



激波对堆浸渗透性与浸出率的影响

艾纯明¹, 王贻明², 刘超³

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 葫芦岛 125105;

2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 万宝矿产有限公司, 北京 100053)

摘要:为解决浸出矿堆渗透性差、浸出率低的问题,引入激波管试验,并结合渗流力学原理、CT 扫描等手段考察应力波改善堆浸渗透性的效果,采用变水头法对矿柱的渗透性进行了测量。结果表明:激波对堆浸散体介质的孔隙结构起到了松散作用,矿柱孔隙当量直径扩大了 32%,孔隙率提高了 5.72%,渗透系数增加了 3.8~10 倍,溶液渗流得到了强化,并体现出一定的时效性;经过激波作用后,矿石浸出率提高了近 10%,在反应后期激波提高浸出率的作用更明显。

关键词:激波;堆浸;渗透性;浸出率;孔隙结构

文章编号: 1004-0609(2018)-03-0604-08

中图分类号: TD862.1

文献标志码: A

在矿石堆浸中,溶液运达目的矿物以及有用组分运出矿堆这两个过程均需通过渗流作用完成,因此矿堆的渗透性是影响矿石堆浸效果的关键因素^[1]。矿堆渗透性直接影响到溶液分布的均匀程度^[2]以及金属回收率^[3-4],渗透性越差,回收率越低。矿堆渗透性差已成为制约堆浸技术发展的一大难题,为改善堆浸体系的渗透性能,国内外学者从物理、化学等角度提出了多种改善矿堆渗透性的措施,包括粉矿制粒技术^[5]、矿石分级筑堆、添加化学药剂^[6-7]等,均取得了良好的效果。应力波作用到堆浸矿石,可改变矿堆原有的物理形态,为改善堆浸渗透性提供了可能。

国内外学者关于应力波作用下散体多孔介质体现出不同的力学强度和渗流特性方面,已经作出了大量的研究。在冲击载荷作用下多孔介质或散体介质的渗流特性研究方面,张均锋等^[8-9]研究了冲击载荷作用下的饱和砂的渗流强化与结构破坏,试验观察到试样中出现纵向排水通道、横断裂纹等现象,渗透系数最大增加 4~6 倍;李世海等^[10]建立了冲击载荷的简单一维力学模型。国胜兵等^[11]、王明洋等^[12]采用爆炸的方法研究了冲击载荷对饱和砂的密实和液化特性。激波管产生的激波作用于散体时可以形成应力波,高速高压气体对散体产生破坏作用,试验条件易于控制,因此

激波试验在研究散体渗透性方面得到广泛的应用。BRITAN 等^[13-15]采用激波管的方法,研究了散体介质中波的传播特性。吴爱祥等^[16]利用激波管试验研究了采空区冒落形成的空气冲击波与矿石垫层的关系。

鉴于激波管的优点,本文作者利用激波管产生冲击波作用于堆浸散体介质,进而在介质中产生应力波,研究应力波引起堆浸散体介质结构和渗透性发生变化的规律。

1 实验

1.1 试验矿石

试验矿样取自我国南方某铜矿,该矿山采用堆浸法回收金属铜。矿石破碎后采用标准圆振筛筛分,取粒径小于 8 mm 的自然级配矿样,粒度组成曲线见图 1。

平均粒径

$$d_{cp} = \sum_{n=0}^n \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \times a_i = 1.64 \text{ mm} \quad (1)$$

式中: d_i 、 d_{i+1} 分别为第 i 组粒度范围的始末粒度值;
 a_i 为第 i 组粒度范围的质量分布频率。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604138, 51674012)

收稿日期: 2015-03-12; **修订日期:** 2018-01-24

通信作者: 王贻明, 副教授, 博士; 电话: 010-62332264; E-mail: ustbwym@126.com

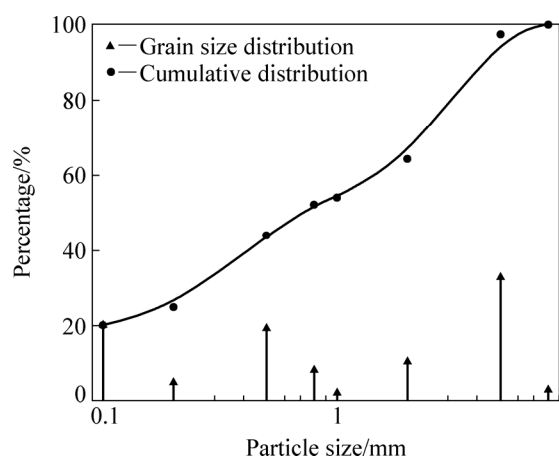


图 1 试样级配曲线

Fig. 1 Grading curve of test sample

1.2 试验装置

为研究激波对堆浸散体介质结构及渗透性的影响, 采用自行研制的激波管试验装置, 如图 2 所示。

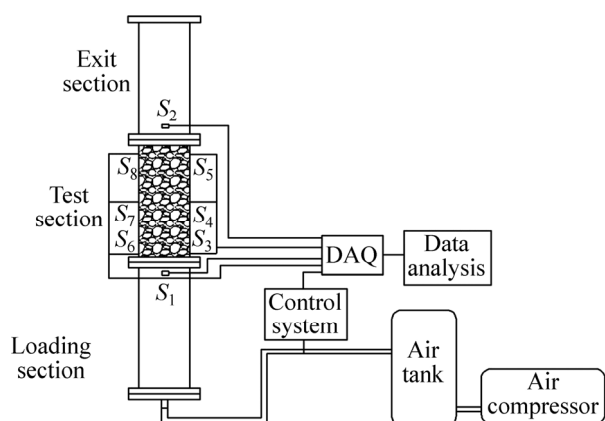


图 2 激波管试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of shoke wave test system

试验装置由空压机、贮气包、控制系统、激波管、数据采集系统和分析系统组成。贮气包主要用于调节空压机的机械脉冲, 稳定冲击波压力。在出口处设有压力表, 监测贮气包出口压力。激波管由加载段、试验段和出口段组成, 由有机玻璃管制作, 内径 50 mm, 长 500 mm 至 1000 mm, 采用法兰盘螺栓连接。数据采集系统由微型压力传感器($S_1 \sim S_8$)和数据采集仪组成, 微型压力传感器安装在激波管试验段管内壁, 数据采集仪采样频率 500 Hz, 主要记录压力波形和幅值。应用计算机专用软件分析采集的数据。

激波管试验加载段与试验段柱子内径相同, 均为 $\phi 50$ mm, 加载段长 1000 mm, 试验段长 400 mm。

激波强度通过贮气包出口压力控制, 通过试验确

定激波强度分别为 3、4 和 5 kg/cm², 由加载段压力和试验段压力比, 可以换算出激波的马赫数 M_s 为 1.5~1.8。

试验样品装样量 600 g, 装样高度 23.5 cm, 矿柱底部和顶部均装有粗砂和玻璃微珠作为缓冲过滤层。试验设有对照组。

1.3 渗透性测量

采用变水头法^[17]测量矿柱的渗透性, 试验装置如图 3 所示。

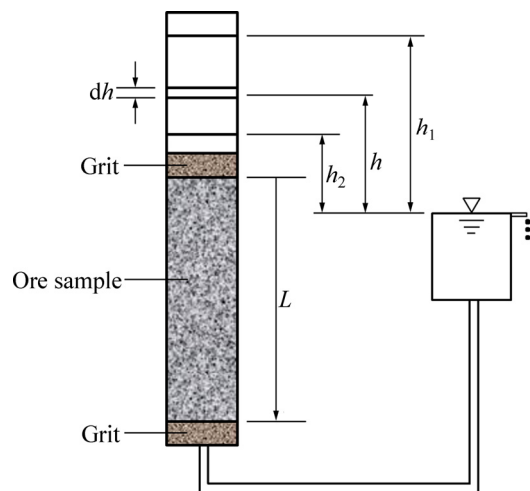


图 3 变水头法测定渗透系数原理图

Fig. 3 Schematic diagram of permeability coefficient measured with variable head method

在渗透试验过程中任一时刻 t , 变水头的水位为 h , 经过时间 dt , 浸出柱中的水位下落 dh , 则在时段 dt 内经过细管的流量 dQ 为

$$dQ = Adh \quad (2)$$

式中: A 为浸出柱截面积。

根据达西定律, 在时段 dt 内流经试样的渗水量又可表示为

$$dQ = k \frac{h}{L} Adt \quad (3)$$

式中: L 为矿柱高度; k 为渗透系数。

联立式(2)和式(3)并进行积分:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{L}{k} \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h} dh \quad (4)$$

即可得出矿柱的渗透系数 k :

$$k = \frac{L}{t_2 - t_1} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为不同计时时刻; h_1 、 h_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻浸出柱中对应的水头。

1.4 孔隙结构检测

冲击波作用于散体介质时, 在散体介质中形成超压, 并向前传播, 当超压超过散体介质的强度极限时, 会引起散体结构破坏和颗粒重排, 导致散体孔隙结构的变化, 宏观上表现为孔隙率的变化。在渗流特性上表现为渗透性的变化即渗透系数的变化。采用 X 射线 CT 技术观察激波作用前后试验柱中散体孔隙结构的变化, 研究激波对堆浸散体结构的影响。

1.5 浸出率计算

浸出率是判断浸出效果好坏的重要指标, 本次试验采用液计浸出率评价浸出结果。液计浸出率是根据溶液中目标金属离子浓度和溶液体积计算, 计算方法如式(6)所示。

$$R_i = \frac{\alpha_i V_i}{QC} \times 10^4 \quad (6)$$

式中: R_i 为液计浸出率, %; α_i 为第 i 级反应合格液质量浓度, g/L; V_i 为第 i 级反应合格液的体积, L; Q 为浸出前矿石质量, g; C 为浸出前矿石中铜含量, %。

2 结果与讨论

2.1 激波的传播与衰减

当激波作用在堆浸散体介质上时, 以超压 ΔP 向前传播, 超压可用下式表示。

$$\Delta P = P - P_g \quad (7)$$

式中: P 为冲击波波阵面作用与散体介质上的压力, P_g 为介质孔隙流体压力。

由于散体介质的渗滤与弥散效应, 冲击波强度很快衰减, 以应力波或振动波向前传播。根据 LEVY 等^[18]的实验结果可以发现, 冲击波在散体介质中衰减很快, 且随着传播距离的增加, 冲击波波阵面的超压迅速下降, 下降曲线近似为负指数形式, 即

$$\Delta P = ae^{-x} \quad (8)$$

式中: a 为常数; x 为传播距离。

2.2 试样孔隙结构变化

2.2.1 孔隙率

试验样品的孔隙率 ϕ 由下式确定。

$$\phi = 1 - \frac{\rho_c}{\rho_s} \quad (9)$$

式中: ρ_c 为样品的密度, ρ_s 为样品的颗粒密度。

试验过程中孔隙率随激波强度的变化见图 4。

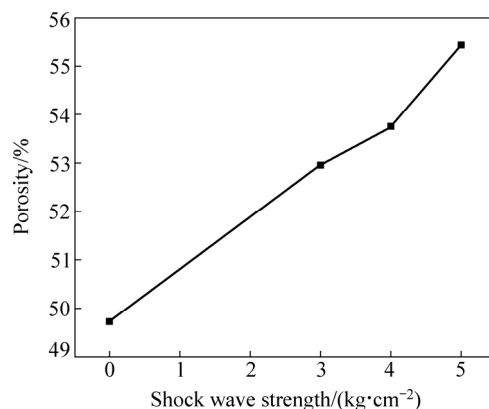


图 4 激波强度与孔隙率的关系

Fig. 4 Relationship between shock wave strength and porosity

由图 4 可以看出, 矿柱的孔隙率随激波强度的增大而加大, 孔隙率由 49.72% 增大至 55.44%, 提高了 5.72%。

2.2.2 CT 扫描图像

在试验柱上设置标记点, 试验样品孔隙结构的变化通过 X 射线 CT 扫描, 分析应力波(激波强度 5 kg/cm²)加载前后试验样品标记点的孔隙结构的变化, 以此分析试样孔隙结构的变化, 见图 5。在激波加载前后, 样品顶底部用筛板固定, 基本保持 CT 扫描过程中样品结构不变。

图 5 中左侧为激波作用前, 右侧为激波作用后。图 5(a)中扫描位置距矿柱底部 18 cm, 图 5(b)中扫描位置距矿柱底部 10 cm。

对 CT 扫描图像进行二值化处理后, 计算孔隙率的大小, 结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 在应力波作用后, 两个位置的孔隙率均得到了增加。图 6(a)中的孔隙率更大, 因为其位置相对较高, 密实程度小。图 6(b)位于矿柱下方, 密实程度大, 孔隙率相对较小, 但其更接近应力波源头, 应力波对该位置的松动效果更为明显。

2.2.3 孔隙直径分布

不规则断面孔隙的直径可以用当量直径来描述, 当量直径即不规则孔隙断面内切圆的直径。为了了解激波作用前后试样孔隙直径分布的变化情况, 利用试验前后样品标志断面的 CT 扫描图像, 通过分析统计

标志断面孔隙当量直径的分布情况, 分析试样在试验前后宏观孔隙当量直径分布的变化, 标志断面孔隙当量直径分布的变化情况见图 7。

由图 7 可知, 在应力波作用后, 矿柱孔隙直径由 0.28 mm 增大至了 0.37 mm, 提高了 32%。

2.3 渗透系数的变化

渗透系数采用变水头法测试, 利用式(5)计算求得。激波加载前后渗透系数如图 8 所示。

通过图 8 可以看出, 矿柱的渗透系数随着激波强度的增大而加大, 由初始的 $7.31 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 提高至了 $7.73 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。

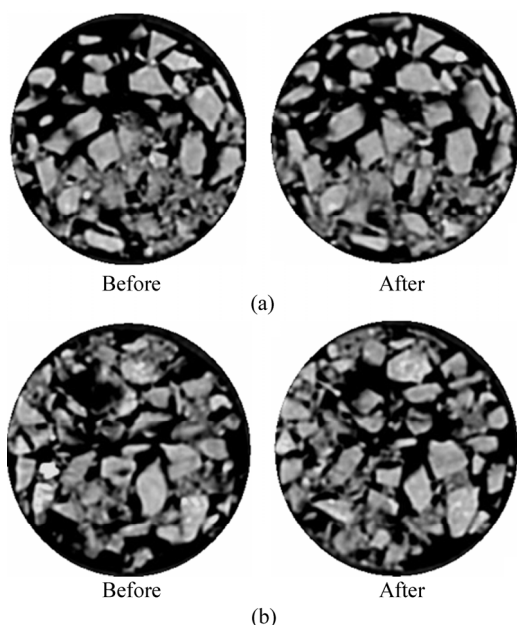


图 5 激波作用前后试样结构变化

Fig. 5 Structure change of sample before and after shock wave action: (a) 18 cm to bottom; (b) 10 cm to bottom

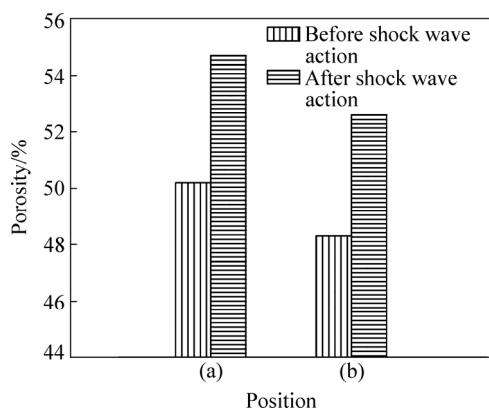


图 6 激波作用前后孔隙率变化

Fig. 6 Porosity change of sample before and after shock wave action: (a) 18 cm to bottom; (b) 10 cm to bottom

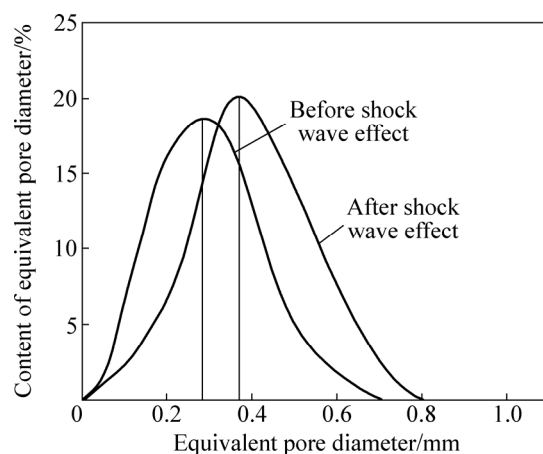


图 7 激波作用前后孔隙直径分布

Fig. 7 Pore size distributions of cross sections before and after shock wave action

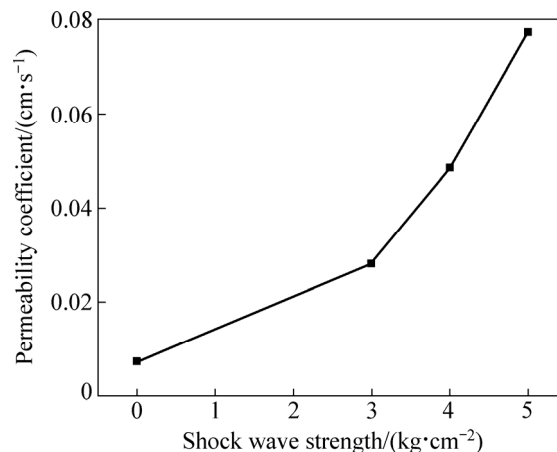


图 8 激波作用下渗透系数的变化

Fig. 8 Change permeability after shock wave action

在冲击波作用后, 试样被松动, 继续对试样进行喷淋, 结果发现试样重新发生沉降, 孔隙率降低。但与激波作用前相比, 孔隙率仍然较高, 说明存在残余变形。测试试样的孔隙率和渗透系数随时间和喷淋量的关系, 试验方法同前, 试验结果见图 9。

图 9 表明试样的渗透系数随喷淋时间增加而降低, 但渗透系数在一定时间内保持相对较高的水平, 说明激波松堆后有利于改善试样的渗透性。

2.4 矿石浸出率变化

使用强度为 5 kg/cm^2 的激波对矿柱进行了浸矿试验, 同时与对照组进行浸出率对比。浸矿试验共进行了 34 d, 每 2 d 检测一次浸出液中的铜离子含量, 并计算出铜的浸出率。铜的液计浸出率随时间的变化曲线如图 10 所示。

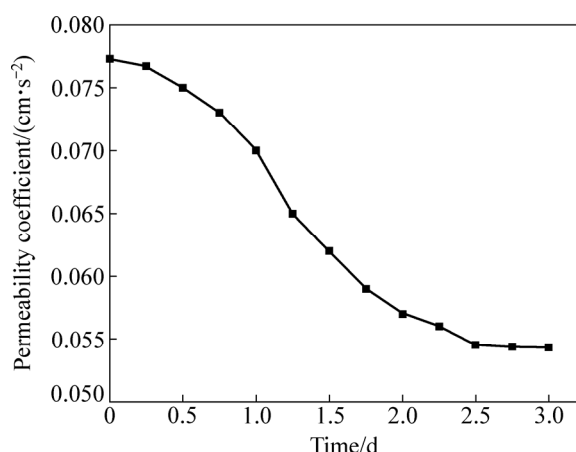


图9 激波作用后渗透系数随时间的变化

Fig. 9 Change of permeability after shock wave action

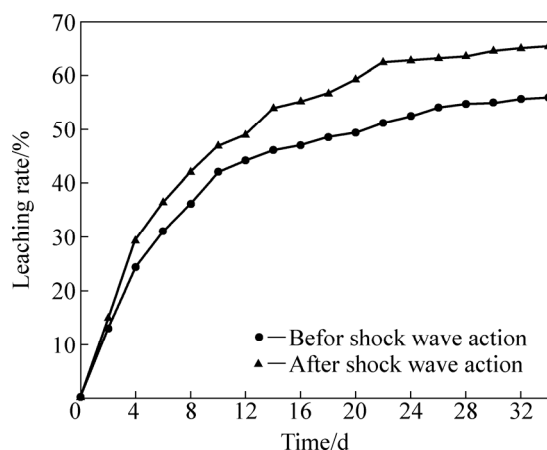


图10 激波作用前后浸出率的变化

Fig. 10 Changes of leaching rate before and after shock wave action

在柱浸试验初期, 浸出液浓度最高, 铜浸出率上升较快。随着浸出反应的不断循环进行, 铜离子浸出的速率减小, 曲线变化趋于平缓。在浸出后期, 铜的浸出率几乎不发生变化, 浸出液中的铜离子几乎不再增加, 试验结束。在经过应力波作用后, 浸出率由55.96%提高至65.27%, 增幅达9.31%。

浸出率结果说明应力波作用在提高矿石渗透性的同时, 也提高了矿石的浸出率。首先, 浸柱渗透性的改善说明浸出液在矿石中的流动更加畅通, 有利于浸出液与目的矿物接触, 进行化学反应; 其次, 目的矿物在溶液中溶解, 有用组分被及时运移, 促进了浸出过程的外扩散作用, 提高了浸出速度; 此外, 矿柱具有良好的渗透性不仅是竖直方向的, 在水平方向也是如此, 使得浸出液在矿石中分布更加均匀, 使浸出反应更加充分。

在浸出反应初期(0~10 d), 两组浸出率差距不大。但随着反应时间的延长(11 d 后), 浸出率间的差距变大。这是由于在反应开始阶段, 浸出液浓度高, 相对于对流扩散作用而言, 化学反应占据主导地位。但浸出反应产生的化学沉淀以及细颗粒运移堆积使矿柱的渗透性变差, 此时溶液流动性能成为制约浸出提高的主要因素, 激波改善的渗透性的效果才充分体现出来。

3 激波强化渗流原理

3.1 激波的形成

冲击波作用于堆浸散体介质时, 会在介质中产生应力波。冲击波在宏观上表现为一个高速运动的高温、高压、高密度曲面, 穿过该曲面时介质的压力、密度、温度等物理量都发生急剧的变化, 即所谓的“突变”或“跃变”。以活塞在圆筒内的运动为例, 说明激波的形成过程。

如图11所示, 活塞在时刻 t_1 缓缓地在圆筒内运动, 就会产生一个平面声脉冲, 形成扰动, 此脉冲在活塞

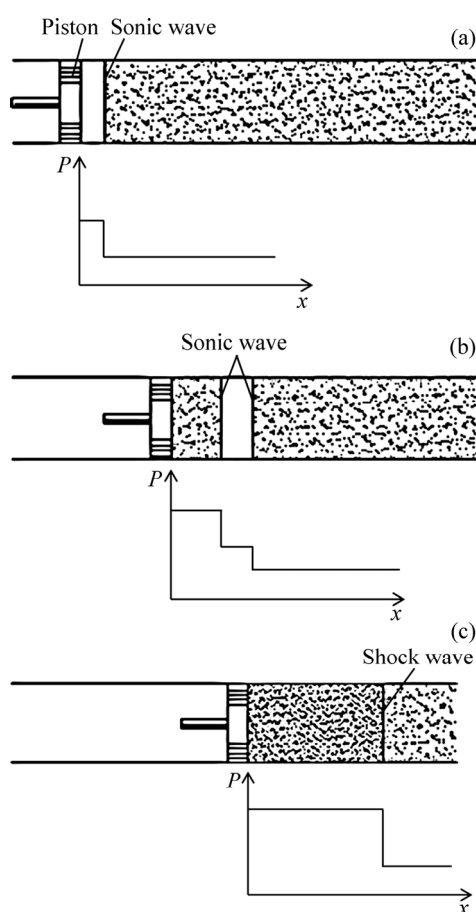


图11 活塞运动产生的激波

Fig. 11 Shock wave induced by piston motion

前面以声速向前迅速运动,这个脉冲将气体轻轻地加热和压缩,如图11(a)中压力-距离曲线(P, x)所示。

如果在时刻 t_2 再推动一下活塞,这时就产生另外一个声脉冲,它进一步加热和压缩气体。因为这个脉冲是在第一个脉冲加热过的气体中运动,所以它将运动得更快一些,并将追上第一个脉冲且与第一个脉冲结合(合并)而形成是一个非常弱的激波。图11(b)就表示这个过程。

最后,由于连续推动活塞,结果在时刻 t_3 就由压缩脉冲或压缩波产生一个强激波,如图11(c)所示。从(P, x)曲线可以看出,在激波面处发生压力阶跃变化,它总保持在活塞面的右前方。类似地,所有的物理量,如温度、密度和质点速度,也都发生阶跃变化。在最后一情况中,激波前面质点的速度是零,激波后面质点的速度值则与激波的强度相一致,它与活塞的速度相同。也就是说,活塞速度愈快,激波就愈强。

如果活塞从静止状态脉冲地加速到有限速度值,则激波就立即产生,并且从活塞面到激波面之间的所有物理量均保持为常数。实际上,这种脉冲运动可在激波管内使高压下的薄膜片(玻璃纸或金属)突然破裂来模拟。

3.2 激波基本方程

激波波阵面上的质量、动量和能量守恒关系式构成了激波的基本方程,对活塞在圆筒中运动所形成激波的一维平面波情况,激波的基本方程为

$$\rho(D-u)=\rho_0(D-u_0) \quad (10)$$

$$\rho(D-u)^2+p=\rho_0(D-u_0)^2+p_0 \quad (11)$$

$$e+\frac{p}{\rho}+\frac{1}{2}(D-u)^2=e_0+\frac{p_0}{\rho_0}+\frac{1}{2}(D-u_0)^2 \quad (12)$$

式中: D 为激波速度, u 、 ρ 、 p 、 e 分别为介质的质点速度、密度、压力和比内能。带下标的和不带下标的量分别表示该量在激波波阵面两边的值。一般把相对波阵面而言介质质点朝向波阵面流动的一边叫波前,另一边叫波后,带下标“0”的量表示波前的量。

若激波波前状态已知,再加由状态方程 $e=e(p, \rho)$, 则以上式(10)~(12)中的未知量共有4个:冲击波速度 D 及波后的 p 、 ρ 、 u 。所以,为了确定激波,必须在这4个量中再给定任何一个。若把坐标取在激波波面上,即只考虑运动的相对速度 $v=D-u$ 时,以上关系式就可以完全确定激波。

对多方气体,有状态方程

$$e=\frac{p\tau}{\gamma-1} \quad (13)$$

式中: $\tau=1/\rho$, 为多方气体的比容; γ 为多方气体常数。

若给定了波前状态,并给出激波速度,则可求出波后的 u 、 p 和 ρ , 即

$$\begin{cases} u-u_0=\frac{2}{\gamma+1}(D-u_0)\left[1-\frac{c_0^2}{(D-u_0)^2}\right] \\ p=\frac{2}{\gamma+1}\rho_0(D-u_0)^2-\frac{\gamma-1}{\gamma+1}p_0 \\ \frac{\rho}{\rho_0}=\frac{(\gamma+1)p+(\gamma-1)p_0}{(\gamma-1)p+(\gamma+1)p_0} \end{cases} \quad (14)$$

对凝聚态物质,有试验关系式:

$$D=c_0+\lambda u \quad (15)$$

式中: c_0 、 λ 均为常数。

则有

$$\begin{cases} D=c_0+\lambda u \\ \frac{\rho}{\rho_0}=\frac{D}{D-u} \\ p=\rho_0 D u=\lambda \rho_0 u^2+\rho_0 c_0 u \end{cases} \quad (16)$$

当一个强超压激波通过未受扰动的介质时,受扰动部分的压力、温度和密度要增高数倍。当激波强度超过介质的动抗剪强度时,堆浸散体介质将发生结构破坏,孔隙率发生变化,引起浸堆渗透系数的改变。激波作用于饱和堆浸散体介质时,堆中的溶浸液受到冲击载荷的作用,孔隙流体压力增高,有利于加快溶液的渗流。

3.3 矿堆结构变形

3.3.1 矿堆的骨架变形

骨架变形包括骨架本身整体变形和构成骨架的散体颗粒的变形,对堆浸散体介质而言,在低压时决定于散体颗粒接触面上结合物的弹性变形;高压时决定于结合物的破裂和各颗粒的位移(塑性变形),如图12所示。

在应力波作用下,堆浸散体介质的结构变形和颗粒变形都存在,散体多孔介质总的变形是这两种变形的代数和。

3.3.2 矿堆所有相变形

当矿堆受到应力波等高速冲击载荷作用时,孔隙流体来不及排出,散体的变形就由所有相的变形决定,即所有相变形决定于各个相的体积压缩量。此时,散体单元在应力梯度作用下发生变形,单元总体积的变化等于各项体积变化的总和,即

$$\frac{\Delta V}{V_0}=\frac{\Delta V_s}{V_0}+\frac{\Delta V_p}{V_0}=\frac{\Delta V_s}{V_0}+\frac{\Delta V_w}{V_0}+\frac{\Delta V_a}{V_0}+\frac{\Delta V_c}{V_0} \quad (17)$$

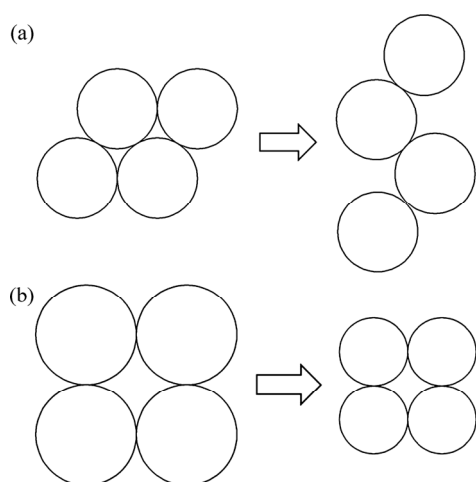


图 12 矿堆骨架变形

Fig. 12 Frame deformation of granular media: (a) Structure deformation; (b) Particle deformation

式中： V_0 为矿堆单元体初始总体积； ΔV_s 为矿堆单元固相体积； ΔV_p 为矿堆单元孔隙总体积； ΔV_w 为矿堆单元液相体积； ΔV_a 为矿堆单元气相体积； ΔV_c 为矿堆单元液膜体积。

当矿堆受到外载作用时，两种机制同时都起作用，然而，在加载过程的某一些阶段，其中的一种机制的效应可以大到使另一种机制能忽略的程度。

4 结论

1) 应力波改变了矿柱的孔隙结构。矿柱的孔隙率随着应力波强度的增加而加大，孔隙率提高了 5.72%；CT 扫描图像显示应力波对于矿柱底部的作用更为明显；孔隙当量直径扩大了 32%。

2) 应力波改善矿柱渗透性的作用明显，强度为 5 kg/cm² 的激波将矿柱的渗透系数提高了 10 倍。之后，随着溶液的流动，渗透性有所下降，但仍维持在较高水平。

3) 经过应力波作用后，矿石浸出率提高了近 10%。同时，通过浸出率随时间变化曲线可以看出，应力波改善矿堆渗透性的作用，在浸出后期对于浸出率的提高起到了关键作用。

REFERENCES

[1] 王少勇, 吴爱祥, 尹升华, 缪秀秀, 胡凯建. 外加电场对细粒散体浸堆渗透性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1864–1870.

WANG Shao-yong, WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, MIAO Xiu-xiu, HU Kai-jian. Effect of applied electric field on permeability of fine granules heap[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(7): 1864–1870.

[2] WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, LIU Jin-zhi, YANG Bao-hua. Formative mechanism of preferential solution flow during dump leaching[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(5): 590–594.

[3] POISSON J, CHOUTEAU M, AUBERTIN M. Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile[J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 67(2): 179–192.

[4] MOLSON J W, FALA O, AUBERTIN M. Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2005, 78(4): 343–371.

[5] BOUFFARD S C. Agglomeration for heap leaching: Equipment design, agglomerate quality control, and impact on the heap leach process[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(15): 1115–1125.

[6] 吴爱祥, 艾纯明, 王贻明, 胡凯建. 表面活性剂对铜矿石堆浸渗透性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 895–901.

WU Ai-xiang, AI Chun-ming, WANG Yi-ming, HU Kai-jian. Influence of surfactant on permeability of heap leaching of copper ore[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(3): 895–901.

[7] PENG An-an, LIU Hong-chang, NIE Zhen-yuan, XIA Jin-lan. Effect of surfactant Tween-80 on sulfur oxidation and expression of sulfur metabolism relevant genes of *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(12): 3147–3155.

[8] 张均锋, 孟祥跃, 谈庆明, 俞善炳. 冲击荷载下饱和砂土密实与排水过程的初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 622–625.

ZHANG Jun-feng, MENG Xiang-yue, TAN Qing-ming, YU Shan-bing. Primary analysis on process of densification and drainage of saturated sand under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 622–625.

[9] 张均锋, 孟祥跃, 谈庆明, 俞善炳. 冲击荷载下饱和砂土砂面沉降的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 519–523.

ZHANG Jun-feng, MENG Xiang-yue, TAN Qing-ming, YU Shan-bing. Laboratory study on the settlement of sand surface of saturated sand under impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 519–523.

[10] 李世海, 徐以鸿, 张均锋, 孟祥跃. 冲击荷载作用下饱和砂土孔压特性的简化力学模型与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 321–325.

- LI Shi-hai, XU Yi-hong, ZHANG Jun-feng, MENG Xiang-yue. Simplified mechanical model and analysis on the character of saturated sand under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 321–325.
- [11] 国胜兵, 王明洋, 钱七虎. 饱和砂土爆炸液化特性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 427–535.
- GUO Sheng-bing, WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. Study on characteristics of explosion liquefaction of saturated sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 427–535.
- [12] 王明洋, 赵跃堂, 钱七虎. 饱和砂土动力特性及数值方法研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 737–742.
- WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, QIAN Qi-hu. Study on dynamic behaviour and numerical method for saturated sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 737–742.
- [13] BRITAN A, BEN-DOR G, IGRA O, SHAPIRO H. Shock waves attenuation by granular filters[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(4): 617–634.
- [14] BRITAN A, BEN-DOR G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(5): 623–642.
- [15] BRITAN A, BEN-DOR G, SHAPIRO H, LIVERTS M, SHREIBER I. Drainage effects on shock wave propagating through aqueous foams[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 309(1): 137–150.
- [16] 吴爱祥, 王贻明, 胡国斌. 采空区顶板大面积冒落的空气冲击波[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 473–477.
- WU Ai-xiang, WANG Yi-ming, HU Guo-bin. Air shock wave induced by roof falling in a large scale in ultra-huge mined-area[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(4): 473–477.
- [17] 王贻明, 吴爱祥, 杨保华. 机械压实作用对排土场堆浸渗透性的影响[J]. 金属矿山, 2007(12): 24–26.
- WANG Yi-ming, WU Ai-xiang, YANG Bao-hua. Effect of mechanical compaction on permeability coefficient of dump site leaching[J]. Metal Mine, 2007(12): 24–26.
- [18] LEVY A, SOREK S, BEN-DOR G, SKEWS B. Waves propagation in saturated rigid porous media: analytical model and comparison with experimental results[J]. Fluid Dynamics Research, 1996, 17(2): 49–65.

Effect of shock wave on permeability and leaching rate during heap leaching

AI Chun-ming¹, WANG Yi-ming², LIU Chao³

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mines,

Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Wanbao Mining Limited, Beijing 100053, China)

Abstract: To improve heap permeability and leaching rate of ore, the shock tube experiment was introduced in the heap leaching. The improved effect of the permeability with the shock wave was examined based on both the seepage mechanics principle and the CT scanning. The results show that shock wave has impact on the pore structure of heap leaching medium, and the equivalent diameter of pillar pore is increased by 32%, the porosity is increased by 5.72%. When the permeability of pillar is measured by the means of variable water head, the permeability coefficient increases 3.8–10 times. The solution seepage which reflects certain timeliness has reinforced. The ore leaching rate increases by nearly 10% due to the function of the shock wave. In the late reaction, the effect of the reinforcement is more apparent.

Key words: shock wave; heap leaching; permeability; leaching rate; pore structure

Foundation item: Project(51604138, 51674012) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2015-03-12; **Accepted date:** 2018-01-24

Corresponding author: WANG Yi-ming; Tel: +86-10-62332264; E-mail: ustbwym@126.com

(编辑 何学锋)