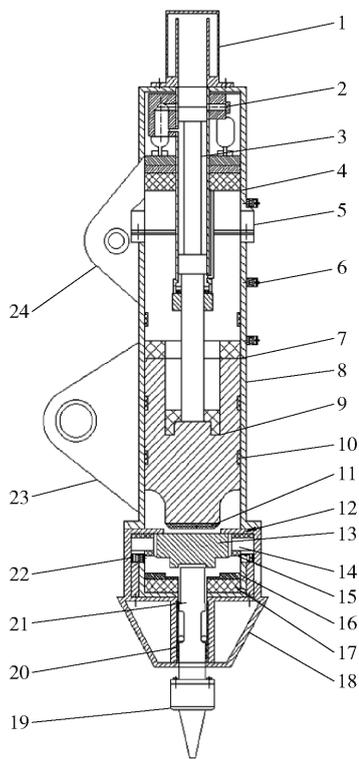
**[第一作者]** 金学伟(1968—), 男, 吉林延吉人, 讲师, 博士, 主要研究方向为机电系统检测与控制, 流体传动与控制。

设计液压系统回路,利用 AMESim 软件对气液压系统各组成元件性能参数的模拟计算结果,分析氮气室初始压力、氮气容积、液压系统主要参数对液压缸活塞的位移、速度和氮气室压缩气体压力变化的影响,优化参数,从而改善气液破碎锤冲击力不足、末端冲击速度低、冲击频率低等问题。

## 1 气液破碎锤结构和液压系统

### 1.1 气液破碎锤基本结构

液压破碎锤又称碎石器,主要依靠泵站提供的液体压力来驱动活塞作往复运动<sup>[12]</sup>。矿用气液破碎锤是由冲击机构、配油机构、蓄能稳压机构、执行机构以及其他机构组成<sup>[13]</sup>,如图 1 所示。



1 - 氮气室; 2 - 液压组合系统; 3 - 活塞杆; 4 - 回程缓冲垫; 5 - 上结构体; 6 - 位置传感器; 7 - 活塞锤体缓冲垫; 8 - 中结构体; 9 - 提锤缓冲垫; 10 - 行程导轨; 11 - 活塞锤体; 12 - 钎杆帽上位挡板; 13 - 钎杆帽; 14 - 空打缓冲垫; 15 - 防空打传感器; 16 - 钎杆帽下位挡板; 17 - 钎杆缓冲垫; 18 - 下结构体; 19 - 钎杆头; 20 - 钎杆缓冲垫; 21 - 空打缓冲垫; 22 - 位置传感器; 23, 24 - 支座

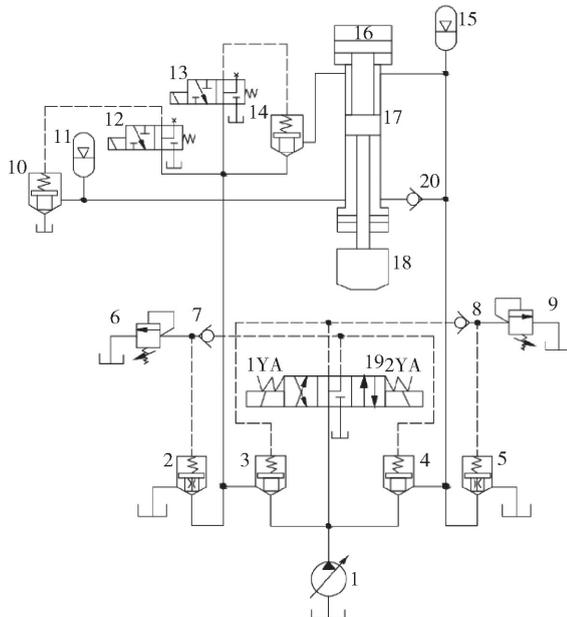
图 1 气液破碎锤结构图

Fig. 1 Structure diagram of gas-liquid breaking hammer

### 1.2 液压系统和工作原理

气液破碎锤液压系统通过液压能和破碎锤氮气

室压缩气体膨胀做功<sup>[14]</sup>。其液压系统的工作原理是由控制器控制液压阀的通断和位置的形式实现活塞式液压缸的往复运动,完成破碎锤的回程蓄能和下降锤击的功能。本文以锤体最低位置为回程起点,将气液破碎锤运动过程分为回程加速、回程减速、冲程加速和打击停顿 4 个阶段,每个过程具有一定的缓冲保护,其液压原理如图 2 所示。



1 - 变量泵; 2 - 压力插装阀; 3 - 上升插装阀; 4 - 下降插装阀; 5 - 压力插装阀; 6 - 溢流阀; 7 - 单向阀; 8 - 单向阀; 9 - 溢流阀; 10 - 插装阀; 11 - 低位蓄能器; 12 - 换向阀; 13 - 换向阀; 14 - 插装阀; 15 - 高位蓄能器; 16 - 氮气室; 17 - 液压缸; 18 - 锤体; 19 - 换向阀; 20 - 单向阀

图 2 气液破碎锤液压系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of hydraulic system of gas-liquid breaking hammer

气液破碎锤回程阶段采用双杆液压缸构成差动连接回路。以锤体最低位置为上升起点,将换向阀 12、换向阀 13 和换向阀 19 置于右位,此时插装阀 4 导通,高压油液流入破碎锤油缸下腔,活塞带动锤体上升,氮气室 16 同时被压缩;流出液压缸上腔的液压油,一部分存储在蓄能器 15 中,另一部分经单向阀 20 进入活塞杆前腔形成差动连接,提高了破碎锤的回程速度。随着破碎锤上升到指定位置,氮气室内气体被压缩、压力逐渐增加,活塞速度降低至停止。

破碎锤下降锤击阶段,将换向阀 19、换向阀 12 和换向阀 13 置于左位,将高压液压油经由插装

阀 3、14 进入液压缸上腔,液压油缸活塞在锤自身重力、氮气室高爆压力、液压油压力的共同作用下完成对钢钎的向下打击,蓄能器 15 释放压力,补充上腔流量,蓄能器 11 吸收部分回油路的压力冲击,减轻对下降速度的干扰。当锤体打击到钎杆帽时,钎杆帽将冲击力传递给钎杆上端面,钎杆帽下的防空打缓冲垫多余冲击力吸收。在缓冲垫的作用下,锤体减速制动,减速到下限位置完成一个工作循环。

## 2 气液破碎锤数学模型

为全面分析破碎锤的实际运动过程,描述系统中各个元件的输入变量与输出变量之间关系,本文根据图 1 和图 2 建立液压系统数学模型。

### 2.1 数学模型的假设条件

本文依据实际情况,对系统性能影响不大的因素做出如下假设<sup>[15]</sup>:1) 液压泵提供的液压油流量始终处于恒定状态;2) 液压油的黏温特性不受压力影响;3) 忽略油液质量,必要时集中参数处理;4) 忽略液压系统液压油的泄漏和压力损失;5) 蓄能器和氮气室的气体视为绝热状态。

### 2.2 冲击油缸的数学模型

根据气液破碎锤回程阶段液压系统分析,液压缸活塞动力学方程可表示为<sup>[15]</sup>式(1)。

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + Mg + p_G A_G = p_1 (A_1 - A_2) \quad (1)$$

式中: $M$  为锤体质量; $y$  为垂体竖直方向的位移; $p_1$  为差动液压缸进、出口压力; $A_1$ 、 $A_2$  为双杆缸下、上腔面积( $A_1 > A_2$ ); $A_G$  为氮气室内活塞有效面积; $p_G$  为压缩氮气压力。

其中,氮气室内压缩气体压力为式(2)。

$$p_G = p_{G0} \left( \frac{V_{G0}}{V_{G0} - A_G y} \right)^n \quad (2)$$

式中: $p_{G0}$  为氮气室初始气体压力; $V_{G0}$  为氮气初始体积; $n$  为气体变化系数,取  $n = 1.4$ 。

当液压位移为  $y$  时,高位蓄能器中的气体压力表示为式(3)。

$$p = p_0 \left[ \frac{V_0}{V_0 + (A_1 - A_2)y - qt} \right]^{1.4} \quad (3)$$

式中: $p_0$  为蓄能器初始气体压力; $V_0$  为蓄能器初始气体体积; $q$  为液压泵供油流量; $t$  为供油时间。

当高位蓄能器内气体充压时,液压缸内油液压力与蓄能器中气体压力关系表示式(4)。

$$p_1 = \alpha p \quad (4)$$

式中: $\alpha$  为比例系数,为保证蓄能器持续补油, $\alpha$  应大于 1。

由式(1)~(4),可得差动式氮爆破碎锤上升过程中的数学模型(式(5))。

$$\begin{cases} \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{1}{M} \left[ \frac{\alpha p_0 V_0^{1.4} (A_1 - A_2)}{[V_0 + (A_1 - A_2)y - qt]^{1.4}} - p_{G0} A_G \left( \frac{V_{G0}}{V_{G0} - A_G y} \right)^{1.4} - Mg \right] \\ \frac{dy}{dt} = 0, y = 0 \end{cases} \quad (5)$$

同理,破碎锤下降过程液压活塞的动力学方程可表示为式(6)。

$$Mg + p_2 A_2 + p_{G2} A_G = M \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (6)$$

式中: $p_2$  为下降过程液压缸上腔油压力; $p_{G2}$  为氮气室压缩气体压力。

其中,

$$p_{G2} = p_G \left( \frac{V_G}{V_G - A_G L + A_G y} \right)^{1.4} \quad (7)$$

$$p_2 = p_0 \left[ \frac{V_0}{V_0' + A_2 y - Qt} \right]^n \quad (8)$$

式中: $V_G$  为氮气室气体压缩后的体积; $L$  为双杆缸行程; $V_0'$  为下降开始时高位蓄能器的气体体积。

经过推导计算,得到气液破碎锤下降过程的数学模型式(9)。

$$\begin{cases} \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{1}{M} \left[ \frac{p_0 V_0^{1.4} A_2}{[V_0' + A_2 y - Qt]^{1.4}} + p_G A_G \left( \frac{V_G}{V_G - A_G L + A_G y} \right)^{1.4} + Mg \right] \\ \frac{dy}{dt} = 0, y = 0 \end{cases} \quad (9)$$

## 3 破碎锤连续运行的仿真求解

### 3.1 液压回路 AMESim 仿真模型建立

根据对气液破碎锤各部分机构的分析和模型搭建,建立了基于 AMESim 的气液破碎锤液压系统仿真模型,如图 3 所示。

在仿真过程中,部分参考了其他同类型液压破碎锤的参数,仿真模型所需参数见表 1。

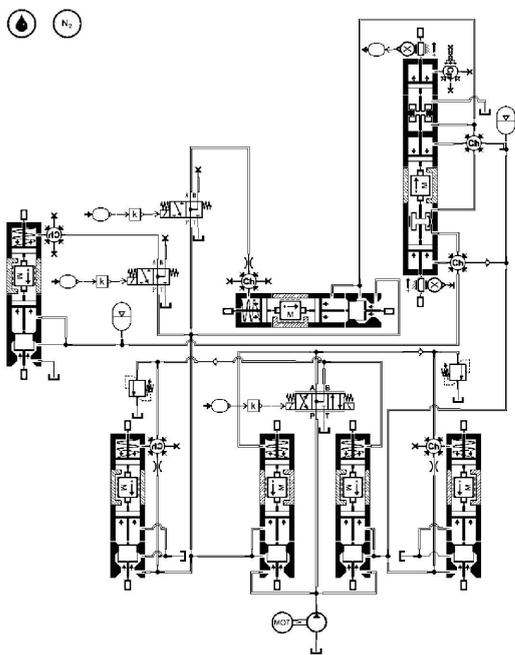


图 3 破碎锤液压系统 AMESim 仿真模型

Fig. 3 AMESim simulation model of hydraulic system for breaking hammer

表 1 破碎锤系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the breaking hammer system

类型	参数
系统最大流量/(L·min <sup>-1</sup> )	400
上升溢流阀控制压力/MPa	30
下降溢流阀控制压力/MPa	15
活塞锤体质量/kg	5 000
活塞结构行程/mm	1 000
活塞前腔直径/mm	180
活塞后腔直径/mm	160
活塞后腔密封段长度/mm	18
氮气室初始压力/MPa	3
氮气室初始容积/L	100
油液密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	850
油液运动黏度/cSt	36
高压蓄能器初始体积/L	20
高压蓄能器初始压力/MPa	15
低压蓄能器初始体积/L	5
低压蓄能器初始压力/MPa	10

### 3.2 仿真结果分析与讨论

将表 1 的初始参数输入气液破碎锤的液压系统模型中,仿真结果可得到液压缸活塞的位移、速度、冲击能量和氮气室压力等对破碎锤工作性能的影响,如图 4 所示。

由图 4 可知,活塞在液压油和高压蓄能器的作用下,回程阶段最大速度为 1.05 m/s,在破碎锤自身重力、压缩氮气压力和上腔液压油的作用下,活塞下降的最大位移为 1.15 m,最大速度为 5.05 m/s。在 10 s 内活塞运行了 6.6 个周期,破碎锤的工作频率为 40 次/min,图 4(d) 中破碎锤冲程最大冲击能量为 60 kJ。由图 4(b) 可知,下降阶段会出现位移超出原始位移现象,其原因是因破碎锤惯性下降,液压油阻力不能及时制动,使得在减速状态下仍继续下降一段距离。随着回程位移增加,氮气室压力越来越大,活塞速度逐渐下降直至停止到设定位置。气液破碎锤的液压系统仿真结果与理论分析的运动规律一致,验证了仿真模型的准确性、合理性。

### 3.3 氮气室初始压力和容积对工作性能的影响

基于单因素控制变量法,根据 AMESim 仿真结果分析氮气室初始压力和容积对破碎锤工作性能的影响。

#### 3.3.1 氮气室初始压力

氮气室初始压力对气液破碎锤的冲击能量和打击频率的影响较大。本文液压系统输入流量设为 300 L/min,氮气初始压力分别为 1.8 MPa、2.0 MPa、2.2 MPa、2.4 MPa 进行仿真试验,得到破碎锤速度和位移结果,如图 5 所示。

氮气室初始压力对气液破碎锤性能参数影响的仿真结果见表 2。其他条件不变情况下,在氮气室初始充气压力为 1.8 ~ 2.4 MPa 时,其打击能为 52.9 ~ 67.6 kJ,打击频率为 38 ~ 44 次/min,打击速度为 4.6 ~ 5.15 m/s。由图 5 可知,活塞的行程受初始压力的影响很小;氮气初始充气压力增大时,锤头的回程行程稍微减小,而锤头的下冲击速度和冲击能量显著增大,打击频率会相应减少。

仿真结果表明:氮气室的初始氮气压力的增高,主要影响打击速度、冲击频率以及冲击能量。在一定范围内,随着氮气初始压力的升高,打击速度、打击能量增加,而打击频率减小。由此得出,在一定的

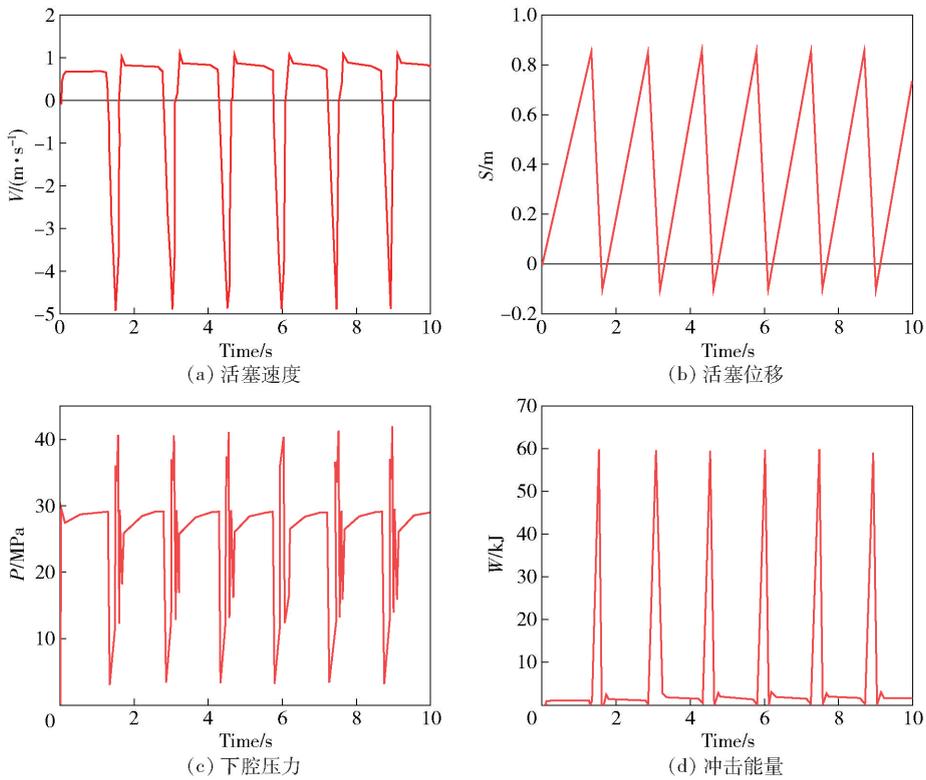


图4 初始条件气液破碎锤性能变化曲线

Fig. 4 Performance curve of breaking hammer at initial conditions

表2 氮气初始压力与气液破碎锤性能仿真结果

Table 2 Results of parameters of gas-liquid breaking hammer at initial pressure of the nitrogen chamber

初始压力/MPa	打击速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	冲击能量/kJ	打击频率次/min	工作行程/m	氮气压缩压力/MPa
1.80	4.60	52.90	44	0.96	3.37
2.00	4.70	55.22	43	0.97	3.35
2.20	4.85	58.80	42	0.96	3.33
2.40	5.10	65.02	40	0.94	3.30

参数范围内,为获得较大的冲击能,应选择较大的氮气初始压力。

### 3.3.2 氮气室容积

氮气室初始容积是破碎锤设计的结构参数,其与无量纲油缸位移以及氮气室有效截面积关系紧密,氮气初始容积对冲击性能有一定程度的影响。设定氮气室初始充气容积为 65 L、80 L、95 L 和 110 L,仿真得到破碎锤速度变化过程如图 6 所示,氮气室初始容积对气液破碎锤性能影响结果见表 3。

由图 6 可知,氮气室初始容积对破碎锤打击频率以及速度影响较大,且随着容积的增加,运动速度

平稳型提高、波动减小。氮气初始容积分别为 65 L、80 L、95 L、110 L 时,锤击末端速度分别为 5.25 m/s、5.12 m/s、5.0 m/s、4.96 m/s,打击频率为 35 次/min、37 次/min、39 次/min、40 次/min。试验结果表明,氮气初始压力与行程近乎相同的情况下,随着氮气室容积增加,在回程阶段氮气的压缩程度以及氮气阻力就越小,回程时间会减少;下降打击阶段,随着氮气室压缩程度越大,氮气室提供给液压缸活塞杆的作用力也就越大,锤击末端速度也会相应提高。

氮气室初始容积的变化,会引起氮气室承受的最大压力和内部温度的变化。根据无量纲设计要

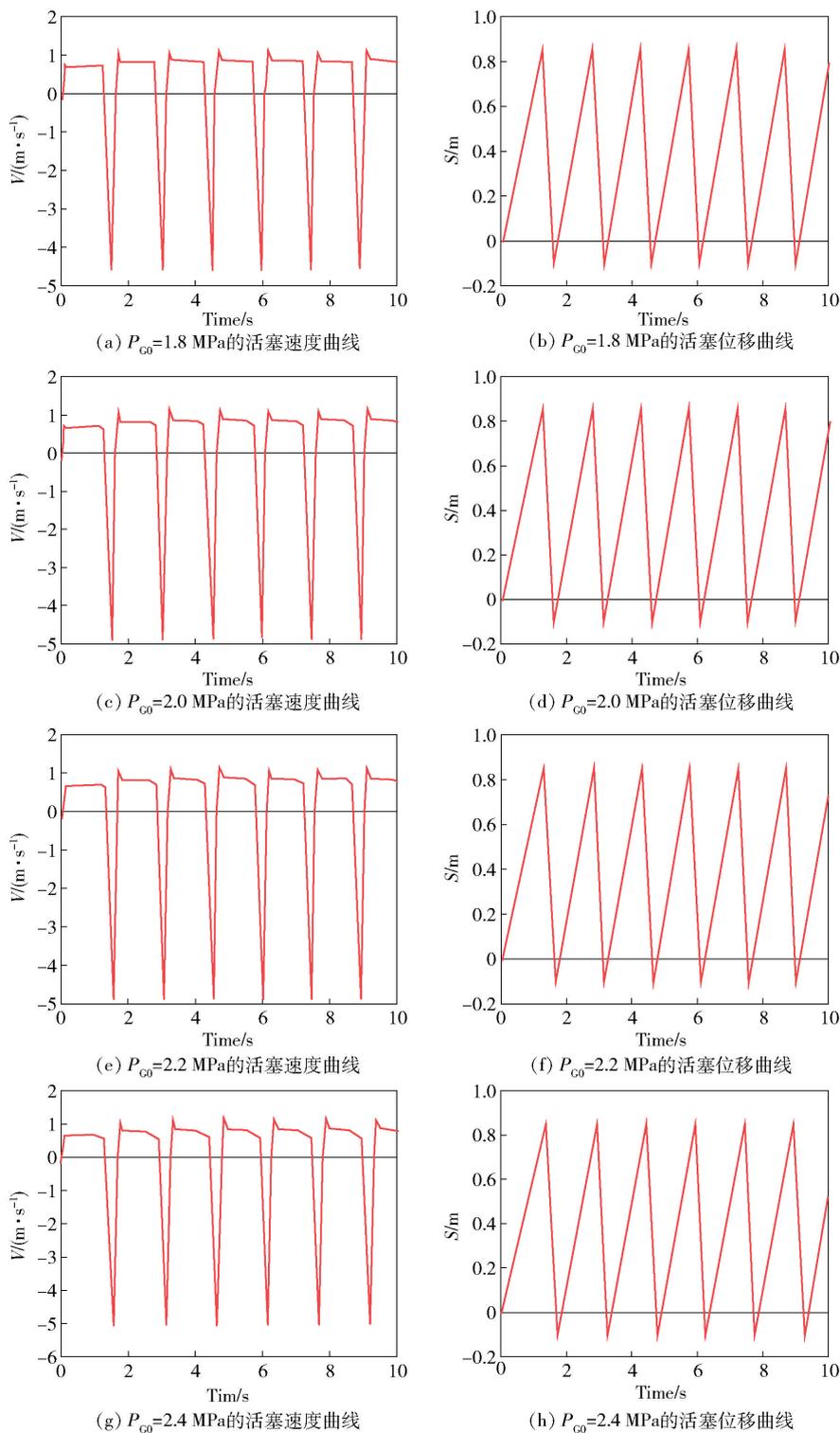


图 5 氮气室初始压力与活塞速度和位移的关系

Fig. 5 Diagram of the speed and displacement of the piston at initial pressure of the nitrogen chamber

求,综合考虑密封、温度变化以及结构、重量等因素,确定氮气室结构尺寸时,相应提高氮气室初始充气

压力和降低容积,以保证气液破碎锤的锤击末端速度和冲击能量满足技术性要求。

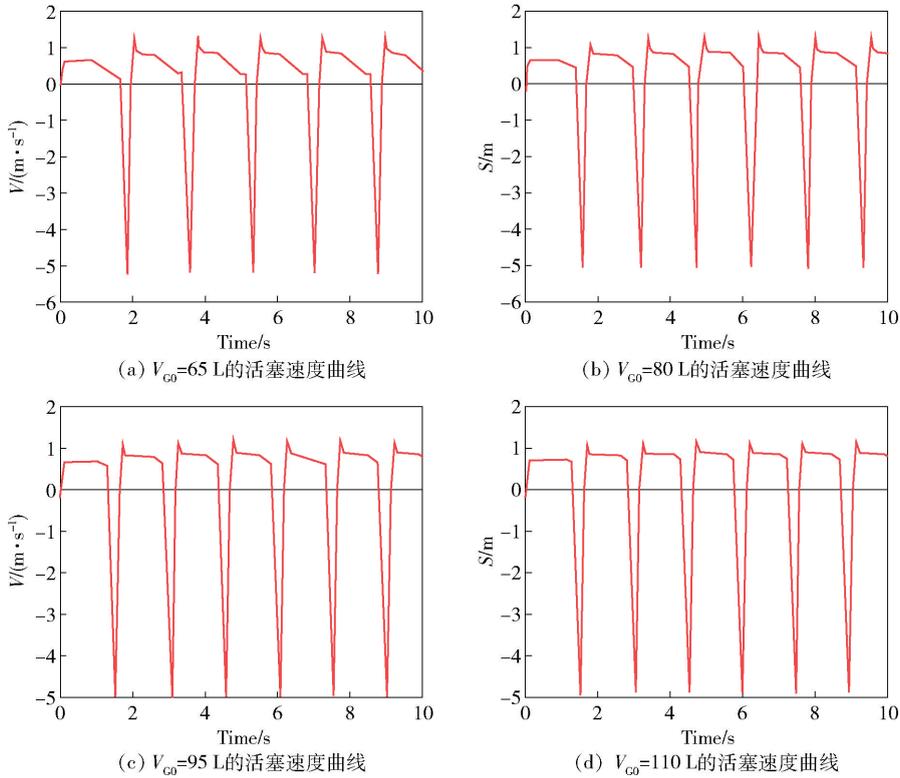


图6 氮气室初始容积与活塞速度和锤击频率的关系

Fig. 6 Diagram of the speed and frequency of the piston at initial volume of the nitrogen chamber

表3 氮气室初始容积与气液破碎锤性能仿真结果

Table 3 Simulation results of parameters of gas-liquid breaking hammer at initial volume of the nitrogen chamber

初始容积/L	打击速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	冲击能量/kJ	打击频率/(次 $\cdot$ min $^{-1}$ )	打击行程/m	氮气压缩压力/MPa
65	5.25	68.91	35	0.93	4.8
80	5.12	65.54	37	0.94	4.0
95	5.00	62.50	39	0.95	3.6
110	4.96	61.50	40	0.96	3.3

## 4 结论

为有效提高采矿用气液破碎锤的冲击力和锤击频率,本文对气液破碎锤的结构和液压系统优化设计,利用推导的数学模型和 AMEsim 仿真模型分析破碎锤的运动速度、位移、冲击力、打击频率以及液压缸内压力等性能参数关系,并且分析了氮气室的初始压力和容积对冲击力和锤击频率的影响,得出如下结果。

气液破碎锤回程阶段液压缸采用差动连接回路、大容量插装阀、高位蓄能器、氮气室的结构形式提高了回程速度、降低波动;冲击阶段受到的锤自身重力、蓄能器压力、氮爆压力、外部供油压力,会显著

提高打击速度和冲击力。运用单因素控制变量法对仿真结果进行分析,结果得出:增加氮气室初始压力,能提高冲击力和打击速度;增加氮气室初始容积,会使冲击频率增加;当初始容积达到一定值时,对冲击频率与冲击力变化率的影响逐渐较小。

本研究的方法和分析结果,对类似的矿用气液破碎锤的设计、优化以及参数仿真提供了一定的借鉴和研究路径。

### [参考文献]

- [1] 童桂英,万怡男,张磊,等. 液压破碎锤活塞横裂机理分析与工艺优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(10):2995-3004.
- [2] 王延杰. 大型破碎锤驱动压力与流量匹配机理的研究[D]. 烟台:烟台大学, 2022.

- [3] 韩玉娟,王尊礼,杨晟豪.一种液压破碎锤活塞失效分析及工艺改进[J].机械工程师,2024(4):145-147.
- [4] 孙鹭.浅谈回转式破碎锤在刮板输送机上的应用[J].中国设备工程,2024(23):12-14.
- [5] Gorodilov L V, Efimov V P, Kudryavtsev V G. Modeling the striking head-impact tool-rock mass interaction [J]. J Min Sci +, 2013, 49(4): 618-625.
- [6] Gorodilov L V, Pashina O, Kudryavtsev V G. Experimental research stand and procedure for hydraulic percussion systems [J]. Min Sci, 2011, 47(6):778-786.
- [7] Giuffrida A, Laforgia D. Modelling and simulation of a hydraulic breaker [J]. International Journal of Fluid Power, 2005, 6(2): 47-56.
- [8] Oh J, Lee G, Kan H, et al. Modeling and performance analysis of rock drill drifters for rock stiffness [J]. Int J Precis Eng Man, 2012, 13(12): 87-93.
- [9] Oh J, Song C, Kim D, et al. Numerical investigation of performance of hydraulic percussion drifter [J]. Precis Eng Manuf, 2016, 17(7):879-885.
- [10] 陈家林,田英真,杨晓东,等.基于 AMESim 的液压冲击器结构参数优化[J].中国新技术新产品,2022(8):75-77.
- [11] 张明松,苏志成,王宏.液压破碎锤动态特性的研究[J].南方农机,2021,52(3):106-107,118.
- [12] 高东玲,柴红强.基于 PumpLinX 液压破碎锤流场仿真与计算[J].液压气动与密封,2024,44(9):31-37.
- [13] 胡彦龙.挖掘机破碎锤工况延长主泵使用寿命分析[J].液压气动与密封,2022,42(7):76-78,82.
- [14] 贺克伟.液压破碎锤在矿用多功能铲运机上的应用[J].煤矿机械,2023,44(4):148-150.
- [15] 张氢,陈森,孙远韬.氮爆式液压打桩机蓄能控制仿真研究[J].计算机仿真,2018,35(7):183-187,193.

## Performance simulation and analysis of hydraulic system for mining gas-liquid breaking hammer

JIN Xuewei, XING Mingyang, LIU Hao, ZHANG Chen, DING Yunlong

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:** Gas-liquid breaking hammer is a large and efficient mining impact crushing equipment, which is widely used in non-ferrous mining, marine engineering and construction fields. At present, in the mining process of magnesium ore, which affected by the geological and construction conditions, the gas-liquid breaking hammer has the problems of insufficient crushing impact force, low hammering frequency and low power utilization. This paper optimizes the design of the structure and hydraulic system, analyzes the relationship between the performance parameters of the hydraulic cylinder rise and the strike stage by the dynamic model of the hydraulic system, and the parameters of the various operating conditions have been simulated and analyzed by AMESim on the gas-liquid breaking hammer. The results show that the model of the gas-liquid breaking hammer can solve the curves of velocity, displacement, impact energy, pressure of the hydraulic cylinder with time in the rise and strike stages, and the optimized hydraulic system can effectively improve the crushing impact force and hammering frequency. When the oil supply capacity and stroke length are unchanged, based on the single factor control variable method, it can be concluded that the velocity and impact force of the gas-liquid break increase with the increase of the initial pressure of the nitrogen chamber, and decrease with the increase of the initial volume; the hammering frequency increases with the increase of the initial volume of the nitrogen chamber, and decreases with the increase of the initial pressure.

**Keywords:** gas-liquid breaking hammer; hydraulic system; optimization design; mathematical model; AMESim simulation; single-factor control variable method

