

# 大密集系数爆破在单斜构造石灰岩矿爆破中的应用

曹敦明

中国建筑材料工业建设西安工程有限公司 陕西 西安 710075

**摘要：**新疆阿克苏地区四石场1号石灰岩矿体赋存于倾角较大的单斜构造中，地质结构稳定性较强，但自由面受限，采剥空间狭窄。根据现场生产实际情况，单次爆破作业量大、排数多，常规爆破方式在控制大块率、减少底根残留方面效果不佳，影响采装效率及后续工艺衔接。为提高爆破解体效果与作业经济性，采用大密集系数孔网参数进行爆破设计，通过适当减小排距、增大炮孔密度、优化装药结构与毫秒延期起爆顺序，实现能量集中释放，增强岩体破碎程度，有效控制底盘效应和后冲现象，形成合理堆积形态。该技术措施有助于提升铲装作业连续性与生产效率，降低二次破碎率，显著改善爆破作业的整体技术经济指标。

**关键词：**露天开采；单斜构造；大密集系数；爆破参数

## 1 引言

在国外露天矿山穿孔爆破设计实践中，参数选择普遍倾向于采用“大密集”爆破理念，其核心特征是将孔距与排距的比值控制在3至8之间<sup>[1]</sup>。该设计方式通过优化孔网结构，提高爆破能量的集中程度与利用效率，从而在岩石破碎质量、爆堆堆积形态及后续采装工序中展现出显著的技术优势。尤其是在欧美等矿山技术成熟地区，大密集爆破已成为深孔爆破的主流设计思路之一<sup>[2]</sup>。然而，在中国大多数露天矿山的穿爆实践中，受限于地质条件、设备能力和技术传统，孔距与排距的比值往往接近于1，导致爆破能量释放受限，应力波相互干扰显著，岩体破碎程度偏低，大块率偏高，进而增加了二次破碎成本，并降低了采装效率<sup>[3]</sup>。

因此，在中国矿山条件下，科学合理地优化孔距与排距的比值，提升密集系数，已成为提升爆破质效的重要课题。合理的孔网设计不仅能够有效控制炸药单耗，减少对周边岩体的扰动，还能优化爆破后的块度分布，使爆堆集中、松散度良好，便于装载设备高效作业，从而提高整体作业效率，降低综合生产成本<sup>[4]</sup>。

大密集系数爆破技术最早由瑞典爆破专家U. Langfous提出并加以系统化，其理论基础在于在维持单孔负担面积不变的前提下，通过适度增加孔距、减小排距，使孔网密集程度提高。该方法通过增大炮孔的爆破漏斗角，促使自由面呈弧形扩展，形成更理想的张拉破坏条件<sup>[5]</sup>。同时，由于炮孔间距离增大，相邻炮孔的径向裂隙贯通时间得到有效延迟，减弱了爆破过程中应力波的负面干扰效应，有利于岩石环向裂隙与径向裂隙的充分扩展与联结。这种孔网优化模式显著增强了爆破能量的传播效率，实现爆破波在岩体中的定向传递，为多面临空爆破

及复杂工况下的深孔爆破提供了技术支持，是现代爆破工程中的关键设计方向之一。

## 2 矿山概况

矿区位于南天山西段南麓、塔里木盆地北缘，地处构造复杂区带，海拔高程在1330m至1750m之间，最大比高达420m，属低中山区地貌类型。区域整体地势北高南低，地形起伏剧烈，地表岩石广泛裸露，植被覆盖率极低，水系不发育，缺乏稳定沟谷地貌特征，对矿山施工道路布设和边坡稳定性管理带来一定挑战<sup>[6]</sup>。矿体赋存于呈东西走向的单斜构造中，由北向南倾斜，倾角范围为42°至65°，北部边界临近悬崖，为典型的临崖作业环境，作业面空间受限，安全风险较高。

在初步开采阶段，按照常规爆破设计由北向南进行台阶爆破施工，由于受南部上盘岩石封闭影响，自由面条件不良，致使爆破缺乏抛掷效果，破碎性差，大块率高，残留大量底根和坡脚，严重影响装载效率和后续作业流程。在调整爆破方案后，将自由面方向转为东西向以改善岩石破碎度。该调整在一定程度上提升了爆破解体效果，但由于矿体形态狭长，受限于东西向自由面宽度不足，导致单次爆破排数增多，通常需达到10排以上，增加了起爆网络复杂性与同段爆破的协调难度<sup>[7]</sup>。

为优化爆破参数、提升爆破作业效率并控制二次破碎成本，现场开始探索大密集系数爆破技术路径。通过减小排距、增加炮孔布设密度、调整装药结构与起爆顺序等措施，尝试在有限自由面条件下实现更优的能量传递与岩体破碎。大密集系数爆破有效提高了岩石裂隙发育程度，降低块度指标，并改善了爆堆形态，为采装系统提供了更为理想的作业条件。同时，爆破振动控制、炮孔相互作用、冲击波叠加效应等因素亦在优化设计中

被重点考量，确保爆破作业在高效、经济的同时满足边坡稳定与安全生产要求<sup>[8]</sup>。

### 3 爆破参数

该矿山开采爆破作业采用多排孔电子雷管逐孔起爆方式，具备良好的起爆延时控制精度与安全性能，有效降低了爆破振动强度及邻近结构的扰动影响。爆破装药结构为孔内连续装药，起爆网络采用南理工科化数码电子雷管，通过精确编程实现毫秒级延时起爆，有利于控制爆堆形态、提高爆破效率并降低大块率。所用炸药为岩石膨化硝酸铵炸药，密度为750kg/m<sup>3</sup>，该类炸药具有良好的爆速稳定性与较高的爆破能量释放率，适用于硬岩及半硬岩工况条件下的中深孔爆破作业。矿山开采台阶高度设计为15米，选用孔径120mm的高风压潜孔钻进行钻孔施工，实际成孔直径为115mm，钻孔垂直度和成孔质量较高，为后续装药和起爆过程提供了良好的基础保障。采用中深孔爆破工艺，配合合理的装药结构与起爆参数设计，实现能量定向传递与岩体有效破碎，保证了台阶稳定性、爆堆均匀性以及装药运输环节的连续性，提升了整体爆破作业的技术质量和经济效益。

#### 3.1 孔网参数选择

炮孔直径D = 115mm;

台阶高度H = 15m;

炮孔倾角θ = 90°;

超深深度h = (8-12) D，实取h = 1.5m;

炮孔深度L = H+h = 16.5m;

堵塞长度L<sub>1</sub> = (20-40) D，实取L<sub>1</sub> = 3.5m;

装药长度L<sub>2</sub> = L-L<sub>1</sub> = 13.0m;

延米装药量P = 1/4π×d<sup>2</sup>×r× = 7.3kg/m;

单孔装药量Q = P×L<sub>2</sub> = 7.3×13.0 = 95kg;

炮孔孔距取a = 6.0m;

排距取b = 3.0m;

底盘抵抗线W<sub>1</sub> = b = 3.0m

炮孔密集系数m取2.0;

则Q = qabH计算可得q = Q/abH = 95÷(6×3×15) = 0.352kg/m<sup>3</sup>;

#### 3.2 起爆网络连接

根据国内外大量工程实践及相关研究成果表明，在数码电子雷管控制的起爆网络中，合理的延时设计是实现理想爆破效果的关键因素。通常情况下，孔间延期控制在3-8ms/m，排间延期控制在8-15ms/m的范围内，可有效提高爆破解体效果，优化爆堆形态，降低震动和爆破对边坡稳定性的影响。本矿山在爆破施工初期阶段，根据现场作业条件与孔网布设参数，初步采用孔间距a =

4.2m，排间距b = 3.4m的爆破孔网设计。在此参数基础上，为保证爆破的定向解体效果与岩体破碎均匀性，数码电子雷管选择逐孔爆破方式，孔间延期设定为17ms，排间延期设定为35ms，该参数组合使爆破应力波具有较好的传播与衰减控制，避免过度波叠引起的大块或边坡扰动。

随着矿山作业深入及自由面条件变化，孔网参数进一步优化为孔间距a = 6.0m，排间距b = 3.0m，以适应更大规模的爆破作业需求。在此设计中，由于排数较多，爆破延时设计的稳定性与精度要求更高，因此继续采用孔间延期17ms、排间延期35ms的时序控制方式。该延时网络结合高精度数码电子雷管技术，确保起爆时序的可控性与重复性，保障了爆破波的连续推进、能量的有效传递与岩体的理想破碎，进一步提升了爆破作业的整体安全性、经济性与技术质量。

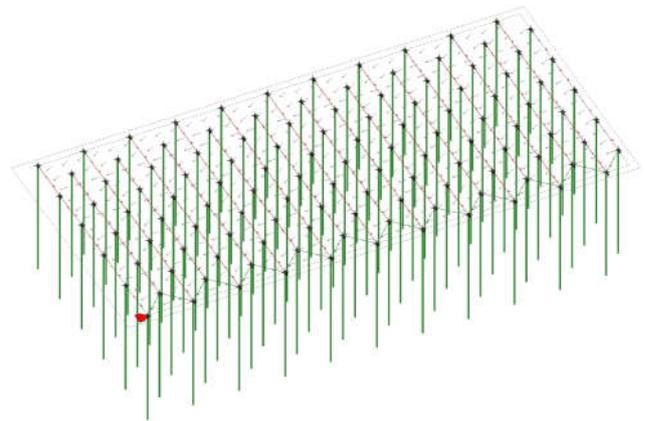


图1 爆破设计图

### 4 爆破效果比较

从爆破参数设计角度分析，将孔网参数由原先的孔间距a = 4.2m、排间距b = 3.4m调整为孔间距a = 6.0m、排间距b = 3.0m，使密集系数（即孔距与排距的比值）由1.25提高至2.00，实现了60%的同比增长。这一变化不仅是数值上的简单提升，更是在爆破效果与能量利用效率方面带来了实质性的改善。大密集系数设计通过增大炮孔间距、减小排间距，在保持单孔负担岩体体积不变的前提下，改变了爆破波与应力波的传播路径与相互作用关系。由于炮孔之间间距的增加，单个炮孔在爆炸时所产生的放射状裂纹与径向裂隙对邻近炮孔的影响显著减弱，龟裂带之间的重叠效应减少，从而有效避免了局部区域岩石过度粉碎的问题。在该布孔方式下，岩体破碎更为均匀，块度分布更加合理，减少了超细粒与大块率共存的不良爆堆结构，不仅为铲装和运输作业提供了理想作业条件，也降低了因大块率高所导致的二次破碎作

业频率。同时,能量利用率的提升也带来了爆破单耗的降低,实现炸药的高效利用与成本控制的协同优化。

从图2上可以看出,爆破时同时起爆的炮孔数量最多

仅为3个,爆破振动、爆破冲击波及其他爆破有害效应得到了有效控制。

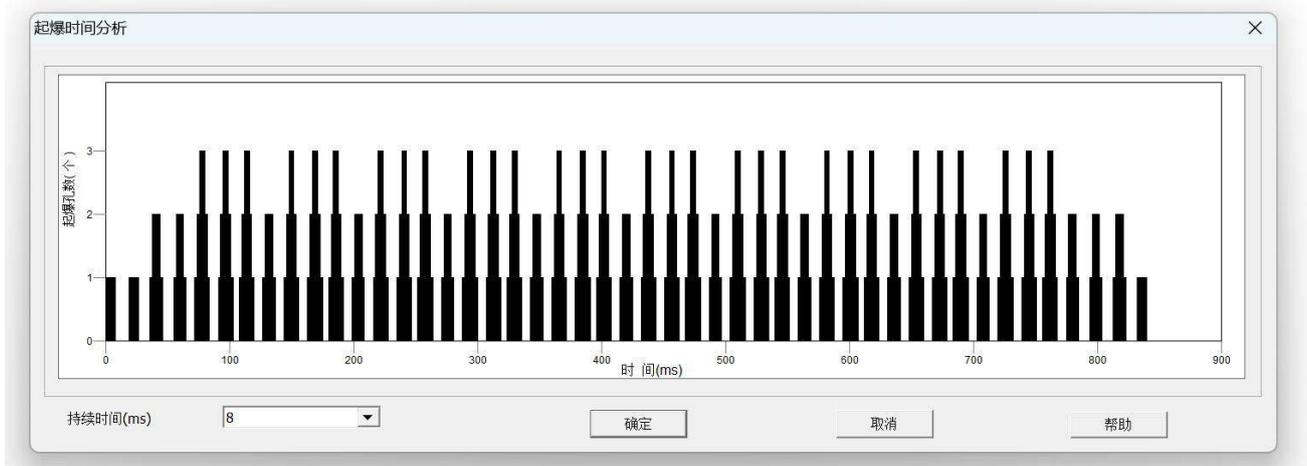


图2 起爆时间分析图

从现场实际效果对比上,图3(左)为密集系数 = 1.25、孔间距 $a = 4.2\text{m}$ ,排间距 $b = 3.4\text{m}$ 孔网参数的爆后效果图,图3(右)为密集系数 = 2.00、孔间距 $a = 6.0\text{m}$ ,排间距 $b = 3.0\text{m}$ 孔网参数的爆后效果图。通过爆后效果图可以看出,大密集系数下,爆破后爆堆较原爆破设计爆堆集中,无根底、无后冲,易于铲装;据现场统计,大块率由原来17%降至10%以内,降低了二次破碎成本。铲装效率提高10%左右。

## 5 结语

实践表明,爆破孔网设计无论如何调整,其爆破效能均需遵循等爆方单耗原理,即单位炸药量所负责破碎的岩体体积为一恒定值,该参数在保证破碎效率和能量利用率方面具有理论指导意义。然而,在实际工程应用中,即便在保持等爆方单耗前提下,不同孔网参数配置仍会对岩体爆后粒径组成及块度分布产生显著影响。以新疆阿克苏地区四石场1号石灰岩矿为例,该矿区地质条件特殊,岩层产状呈单斜结构,倾角较大,自由面发育不足,受限空间导致爆破排数普遍偏多,传统孔网设计难以实现良好破碎效果,且常伴随底根残留和后冲现象。采用大密集系数爆破设计,通过适度增大炮孔间距、减小排距,形成高密度、低行距的爆破网络,在保持单孔负担体积不变的基础上,优化了炸药能量释放方向与作用路径。该设计不仅提高了爆破波与应力波的重叠效应,还强化了岩体介质内部裂隙扩展的均匀性,改善了块度组成,降低大块率,提升了爆堆松散度与堆形

质量,极大地改善了采装条件与作业连续性。该实践进一步印证了在特定构造和作业环境下,爆破孔网参数的精细调整对提升爆破质效具有重要现实意义。

## 参考文献

- [1]耿城,贾建军,乔继延,等.炮孔密集系数对破碎效果的影响[J].金属矿山,2018(11):63-66.DOI:10.19614/j.cnki.jsks.201811013.
- [2]王修勇,王树仁.宽孔距爆破破碎机理的研究[J].爆炸与冲击,1997,(3):68-73.
- [3]张鑫,舒大强.宽孔距爆破法数值模拟及破岩机理分析[J].爆破,2012,29(4):42-45.DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2012.04.010.
- [4]张平,刘松,刘海瑞.大孔距小排距技术在中深孔爆破中的应用[J].建材世界,2013(6):78-80.DOI:10.3963/j.issn.1674-6066.2013.06.021.
- [5]李长权,戚文革,李延春,等.宽孔距、小排距爆破技术在大黑山钼矿的应用[J].黄金,2011,32(7):36-39.DOI:10.3969/j.issn.1001-1277.2011.07.008.
- [6]吴恒金.石灰岩矿爆破效果的模糊综合评判[J].爆破,1985(01):33-36.DOI:CNKI:SUN:BOPO.0.1985-01-010.
- [7]肖健,钱明渊.空气间隔装药技术在露天石灰岩矿山爆破中的应用[J].安徽建筑,2017,24(6):2.DOI:CNKI:SUN:AHJZ.0.2017-06-040.
- [8]聂锦瑞.露天石灰岩矿爆破粉尘扩散规律及防治技术研究[D].安徽理工大学,2023.