

某露天矿富水区水孔爆破现场试验和参数优化*

王堃, 柏树丰, 王天龙, 严頔

(云南磷化集团有限公司, 云南昆明 650600)

摘要:某露天矿深部采场矿岩孔隙水发育,炮孔充水严重,影响矿山爆破作业施工和爆破效果。为解决上述问题,通过装药周边水介质冲击传载机理的理论分析和现场试验,对爆破参数进行优化。现场试验设计以充水孔炸药单耗下降8%、15%、20% 3个层次水平与孔网参数为5.5 m×5 m、6 m×4.5 m、7 m×4 m进行方案组合。理论分析和试验研究表明:利用炮孔中水介质实现不耦合装药,可有效利用水介质高效传载、孔壁初始裂纹激发、爆轰产物与水介质高压联合增裂的效应,达到显著降低炸药单耗和提高爆破效果的目的。试验确定6 m×4.5 m的孔网参数与炸药单耗降低15%的组合方案为最优,其综合爆破效果最佳,大块率、冲孔率分别控制在5%、8.5%以内。试验结果可为类似矿山优化水孔爆破参数、改善水孔爆破效果提供参考。

关键词:露天矿;水孔爆破;水介质传载;参数优化

0 引言

随着国内露天矿台阶爆破向设备大型化、装药自动化方向发展,大孔径深孔爆破在矿山生产中得到了广泛应用,爆破质量、效率及安全性有了较大改善,取得了一定效果。但露天矿深孔台阶爆破过程中,受大气降水或地下水发育补给、孔隙含水等因素影响,经常出现水孔,有相当一部分露天矿或采石场的水孔爆破经常出现拒爆、冲孔、根底、大块率高等情况,爆破效果得不到保证。生产实际中多采取抽排水措施来消除水孔的不利影响,但实际效果随排水效率和现场情况的不同差异较大,爆破质量也未能从根本上得到改善。

长期以来,随着常规水压爆破理论研究和实际应用的不断发展,对利用水作为耦合介质的耦合爆破技术的研究逐渐深入,并取得较多成果^[1]。国内外学者研究认为^[2-4],水相对于空气介质密度较大,可压缩性相对较差,在炸药爆轰瞬间,在孔内水介质中产生的高强度冲击波显著高于空气介质,与空气、细沙等惰性耦合介质相比,用水介质耦合时可增大孔间距50%~70%,或可减少装药50%。黄年辉^[5]研究表明,水介质耦合爆破冲击波传载损耗小,炮孔

内压力持续作用时间长。冉恒谦等^[1]研究了水介质耦合动水压力破岩作用,测试分析了爆生气体后续膨胀挤压作用下水介质压力变化规律。尹根成等^[6]通过对水压爆破机理的研究表明,药柱爆轰波在水中形成冲击波到达孔壁时发生反射,反射波传到分界面后,水介质达到准静压力状态,在反射波-准静压力共同作用下,孔壁岩体发生振动、变形和产生初始裂纹,而透射应力波压缩岩体产生切向拉伸应力,当拉应力大于岩石动态抗拉强度时,岩体产生径向裂纹。赵华兵等^[7]证明了水介质耦合爆破能显著提高炸药利用率和破岩能力。杨敬轩等^[8]围绕围岩裂隙充水承压爆破控制机理,开展了系列试验研究,并建立了承压爆破力学机制模型,提出了波动传载先导破岩与联合传爆介质后续膨胀挤压增裂原理,并取得了良好效果。

针对大型露天矿富水区台阶深孔爆破,抽排水不仅增加成本和工作量,同时受地形和采场排水系统布设的制约,效果往往不及预期。以云南磷化集团某矿山富水区矿岩台阶爆破工程为例,在总结吸收前人水压爆破优秀成果的基础上,对影响水孔爆破效果的原因和充水炮孔水耦合爆破机理进行了理论分析和现场试验,对爆破参数进行了优化。

* 收稿日期: 2023-05-16

作者简介: 王堃(1972—),男,甘肃天水人,硕士,高级工程师,从事采矿管理及工程爆破工作,E-mail:1298483664@qq.com。

1 工程概况

云南磷化集团公司的某大型露天矿山的采场台阶高度为 10 m, 钻孔设备采用 $\Phi 150$ mm 潜孔钻机, 钻孔深度为 9.6~11 m(超深 1.0 m)。近年来, 随着开采水平不断下降, 深部矿岩体岩溶裂隙水和碎屑岩裂隙水发育, 并受区域震旦系上统灯影组(zbdn)

含水层控制, 作为深部矿岩体水的补给来源, 岩层中岩溶、裂隙发育, 地下水动态稳定, 致使主要采坑内积水严重, 虽然布置了抽水设备设施, 但坑底矿岩工作面径流明显, 极大地影响了露天爆破作业和爆破效果。因此, 分析和优化水孔爆破参数, 对改善露天水孔爆破效果, 提高经济效益具有重要意义。目前采用的主要爆破参数见表 1。

表 1 爆破技术参数

台阶高度/ m	底盘抵抗线/ m	单孔装药量/ kg	孔距/ m	排距/ m	装药长度/ m	堵塞长度/ m	线装药密度/ (kg/m)	炸药单耗/ (kg/m ³)
10	4.6	90~105	5.5~6	4~5.5	6~7	>3.5	17.5	0.38

2 富水区充水炮孔对爆破效果影响分析

2.1 水孔影响爆破效果的原因分析

富水区现场水孔爆破的实施, 按耦合装药条件下的无水干孔爆破参数设计, 没有考虑水对穿孔质量的影响, 以及爆破过程中水介质的作用及水介质对矿岩介质的影响, 忽视了在水孔环境下爆炸作用对周围岩石破坏范围和效果的影响, 导致经常出现冲孔、大块、根底等现象, 使炸药的爆炸能量没有得到充分的利用, 具体原因如下。

(1) 孔网参数不合理, 有效孔深不够。水介质相对于空气介质密度较大, 可压缩性相对较差, 在炸药爆轰瞬间, 孔内水介质中产生的高强度冲击波显著高于空气介质。大气压条件下水介质冲击波初始压力为 10^4 MPa, 而空气介质中冲击波初始压力约为 80~130 MPa。采用水介质可明显提高炸药能量的介质传载效率, 从而提高炸药能量利用率。在实际施工中未考虑水孔爆破在人工装药条件下须采用径向不耦合装药, 从而选择的炸药单耗、单孔装药量等参数值偏大并高于实际需要; 反之, 采用耦合装药条件下的无水干孔孔网参数可能与实际相比偏小, 对孔网参数值应作适当调整。

当在含水量较大或涌水的岩层中穿孔作业时, 由于孔壁周围岩缝中静水压力作用, 使钻机排渣困难, 当钻杆从钻孔中提出后, 未排出的岩渣又落回孔底, 使得穿孔深度小于炮孔设计深度, 导致炮孔有效深度不够。经现场实测统计, 富水区炮孔内未清岩渣占钻进孔深的 4%~8%, 平均约为 0.55 m。另外, 在设计单孔药量确定的情况下, 由于炮孔内水的浮力作用以及岩粉与水容易生成泥浆, 使炸药不容易下沉, 在事实上实现了不耦合装药, 导致炮

孔的线装药密度变小, 实际为 12.5 kg/m。装药长度增大, 多数炮孔堵塞长度低于设计长度; 堵塞长度不足加之水流影响, 造成冲孔率高达 30% 以上; 爆后大块、根底多。为了保证有效孔深, 水孔的钻孔深度应大于设计孔深。

(2) 炸药单耗不合理。根据现场岩石性质选择的炸药单耗, 未考虑爆破过程中水这种不可压缩介质的高波阻抗特征; 未充分利用水介质传爆过程中自身消耗的变形能较少, 波强度衰减较慢, 介质密度高, 惯性大, 爆轰产物在水介质中膨胀时间明显增加, 爆轰波均匀传载、冲击波作用时间延长和水楔作用对裂隙扩展等有利于岩石破碎的积极因素, 以及水介质对矿岩介质强度的影响, 从而使得孔网参数可能与实际需要不相符, 应作适当调整。

(3) 装药质量差, 拒爆现象偶有发生。对于水孔爆破, 目前受装药方式限制, 采用人工装药。装药的基本方法是: 选定责任性较强的爆破员, 用竹竿将药卷缓慢压入水孔内, 并尽力使两个药卷卡在孔壁之间, 确保药卷间接触和一定的装药长度。受炮孔涌水和浮力作用, 存在水中装药连续性中断或起爆药包雷管在装药过程中脱离的情况, 偶尔会引起少量炮孔拒爆。另外, 炮孔涌水和浮力作用对堵塞质量也会产生不利影响。

以上问题是导致水孔爆破根底、冲孔、大块率高的根本原因。因此, 为解决水孔爆破存在的问题, 提高水孔爆破质量是很有必要的。

2.2 水对岩石强度的影响

在富水区域矿岩孔隙及裂隙中广泛地存在水, 在冲击动载作用下来不及排出或不易排出, 产生裂隙水压力, 此时存在于岩石内部的初始微裂纹端部处于受拉状态, 破坏岩石的结构连接, 导致岩石有

效应力减小,从而降低了岩石的抗剪强度。

饱和多孔岩石的抗剪强度公式:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \varphi = c + (\sigma - P_w) \tan \varphi \quad (1)$$

M-C 主应力表达式:

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\varphi + R_c \quad (2)$$

有效应力表达式:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 N_\varphi + R_c \quad (3)$$

其中:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - P_w, \sigma'_3 = \sigma_3 - P_w \quad (4)$$

式中, τ_f 、 c 、 ϕ 、 P_w 、 σ'_1 、 σ_1 、 σ_3 等参数分别为岩石抗剪强度、内聚力、内摩擦角、孔隙水压力、有效主应力、最大主应力、最小主应力; $N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$; $R_c =$

$$\frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}。$$

将式(4)代入式(3)后得:

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\varphi + R_c - P_w (N_\varphi - 1) \quad (5)$$

由式(5)可知, $-P_w(N_\varphi - 1)$ 恒为负值,说明孔隙水压力减小了抗剪强度中的摩擦阻力,其程度与孔隙水压力大小有关,随着孔隙水压力的增大,岩石强度降低。

2.3 炮孔充水时爆破机理分析

2.3.1 装药周边水介质冲击转载机理分析

采用人工装药时,受成品药包包装及孔径等限制,孔内药包之间、药包与孔壁之间存在一定间隙,相当于空气介质不耦合装药结构。炮孔内炸药爆轰波及爆轰产物对空气介质的压缩做功和产热,导致空气介质对冲击波转载衰减程度远大于装药周边水介质的情况,而未发挥冲击破岩作用。由于高压条件下水介质压缩性不显著,如在冲击波波前过后水介质压力超过 5 GPa 时,水介质密度达到 $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,即使压力达到 25 GPa,水介质密度也仅为 $1.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。因为水介质密度、波阻抗指标值远大于空气介质相应指标,水介质的转载效率高,爆炸能量传递损耗减少。

根据爆炸冲击波理论,爆轰波入射到不同波阻抗两介质界面时,将导致界面处出现反射冲击波和透射冲击波。爆轰冲击波在装药和装药周边两种介质面的反射系数 F 及透射系数 T 见式(6)。

$$\begin{cases} F = \frac{\rho_2 c_{p2} - \rho_1 c_{p1}}{\rho_2 c_{p2} + \rho_1 c_{p1}} \\ T = \frac{2\rho_2 c_{p2}}{\rho_2 c_{p2} + \rho_1 c_{p1}} \\ 1 + F = T \end{cases} \quad (6)$$

式中, ρ_1 、 ρ_2 分别为两种不同介质的密度, kg/m^3 ; c_{p1} 、 c_{p2} 分别为纵波传播速度, m/s 。

由式(6)可知,透射系数 T 恒大于零。当装药周边介质波阻抗较小($\rho_1 c_{p1} > \rho_2 c_{p2}$)时,入射爆轰波在两介质界面的反射系数 $F < 0$,则进入装药周边介质的冲击波透射系数 $T < 1$ 。这表明透射波的强度与入射波相比有所降低,其降低的幅度与进入装药介质的反射拉伸波的强度相当。较之水介质,空气介质波阻抗值极小,导致装药周边水介质透射系数是空气介质的 2 倍,约为 0.6,表明提高装药周边介质的波阻抗,有利于增加爆轰波对装药周边介质的作用强度,提高其在介质层内激起冲击波的强度和破坏能力。增强的水介质冲击波有利于产生对孔壁围岩破碎的导向作用。

研究表明,钻孔中炸药爆轰波的高速撞击会在水介质中激发高强度的冲击波,使孔内水处于高压状态;高强度冲击波后压力随转载介质初始密度的增加而近似呈线性增大,且当达到一定值时,冲击波后压力将达到甚至超过炸药爆轰压力;当高强度冲击波穿透有限厚度的水介质进入孔壁界面时,其衰减量也很少,岩石透射冲击波强度约为 2~3 GPa,进而对孔壁围岩产生压缩破坏作用;且孔壁围岩波阻抗相对较大,在产生透射冲击波的同时,也产生一定强度的反射冲击波,并以压缩波的形式进入已受透射冲击波扰动的水介质层。

当冲击波在钻孔内的水介质中经过多次反射和透射后,水介质内应力趋于均匀,水介质承载系数将不断增大,并限制水介质中激起的冲击波透射到钻孔围岩中,从而显著提高水介质后续膨胀做功的能力。当高强度冲击波穿透有限的水介质厚度进入孔壁界面后,即对孔壁围岩产生压缩破坏,形成压实区或粉碎区,同时在粉碎区边界衰减为应力波,此时在应力波作用下,钻孔粉碎区边界外侧产生径向拉伸裂纹,并与孔壁压实区或粉碎区贯通。

随着应力波强度的持续降低和钻孔孔腔围岩积累的压缩变形能的释放,径向裂隙区域产生与应力波方向相反的拉伸应力,进而在围岩中形成环向拉伸裂隙。在围岩应力波作用下,钻孔周边围岩径向拉伸裂纹、环向拉伸裂隙受压进一步发育、扩展,并与矿岩中存在空隙水压力的天然裂隙叠加、耦合,为下一步在高温高压爆轰产物推动的高压水介质条件下形成高速“水楔”,进入初始裂隙并均匀传递压力创造了条件。

2.3.2 爆轰产物推动高压水介质增裂机理分析

钻孔内爆轰产物的后续膨胀做功将推动水介质形成“水楔”并进入围岩初始裂隙,裂隙受压进一步发育、扩展,并产生更多次生裂纹,从而实现水介质对钻孔中远区围岩的增裂作用。长江水电科学院研究提出了岩石断裂韧度 K_{Ic} 与其抗压强度 σ_1 间的估算公式和围岩裂隙起裂判据,见式(7)和式(8)。

$$K_{Ic} = 0.141\sigma_1^{1.15} \quad (7)$$

$$K_1 = K_{Ic} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知,当裂纹尖端应力强度因子 K_1 达到岩石 I 型断裂韧度时,岩石处于临界应力状态,裂纹进行扩展,随着扩展长度增加, K_1 呈下降趋势。考虑裂纹之间的相互作用,张拉裂纹稳定扩展到一定临界扩展长度后,裂缝之间将贯穿连通,直至裂纹之间出现失稳而破坏。在较高围压下,尤其是在冲击动载条件下,裂隙岩体将沿结构面产生剪切断裂破坏,主要机制是:在剪切裂纹尖端出现稳定扩展的微张拉裂纹,引起两剪切裂纹之间的岩桥上出现微张裂纹,显著削弱岩石的剪切断裂韧度,从而促进裂纹进一步发展、贯穿。在水介质作用下,孔内爆轰产物的后续膨胀做功将推动高压水介质形成高速“水楔”,并均匀转载进入围岩初始裂隙,围岩获得更多的裂隙扩展动能,促进围岩裂隙发展并以更快的速度扩展。可见孔内水介质有效提高了传递给围岩的爆炸冲量,并延长了爆轰气体产物的膨胀作用,扩大了岩石的破碎范围,同时与干孔连续装药相比,水孔装药高度的提高,更有利于克服台阶上部大块和根底现象,达到了有利于岩石破碎的作用。

3 现场试验和爆破参数优化

3.1 合理选择孔网参数

结合水介质高效转载、爆轰产物与水介质高压联合增裂理论分析,在充分利用水介质不耦合装药有效提高炸药爆轰作用于岩石破碎的能量利用率的基础上,结合生产区实际使用的爆破参数,通过现场试验,以降低冲孔率和大块率为目标,对爆破参数重新设计如下。

(1) 钻孔深度。孔深影响炮孔装药量,是爆破后是否出现根底的一个重要参数。在爆破设计时,应重视水孔的有效孔深,充分考虑未清岩渣占钻进

孔深的 5%~10% 这一因素,应将原设计孔深加深 5% 以上,取超深 1.5 m,孔深 11.5 m。

(2) 底盘抵抗线。底盘抵抗线是影响爆破效果的重要参数,主要依据矿岩坚固性、孔径、炸药条件、炮孔密集系数等因素确定。现使用的底盘抵抗线为 4.6 m,能有效消除根底,可继续延用。

(3) 孔距、排距。钻孔孔径为 150 mm,在降低炸药单耗的基础上,孔网参数仍延用矿山日常采用的干孔孔网参数,孔排距以 5.5 m×5 m、6 m×4.5 m、7 m×4 m 组合,并测算单孔装药量和合理的堵塞长度,通过现场试验优化确定最优孔排距组合。

(4) 炸药单耗。通过炮孔充水时爆破机理、水介质增裂机理的理论分析,得出炮孔充水可极大提高炸药能量利用效率的结论,并参考相关试验数据,拟按 8%、15%、20% 降低炸药单耗进行现场试验。根据实际线装药密度和装药长度确定单孔装药量,以确保堵塞长度。根据现场实测的线装药密度为 12.5 kg/m,测算等效装药直径约为 130 mm,不耦合系数约为 1.15。

3.2 现场试验及参数优化结果

为改善富水区爆破大块率、冲孔率较高的现状,现场试验以不增加钻孔成本为基础,在维持现有延米爆破指标的基础上,充分考虑到水介质的均匀转载、高压水介质“水楔”增裂作用,确定爆破参数组合并编制现场试验方案。为方便现场钻孔施工,初选 3 组矿山常用的孔排距组合,分别为 5.5 m×5 m、6 m×4.5 m、7 m×4 m。并以干孔炸药单耗参数为基准,按分别降低 8%、15%、20% 三个水平与孔排距组合进行现场分区爆破试验,以观察统计方式收集爆堆形态、冲孔率以及采装过程中的大块率等数据,并通过现场试验验证方案的可行性。结合矿山具体情况,进行一系列试验并对各项爆破参数进行优化,得出适合于该矿岩条件下的最佳孔网参数,结果见表 2。

现场试验结果表明,初选出的 3 组孔排距组合中,6 m×4.5 m 方案在不同炸药单耗水平下爆破大块率最低,单耗降低 15% 时最优,为 7.8%,冲孔率介于另两孔排距组合之间;而在不同孔排距组合下,炸药单耗降低 15%、20% (分别为 0.32 kg/m³、0.30 kg/m³) 方案的冲孔率明显较低,大块率最低为炸药单耗降低 15% 的方案,炸药单耗为 0.32 kg/m³。6 m×4.5 m 孔排距组合及炸药单耗 0.32 kg/m³ 的组合方案的大块率、冲孔率分别为 3.3%、

表2 水孔爆破现场试验参数及试验结果汇总

项目	孔数	孔深/ m	底盘抵抗线/ m	孔距/ m	排距/ m	装药长度/ m	填塞长度/ m	单孔装药量/ kg	延米爆破量/ m ³	炸药单耗/ (kg/m ³)	冲孔率/ %	大块率/ %
1	40	11.5	4.6	5.5	5.0	7.7	3.8	96	27.5	0.35	10.5	10.9
	35	11.5	4.6	5.5	5.0	7.0	4.5	88	27.5	0.32	4.6	7.7
	34	11.5	4.6	5.5	5.0	6.6	4.9	83	27.5	0.30	3.0	7.2
2	44	11.5	4.6	6.0	4.5	7.5	4.0	94	27.0	0.35	8.6	11.5
	32	11.5	4.6	6.0	4.5	6.9	4.6	86	27.0	0.32	3.3	7.8
	35	11.5	4.6	6.0	4.5	6.5	5.0	81	27.0	0.30	5.0	10.1
3	35	11.5	4.6	7.0	4.0	7.8	3.7	98	28.0	0.35	7.9	11.4
	42	11.5	4.6	7.0	4.0	7.2	4.3	90	28.0	0.32	4.4	10.7
	30	11.5	4.6	7.0	4.0	6.7	4.8	84	28.0	0.30	2.0	11.5
4	135	9.6	4.3	6.0	4.5	5.8	3.8	72	27.0	0.32	3.4	7.3

7.8%。结合前3次现场试验成果,在钻孔深度为9.6 m的爆破作业中相关指标较好,达到了大块率、冲孔率分别控制在5%、8.5%以内的预期目标。

4 结论

(1) 基于某露天矿深部采场富水区炮孔充水严重进而影响爆破效果的问题,应用岩石力学和爆破理论分析了孔隙水压力对岩石抗剪强度的影响以及装药周边水介质冲击传载机理。利用炮孔中水介质可实现不耦合装药,有效利用水介质高效传载、孔壁初始裂纹激发、爆轰产物与水介质高压联合增裂的效应,从而达到显著降低炸药单耗和提高爆破效果的目的。

(2) 在水介质不耦合装药有效提高炸药爆轰作用于岩石破碎的能量利用率的基础上,结合生产实际使用的爆破参数,以降低冲孔率和大块率为目标,初选5.5 m×5 m、6 m×4.5 m、7 m×4 m 3组矿山常用的孔排距组合,并以干孔炸药单耗参数为基准,按分别降低8%、15%、20% 3个水平与孔排距组合,进行现场分区爆破试验。

(3) 现场试验结果表明,6 m×4.5 m的孔网参数方案在不同炸药单耗水平下,爆破大块率最低,炸药单耗降低15%时最优,为7.8%,冲孔率介于另两孔排距组合之间;在不同孔排距组合下,炸药单耗降低15%、20%的方案冲孔率明显较低,炸药单耗降低15%的方案大块率最低,此方案的炸药单耗

为0.32 kg/m³。最优方案为6 m×4.5 m孔排距组合及炸药单耗为0.32 kg/m³的组合方案,大块率、冲孔率分别为3.3%、7.8%。结合前3次现场试验成果,在钻孔深度为9.6 m的爆破作业中,相关指标较好,达到了大块率、冲孔率分别控制在5%、8.5%以内的预期目标。

(4) 对于类似孔内渗水量不大以及因降雨地表水渗入而积水的炮孔,不需采取排水疏干措施。不仅可使孔底积水变为对爆破有利的条件,提高爆破效果,而且可适当降低炸药单耗。

参考文献:

- [1] 冉恒谦,陈庆寿,李功伯,等. 爆炸动力水压力破岩系统的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2001(增刊1):258-261.
- [2] 吴顺川,李利平,张晓平. 岩石力学[M]. 北京:高等教育出版社,2021.
- [3] YUAN W, WANG W, SU X B, et al. Experimental and numerical study on the effect of water-decoupling charge structure on the attenuation of blasting stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 124: 104133.
- [4] 汪旭光,郑炳旭,张正忠,等. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [5] 黄年辉. 水压爆破试验效果[J]. 探矿工程,1989(6):57-58.
- [6] 尹根成,张英华. 水压爆破造缝提高煤层瓦斯抽放率技术[J]. 煤炭工程,2006(12):73-74.
- [7] 赵华兵,龙源,胡新印,等. 水耦合装药爆破荷载与岩石介质相互作用研究[J]. 西部探矿工程,2012(3):17-20.
- [8] 杨敬轩,刘长友,于斌. 围岩孔裂隙充水承压爆破控制机理[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2018.