

某铁矿台阶深孔爆破合理延期时间优选试验研究

郭一娜, 洪国敏

(包钢集团矿山研究院(有限公司), 内蒙古包头 014030)

摘要: 文章通过对国内外微差爆破破岩理论进行分析, 计算求均值得出爆破网路中铁矿、白云岩和板岩三类岩性孔间和排间的理论延期时间, 并制定合理的参数组织开展爆破试验。研究表明, 白云岩合理孔间延期时间为 32 ms, 爆破块度 ≤ 800 mm 占 98.17%; 板岩合理孔间延期时间为 40 ms, 爆破块度 ≤ 800 mm 占 91.11%; 铁矿石合理孔间延期时间为 28 ms, 爆破块度 ≤ 600 mm 占 82.16%。各岩性合理延期时间对应下合格块度占比得到提高。

关键词: 数码电子雷管; 微差爆破; 延期时间; 块度

中图分类号: TD235

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)01-0009-04

Experimental Study on Optimizing Reasonable Delay Time of Deep Hole Blasting for Bench of An Iron Mine

Guo Yina, Hong Guomin

(Baotou Steel Group Mining Research Institute (Co., Ltd.), Baotou 014030,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In the paper, the theoretical inter-hole delay time and theoretical delay time between rows for such three types of lithology as iron ore, dolomite and slate in firing network are calculated by averaging as well as reasonable parameters are formulated to organize and launch bursting test through analyzing domestic and foreign rock breaking theory of millisecond blasting. The study showed that the reasonable inter-hole delay time of dolomite was 32 ms and that with blast block ≤ 800 mm accounted for 98.17%; reasonable inter-hole delay time of slate was 40 ms and that with blast block ≤ 800 mm accounted for 91.11%; reasonable inter-hole delay time of iron ore was 28 ms and that with blast block ≤ 600 mm accounted for 82.16%. The proportions of qualified block corresponding to reasonable delay time of each lithology are increased.

Key words: digital electronic detonator; millisecond blasting; delay time; block

大量研究表明, 合理的微差爆破延期时间很大程度上决定能否达到预期的爆破效果。近年来随着爆破器材的不断发展, 应用具有高精度延期时间和安全性的数码电子雷管越来越普遍^[1]。2018年数

码电子雷管在某大型铁矿逐步取代导爆管雷管, 但爆破延期时间仍沿用以往使用导爆管雷管的经验进行设定, 很难发挥数码电子雷管的优点来改善爆破效果, 反而增加了起爆器材成本。因此, 利用数码电

子雷管探索最优的“微差延期时间”，来提高台阶爆破破碎效果成了新的研究课题^[2]。

1 矿山爆破现状

某大型铁矿台阶深孔爆破采用 $\Phi 310$ mm 牙轮钻机穿凿炮孔，台阶高度为 14 m，采用三角形布孔，采用自有炸药厂生产的多孔粒状铵油炸药和乳化炸药进行爆破，起爆方式采用普通导爆管雷管排间起爆和高精度雷管逐孔起爆两种方式。共组织正常台阶深孔爆破 133 区，完成爆破总量 2 960.48 万 t，其中矿石 817.05 万 t，平均炸药单耗为 340.17 g/t，平均延米爆破量为 132.2 t/m。某大型铁矿经过长期的现场爆破优化，已基本形成一套爆破参数，但爆破质量仍存在一定问题，影响生产。该矿的矿物种类按岩性主要分为铁矿、白云岩、板岩三大类型，与国内其他同类型矿山相比，炸药单耗偏高，而爆破效果却不是十分理想，且爆堆形状时好时坏，没有规律，块度不均。

近年来，矿山开展了挤压爆破、间隔装药、爆破震动危害控制等大量的科研攻关项目，在一般爆区或岩石相对较软的岩石地区，爆破能够达到预期效果，但在难爆区或岩层复杂地区，爆破效果较差，严重影响后续铲装效率，增加后续工序成本，亟需对难爆区进行爆破技术攻关，满足高效、安全生产要求。

2 理论延期时间计算

理论延期时间的计算是一个复杂的过程，需要综合考虑多种因素。随着数码电子雷管技术的发展，可以更精确地控制延期时间，从而提高爆破效率和安全性。在实际应用中，理论计算结果通常需要结合现场试验结果和经验进行调整，以达到最佳爆破效果。

国内外合理的露天微差爆破延期时间计算的理论有增加自由面假说、岩石相互碰撞假说和最小抵抗线假说。而影响爆破延期时间选取的物理和动力学因素主要有岩石和炸药密度、炮孔平均装药量、孔内炸药爆速、冲击波传播速度和威力、爆生气体作用方式、二次破碎作用以及反拉伸波作用等。三种假说理论公式见公式(1)、公式(2)、公式(3)。

增加自由面假说理论公式：

$$\Delta t = (K_1 + K_2) \sqrt[3]{Q} + S/V \quad (1)$$

式中： Δt 为延期时间，ms； K_1 、 K_2 分别为正波传播系数， K_1 为 1.25 ~ 1.80， $K_2 = 9(\Phi - 0.18)$ ，其中 Φ 为

炸药与岩石的波阻抗比值； Q 为炮孔平均装药量，kg； S 为孔后部裂槽宽度，一般取 10 mm； V 为岩石移动平均速度，m/s。

最小抵抗线假说理论公式：

$$t = \frac{W}{C_p} Q^{-3} + 3.843 \times 10^{-5} \left(\frac{W^2 r_0}{\Phi} \right) \quad (2)$$

式中： t 为延期时间，ms； W 为爆区前排孔平均抵抗线，m； C_p 为矿岩纵波传播速度，m/s； Q 为折合药量，kg； r_0 为矿岩容重，kg/cm³； Φ 为炮孔直径，m。

岩石相互碰撞假说理论公式：

$$\Delta t = 1000b(\rho - 1) \sqrt{2h_1/g/S} \quad (3)$$

式中： Δt 为排间延期时间，ms； b 为排间距，m； ρ 为爆堆松散系数； h_1 底板上装药高度，m； S 为前冲距离，m。

进一步收集并整理了该矿上半年的全部爆破资料，从中筛选出岩性相对单一、炸药种类相对单一的爆区，通过对全部爆区数据统计分析，采用增加自由面假说、岩石相互碰撞假说及最小抵抗线假说，分别计算理论孔间延期时间，进而求取平均值，可以得到各岩性在不同炸药种类爆破中的理论孔间延期时间。结合现行爆破参数以及爆破效果目标值，采用岩石相互碰撞假说，对理论排间延期时间进行计算，最终得到各岩性理论延期时间，见表 1。

表 1 最佳理论延期时间

岩性	平均装药量 /kg	排间延期 时间/ms	孔间延期 时间/ms
铁矿	850	85	32
白云岩	780	80	32
板岩	800	82	35

3 合理延期时间优选试验

3.1 试验方案

理论延期时间需通过现场试验来验证和调整，以更好地适应实际条件。通过现场踏勘，结合采场生产实际，考虑炸药种类不同，延期时间略有不同。目前该矿爆破超标大块率仍然偏高，爆区前冲过大。据此结合矿山爆破要求，爆区设定爆破效果块度目标值^[3]：铁矿石 ≤ 600 mm 占比为 75%；板岩 ≤ 800 mm 占比为 80%；白云岩 ≤ 800 mm 占比为 93%。

现场试验拟定在 1 210 ~ 1 222 m 台阶进行，爆

区均采用电子雷管逐孔起爆方法,炮孔起爆网络布孔方式见图 1。选定 27 个爆区进行试验,炮孔直径与平均装药量不变,排间距铁矿为 6 m × 7 m,白云岩为 6 m × 8 m,板岩为 6 m × 9 m。结合理论延期时间,制定不同的延期时间方案进行爆破^[4],具体参数见表 2、表 3。

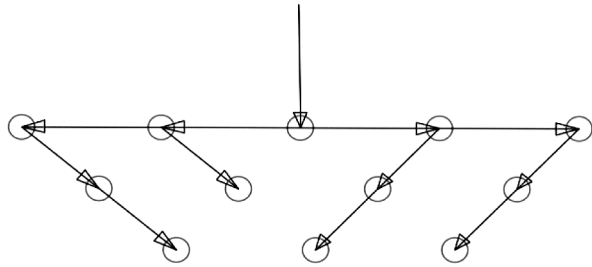


图 1 布孔方式

表 2 孔间延期时间优选试验方案 ms

岩性	排间延期时间	孔间延期时间
铁矿石	85	24,28,32
白云岩	80	20,25,32,35,40
板岩	82	30,35,40,45

表 3 排间延期时间优选试验方案 ms

岩性	孔间延期时间	排间延期时间
铁矿石	28	70,75,80,85,90,95,100
白云岩	32	70,75,80,85,90,95,100
板岩	40	70,76,82,88,94,100

3.2 试验结果统计

按照设计参数组织爆破,采用三维激光扫描仪现场测定爆堆形状,计算其松散度、块度,分析爆堆参数统计结果见表 4、表 5。

表 4 试验爆区参数汇总表

爆区编号	岩性	排距 /m	排间延期时间/ms	松散度	爆区编号	岩性	排距 /m	排间延期时间/ms	松散度
爆区一	白云岩	6	70	1.424	爆区十一	板岩	6	88	1.448
爆区二	白云岩	6	75	1.435	爆区十二	板岩	6	94	1.439
爆区三	白云岩	6	80	1.453	爆区十三	板岩	6	100	1.437
爆区四	白云岩	6	85	1.464	爆区十四	铁矿石	6	70	1.393
爆区五	白云岩	6	90	1.458	爆区十五	铁矿石	6	75	1.406
爆区六	白云岩	6	95	1.456	爆区十六	铁矿石	6	80	1.412
爆区七	白云岩	6	100	1.457	爆区十七	铁矿石	6	85	1.426
爆区八	板岩	6	70	1.424	爆区十八	铁矿石	6	90	1.431
爆区九	板岩	6	76	1.436	爆区十九	铁矿石	6	95	1.437
爆区十	板岩	6	82	1.443	爆区二十	铁矿石	6	100	1.429

表 5 试验爆区块度数据统计表

爆区编号	岩性	实际孔间延期时间/ms	合格块度 /%	爆区编号	岩性	实际孔间延期时间/ms	合格块度 /%
爆区一	铁矿石	42	68.20	爆区十一	白云岩	30	93.65
爆区二	铁矿石	32	75.10	爆区十二	白云岩	26	94.16
爆区三	铁矿石	30	75.70	爆区十三	白云岩	35	96.40
爆区四	铁矿石	18	77.70	爆区十四	白云岩	20	96.89
爆区五	铁矿石	24	78.48	爆区十五	白云岩	25	97.77
爆区六	铁矿石	23	80.64	爆区十六	白云岩	32	98.17
爆区七	铁矿石	28	82.16	爆区十七	板岩	45	83.29
爆区八	白云岩	40	88.07	爆区十八	板岩	30	84.71
爆区九	白云岩	22	88.24	爆区十九	板岩	35	90.01
爆区十	白云岩	42	88.96	爆区二十	板岩	40	91.11

3.3 试验结果分析

结合表 4 数据,将松散度与排间延期时间关联分析,见图 2。

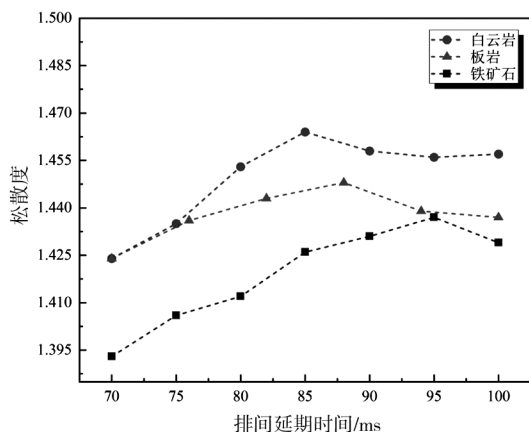


图 2 各岩性排间延期时间爆破效果对比图

通过以上图表分析可知,白云岩、板岩和铁矿石的松散度,随着排间延期时间的加大发生了变化^[5]。

白云岩排间延期时间由 70 ms 增加至 100 ms 过程中,爆堆松散度先明显增大,85 ms 时达到最大,再增加排间延期时间松散度有下降趋势,对应前冲距离为 49 m;板岩排间延期时间由 70 ms 增加至 100 ms 过程中,爆堆松散度先明显增大,88 ms 时达到最大,再增加排间延期时间松散度有下降趋势,对应前冲距离为 47 m;铁矿石排间延期时间由 70 ms 增加至 100 ms 过程中,爆堆松散度先明显增大,95 ms 时达到最大,再增加排间延期时间松散度有下降趋势,对应前冲距离为 45 m。

研究表明,白云岩合理排间延期时间为 85 ms,爆堆松散度为 1.464,前冲距离为 49 m;板岩合理排间延期时间为 88 ms,爆堆松散度为 1.448,前冲距离为 47 m;铁矿石合理排间延期时间为 95 ms,爆堆松散度为 1.437,前冲距离为 45 m。

结合表 5 数据,将各爆区爆破块度与孔间延期时间关联分析,见图 3。

由图 3 可知,各岩性的块度随着孔间延期时间的加大发生了变化。铁矿石孔间延期时间从 32 ms 调整至 24 ms,块度先改善后劣化,块度合理时孔间延期时间为 28 ms;白云岩孔间延期时间从 40 ms 调整至 20 ms,块度先改善后劣化,块度合理的孔间延期时间为 32 ms;板岩孔间延期时间从 45 ms 调整至

30 ms,块度先改善后劣化,块度合理的孔间延期时间为 40 ms。

最终确定在使用乳化炸药条件下,白云岩合理孔间延期时间为 32 ms,爆破块度 ≤ 800 mm 占 98.17%;板岩合理孔间延期时间为 40 ms,爆破块度 ≤ 800 mm 占 91.11%;铁矿石合理孔间延期时间为 28 ms,爆破块度 ≤ 600 mm 占 82.16%。在各岩性合理延期时间对应下合格块度占比提高 2% 以上,无根底,其他爆破效果指标也得到改善。与原参数指标进行对比,结果见表 6。

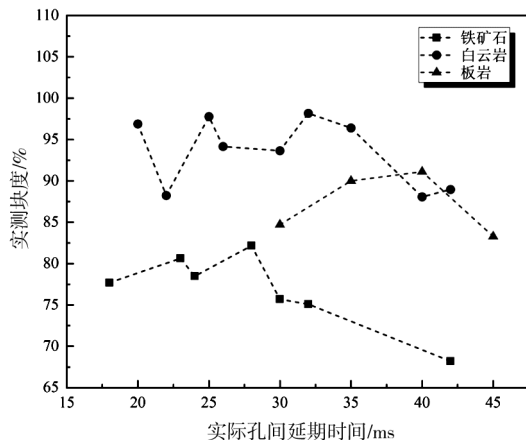


图 3 各岩性孔间延期时间爆破效果对比图

表 6 各岩性爆破试验效果块度指标对比

岩性	优化后孔间 延时/ms	优化后排间 延时/ms	块度/%	
			目标值	优化后
铁矿石	28	95	75	80.64
板岩	40	88	90	93.70
白云岩	32	85	93	95.16

4 结束语

本文通过采用目前国内外先进的理论数学计算模型,与某铁矿现场条件相结合,确定计算所需参数。结合分区结果,依据确定的各岩性合理延期时间,在采场开展爆破试验。通过测定,分析爆破后的效果,与目标值进行对比,最终确定各岩性的合理延期时间。现场爆破试验结果表明,白云岩合理孔间延期时间为 32 ms,板岩合理孔间延期时间为 40 ms,铁矿石合理孔间延期时间为 28 ms,能够取得较好的块度分布,同时试验结果验证了理论计算公式的

(下转第 75 页)

到提高。钢材微观组织结构对于耐蚀性能亦有显著影响,热处理工艺及加工工艺的恰当控制可得到马氏体、贝氏体和铁素体等不同微观组织结构,贝氏体及铁素体组织由于晶体结构相对稳定且不易受腐蚀性介质的腐蚀而表现出良好的耐蚀性。另外可采用纳米技术使钢材晶粒细化至纳米级别,以改善其耐蚀性。在通过合金设计及优化微观组织结构改善耐蚀性能的同时,可发展新的表面处理技术,如通过热喷涂、电镀和化学镀,使钢材表面生成耐腐蚀涂层,能有效防止腐蚀性介质入侵,也可通过表面激光处理和表面等离子体处理对钢材表面改性以改善耐蚀性。为更好地研制新型耐蚀钢,需要对钢材腐蚀机理进行大量研究,虽然在钢的腐蚀机理研究方面已取得不少成果,但是还存在着一些有待解决的问题。以海洋环境为例,钢材腐蚀除受海水化学作用外,同时还受海浪、潮汐和生物作用,有必要将上述因素考虑在内,建立更精确的腐蚀模型,为研制新型耐蚀钢提供理论依据。

4 结束语

海洋环境对钢材腐蚀行为有深刻影响,深入研

究腐蚀机制并探讨有效防腐技术,对确保海洋工程结构安全及延长使用寿命至关重要。今后随着新型耐蚀钢研发与应用技术的发展,海洋工程结构材料的耐蚀性能会进一步提高。

参 考 文 献

- [1] 许勇. 海洋潮差区高强度钢腐蚀和氢渗透及应力腐蚀开裂研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院海洋研究所),2023.
- [2] 莫磊. 氯盐环境下波形钢腹板组合箱梁桥剩余承载力及可靠度研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2023.
- [3] 刘濮源. 海洋环境下钢管桩腐蚀后稳定承载力与抗倒塌性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [4] 王辰宇. 不同加速腐蚀模式下圆钢力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [5] 刘毅. 考虑腐蚀和焊接影响的钢材力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.

(上接第12页)

准确性,优化了现场爆破延期时间,改善了矿山的爆破效果。今后应当建立“一爆一分析”档案,根据不同地质条件选取不同的爆破方案,以达到最好的爆破效果。

参 考 文 献

- [1] Arvind K M, Nigamy K, Deepanshu R S. Controlled Blasting in a Limestone Mine Using Electronic Detonators: Case Study[J]. Journal of the Geological Society of India, 2017, 89: 87-90.
- [2] Hemant A, Chitranjan P S, Arvind K M, et al. Reducing Environmental Hazards of Blasting Using Electronic Detonators in a Large Opencast

Coal Project: a Case Study [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2019, 67(7): 345-350.

- [3] 吴亮,鲁帅,许锋,等. 矿岩爆破破碎机理、块度分布与测量技术研究动态[J]. 金属矿山, 2016(7):47-53.
- [4] Wu Liang, Lu Shuai, Xu Feng, et al. Research Trends about the Mechanism of Ore Rock Blasting Fragmentation, the Distribution of Block Size and Measurement Technique [J]. Metal Mine, 2016(7):47-53.
- [5] 谢博,施富强,赵建才,等. 爆破岩块自动识别与块度特征提取方法[J]. 爆破, 2019, 36(3): 43-49.