

HỘI KỸ THUẬT NỔ MÌN VIỆT NAM



TUYỂN TẬP BÁO CÁO
HỘI NGHỊ KHOA HỌC KỸ THUẬT NỔ MÌN VIỆT NAM LẦN THỨ I
**KỸ THUẬT NỔ MÌN TIỀN TIẾN
AN TOÀN VÀ THÂN THIỆN VỚI MÔI TRƯỜNG**



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

HỘI KỸ THUẬT NỔ Mìn VIỆT NAM

TUYỂN TẬP BÁO CÁO

HỘI NGHỊ KHOA HỌC KỸ THUẬT NỔ Mìn VIỆT NAM LẦN THỨ I

**KỸ THUẬT NỔ Mìn TIỀN TIẾN
AN TOÀN VÀ THÂN THIỆN VỚI MÔI TRƯỜNG**

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

LỜI NÓI ĐẦU

Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam là tổ chức xã hội - nghề nghiệp hoạt động trong các lĩnh vực khai thác mỏ, kỹ thuật nổ mìn, vật liệu nổ công nghiệp và bảo vệ môi trường, được thành lập theo Quyết định số 947/QĐ-BNV ngày 13 tháng 8 năm 2010 của Bộ Nội vụ. Trải qua quá trình hình thành và phát triển, Hội luôn kiên định mục tiêu kết nối đội ngũ chuyên gia, nhà khoa học, cơ quan quản lý và doanh nghiệp; đồng thời thúc đẩy chuyển giao tri thức, ứng dụng công nghệ tiên tiến, nâng cao năng lực quản lý - điều hành và thực hành an toàn trong công tác khoan - nổ mìn.

Thực tiễn sản xuất cho thấy yêu cầu đổi mới công nghệ, cập nhật tri thức quốc tế, kiểm soát rủi ro và giảm thiểu tác động môi trường trong nổ mìn ngày càng cấp thiết. Bên cạnh những thành tựu đã đạt được, lĩnh vực này vẫn đứng trước không ít thách thức: mức độ phổ cập các giải pháp công nghệ, kỹ thuật hiện đại còn chưa đồng đều; chia sẻ thông tin chuyên môn đôi khi chưa kịp thời; sự cố và tai nạn liên quan đến nổ mìn vẫn có thể xảy ra nếu thiếu chuẩn mực kỹ thuật và kỷ luật an toàn nghiêm ngặt. Điều đó đòi hỏi một diễn đàn khoa học - nghề nghiệp đủ uy tín để trao đổi học thuật, chia sẻ kinh nghiệm, lan tỏa các thực hành tốt và củng cố văn hóa an toàn.

Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học Hội nghị Khoa học kỹ thuật nổ mìn Việt Nam lần thứ I “Kỹ thuật nổ mìn tiên tiến, an toàn và thân thiện với môi trường” của Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam tập hợp các bài viết do các tác giả từ khắp mọi miền đất nước gửi tới tham gia hội nghị. Đây là những kết quả nghiên cứu, tổng quan chuyên đề, giải pháp công nghệ và kinh nghiệm thực tiễn tiêu biểu đúng với chủ đề, đã được tuyển chọn, biên tập công phu, là minh chứng thuyết phục cho sự thành công của Hội nghị VBEA-2025.

Thông qua các bài viết này, Ban Khoa học hy vọng góp phần cung cấp thêm một nguồn tài liệu tham khảo có giá trị cho công tác quản lý, đào tạo, thiết

kế - thi công nỗ lực tại các đơn vị trong và ngoài ngành. Nhân dịp này chúng tôi cũng trân trọng cảm ơn các tác giả, các nhà khoa học, chuyên gia, các cơ quan quản lý và doanh nghiệp đã quan tâm, đồng hành, đóng góp về nội dung và hỗ trợ cho ấn phẩm sớm ra mắt bạn đọc.

Ban Tổ chức và Ban Khoa học rất mong tiếp tục nhận được những ý kiến trao đổi, phản biện và các bài viết chất lượng để ấn phẩm ngày càng thiết thực, chuyên sâu, góp phần thúc đẩy sự phát triển bền vững của ngành kỹ thuật nỗ lực Việt Nam.

BAN KHOA HỌC

BAN TỔ CHỨC

TS. Lê Ngọc Ninh, *Chủ tịch Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Trưởng ban

GS.TS. Bùi Xuân Nam, *Phó Chủ tịch kiêm Tổng Thư ký Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Phó Trưởng ban

PGS.TS. Trần Quang Hiếu, *Chánh Văn phòng Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Thư ký

PGS.TS. Phạm Văn Hòa, *Phó Chủ tịch Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên

Đại tá, ThS. Nguyễn Văn Hải, *Phó Chủ tịch Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên

KS. Nguyễn Quốc Huy, *Phó Chủ tịch Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên

ThS. Phan Hồng Việt, *Phó Chủ tịch Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên

Đại tá, KS. Phạm Quốc Mạnh, *Phó Chủ tịch Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên

KS. Đỗ Đức Khoa, *Cục An toàn công nghiệp, Bộ Công Thương* - Ủy viên

ThS. Lê Đức Ánh, *Phó Giám đốc Sở Công thương Nghệ An* - Ủy viên

TS. Nguyễn Tam Tính, *Phó Trưởng ban, Tập đoàn công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam* - Ủy viên

ThS. Trần Văn Dũng, *Phó Tổng Giám đốc, Tổng công ty Công nghiệp Hoá chất mỏ - VINACOMIN* - Ủy viên

Đại tá, ThS. Tăng Văn Chi, *Tổng Giám đốc Tổng công ty Xây dựng Lũng Lô* - Ủy viên

ThS. Lê Tuấn Ngọc, *Phó Tổng Giám đốc, Tổng công ty Khoáng sản VINACOMIN* - Ủy viên

TS. Hoàng Hùng Thắng, *Hiệu trưởng Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh* - Ủy viên

TS. Nguyễn Anh Thơ, *Viện trưởng Viện Khoa học An toàn vệ sinh lao động* - Ủy viên

TS. Trịnh Xuân Đức, *Viện trưởng Viện Khoa học Kỹ thuật Hạ tầng và Môi trường* - Ủy viên

ThS. Nguyễn Khắc Quyền, *Phó Viện trưởng Viện Chính sách, Bộ Công Thương* - Ủy viên

TS. Phạm Huy Đông, *Phó Viện trưởng Viện Hoá học Công nghiệp* - Ủy viên

PGS.TS. Phan Đức Nhân, *Trưởng ban Sau Đại học, Học viện Kỹ thuật Quân sự* - Ủy viên

PGS.TS. Nguyễn Ngọc Bích, *Trưởng khoa, Trường Đại học Y tế Công cộng* - Ủy viên

TS. Ngô Kim Tú, *Phó Trưởng khoa, Trường Đại học Lao động - Xã hội* - Ủy viên

TS. Đoàn Văn Thanh, *Trưởng phòng, Viện Khoa học và Công nghệ mỏ* - Ủy viên

PGS.TS. Nguyễn Anh Tuấn, *Giám đốc Trung tâm Nghiên cứu Cơ điện mỏ* - Ủy viên

TS. Đào Văn Chi, *Giám đốc Trung tâm Khoa học Công nghệ Mỏ và Môi trường* - Ủy viên

TS. Nguyễn Đình An, *Phó Giám đốc Trung tâm Bồi dưỡng và Tư vấn nổ mìn* - Ủy viên

BAN KHOA HỌC

GS.TS. Bùi Xuân Nam, *Trường Đại học Tôn Đức Thắng* - Trưởng ban
PGS.TS. Trần Quang Hiếu, *Trường Đại học Mở - Địa chất* - Thư ký
GS.TS. Changwoo Lee, *Dong A University (Hàn Quốc)* - Ủy viên
GS.TS. Nhữ Văn Bách, *Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên
GS.TS. Võ Trọng Hùng, *Hội Khoa học và Công nghệ mỏ Việt Nam* - Ủy viên
GS.TS. Lê Văn Trình, *Hội Khoa học An toàn, vệ sinh lao động* - Ủy viên
PGS.TS. Lê Quang Hồng, *Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên
TS. Nguyễn Phú Vụ, *Hội Khoa học và Công nghệ mỏ Việt Nam* - Ủy viên
TS. Lê Văn Quyền, *Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên
TS. Nguyễn Đăng Tề, *Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam* - Ủy viên
PGS.TS. Phạm Văn Hòa, *Trường Đại học Mở - Địa chất* - Ủy viên
TS. Đỗ Ngọc Hoàn, *Trường Đại học Mở - Địa chất* - Ủy viên
TS. Hoàng Hùng Thắng, *Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh* - Ủy viên
PGS.TS. Đàm Trọng Thắng, *Học viện Kỹ thuật Quân sự* - Ủy viên
PGS.TS. Phan Đức Nhân, *Học viện Kỹ thuật Quân sự* - Ủy viên
PGS.TS. Nguyễn Ngọc Bích, *Trường Đại học Y tế Công cộng* - Ủy viên
TS. Ngô Kim Tú, *Trường Đại học Lao động - Xã hội* - Ủy viên
TS. Nguyễn Anh Thơ, *Viện Khoa học An toàn và vệ sinh lao động* - Ủy viên
TS. Trịnh Xuân Đức, *Viện Khoa học Kỹ thuật Hạ tầng và Môi trường* - Ủy viên
ThS. Nguyễn Khắc Quyền, *Viện Chính sách Bộ Công Thương* - Ủy viên
TS. Phạm Huy Đông, *Viện Hoá học Công nghiệp* - Ủy viên
TS. Lê Đức Phương, *Tạp chí Công nghiệp mỏ* - Ủy viên
TS. Đoàn Văn Thanh, *Viện Khoa học và Công nghệ mỏ* - Ủy viên
TS. Nguyễn Văn Đức, *Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản* - Ủy viên
TS. Nguyễn Tam Tính, *Tập đoàn Công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam* - Ủy viên
PGS.TS. Nguyễn Anh Tuấn, *Trung tâm Nghiên cứu Cơ điện mỏ* - Ủy viên
TS. Đào Văn Chi, *Trung tâm Khoa học Công nghệ Mỏ và Môi trường* - Ủy viên

MỤC LỤC

TT	Tên bài báo và tác giả	Trang
1	Kỹ thuật nổ mìn tiên tiến trong khai thác lộ thiên: Xu hướng công nghệ, kiểm soát rủi ro và định hướng phát triển thân thiện với môi trường <i>Bùi Xuân Nam, Lê Ngọc Ninh, Trần Quang Hiếu</i>	11
2	Phi carbon hóa khai thác than lộ thiên tại Việt Nam: Nghiên cứu điển hình về vòng đời phát thải và các lộ trình giảm thiểu <i>Bùi Xuân Nam, Nguyễn Thị Tâm, Lê Ngọc Ninh, Quách Đức Tín, Trần Quang Hiếu, Chang-Woo Lee, Đỗ Văn Triều, Nguyễn Văn Đức</i>	45
3	Nghiên cứu khả năng sử dụng hệ thống cấp nổ điện tử nhằm nâng cao hiệu quả nổ mìn tại các mỏ lộ thiên Việt Nam <i>Trần Quang Hiếu, Phạm Đại Hải, Trần Văn Dũng, Phan Mạnh Lộc</i>	68
4	Nghiên cứu kỹ thuật nổ mìn an toàn và thân thiện với môi trường <i>Lê Ngọc Ninh</i>	86
5	Nghiên cứu sử dụng trí tuệ nhân tạo (AI) để tính toán lập hộ chiếu khoan - nổ mìn đào lò nhằm từng bước chuyển đổi số và tự động hóa công tác thiết kế khoan - nổ mìn tại các mỏ hầm lò thuộc TKV <i>Đặng Văn Kiên, Đoàn Đắc Thọ, Lê Quốc Khang, Trần Đăng Hải, Tạ Đăng Đại, Trần Công Thái, Nguyễn Văn Hải, Ngô Văn Giáp, Trần Quốc Đoàn</i>	103
6	Rủi ro trong công tác nổ mìn tại mỏ lộ thiên: phân tích, đánh giá và các giải pháp kiểm soát toàn diện <i>Trần Đình Bảo, Nguyễn Đình An, Trần Quang Hiếu</i>	120

7	Nghiên cứu phương án sản công tác nổi lắp ghép phục vụ việc khoan lỗ mìn dưới nước khi thi công công trình giao thông quy mô nhỏ	142
	<i>Nguyễn Mạnh Thường, Đàm Trọng Thắng, Trần Quang Hiếu</i>	
8	Xác định các thông số kỹ thuật của giải pháp phá vỡ đất đá bằng CO ₂ lỏng cho các mỏ lộ thiên Việt Nam	153
	<i>Hoàng Mạnh Thắng, Đàm Công Khoa, Đoàn Văn Thanh</i>	
9	Nghiên cứu các giải pháp kỹ thuật công nghệ nhằm nâng cao hiệu quả khoan-nổ mìn tại các đường lò của Công ty cổ phần Than Núi Béo	166
	<i>Đặng Văn Kiên, Lê Quốc Khang, Nguyễn Văn Định</i>	
10	Nghiên cứu khảo sát sự suy giảm cường độ sóng xung kích lan truyền trong không khí sau tường chắn do nổ lượng nổ tập trung bằng phương pháp số	177
	<i>Nguyễn Đức Khởi, Đàm Trọng Thắng, Nguyễn Văn Hiếu</i>	
11	Nghiên cứu ảnh hưởng của góc nghiêng của lỗ mìn đơn trong môi trường đất đá đến trường phân bố tốc độ xung quanh lượng nổ	192
	<i>Kiều Xuân Bách, Đàm Trọng Thắng, Vũ Trọng Hiếu</i>	
12	Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá giải pháp gia cường kết cấu tường gạch khi chịu tải trọng nổ	210
	<i>Nguyễn Hữu Thế, Đàm Trọng Thắng, Nguyễn Mạnh Thường, Nguyễn Công Nghị</i>	
13	Nghiên cứu đổi mới phương pháp tính toán chỉ tiêu thuốc nổ và các thông số khoan - nổ mìn hợp lý cho các mỏ lộ thiên của TKV	220
	<i>Lê Đức Phương, Lê Việt Phương, Phí Trung Kiên, Phạm Xuân Tráng, Nguyễn Ngọc Dũng</i>	
14	Đề xuất ứng dụng ống tập trung năng lượng khi đào lò đá ở các mỏ hầm lò thuộc Tập đoàn Công nghiệp Than khoáng sản Việt Nam	235
	<i>Đào Văn Chi, Phạm Đức Hưng, Nguyễn Minh Đức</i>	

15	Kíp điện tử - nền tảng chuyển đổi số cho nổ mìn thông minh <i>Nguyễn Đình An, Hoàng Trung Thành, Trần Đình Bảo, Lê Quý Thảo, Trần Văn Dũng</i>	243
16	Mô hình hóa quỹ đạo đá văng theo điều kiện nổ mìn: Áp dụng cho mỏ đá Điều Phon, Cao Bằng <i>Nguyễn Anh Tuấn, Phạm Văn Việt, Phạm Văn Hòa, Đỗ Ngọc Hoàn, Nguyễn Anh Kiên, Phùng Văn Thắng, Ngọc Thúy Oanh, Phùng Bảo Ngọc, Phùng Tuấn Kiệt</i>	254
17	Nghiên cứu khả năng tận dụng dầu ăn đã qua sử dụng để chế tạo thuốc nổ nhũ tương <i>Đàm Quang Sang, Nguyễn Tuấn Anh, Nguyễn Vũ Hùng</i>	274
18	An toàn, sức khỏe nghề nghiệp cho thợ nổ mìn trong cung ứng dịch vụ nổ mìn trên địa bàn tỉnh Quảng Ninh - Thực tiễn triển khai tại Tổng công ty Công nghiệp Hóa chất Mỏ (MICCO) <i>Ngô Kim Tú, Lâm Kiều Anh, Trần Văn Dũng</i>	285
19	Đánh giá nguy cơ rủi ro và phòng ngừa ô nhiễm bụi, khí độc trong công tác nổ mìn cho các mỏ sử dụng vật liệu nổ công nghiệp <i>Lâm Kiều Anh</i>	300
20	Tác động môi trường của vật liệu nổ trong xung đột vũ trang và hàm ý đối với quản lý nổ mìn thân thiện môi trường <i>Lê Ngọc Ninh</i>	315

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG SỬ DỤNG HỆ THỐNG KÍP NỔ ĐIỆN TỬ NHẪM NÂNG CAO HIỆU QUẢ NỔ Mìn TẠI CÁC MỎ LỘ THIÊN VIỆT NAM

Trần Quang Hiếu^{1, 3, *}, Phạm Đại Hải^{2, 3}, Trần Văn Dũng^{2, 3}, Phan Mạnh Lộc^{2, 3}

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu tổng quan về công nghệ nổ mìn bằng hệ thống kíp nổ điện tử và phân tích hiệu quả ứng dụng dựa trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm quốc tế và điều kiện thực tế tại Việt Nam. Phương pháp nghiên cứu bao gồm tổng hợp tài liệu kỹ thuật và phân tích so sánh các chỉ tiêu: độ chính xác thời gian vi sai, mức độ rung chấn và mức độ đập vỡ đất đá hợp lý. Kết quả cho thấy sử dụng hệ thống kíp nổ điện tử có sai số vi sai so với thời gian lập trình chỉ 0,02% (so với 5 - 10% của kíp vi sai phi điện). Các nghiên cứu thực nghiệm ghi nhận mức giảm rung chấn lên tới 35,2% và cải thiện mức độ đập vỡ đất đá khoảng 20%. Trên cơ sở đó, nghiên cứu nhận định tiềm năng, khả năng áp dụng công nghệ này, đặc biệt hiệu quả cho các mỏ than lộ thiên xuống sâu vùng Quảng Ninh để nâng cao hiệu quả nổ mìn và bảo vệ môi trường.

Từ khóa: kíp nổ điện tử, nổ mìn, mỏ lộ thiên.

1. Đặt vấn đề

Trong ngành công nghiệp khai thác mỏ lộ thiên, đặc biệt là khai thác than và khoáng sản, công tác nổ mìn phá vỡ đất đá là một trong những khâu sản xuất đầu tiên, có ảnh hưởng quyết định đến hiệu quả của hoạt động khai thác mỏ (Petropoulo, 2013). Hiện nay, các mỏ lộ thiên tại Việt Nam chủ yếu vẫn đang sử dụng các kíp nổ truyền thống như kíp nổ điện, kíp nổ vi sai điện và phổ biến nhất là kíp nổ vi sai phi điện.

¹ Trường Đại học Mỏ – Địa chất

² Tổng công ty Công nghiệp Hóa chất mỏ MICCO – Vinacomin

³ Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam

*Email: tranquanghieu@humg.edu.vn

Tuy nhiên, các phương pháp truyền thống này đang bộc lộ nhiều hạn chế cố hữu, đặc biệt là sai số về thời gian vi sai, với sai số thực tế có thể dao động từ 5÷10%. Sai số này khiến việc kiểm soát trình tự và thời điểm nổ giữa các lỗ mìn trở nên kém chính xác, dẫn đến nhiều hệ quả: (i) hiệu suất phá vỡ đất đá không tối ưu, tỉ lệ đá quá cỡ cao, làm tăng chi phí cho các công đoạn sau nổ mìn như phá đá quá cỡ, xúc bốc, vận tải (Petropoulos, 2013); (ii) gây lãng phí năng lượng nổ, có nguy cơ xảy ra cầm, cắt mìn; (iii) Tác động tiêu cực đến môi trường do gây ra rung chấn (PPV), tiếng ồn.

Trên thế giới, công nghệ kíp nổ điện tử đã được nghiên cứu và ứng dụng từ cuối những năm 1990 và đang trở thành xu thế chính (Petropoulos, 2013). Với khả năng lập trình thời gian vi sai chính xác, kíp điện tử cho phép các kỹ sư khai thác mỏ có thể áp dụng các lý thuyết nổ mìn tiên tiến, điều khiển sự tương tác của sóng ứng suất để tối ưu hóa quá trình phá vỡ đá (Rossmanith, 2003).

Tại Việt Nam, kíp nổ điện tử vẫn là một công nghệ rất mới, chủ yếu mới ở giai đoạn nghiên cứu, thử nghiệm và chưa được triển khai áp dụng rộng rãi. Do đó, việc thực hiện một nghiên cứu tổng quan, phân tích cơ sở kỹ thuật và đánh giá tiềm năng ứng dụng của kíp nổ điện tử trong điều kiện thực tế của Việt Nam là cần thiết. Nghiên cứu này tập trung phân tích cơ sở kỹ thuật của kíp nổ điện tử và đánh giá tiềm năng ứng dụng tại các mỏ lộ thiên Việt Nam trong bối cảnh điều kiện địa chất khai thác phức tạp và yêu cầu về an toàn, môi trường ngày càng thắt chặt.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

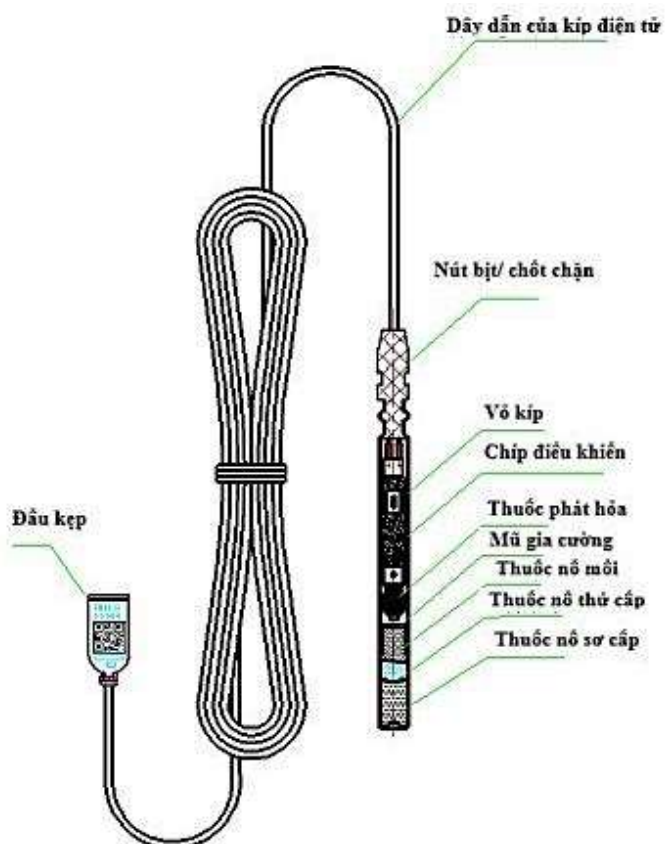
2.1. Giới thiệu về hệ thống kíp nổ điện tử

Kíp nổ điện tử hay còn gọi là kíp nổ kỹ thuật số, đại diện cho bước tiến công nghệ vượt bậc trong lĩnh vực nổ mìn, thay thế cơ chế vi sai bằng hóa chất truyền thống bằng vi mạch điện tử tích hợp. Khác với kíp nổ điện hoặc vi sai phi điện thông thường dựa vào tốc độ cháy của thuốc cháy chậm để xác định thời gian vi sai, kíp điện tử sử dụng một chip vi xử lý và tụ điện nội bộ để kiểm soát chính xác thời điểm khởi nổ.

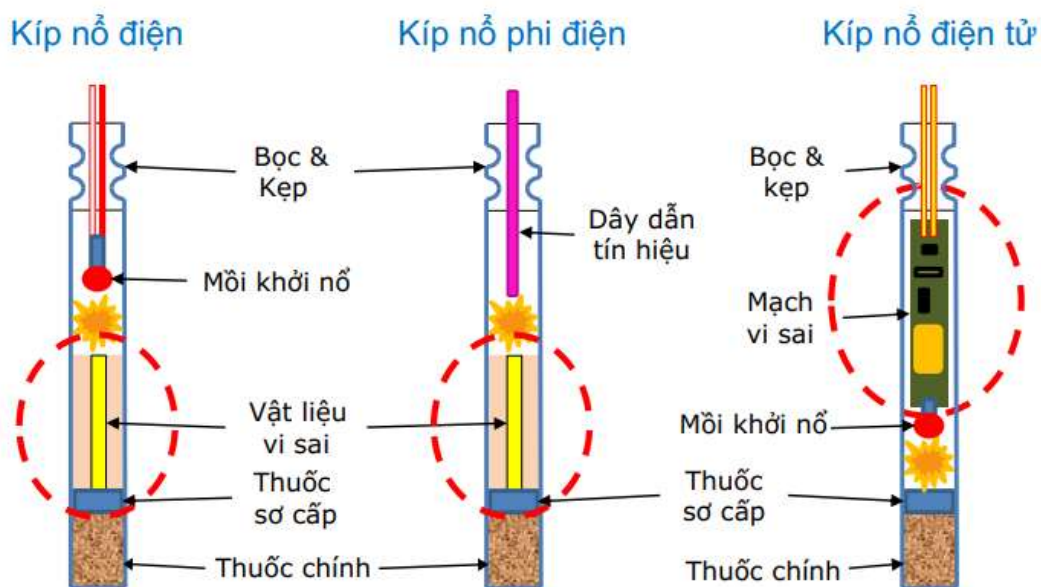
2.1.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Về mặt cấu trúc, một kíp nổ điện tử (Hình 1) hoàn chỉnh bao gồm các thành phần cơ bản: vỏ kíp (thường bằng đồng hoặc nhôm), dây dẫn tín hiệu, phích cắm kết nối, và mô-đun điều khiển điện tử. Mô-đun này đóng vai trò là “bộ não” của kíp, chứa chip thông minh (Microchip/ASIC) để nhận lệnh, lưu trữ mã định danh

duy nhất, tính toán thời gian vi sai và tụ điện để tích trữ năng lượng kích hoạt cầu điện trở (Hình 2).



Hình 1. Cấu tạo của kíp nổ điện tử



Hình 2. Sơ đồ mặt cắt của kíp nổ truyền thống và kíp nổ điện tử

Nguyên lý hoạt động của kíp điện tử dựa trên quy trình giao tiếp hai chiều và nạp xả năng lượng được kiểm soát chặt chẽ:

- Kết nối và định danh: mỗi kíp nổ sở hữu một mã ID duy nhất, cho phép thiết bị điều khiển nhận diện và kiểm tra trạng thái của từng kíp trong mạng nổ.

- Lập trình thời gian vi sai: thời gian vi sai được lập trình kỹ thuật số thông qua các thiết bị chuyên dụng, cho phép cài đặt thời gian vi sai linh hoạt từ 0 đến hàng chục nghìn miligiây (ms) với bước nhảy 1 ms.

- Tích năng lượng và khởi nổ: khi nhận lệnh nổ, thiết bị điều khiển sẽ nạp năng lượng cho tụ điện trong kíp. Chip điện tử sẽ đếm ngược thời gian vi sai đã được lập trình và phóng điện từ tụ vào cầu điện trở để đốt cháy thuốc mồi, kích hoạt chuỗi nổ.

2.1.2. Đặc tính kỹ thuật ưu việt của hệ thống kíp nổ điện tử

Sự khác biệt giữa kíp nổ điện tử và các loại kíp nổ truyền thống nằm ở thời gian vi sai chính xác và tính an toàn:

- Thời gian vi sai chính xác: kíp nổ điện tử loại bỏ hoàn toàn sai số do tốc độ cháy không đồng đều của thuốc chậm trong các loại kíp vi sai phi điện truyền thống. Sai số thời gian trễ của kíp điện tử cực thấp, thường dưới $\pm 0,02\%$. Trong khi đó, kíp vi sai phi điện thường có độ phân tán thời gian vi sai lớn, dao động từ 5 - 10% hoặc thậm chí lên đến 20% so với thời gian danh định.

- Khả năng lập trình linh hoạt: hệ thống cho phép người thiết kế nổ mìn tự do cài đặt bất kỳ thời gian vi sai nào trong giới hạn kỹ thuật (thường từ 0 - 15.000 ms hoặc lên tới 50.000 ms tùy loại), tạo điều kiện tối ưu hóa sự tương tác sóng nổ trong thiết kế nổ mìn.

- Tính năng an toàn cao: kíp điện tử được thiết kế với khả năng chống lại các nguồn điện ngoại lai như tĩnh điện, dòng điện rò, và sóng vô tuyến. Cơ chế an toàn yêu cầu tín hiệu mã hóa kỹ thuật số để kích nổ, do đó kíp không thể bị kích hoạt bởi các nguồn điện thông thường như pin hay ắc quy.

- Kiểm soát toàn diện: hệ thống kíp nổ điện tử cho phép kiểm tra hai chiều để xác nhận tính toàn vẹn của dây dẫn, trạng thái kíp và phát hiện các lỗi kết nối trước khi tiến hành nổ, giúp giảm thiểu tối đa nguy cơ mìn cảm.

2.2. Tổng quan tình hình ứng dụng hệ thống kíp nổ điện tử trên thế giới

Công nghệ kíp nổ điện tử bắt đầu được phát triển từ những năm 1990 và hiện nay đã trở thành một xu hướng tất yếu trong ngành khai thác mỏ toàn cầu, đặc biệt

tại các quốc gia có nền công nghiệp khai khoáng tiên tiến. Sự chuyển dịch từ kíp nổ truyền thống (kíp điện, phi điện) sang kíp nổ điện tử được thúc đẩy mạnh mẽ bởi nhu cầu ngày càng cao về độ chính xác, an toàn và hiệu quả kinh tế trong các mỏ lộ thiên quy mô lớn.

Kíp nổ điện tử hiện đã trở thành giải pháp kỹ thuật tiêu chuẩn cho các mỏ lộ thiên quy mô lớn và các khu vực thi công gần khu dân cư. Tại Ấn Độ, việc sản xuất và ứng dụng kíp điện tử nội địa đã bắt đầu từ năm 2004, chứng minh hiệu quả rõ rệt trong việc kiểm soát chấn động và giảm thiểu thời gian dừng mỏ tại các khu vực khai thác gần khu dân cư. Các hệ thống hiện đại như Daveytronic hay I-KON đã được sử dụng phổ biến để kiểm soát chính xác quy trình nổ mìn, đảm bảo an toàn trước các nguồn điện ngoại lai như sấm sét hay sóng vô tuyến, điều mà kíp nổ điện thông thường không thể đảm bảo.

Trên thế giới, các mỏ lớn tại Úc, Nam Phi, Hoa Kỳ và Chile đã chuyển đổi sang sử dụng kíp điện tử như một tiêu chuẩn. Các nghiên cứu và áp dụng thực tế đã chỉ ra các lợi ích rõ rệt: (i) kiểm soát chấn động: bằng cách lập trình thời gian vi sai chính xác, kíp điện tử cho phép kiểm soát tần số và biên độ sóng chấn động, triệt tiêu hiện tượng cộng hưởng, giúp nổ mìn an toàn (Blair, 2012); (ii) cải thiện phân mảnh đá: khả năng tạo ra các kịch bản nổ phức tạp giúp năng lượng nổ được phân bố tối ưu, tăng cường va đập giữa các khối đá, làm cho đá vỡ đồng đều và giảm kích thước đá quá cỡ (Cunningham, 2005); (iii) giảm đá văng và tăng ổn định bờ mỏ: thời gian nổ chính xác giúp khống chế năng lượng nổ trong phạm vi thiết kế, giảm thiểu đá văng và các vết nứt không mong muốn vào vách mỏ.

Về xu hướng phát triển trong tương lai, công nghệ kíp nổ điện tử đang chuyển dịch từ việc chỉ tập trung vào độ chính xác trong thời gian vi sai sang việc tối ưu hóa toàn diện quy trình khai thác theo mô hình “Mine-to-Mill”. Các thế hệ kíp nổ mới (như hệ thống HEBS II của Hanwha) được phát triển với độ chính xác thời gian cực cao (sai số 0,02%), khả năng lập trình linh hoạt lên tới 50.000 mili giây và tích hợp các thiết bị thông minh chạy trên hệ điều hành Android để đơn giản hóa quy trình vận hành. Trong tương lai, kíp nổ điện tử được dự báo sẽ trở thành công cụ chủ lực để giảm thiểu chi phí khai thác và quản lý rủi ro, thay vì chỉ được xem là một loại phụ kiện nổ chi phí cao như trước đây.

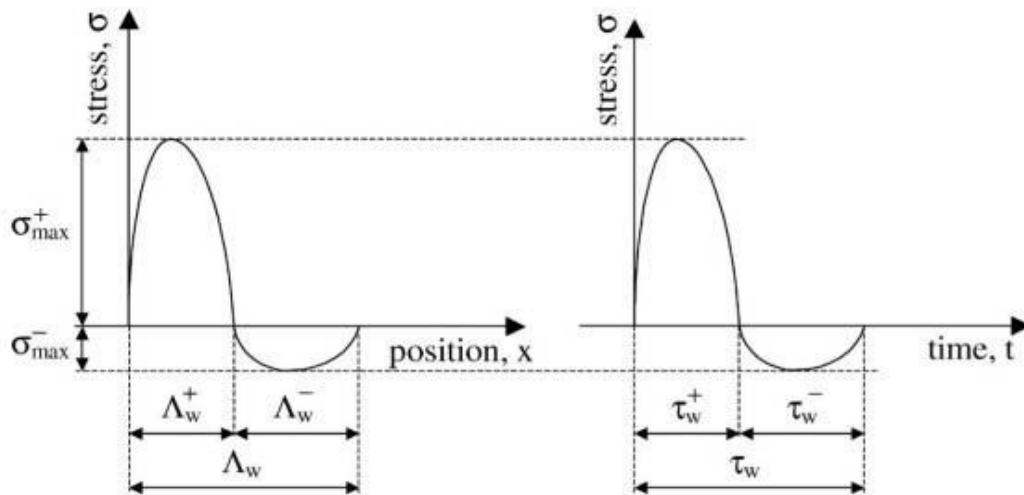
2.3. Cơ sở lý thuyết về phá vỡ đá bằng tương tác sóng ứng suất

Quá trình phá vỡ đá trong nổ mìn truyền thống chủ yếu dựa vào hai cơ chế: (i) sóng nén (sóng xung kích) lan truyền từ lỗ mìn, gây vỡ nứt ban đầu và (ii) sóng

nén khi đi đến mặt tự do sẽ phản xạ trở lại thành sóng kéo, mà đá có cường độ chịu kéo kém hơn nhiều so với cường độ chịu nén, nên bị phá vỡ (Petropoulos, 2013).

Về mặt lý thuyết, quá trình phá vỡ đất đá dựa trên sự lan truyền của sóng xung kích với tốc độ rất cao ($3000\div 5000$ m/s), bao gồm sóng nén (P) và sóng kéo/cắt (S). Rossmanith (2002) mô tả sóng ứng suất dạng xung có cấu trúc gồm phần dẫn đầu (dương) và phần đuôi (âm). Trong kỹ thuật nổ mìn truyền thống, do đá chịu lực kéo kém hơn lực nén, quy trình nổ thường phụ thuộc vào việc tạo ra các mặt tự do để sóng nén phản xạ trở lại dưới dạng sóng kéo nhằm phá vỡ đá.

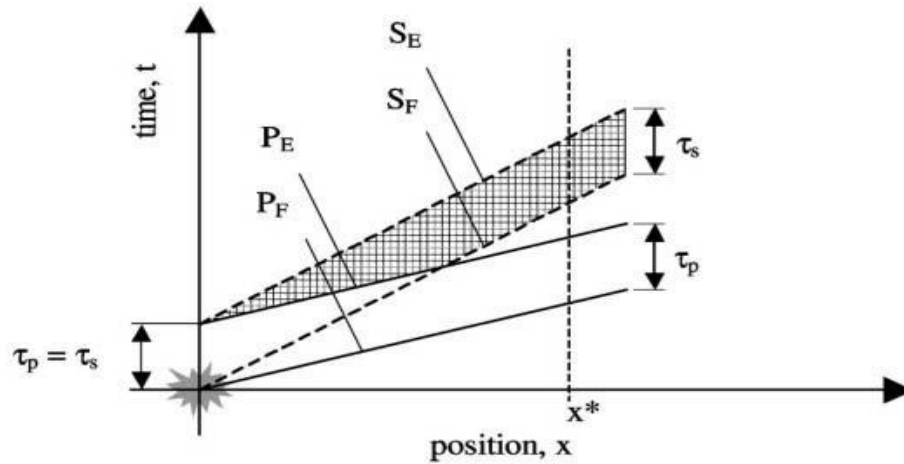
Theo khái niệm lan truyền sóng (Hustrulid, 1999), áp suất dương của sóng xung kích giảm nhanh xuống các giá trị âm, ngụ ý sự thay đổi đột ngột từ nén sang kéo. Trong mô tả chi tiết hơn về khái niệm này, Rossmanith (2002) nêu rằng sóng ứng suất dạng xung có độ dài và thời gian hữu hạn bao gồm một phần dẫn đầu và một phần đuôi (Hình 3). Các phần dẫn đầu được đặc trưng bởi chỉ số “+” và các phần đuôi bằng chỉ số “-”. Dấu +/- không nhất thiết chỉ ra sự nén hoặc kéo, mà là các phần dẫn đầu và đuôi.



Hình 3. Biểu diễn sóng ứng suất/xung trong miền a) không gian và b) thời gian (Rossmanith, 2002)

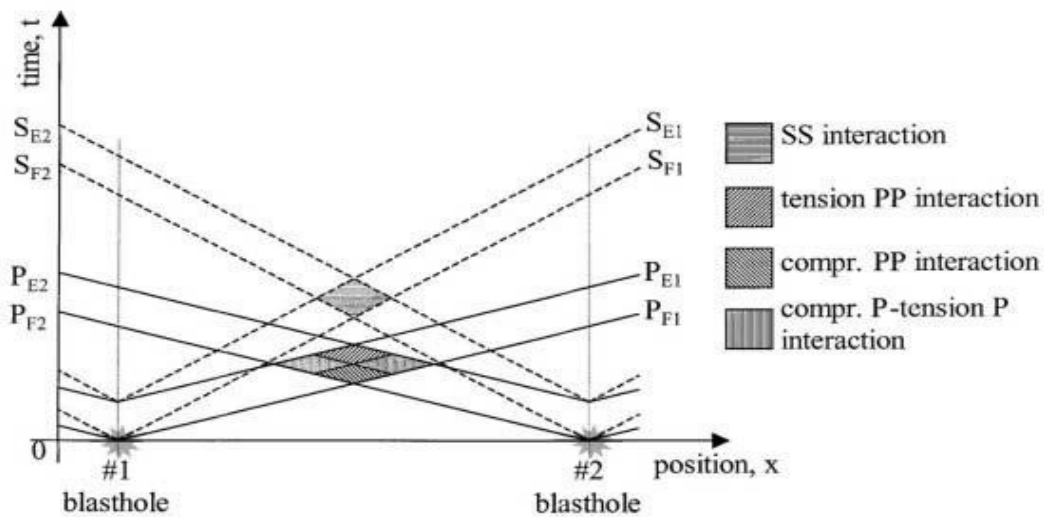
Để trình bày rõ hơn về khái niệm đã đề cập ở trên, Rossmanith (2002) đã đề xuất sử dụng biểu đồ Lagrange. Để đơn giản, sóng ứng suất được coi là phẳng, tức là một chiều; các hiệu ứng ba chiều của lỗ nổ và điện tích cũng bị bỏ qua. Hình 4 minh họa mặt trước và mặt cuối của sóng P và sóng S của xung ngắn trên biểu đồ Lagrange, bao gồm trục thời gian so với trục vị trí. Tiếp tuyến của các đường liên kết là nghịch đảo của sóng. Vì tốc độ lan truyền của sóng P lớn hơn sóng S, nên

đường liên kết của nó có độ dốc nhỏ hơn. τ_s và τ_p biểu thị thời lượng của sóng nén và sóng cắt, trong đó một phần là sóng dẫn dương theo sau là đuôi âm.



Hình 4. Định nghĩa mặt trước và đầu cuối của sóng P và sóng S cho xung ngắn (Rossmanith, 2002)

Sơ đồ biểu diễn của sự tương tác của hai sóng ứng suất từ hai lỗ nổ bắt đầu tức thời được trình bày trong Hình 5. Như đã thấy, các loại tương tác khác nhau diễn ra đối với mặt trước và đầu cuối của sóng S và P . Cũng cần nhắc lại rằng mỗi sóng bao gồm một phần dẫn đầu dương và một phần đuôi âm trong thời gian của mặt trước và mặt cuối của nó. Sơ đồ trong Hình 5 cho thấy cơ sở để thiết kế các lỗ nổ có độ trễ ngắn nhằm tăng biên độ và độ dài hiệu dụng của các tương tác sóng thuận lợi nhất, cũng như để tránh hình thành các tương tác phá hủy.



Hình 5. Sơ đồ Lagrange về các tương tác của các sóng từ hai lỗ nổ được khởi tạo đồng thời (Rossmanith, 2002)

Cơ sở lý thuyết và thực tiễn đều chứng minh rằng việc thiết kế lỗ nổ với độ trễ ngắn bằng kíp điện tử giúp tăng biên độ và độ dài hiệu dụng của các tương tác sóng có lợi. Kết quả thực tế cho thấy kíp nổ điện tử vượt trội hơn hẳn so với kíp nổ phi điện trên ba phương diện chính: cải thiện kích thước đất đá sau nổ, giảm thiểu chấn động và nâng cao năng suất thiết bị. Kỹ thuật này đòi hỏi độ chính xác về thời gian ở mức 1 ms hoặc thấp hơn. Điều này là không thể thực hiện được với kíp phi điện (vốn có sai số hàng chục mili giây) mà chỉ có thể thực hiện được với kíp nổ điện tử (Petropoulos, 2013).

2.4. Phương pháp nghiên cứu

Để đạt được mục tiêu đề ra, nghiên cứu sử dụng các phương pháp chính sau:

- Phương pháp tổng hợp và nghiên cứu tài liệu khoa học: nghiên cứu tổng hợp, phân tích các công trình khoa học, báo cáo kỹ thuật, và các nghiên cứu điển hình đã được công bố trên thế giới về việc ứng dụng kíp nổ điện tử. Các tài liệu này được thu thập từ các hội nghị quốc tế (ISEE, Fragblast), các tạp chí chuyên ngành (Rock Mechanics, Mining Technology) và các báo cáo kỹ thuật từ các mỏ (mỏ Aitik, Thụy Điển).

- Phương pháp phân tích thông số kỹ thuật: thu thập và phân tích thông số kỹ thuật của các hệ thống kíp nổ điện tử hiện đại (hệ thống HEBS II của Hanwha, Hàn Quốc; hệ thống của Yipuli Xianghong của Trung Quốc) để làm cơ sở so sánh kỹ thuật với công nghệ kíp vi sai phi điện truyền thống.

- Phương pháp phân tích bối cảnh Việt Nam: phân tích thực trạng công nghệ nổ mìn, các thách thức thực tế tại Việt Nam, dựa trên các phương án kỹ thuật và báo cáo của các đơn vị khai thác mỏ.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân tích thông số kỹ thuật của hệ thống kíp nổ điện tử

Việc đánh giá hiệu quả của công nghệ nổ mìn điện tử cần dựa trên các thông số kỹ thuật định lượng cụ thể. Trong nghiên cứu này, chúng tôi phân tích hai hệ thống kíp nổ điện tử điển hình: hệ thống HEBS II (Hanwha - Hàn Quốc) và hệ thống kíp nổ điện tử Yipuli Xianghong (Yipuli - Trung Quốc), đồng thời so sánh với các thông số của kíp nổ vi sai phi điện đang sử dụng phổ biến tại Việt Nam.

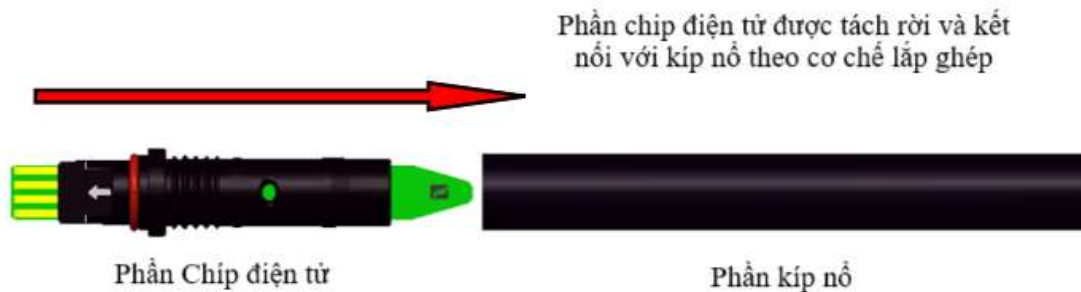
3.1.1. Đặc tính kỹ thuật của hệ thống kíp nổ điện tử nghiên cứu

- Hệ thống HEBS II (Hanwha): nổi bật với độ chính xác thời gian cao và khả năng lập trình linh hoạt. Chip vi xử lý trong kíp HEBS II cho phép lập trình thời

gian trễ từ 0 - 50.000 ms với bước nhảy 1 ms. Độ chính xác của hệ thống đạt mức 0,02% so với thời gian cài đặt, giúp loại bỏ gần như hoàn toàn sai số ngẫu nhiên trong chuỗi nổ. Về mặt an toàn, kíp có khả năng chống phóng tĩnh điện lên tới 30 kV (tại 2.500 pF) và hoạt động ổn định trong dải nhiệt độ từ -20°C đến +60°C. Thiết bị khởi nổ có thể kích hoạt tới 3.000 kíp trong chế độ đơn lẻ hoặc lên tới 63.000 kíp trong chế độ kết nối đa máy.

- Hệ thống kíp nổ điện tử Yipuli Xianghong: các dòng kíp điện tử công nghiệp có dải thời gian trễ lập trình từ 0÷12.000 ms. Sai số thời gian được kiểm soát chặt chẽ: không quá $\pm 1,5$ ms đối với thời gian vi sai ≤ 150 ms và không quá $\pm 1\%$ đối với thời gian vi sai > 150 ms. Hệ thống này được thiết kế để chịu đựng điều kiện môi trường khắc nghiệt với dải nhiệt độ hoạt động rộng từ -40°C đến +80°C và khả năng chịu áp lực nước 0,05 MPa trong 24 giờ. Đặc biệt, kíp có tính năng an toàn điện cao, không phát nổ khi chịu điện áp 220V AC hoặc 48V DC trong 10 giây.

- Bên cạnh các dòng kíp nổ điện tử tích hợp truyền thống, công nghệ kíp nổ điện tử thế hệ mới dạng “tháo rời” cũng đang được phát triển nhằm tối ưu hóa độ an toàn nội tại. Đặc điểm kỹ thuật nổi bật của dòng sản phẩm này là loại bỏ hoàn toàn thuốc nổ môi (no ignition head) - bộ phận dễ gây ra hiện tượng kíp câm do đứt gãy trong quá trình vận chuyển. Thay vào đó, cơ chế khởi nổ sử dụng điện trở phát nhiệt dạng chip kết hợp với tụ điện khởi nổ dung lượng lớn (lên tới 220 μ F, gấp 3 lần thông thường). Cải tiến này không chỉ cung cấp nguồn năng lượng dồi dào giúp mô-đun chip chống nhiễu tốt hơn mà còn đảm bảo khả năng kích nổ ổn định trong các môi trường áp lực cao (Hình 6).



Hình 6. Kíp nổ điện tử với phản chip điện tử tháo rời

3.1.2. So sánh với kíp nổ vi sai phi điện phổ biến tại Việt Nam

Kíp nổ vi sai phi điện hiện đang được sử dụng rộng rãi tại các mỏ của TKV (như: Cao Sơn, Đèo Nai). Tuy nhiên, công nghệ này dựa trên tốc độ cháy của thuốc chậm pyrotechnic, dẫn đến sai số về thời gian vi sai lớn. Dưới đây là bảng so sánh tổng hợp các thông số kỹ thuật chính:

Bảng 1. Bảng so sánh thông số kỹ thuật giữa kíp điện tử và kíp vi sai phi điện

Thông số	Kíp nổ điện tử	Kíp vi sai phi điện
Cơ chế vi sai	Chip vi xử lý (Microchip/ASIC).	Thuốc chậm hóa học (Pyrotechnic).
Độ chính xác thời gian vi sai	$\pm 0,02\%$ (HEBS II) hoặc $\pm 1\%$ (TQ).	Khoảng $\pm 5\%$ đến $\pm 10\%$ (tùy dải vi sai).
Dải thời gian vi sai	0 - 50.000 ms, lập trình tự do bước nhảy 1 ms.	Cố định theo các cấp (ví dụ: 25, 42, 500 ms...).
Khả năng kiểm tra	Giao tiếp hai chiều: kiểm tra ID, thông mạch, trạng thái kíp trước khi nổ.	Không thể kiểm tra tình trạng kíp sau khi đã nạp xuống lỗ.
An toàn	Chống tĩnh điện cao (30kV), an toàn với dòng điện lạc.	Nhạy cảm với tác động cơ học mạnh, an toàn với điện nhưng không kiểm soát được nổ sớm do va đập.

3.1.3. Phân tích thông số kỹ thuật

Sự chênh lệch về thông số kỹ thuật cho thấy kíp nổ phi điện hiện tại có sai số vi sai lớn, gây khó khăn cho việc thực hiện các quy trình nổ mìn chính xác yêu cầu vi sai nhỏ (dưới 10 ms) để tối ưu hóa sự phân mảnh và giảm chấn động. Ngược lại, với độ chính xác 0,02% của HEBS II, các kỹ sư có thể thiết kế các khoảng thời gian trễ chính xác đến từng mili giây, đảm bảo các lỗ mìn nổ đúng trình tự thiết kế, không xảy ra hiện tượng chồng chéo sóng nổ ngoài ý muốn, từ đó giải quyết triệt để bài toán về an toàn và môi trường tại các mỏ lộ thiên sâu và phức tạp. Cụ thể:

- Sai số vi sai: kíp nổ điện tử đạt độ chính xác gần như tuyệt đối. Các tài liệu kỹ thuật và thử nghiệm đo đạc khẳng định sai số của kíp điện tử có thể chính xác tới 0,02% so với thời gian lập trình. Ngược lại, kíp nổ phi điện truyền thống, vốn dựa vào tốc độ cháy của dây dẫn và các bộ phận vi sai pyrotechnic, có sai số thực tế rất cao. Sai số này dao động trong khoảng 5 - 10% thời gian danh định, và một số tài liệu tổng quan còn ghi nhận mức sai số lên đến 10 - 20%.

- Phạm vi vi sai và khả năng lập trình: kíp nổ điện tử cho phép lập trình vi sai từng mili giây một (bước lập trình 1 ms) trong một dải rộng. kíp phi điện bị giới hạn bởi các số vi sai cố định do nhà sản xuất cung cấp (17 ms, 25 ms, 42 ms, 67 ms...).

- Tăng khả năng kiểm soát: trước khi nổ, thiết bị điều khiển sẽ gửi tín hiệu kiểm tra đến từng kíp nổ, nhận diện ID và xác nhận tình trạng kết nối, điện trở, và dòng rò. Hệ thống sẽ báo lỗi nếu phát hiện đầu nối sai, hở mạch, hoặc kíp hỏng, cho phép người chỉ huy nổ mìn khắc phục trước khi khai hỏa. Kíp phi điện không có khả năng này; việc kiểm tra chỉ dừng ở mức “thông mạch” vật lý, không thể phát hiện sai số vi sai hoặc lỗi kíp nổ. Trong trường hợp có kíp nổ không được lập trình thời gian vi sai thì kíp đó sẽ vẫn được kích nổ vào thời điểm mặc định tùy theo hệ thống kíp nổ điện tử.

- Loại bỏ hiện tượng “cắt mìn”: cơ chế hoạt động của kíp điện tử diễn ra theo quy trình lần lượt là nạp, tích năng lượng vào tụ điện, nhận lệnh nổ, đếm ngược, kích nổ. Kíp nổ điện tử hoạt động độc lập nhờ cơ chế tích trữ năng lượng vào tụ điện nội bộ ngay khi nhận lệnh nạp. Nhờ đó, chip điện tử vẫn duy trì hoạt động và kích nổ chính xác theo thời gian lập trình ngay cả khi dây dẫn bị cắt đứt do va đập hoặc áp lực đất đá, khắc phục hoàn toàn nhược điểm dễ bị vô hiệu hóa do đứt dây tín hiệu của kíp vi sai phi điện.

- An toàn: kíp điện tử sở hữu các tính năng an toàn vượt trội. Thử nghiệm cho thấy khả năng kháng tĩnh điện lên đến 30 kV, và khả năng kháng nước cao (có thể chịu được 4 tuần ở độ sâu 7 m).

Những kết quả này khẳng định: kíp điện tử được lập trình với bước nhảy vi sai 1 ms và với sai số vi sai dưới 1% cung cấp cho kỹ sư nổ mìn một công cụ chính xác, trong khi kíp phi điện với sai số 5 - 10% là một rào cản không thể vượt qua khi muốn áp dụng các lý thuyết nổ mìn chính xác.

3.2. Lợi ích đã được kiểm chứng qua các nghiên cứu điển hình trên thế giới

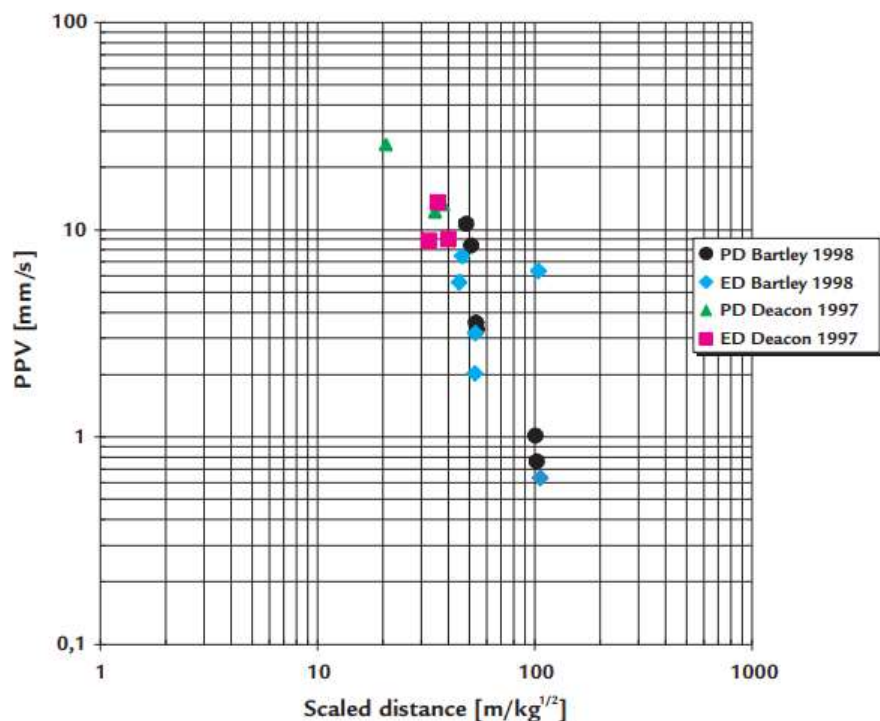
Các nghiên cứu thực nghiệm tại nhiều mỏ lộ thiên quy mô lớn trên thế giới đã chứng minh việc chuyển đổi từ kíp nổ phi điện sang hệ thống kíp nổ điện tử mang lại hiệu quả rõ rệt trên ba khía cạnh chính: giảm thiểu chấn động, cải thiện độ phân mảnh đất đá và hiệu quả kinh tế.

3.2.1. Giảm thiểu chấn động và tác động môi trường

Một trong những ưu điểm lớn nhất của kíp nổ điện tử là khả năng kiểm soát chính xác thời gian kích nổ, cho phép thiết kế các khoảng thời gian vi sai nhằm triệt tiêu cộng hưởng sóng chấn động.

- Tại mỏ than Bhumi Rantau Energi (Indonesia), nghiên cứu so sánh giữa kíp Nonel và hệ thống kíp điện tử HEBS II cho thấy: với cùng một lượng thuốc nổ,

kíp điện tử giúp giảm giá trị vận tốc dao động hạt cực đại (PPV) tới 35,20% so với kíp Nonel. Điều này cho phép mở tăng lượng thuốc nổ tức thời (charge per delay) lên đáng kể (từ 80 kg lên 130 kg ở khoảng cách 500 m) mà vẫn đảm bảo tuân thủ giới hạn rung chấn an toàn cho các công trình lân cận.



Hình 7. Biểu đồ so sánh mức độ rung chấn (PPV) giữa kíp điện tử và kíp phi điện theo khoảng cách quy đổi (Cardu, 2013)

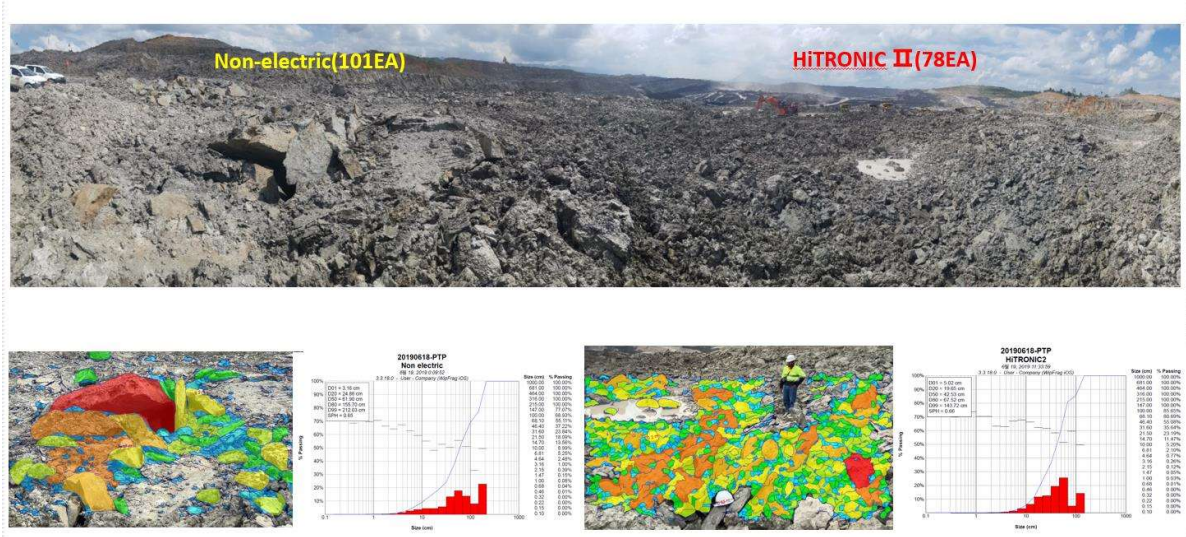
- Tổng quan nghiên cứu của Cardu và cộng sự (2013) cũng ghi nhận các trường hợp tại mỏ đá vôi ở Pháp và Nam Phi, nơi kíp điện tử giúp giảm mức rung chấn (PPV) từ 30 - 55% so với kíp phi điện.

- Tại Ấn Độ, các mỏ than thuộc NCL (vùng Singrauli) đã giải quyết được các khiếu nại của người dân về rung chấn và tiếng ồn bằng cách áp dụng kíp điện tử, đồng thời giảm thiểu thời gian dừng máy xúc do các sự cố liên quan đến môi trường.

3.2.2. Cải thiện độ phân mảnh đất đá

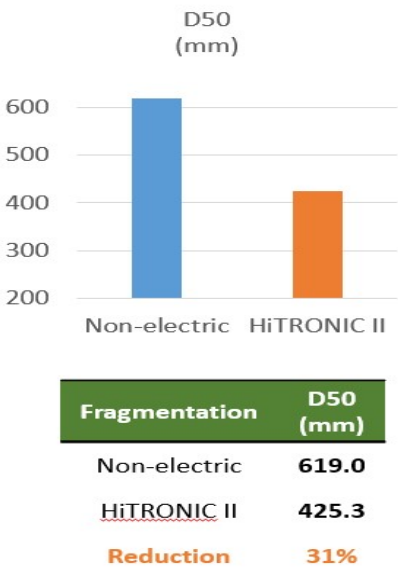
Độ chính xác về thời gian vi sai của kíp điện tử (sai số < 0,1% đến 0,02%) cho phép tận dụng tối đa sự tương tác của các sóng ứng suất để phá vỡ đất đá hiệu quả hơn. Kết quả thực nghiệm tại mỏ Aitik (Thụy Điển) chỉ ra rằng việc sử dụng thời gian trễ ngắn chính xác (3 ms giữa các lỗ) giúp tạo ra độ phân mảnh tốt nhất. Các

chỉ số kích thước đá X₅₀ (trung bình) và X₈₀ (80% khối lượng qua sàng) đều giảm đáng kể so với các bãi nổ sử dụng kíp phi điện thông thường (Petrooulos).



Hình 8. So sánh mức độ đập vỡ đất đá sau nổ giữa kíp điện tử và loại kíp khác (Hanwha)

Nghiên cứu tại Indonesia ghi nhận kích thước đá trung bình P₈₀ giảm 15,14% (từ 62,79 cm xuống 53,29 cm) khi sử dụng kíp điện tử. Quan trọng hơn, độ đồng đều của đồng đá tăng 20,25%, giúp giảm thiểu tỷ lệ đá quá cỡ. Các dữ liệu khác cũng cho thấy kíp điện tử giúp giảm kích thước đá tối đa khoảng 24÷33% và kích thước trung bình khoảng 19÷38% tùy thuộc vào điều kiện địa chất.



Hình 9. Kết quả so sánh độ phân mảnh của kíp điện tử Hitronic (Hanwha) và kíp nổ vi sai phi điện

Trong một thử nghiệm so sánh của hệ thống kíp nổ điện tử Hitronic II và kíp nổ truyền thống của Hanwha trên cùng một khu vực (Hình 8) cho thấy sử dụng kíp nổ điện tử giúp cho kích thước đất đá đồng đều hơn, giảm thiểu tỷ lệ đá quá cỡ. Kết quả cụ thể, kích thước đất đá D_{50} (trung bình) giảm từ 619 mm xuống còn 425,3 mm tương đương với mức giảm thiểu 31% (Hình 9).

3.2.3. Tối ưu hóa năng suất xúc bốc và nghiền sàng

Sự cải thiện trong phân mảnh đất đá tác động trực tiếp đến hiệu suất của các công đoạn sau nổ mìn (xúc bốc, vận tải, nghiền), tạo ra lợi ích kinh tế:

- Tăng năng suất máy xúc: đất đá tơi và đồng đều giúp giảm thời gian xúc của máy xúc. Tại Indonesia, thời gian xúc của máy Komatsu PC-1250 giảm 6,57% khi chuyển sang dùng kíp điện tử. Một nghiên cứu khác được trích dẫn bởi Bartley (2001) cho thấy thời gian đào giảm tới 25%.

- Giảm năng lượng nghiền: tại mỏ Aitik, mặc dù kết quả năng lượng nghiền biến động, nhưng các thử nghiệm với thời gian vi sai 6 ms cho thấy mức tiêu thụ năng lượng nghiền thấp nhất trong tất cả các thử nghiệm, chứng minh tiềm năng tiết kiệm điện năng tại nhà máy tuyển (Petropoulos, 2013).

- Giảm chi phí vận hành: tại mỏ sắt của Tập đoàn Tata (Ấn Độ), việc mở rộng quy mô bãi nổ nhờ kíp điện tử (tăng chiều dài bãi nổ lên 320 m) đã giúp giảm số lần nổ mìn, qua đó giảm thời gian dừng thiết bị và chi phí vận hành máy nổ.

3.2.4. Kiểm soát quy trình an toàn

Bên cạnh hiệu quả kinh tế, kíp điện tử nâng cao đáng kể mức độ an toàn:

- Khả năng kiểm tra hai chiều của hệ thống cho phép phát hiện các lỗi kết nối, hở mạch hoặc kíp hỏng trước khi khởi nổ, giúp loại bỏ rủi ro mìn cảm.

- Cơ chế an toàn cao giúp kíp không thể bị kích nổ bởi các nguồn điện lạc, sóng vô tuyến hay ma sát thông thường.

Trong thời đại công nghệ số như hiện nay, một số quốc gia quản lý hoạt động nổ mìn thông qua kiểm soát kíp nổ điện tử. Như Trung Quốc đã quản lý theo mã hóa và định danh cho từng kíp điện tử, bộ kích nổ điện tử được mã hóa, chỉ hoạt động với kíp được đăng ký đối với từng hộ chiếu nổ mìn được cấp phép. Dữ liệu kíp điện tử và thông tin vụ nổ được đưa vào hệ thống quản lý vật liệu nổ công nghiệp Quốc gia qua đó giúp hạn chế tối đa tình trạng nổ mìn trái phép.

3.3. Tiềm năng ứng dụng kíp nổ điện tử tại Việt Nam

Trong bối cảnh ngành công nghiệp khai thác mỏ tại Việt Nam, đặc biệt là tại các mỏ than lộ thiên vùng Quảng Ninh, đang phải đối mặt với những thách thức

ngày càng lớn về điều kiện khai thác và yêu cầu bảo vệ môi trường, tiềm năng ứng dụng của kíp nổ điện tử được đánh giá là rất cao và cấp thiết bởi các lý do sau:

- Nhu cầu chuyển đổi công nghệ tại các mỏ lộ thiên quy mô lớn

Hiện nay, công tác nổ mìn tại Việt Nam chủ yếu vẫn dựa vào các loại kíp nổ truyền thống: kíp nổ điện (dành cho mỏ quy mô nhỏ), kíp vi sai điện và phổ biến nhất là kíp nổ vi sai phi điện tại các mỏ lớn như than, quặng sắt, bauxite. Tuy nhiên, với các mỏ than lớn tại Quảng Ninh như Cao Sơn, Đèo Nai - Cọc Sáu và Hà Tu, việc khai thác đang ngày càng xuống sâu, dẫn đến điều kiện địa chất phức tạp với đất đá có độ cứng cao (hệ số kiên cố $f = 9 \div 13$) và xuất hiện nhiều lớp kẹp.

Trong điều kiện này, hệ thống kíp nổ phi điện bộc lộ hạn chế do sai số thời gian nổ lớn, không thể thực hiện các kịch bản nổ với thời gian vi sai nhỏ (< 10 ms) để tận dụng hiệu ứng cộng hưởng sóng nổ giúp phá vỡ đất đá hiệu quả. Việc áp dụng kíp nổ điện tử với độ chính xác cao (sai số $< 0,1\%$) sẽ cho phép thiết kế các mạng nổ phức tạp, giúp tăng cường độ tơi của đất đá, giảm suất tiêu hao thuốc nổ và giảm thiểu chi phí cho công tác khoan-nổ mìn cũng như các khâu xúc bốc, vận tải phía sau.

Với quy mô nổ mìn hằng năm tại ba mỏ lớn nhất vùng Quảng Ninh lên tới hơn 110 triệu m^3 đất đá và sử dụng khoảng 48 nghìn tấn thuốc nổ, việc chuyển đổi sang kíp điện tử hứa hẹn mang lại lợi ích kinh tế to lớn nhờ tối ưu hóa quy mô bãi nổ và giảm thiểu thời gian dừng mỏ.

- Đáp ứng yêu cầu nghiêm ngặt về môi trường và an toàn

Một động lực quan trọng thúc đẩy việc ứng dụng kíp nổ điện tử tại Việt Nam là xu hướng phát triển kinh tế gắn liền với bảo vệ môi trường, đặc biệt là chủ trương chuyển dịch từ “nâu” sang “xanh” của tỉnh Quảng Ninh. Các mỏ than lộ thiên ngày càng tiến gần đến khu vực dân cư và các công trình công nghiệp, do đó yêu cầu về kiểm soát chấn động, sóng đập không khí và đá văng trở nên cực kỳ khẩn cấp.

- Tối ưu chi phí và an toàn trong quá trình vận chuyển

Ngoài hiệu quả kỹ thuật tại bãi mìn, khả năng tiếp cận công nghệ và tối ưu hóa chi phí cũng là yếu tố then chốt cho việc áp dụng rộng rãi kíp nổ điện tử tại Việt Nam. Một hướng đi tiềm năng đang được nghiên cứu là mô hình cung ứng kíp nổ điện tử dạng mô-đun tháo rời. Công nghệ này cho phép tách biệt quy trình vận chuyển kíp nổ cơ bản, chip điện tử và dây dẫn, giúp chuyển đổi phân loại vận chuyển từ hàng nguy hiểm sang hàng hóa thông thường đối với linh kiện chip điện tử và dây dẫn.

Kíp nổ điện tử, với khả năng lập trình thời gian vi sai linh hoạt và chính xác, cho phép kiểm soát rung chấn hiệu quả hơn nhiều so với kíp vi sai phi điện, giúp giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường xung quanh và các công trình cần bảo vệ. Bên cạnh đó, tính năng an toàn cao của kíp điện tử, bao gồm khả năng kiểm tra toàn vẹn mạch nổ trước khi kích hoạt và khả năng chống lại các dòng điện lạc, giúp giảm thiểu rủi ro tai nạn lao động và sự cố mìn câm, mìn nổ không hoàn toàn.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã phân tích toàn diện cơ sở kỹ thuật và tiềm năng ứng dụng của kíp nổ điện tử trong bối cảnh khai thác mỏ lộ thiên sâu tại Việt Nam. Dựa trên các dữ liệu kỹ thuật và kết quả thực nghiệm đã công bố, các kết luận chính được rút ra như sau:

Thứ nhất, về mặt công nghệ và độ chính xác, kíp nổ điện tử đại diện cho bước tiến vượt bậc so với công nghệ kíp nổ vi sai phi điện truyền thống.

- Hệ thống kíp nổ điện tử loại bỏ hoàn toàn cơ chế vi sai thuốc cháy chậm, thay thế bằng chip vi xử lý thông minh, giúp đạt độ chính xác thời gian gần như tuyệt đối với sai số 0,02% (so với mức 5 - 10% của kíp vi sai phi điện).

- Khả năng lập trình linh hoạt với bước nhảy 1 ms cho phép các kỹ sư thiết kế chính xác các khoảng vi sai ngắn (dưới 10 ms) để tận dụng sự tương tác sóng ứng suất nhằm tối ưu hóa quá trình phá vỡ đất đá.

Thứ hai, về hiệu quả kỹ thuật và môi trường, việc chuyển đổi sang kíp nổ điện tử giải quyết triệt để các bài toán khó mà các mỏ lộ thiên đang gặp phải:

- Giảm thiểu rung chấn: nhờ khả năng kiểm soát chính xác thời gian kích nổ để triệt tiêu cộng hưởng sóng, kíp điện tử được chứng minh giúp giảm vận tốc dao động hạt cực đại (PPV) tới 35,2%, cho phép mở duy trì sản xuất an toàn ngay cả khi gần khu dân cư.

- Cải thiện mức độ đập vỡ đất đá: độ đồng đều của đồng đá sau nổ tăng khoảng 20%, giảm tỷ lệ đá quá cỡ, từ đó trực tiếp nâng cao năng suất thiết bị xúc bốc (giảm thời gian xúc tới 6,57%) và giảm chi phí nghiền sàng.

Thứ ba, về mức độ an toàn, kíp nổ điện tử cung cấp tiêu chuẩn an toàn cao hơn hẳn.

- Tính năng giao tiếp hai chiều cho phép kiểm tra toàn vẹn mạch nổ, phát hiện lỗi kết nối hoặc kíp hỏng trước khi khởi nổ, giúp loại bỏ rủi ro mìn câm.

- Cơ chế bảo vệ giúp kíp an toàn với các nguồn điện ngoại lai như dòng điện rò hay sóng vô tuyến, đảm bảo an toàn trong môi trường mỏ phức tạp.

Cuối cùng, về tính khả thi tại Việt Nam, nghiên cứu khẳng định kíp nổ điện tử là giải pháp tất yếu cho ngành khai thác mỏ, đặc biệt tại vùng than Quảng Ninh.

Trong bối cảnh các mỏ khai thác xuống sâu, đất đá cứng và địa chất phức tạp, kíp vi sai phi điện với sai số lớn không còn đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật.

Việc áp dụng công nghệ này hoàn toàn phù hợp với xu hướng chuyển dịch kinh tế “từ nâu sang xanh” của địa phương, đáp ứng các tiêu chuẩn khắt khe về môi trường và là công cụ chủ lực để hiện đại hóa, nâng cao hiệu quả kinh tế và an toàn cho ngành công nghiệp khai khoáng Việt Nam trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hoàn thành với sự hỗ trợ về cơ sở vật chất và chuyên môn từ Tổng công ty Công nghiệp Hóa chất mỏ - Vinacomin (MICCO). Các tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến các tổ chức trên.

Tài liệu tham khảo

[1] Cardu, M., Giraudi, A. và Oreste, P. (2013). *A review of the benefits of electronic detonators*. Rem: Revista Escola de Minas, 66(3), pp. 375 - 382.

[2] Công ty TNHH Cơ khí Hóa chất Yipuli Xianghong (2024). *Tài liệu kỹ thuật sản phẩm, Hồ Nam*. Trung Quốc.

[3] Công ty cổ phần Công nghệ Hanbao Yunling (Vân Nam) (2024). *Tài liệu kỹ thuật sản phẩm, Vân Nam*. Trung Quốc.

[4] Ding, Z., Nguyen, H., Bui, X. N., Zhou, J. và Moayedi, H. (2019). *Computational Intelligence Model for Estimating Intensity of Blast-Induced Ground Vibration in a Mine Based on Imperialist Competitive and Extreme Gradient Boosting Algorithms*.

[5] Handayana, R. H. và Hasibuan, T. D. H. (2022). *Electronic Blasting System Application for Safe Environmental Impact and Enhance Productivity*.

[6] Hanwha Corporation và MICCO (2024). *Hanwha HEBS II Presentation*. Tài liệu hội thảo giới thiệu công nghệ.

[7] Petropoulos, N., Johansson, D., Nyberg, U., Novikov, E. và Beyglou, A.. (2013). *Improved blasting results through precise initiation - results from field*

trials at the Aitik open pit mine. Báo cáo khoa học Swebrec, Report 2013:1, Luleå University of Technology, Thụy Điển.

[8] Sarma, P. V. S., Sao, A. D. và Kazmi, A. M.. (2016). *Electronic detonators: A tool for mitigating mining costs and risks*. Recent Advances in Rock Engineering (RARE 2016), Atlantis Press, pp. 396 - 399.

[9] Verakis, H. và Lobb, T.. (2004). *Evaluation of Electronic Detonators - Requirements for Shunting & Circuit Testing*. Báo cáo kỹ thuật (PAR 0088857 A10), Mine Safety and Health Administration (MSHA), U.S. Department of Labor.



ISBN: 978-604-76-3270-1



9 786047 632701

SÁCH KHÔNG BÁN