

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

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 Đức 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

RỦI RO TRONG CÔNG TÁC NỔ Mìn TẠI MỎ LỘ THIÊN PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ VÀ CÁC GIẢI PHÁP KIỂM SOÁT TOÀN DIỆN

Trần Đình Bão^{1, 2, *}, Nguyễn Đình An^{1, 2}, Trần Quang Hiếu^{1, 2}

TÓM TẮT

Công tác nổ mìn là một khâu công nghệ không thể thiếu, quyết định hiệu quả của khai thác khoáng sản có ích bằng phương pháp lộ thiên. Tuy nhiên, đây cũng là công đoạn tiềm ẩn nhiều rủi ro phức tạp, gây ra các tác động tiêu cực đến an toàn, sức khỏe con người, môi trường và sự ổn định của hoạt động sản xuất. Bài báo này trình bày một cách hệ thống các loại rủi ro chính trong công tác nổ mìn tại mỏ lộ thiên, bao gồm các rủi ro thường gặp như: đá văng, rung chấn, sóng đập không khí, khí độc và bụi, và các rủi ro khác. Trên cơ sở phân tích các tài liệu trong các giáo trình, đề tài khoa học và các công trình nghiên cứu đã được công bố trong và ngoài nước, bài báo đi sâu vào các yếu tố cơ bản gây ra rủi ro, phân loại chúng thành các nhóm: địa chất - địa kỹ thuật, thiết kế - thi công nổ mìn, trang thiết bị - công nghệ, và đặc biệt là yếu tố con người và tổ chức. Cuối cùng, bài báo đề xuất một khung quản lý rủi ro tích hợp, nhấn mạnh sự kết hợp giữa các giải pháp kỹ thuật tiên tiến, quy trình hành chính chặt chẽ và việc xây dựng văn hóa an toàn chủ động. Các xu hướng công nghệ mới như IoT, AI trong giám sát và dự báo cũng được xem xét như một hướng đi tất yếu để nâng cao hiệu quả quản lý rủi ro trong tương lai.

Từ khóa: an toàn nổ mìn, mỏ lộ thiên, quản lý rủi ro, đánh giá rủi ro, đá văng, rung chấn, yếu tố con người, văn hóa an toàn.

1. Giới thiệu

Khai thác mỏ lộ thiên đã và đang đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp nguyên liệu thô thiết yếu cho các ngành công nghiệp khác như sản xuất điện, luyện kim, xi măng, xây dựng, điện tử và năng lượng tái tạo,... Ngoài việc cung cấp

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất

² Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam

*Email: trandinhbao@hung.edu.vn

nguyên liệu, khai thác mỏ nói chung, khai thác lộ thiên nói riêng tạo ra nhiều việc làm, đóng góp vào ngân sách nhà nước và thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội tại địa phương. Để phá vỡ các khối đá cứng và khai thác khoáng sản có ích một cách kinh tế, công nghệ khoan - nổ mìn sử dụng vật liệu nổ công nghiệp là phương pháp hiệu quả và phổ biến nhất hiện nay (Roy, 2021). Phương pháp này dựa trên việc sử dụng năng lượng chuyển hóa từ chất nổ công nghiệp để làm vỡ, dịch chuyển đá thải và khoáng sản có ích ra khỏi nguyên khối. Tuy nhiên, việc giải phóng một nguồn năng lượng lớn trong một khoảng thời gian cực ngắn luôn đi kèm với những rủi ro không mong muốn. Các sự cố nổ mìn có thể gây thiệt hại kinh tế (phá hủy cơ sở hạ tầng, hỏng hóc thiết bị), tai nạn nghiêm trọng, ảnh hưởng đến tính mạng con người (thương vong hoặc tử vong cho người lao động và dân cư lân cận) và môi trường.

Các ảnh hưởng tiêu cực chính của nổ mìn khai thác mỏ lộ thiên bao gồm là ô nhiễm không khí (bụi mịn, khí độc), rung chấn (tác động đến công trình và môi trường), sóng va đập không khí và đá văng, gây nguy cơ an toàn lao động (tai nạn lao động, bệnh hô hấp) và ảnh hưởng môi trường xung quanh (ô nhiễm nguồn nước, mất đa dạng sinh học) (Wade, n.d.; Kiani và cộng sự, 2019). Đá văng là các mảnh đá bị bắn ra khỏi khu vực nổ mìn, đây là một trong những mối nguy hiểm nghiêm trọng nhất và thường gây ra các tác động lớn nhất trong hoạt động nổ mìn khai thác mỏ do gây ra tai nạn và thiệt hại tài sản (Kricak và cộng sự, 2012). Rung chấn và sóng đập không khí sinh ra do nổ mìn có thể gây hư hại đến các công trình xây dựng lân cận, ảnh hưởng đến sự ổn định của bờ mỏ và gây ra sự khó chịu cho các hộ dân sống xung quanh khu vực khai thác. Trong khi đó, khí độc (chủ yếu là NOx và CO) và bụi mịn (đặc biệt là bụi chứa silic và các hạt nguy hiểm) là những tác nhân gây ra các bệnh nghề nghiệp nghiêm trọng như bệnh bụi phổi và bệnh bụi phổi silic cùng với khí độc, gây ô nhiễm không khí cục bộ và lâu dài (Wade, N.D., 2002). Ngoài ra, hoạt động nổ mìn và khai thác làm phá hủy môi trường sống tự nhiên, dẫn đến suy giảm đa dạng sinh học.

Theo thống kê, ngành khai thác mỏ luôn có tỷ lệ tai nạn lao động cao và ổn định hơn so với các ngành công nghiệp khác, điều này phản ánh môi trường làm việc nguy hiểm đặc thù, chiếm khoảng 12÷17% các vụ chết người (Hình 3). Mặc dù đã có những cải tiến về an toàn trong nhiều thập kỷ qua, các rủi ro vẫn còn hiện hữu và ngày càng trở nên phức tạp hơn do quy mô mỏ ngày càng lớn, điều kiện địa chất khai thác ngày càng khó khăn hơn và áp lực về sản lượng khai thác gia tăng.



Hình 1. Bụi và khí độc phát sinh trong quá trình nổ mìn khai thác đá tại mỏ đá núi Bền, xã Vĩnh Minh (Vĩnh Lộc - Thanh Hóa)

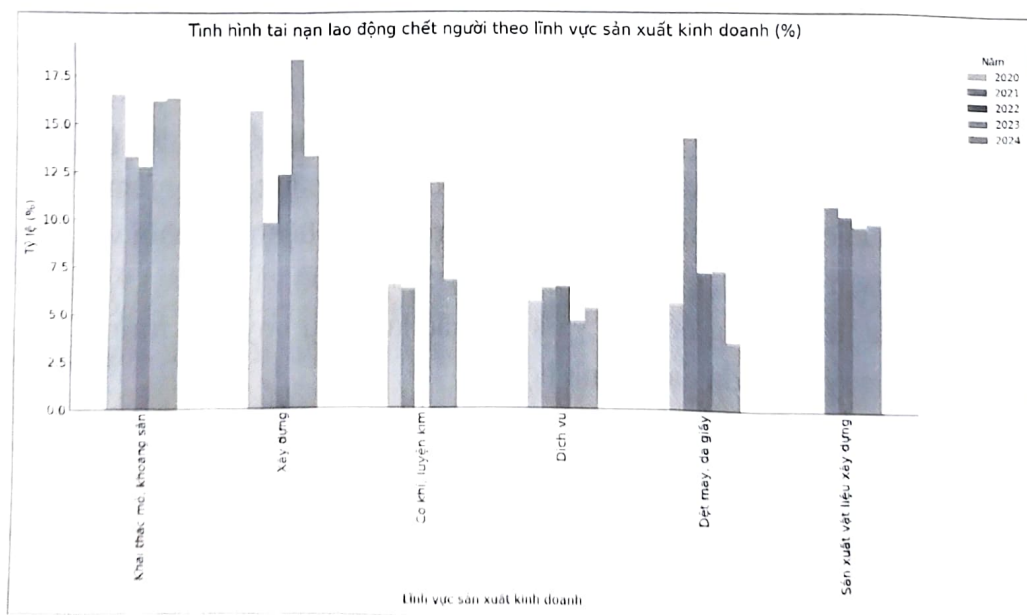
Nguồn: <https://nld.com.vn/thoi-su/no-min-pha-da-vang-troi-dan-keo-ra-duong-chan-xe-phan-doi-20170824190031787.htm>



Hình 2. Nhà nứt do việc nổ mìn từ mỏ đá Hồng Phong I, xã Phú Xá (Cao Lộc - Lạng Sơn)

Nguồn: <https://baolangson.vn/xa-hoi/51596-am-anh-no-min-pha-da-o-hong-phong.html>

Bài báo này nhằm mục đích tổng hợp và phân tích một cách có hệ thống các rủi ro phát sinh trong công tác nổ mìn tại các mỏ lộ thiên, xác định các yếu tố ảnh hưởng chính và đề xuất các phương pháp tiếp cận hiện đại trong việc đánh giá và quản lý rủi ro, hướng tới một ngành công nghiệp khai thác an toàn, bền vững và thông minh hơn.



Hình 3. Tình hình tai nạn lao động chết người theo từng lĩnh vực sản xuất kinh doanh từ năm 2020 đến năm 2024 ở nước ta [1-5]

2. Các rủi ro chính trong hoạt động nổ mìn trên mỏ lộ thiên

Theo các tài liệu quốc tế (ISO 45001, OSHA, Risk Assessment: A Practical Guide to Assessing Operational Risks): “Rủi ro là hoàn cảnh hoặc tình trạng mà mối nguy không được kiểm soát gây ra sự cố dẫn đến tai nạn lao động, bệnh nghề nghiệp, thiệt hại tài sản vật chất, ngừng hoặc gián đoạn sản xuất, ảnh hưởng đến tính toàn vẹn cơ thể, sức khỏe người lao động, uy tín và thương hiệu của công ty, ảnh hưởng đến môi trường, hệ sinh thái”.

Dựa trên bản chất và đối tượng bị tác động, các rủi ro trong công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên được phân loại thành: rủi ro về an toàn sức khỏe nghề nghiệp và rủi ro về môi trường.

2.1. Rủi ro về an toàn và sức khỏe nghề nghiệp

2.1.1. Đá văng

Trong công tác nổ mìn, đá văng là rủi ro được quan tâm hàng đầu tại các mỏ lộ thiên do khả năng gây chết người và thiệt hại nghiêm trọng đến các công trình và thiết bị, máy móc trong và ngoài mỏ. Theo phân tích của Kricak và cộng sự (2012) gần 70% các tai nạn, chấn thương liên quan đến nổ mìn ở mỏ lộ thiên là do đá văng và gác mìn chưa đảm bảo. Nguyên nhân dẫn đến hiện tượng đá văng rất phức tạp, thường là sự kết hợp của các yếu tố địa chất (sự tồn tại của các đới địa chất không biến đổi, đứt gãy, hệ thống khe nứt) và các sai sót trong tính toán các thông số của hộ chiếu nổ mìn (đường căn chưa chính xác, lượng thuốc nổ quá lớn, chiều dài bua không hợp lý) (Kricak và cộng sự, 2012).

2.1.2. Rung chấn

Sóng địa chấn sinh ra từ vụ nổ lan truyền trong môi trường đất đá. Theo các công trình nghiên cứu trên thế giới đã khẳng định chỉ khoảng 20÷30% năng lượng nổ được dùng để phá vỡ đá, phần lớn năng lượng còn lại chuyển hóa thành rung chấn (Kiani và cộng sự, 2019). Rung chấn có thể gây nứt, thậm chí sụp đổ các công trình dân dụng và công nghiệp, đồng thời ảnh hưởng đến sự ổn định của các bờ mỏ, bãi thải. Nguyên nhân chính gây ra chấn động trong quá trình nổ mìn có thể do sai sót trong nghiên cứu địa kỹ thuật khu vực nổ mìn dẫn đến chỉ tiêu thuốc nổ quá lớn, tính toán sai thời gian vi sai giữa các lỗ mìn khiến các lỗ mìn nổ đồng thời sinh ra sự cộng hưởng của sóng chấn động, năng lượng nổ thấp (chỉ tiêu thuốc nổ nhỏ) không đủ phá đá dẫn đến năng lượng chuyển hết thành sóng địa chấn,...

2.1.3. Sóng đập không khí

Áp suất không khí dư hay còn gọi là “va đập không khí” là sóng áp suất trong không khí, gây ra tiếng ồn lớn và có thể làm rung các kết cấu nhẹ như cửa sổ, mái nhà,... xuất hiện trong quá trình nổ mìn. Đây là một rủi ro thường gặp trong quá trình nổ mìn tại các mỏ lộ thiên, nguyên nhân chính dẫn đến hiện tượng này do năng lượng nổ không bị giữ trong khối đá mà thoát ra trong môi trường không khí.

2.1.4. Bụi và khí độc

Bản chất của sự nổ là một phản ứng hóa học xảy ra nhanh và mạnh, trong đó các vật liệu không bền (thuốc nổ) được kích hoạt và chuyển hóa thành các sản phẩm có năng lượng thấp hơn. Quá trình này tỏa nhiệt, giải phóng một lượng lớn khí độc (NOx, CO) và bụi. Việc hít phải bụi và khí độc sinh ra do nổ mìn trong thời gian dài là nguyên nhân chính gây ra các bệnh hô hấp mãn tính cho người lao động trực tiếp và giám tiếp thi công trên bãi nổ. Theo dữ liệu nghiên cứu đã công bố cho thấy 30% mẫu bụi tại các mỏ vượt quá giới hạn phơi nhiễm cho phép đối với silica (Wade, N.D., 2002).

2.1.5. Các sự cố nổ ngoài ý muốn và mìn câm

Các sự cố như nổ sớm, nổ do sét đánh, hoặc mìn câm là những rủi ro có xác suất thấp nhưng hậu quả cực kỳ nghiêm trọng cho người lao động và thiết bị.

- Nổ sớm, nổ do sét đánh: xảy ra khi vật liệu nổ bị kích hoạt trước thời điểm dự kiến do các yếu tố như nhiệt độ cao, rung động từ thiết bị khác, hiện tượng phóng điện, rò điện,... hoặc do tác động của các yếu tố tự nhiên như sét đánh.

- Nổ lại: xảy ra khi vật liệu nổ còn sót lại trong các lỗ mìn đã nổ không hết và bị kích nổ lần nữa khi công nhân làm việc trên gương tầng khai thác hoặc khi thực hiện các công tác xúc bốc, vận tải.

- Mìn câm: xảy ra khi có một hoặc nhiều lỗ mìn không nổ trong một bãi nổ, do các nguyên nhân như: lỗi kỹ thuật trong quá trình nạp mìn, vật liệu nổ bị hỏng, hoặc hệ thống kích nổ có vấn đề. Mìn câm là mối nguy tiềm ẩn, có thể gây nguy hiểm chết người. Công nhân có thể không biết có mìn câm còn sót lại và tiếp cận để xử lý, dẫn đến nguy cơ nổ bất ngờ khi có tác động.

2.2. Rủi ro môi trường

Ngoài những tác động trực tiếp và dễ nhận thấy đối với an toàn và sức khỏe nghề nghiệp, hoạt động nổ mìn tại các mỏ lộ thiên còn gây ra một loạt các rủi ro

và tác động tiêu cực đáng kể đến môi trường. Các tác động này có thể mang tính tức thời hoặc tích lũy dần theo thời gian, ảnh hưởng đến nhiều thành phần của hệ sinh thái và đa dạng sinh học, bao gồm địa hình, thủy văn (ô nhiễm nguồn nước), sinh quyển và chất lượng không khí. Việc đánh giá và quản lý các rủi ro này là một yêu cầu mang tính cấp thiết trong chiến lược phát triển bền vững của ngành khai thác mỏ (Doyle, 2022).

2.2.1. Ô nhiễm nguồn nước mặt và nước ngầm

Công tác nổ mìn tại các mỏ khai thác khoáng sản có ích bằng phương pháp lộ thiên có thể gây ô nhiễm nguồn nước thông qua nhiều cơ chế khác nhau:

Thứ nhất, sự hòa tan các hợp chất nitrat: vật liệu nổ công nghiệp, đặc biệt là các loại thuốc nổ có thành phần chính là amoni nitrat, thường không phản ứng hết 100% khi nổ. Lượng thuốc nổ còn lại, chưa được kích nổ hết này, đặc biệt trong các lỗ mìn có nước, có thể hòa tan và giải phóng các hợp chất nitrat (NO_3^-) và amoni (NH_4^+) vào môi trường nước. Nồng độ nitrat cao trong nước mặt và nước ngầm có thể gây ra hiện tượng phú dưỡng (tích tụ quá nhiều dinh dưỡng, chủ yếu là nitơ (N) và photpho (P), trong môi trường nước), dẫn đến sự phát triển không kiểm soát của tảo, làm suy giảm oxy hòa tan và hủy diệt các loài thủy sinh. Đối với con người, việc tiêu thụ nước nhiễm nitrat có thể gây ra hội chứng trẻ xanh (methemoglobinemia), đặc biệt nguy hiểm cho trẻ sơ sinh.



Hình 4. Hội chứng trẻ xanh ở trẻ em

Thứ hai, tăng nồng độ kim loại nặng: các vụ nổ làm phá vỡ cấu trúc khối đá, tạo ra các bề mặt mới và tăng diện tích tiếp xúc giữa đá với nước và không khí. Quá trình này đẩy nhanh quá trình phong hóa hóa học của đất đá và khoáng sản có ích, giải phóng các kim loại nặng và các nguyên tố độc hại có trong quặng hoặc đá đi kèm (như: chì, kẽm, asen, cadimi...) vào dòng chảy, gây ô nhiễm nguồn nước và có khả năng tích lũy sinh học trong chuỗi thức ăn.

Thứ ba, tăng độ đục của nước: bụi và các hạt vật liệu mịn được tạo thành từ các bãi nổ có thể bị cuốn trôi vào sông, suối gần đó, làm tăng độ đục của nước, ảnh hưởng đến khả năng quang hợp của thực vật thủy sinh và làm tắc nghẽn mang của các loài cá.

2.2.2. Tác động đến hệ sinh thái và đa dạng sinh học

Các tác động vật lý từ vụ nổ (rung chấn và tiếng ồn) không chỉ ảnh hưởng đến con người mà còn gây ra những xáo trộn nghiêm trọng cho động vật hoang dã. Tiếng ồn và rung động mặt đất có thể gây hoảng loạn, thay đổi hành vi kiếm ăn, sinh sản và di cư của nhiều loài động vật, đặc biệt là các loài chim, thú có vú và động vật lưỡng cư. Trong các khu vực nhạy cảm về sinh thái, sự xáo trộn thường xuyên có thể dẫn đến việc các loài động vật rời bỏ môi trường sống quen thuộc, làm suy giảm đa dạng sinh học (Roy, 2021).

Ngoài ra, hoạt động nổ mìn và khai thác nói chung trực tiếp phá hủy thảm thực vật và thay đổi cấu trúc môi trường sống trên bề mặt. Bụi từ các vụ nổ lắng đọng trên lá cây có thể làm giảm khả năng quang hợp và ảnh hưởng đến sức sống của thực vật.

2.2.3. Thay đổi cảnh quan và địa hình

Đây là tác động trực quan và lâu dài nhất của hoạt động khai thác mỏ lộ thiên đến môi trường xung quanh. Công tác nổ mìn là nguyên nhân chính tạo ra những thay đổi lớn về địa hình: quá trình nổ mìn khai thác sẽ tạo ra các moong khai thác và các bãi thải lớn, làm thay đổi vĩnh viễn cảnh quan và địa hình nguyên thủy. Ngoài ra, rung chấn lặp đi lặp lại từ các vụ nổ có thể làm suy yếu độ bền của khối đá, giảm lực liên kết dọc theo các mặt yếu địa chất (khe nứt, phay), làm tăng nguy cơ sạt lở bờ mỏ và các sườn dốc tự nhiên xung quanh khu vực khai thác, đặc biệt trong điều kiện mưa lớn.

2.2.4. Ô nhiễm không khí và suy giảm chất lượng đất

Ngoài bụi và khí độc gây ảnh hưởng sức khỏe nghề nghiệp, các chất ô nhiễm này còn phát tán ra môi trường xung quanh, ảnh hưởng đến chất lượng không khí trong khu vực. Bụi lắng đọng trên đất nông nghiệp có thể làm giảm độ phì của đất và ảnh hưởng đến năng suất cây trồng.

Tóm lại, các rủi ro môi trường từ công tác nổ mìn trong khai thác mỏ lộ thiên là một loạt các tác động tương hỗ. Việc quản lý hiệu quả các rủi ro này đòi hỏi một cách tiếp cận tích hợp, từ việc lựa chọn loại vật liệu nổ thân thiện với môi trường,

tối ưu hóa kỹ thuật nổ để giảm thiểu năng lượng dư thừa, đến việc thực hiện các chương trình giám sát môi trường (nước, không khí, đa dạng sinh học) một cách nghiêm ngặt và minh bạch.

3. Các yếu tố ảnh hưởng đến rủi ro trong công tác nổ mìn

Rủi ro trong công tác nổ mìn là một hàm số phức tạp, đa biến, không xuất phát từ một nguyên nhân đơn lẻ mà là kết quả của sự tác động qua lại và cộng hưởng giữa nhiều yếu tố. Việc nhận diện và phân loại các yếu tố này là bước cơ bản, quan trọng để xây dựng một chiến lược quản lý rủi ro hiệu quả. Dựa trên các nghiên cứu thực nghiệm và phân tích sự cố, các yếu tố ảnh hưởng có thể được phân thành ba nhóm chính: (i) các yếu tố địa chất và địa kỹ thuật, (ii) các yếu tố kỹ thuật và công nghệ, và (iii) các yếu tố con người và tổ chức.

3.1. Yếu tố địa chất và địa kỹ thuật

Các đặc tính của khối đá tại khu vực nổ mìn là yếu tố đầu vào không thể thay đổi, đóng vai trò quyết định cách thức năng lượng nổ được phân bố và cách khối đá phản ứng với tác động của vụ nổ. Việc bỏ qua hoặc đánh giá không đầy đủ các yếu tố này sẽ dẫn đến những tính toán, thiết kế nổ mìn không phù hợp và làm gia tăng rủi ro.

Khối đá trong tự nhiên không phải là một môi trường đồng nhất và đẳng hướng. Sự hiện diện của các yếu tố bất liên tục như hệ thống khe nứt, mặt phân lớp, đứt gãy và các đới dập vỡ tạo ra những mặt yếu trong khối đá. Các mặt yếu này có vai trò kếp:

Thứ nhất, sóng ứng suất và khí nổ có áp suất cao có xu hướng lan truyền dọc theo các mặt yếu này thay vì phá vỡ khối đá liên khối. Điều này dẫn đến việc năng lượng nổ bị thất thoát ra ngoài một cách không kiểm soát, có thể tạo ra đá văng dọc theo phương của các khe nứt (Kricak và cộng sự, 2012).

Thứ hai, các cấu trúc này làm giảm đáng kể đường kháng thực tế của khối đá so với đường kháng được thiết kế trên lý thuyết. khi đó, năng lượng nổ được tính toán cho khối đá liên khối sẽ trở nên dư thừa khi gặp phải một vùng đá đã bị suy yếu trước, dẫn đến việc các mảnh đá bị đẩy đi với vận tốc lớn hơn dự kiến và có nguy cơ hình thành hiện tượng đá văng do nổ mìn.

Mặt khác, các đặc tính như độ cứng, cường độ kháng nén, cường độ kháng kéo, mô-đun đàn hồi, và mật độ của đá ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả phá vỡ và các tác động đi kèm: đối với đá cứng và dòn (quartzite, granite,...) yêu cầu năng

lượng nổ lớn dễ phá vỡ, nhưng cũng có xu hướng tạo ra rung chấn tần số cao vận tốc hạt lớn hơn. Đối với đá mềm và dẻo (đá sét, đá phiến,...) lại có xu hướng hấp thụ năng lượng nổ, đòi hỏi các loại thuốc nổ có tốc độ nổ phù hợp để đạt hiệu quả phá vỡ và có thể gây ra rung chấn tần số thấp, kéo dài. Khi đất đá mở tồn tại sự xen kẽ của các lớp đá có tính chất khác nhau, điều này làm thay đổi đột ngột về trở kháng sóng tại mặt tiếp xúc giữa các lớp đá khác nhau gây ra hiện tượng phản xạ và khúc xạ sóng ứng suất. Điều này làm phức tạp hóa quá trình phân bố năng lượng, có thể gây ra phá vỡ không mong muốn hoặc hiệu quả phá vỡ kém.

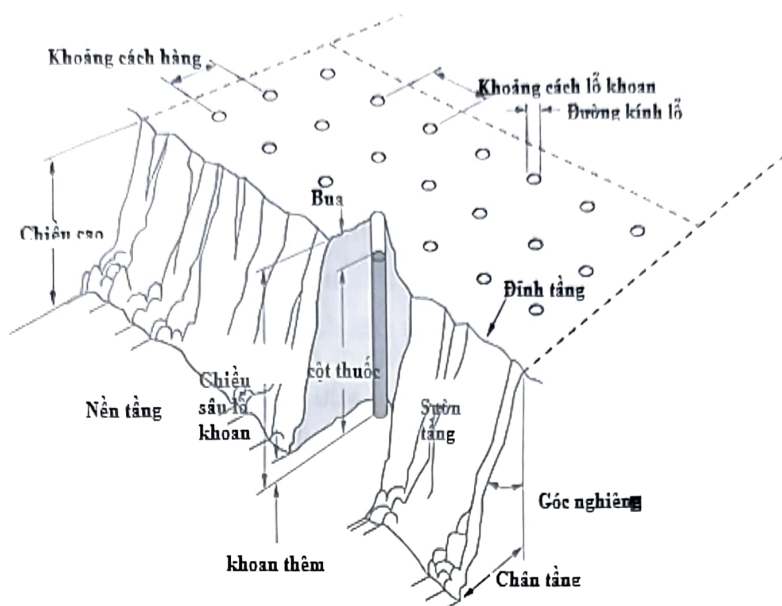
Ngoài ra, nước trong các lỗ khoan hoặc trong các khe nứt của khối đá có thể ảnh hưởng đáng kể đến kết quả nổ mìn. Nước có thể làm giảm hiệu quả của một số loại thuốc nổ (như ANFO không chịu nước) hoặc ngược lại, có thể hoạt động như một môi trường truyền áp suất, làm tăng cường độ rung chấn và có khả năng gây ra hiện tượng phụt bụi nếu không được kiểm soát tốt.

Do đó, việc xây dựng một mô hình địa chất - địa kỹ thuật ba chiều (3D) chi tiết và cập nhật thường xuyên là cơ sở quan trọng, không thể thiếu cho mọi thiết kế nổ mìn. Các dữ liệu từ khoan khảo sát, kết quả đo địa vật lý lỗ khoan, và việc lập bản đồ cấu trúc đất đá cần được tích hợp để nhận diện các rủi ro tiềm ẩn ngay từ giai đoạn đầu, cho phép các kỹ sư khai thác mỏ, người lập hộ chiếu nổ mìn, chỉ huy nổ mìn điều chỉnh hộ chiếu nổ mìn một cách chủ động thay vì đối phó với các sự cố không lường trước.

3.2. Yếu tố kỹ thuật và quá trình thi công

Trái ngược với các yếu tố địa chất không kiểm soát, nhóm yếu tố liên quan đến thiết kế và thi công nổ mìn hoàn toàn nằm trong khả năng kiểm soát của các kỹ sư và đội ngũ thi công. Đây chính là khâu mà kiến thức và kinh nghiệm của kỹ sư khai thác mỏ được vận dụng để điều chỉnh năng lượng nổ, nhằm đạt được mục tiêu phá vỡ đá theo yêu cầu đồng thời giảm thiểu các tác động tiêu cực. Một thiết kế không phù hợp với thực tế bãi nổ, dù xuất phát từ việc thiếu dữ liệu, tính toán sai hay áp lực kinh tế, đều được xem là nguyên nhân gốc rễ dẫn đến hầu hết các sự cố nổ mìn (Roy, 2021).

Các thông số nổ mìn chính có ảnh hưởng trực tiếp đến rủi ro trong công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên bao gồm các thông số hình học của bãi nổ (đường căn chân tảng, khoảng cách giữa các lỗ khoan trong một hàng, khoảng cách giữa các hàng nổ khoan) và các thông số của lỗ mìn.



Hình 5. Minh họa các thông số bãi nổ

Đường kháng chân tầng, đây là thông số quan trọng nhất, được định nghĩa là khoảng cách từ trục của lỗ khoan hàng ngoài cùng đến mép dưới của sườn tầng. Khi đường kháng chân tầng quá nhỏ sẽ làm tăng nguy cơ hiện tượng đá văng và gây ra hiện tượng sóng đập không khí mạnh. Ngược lại, khi đường kháng chân tầng quá lớn sẽ khiến năng lượng nổ bị giữ lại, không đủ để phá vỡ khối đá theo yêu cầu, gây ra hiện tượng chấn động lớn, đá quá cỡ,...

Khoảng cách giữa các lỗ mìn, thông số này quyết định sự tác động giữa các cột thuốc liền kề. Nếu khoảng cách giữa các lỗ khoan quá lớn sẽ để lại các “sống đá” giữa các lỗ mìn, làm giảm hiệu quả phá vỡ. Ngược lại, nếu khoảng cách giữa các lỗ mìn quá nhỏ có thể gây ra hiện tượng đập vỡ quá mức, tạo nhiều đá vụn và lãng phí năng lượng, đồng thời có thể gây ra hiện tượng cắt - đứt giữa các lỗ mìn trong các mạng nổ vi sai.

Chiều sâu khoan thêm nhằm mục đích để đảm bảo phá vỡ hoàn toàn khối đá ở chân tầng, tránh tạo ra mô chân tầng. Tuy nhiên, khi chiều sâu khoan thêm quá lớn sẽ lãng phí năng lượng vào nền tảng, gây ra rung chấn không cần thiết.

Chiều cao cột búa và vật liệu búa mìn có vai trò quan trọng trong việc giữ năng lượng nổ bên trong lỗ mìn, giúp năng lượng này đập vỡ đất đá tốt hơn. Chiều dài cột búa quá ngắn hoặc vật liệu búa kém chất lượng (chỉ dùng mùn khoan thay vì đá dăm góc cạnh) sẽ gây ra hiện tượng phụt búa. Đây là nguyên nhân chính gây ra sóng đập không khí và đá văng lên trên.

Việc lựa chọn loại thuốc nổ phải dựa trên sự phù hợp giữa các đặc tính của nó (tốc độ nổ, mật độ, năng lượng, khả năng chịu nước) và tính chất cơ lý của khối đá. Nạp quá nhiều thuốc nổ so với yêu cầu sẽ làm gia tăng tất cả các rủi ro (đá văng, rung chấn, sóng nổ). Nạp quá ít sẽ không đập vỡ hiệu quả và phát sinh nhiều đá quá cỡ. Cấu trúc nạp thuốc (cột thuốc dài liên tục, hay phân đoạn cột thuốc) cũng là một biện pháp kỹ thuật tiên tiến để phân bố lại năng lượng nổ mìn, có thể giảm rung chấn và cải thiện độ vỡ của đá (Roy, 2021).

Khối lượng thuốc nổ vi sai lớn nhất là yếu tố chính quyết định biên độ và độ lớn của sóng chấn động. Bằng cách chia bãi nổ thành nhiều nhóm nhỏ, mỗi nhóm nổ tại một thời điểm khác nhau (cách nhau vài phần nghìn giây), tổng năng lượng của bãi nổ được giải phóng dần dần, góp phần giảm cường độ chấn động do bãi nổ gây ra.

Việc chuyển đổi từ các phương tiện nổ như dây nổ, kíp nổ phi điện sang kíp nổ điện tử đã tạo ra một cuộc cách mạng trong kiểm soát nổ mìn. Kíp điện tử cho phép lập trình thời gian trễ với độ chính xác đến từng miligiây, tạo ra các sơ đồ nổ phức tạp nhưng có kiểm soát để sóng rung từ các lỗ mìn khác nhau trong bãi nổ có thể giao thoa và triệt tiêu lẫn nhau, qua đó giảm biên độ rung chấn chung của toàn bãi nổ mà không làm giảm hiệu quả phá vỡ đá.

Bên cạnh các yếu tố trên, công tác thi công trên bãi nổ cũng có ảnh hưởng lớn đến các rủi ro đã được trình bày ở trên. Mọi thiết kế nổ mìn tối ưu đều có thể trở nên vô nghĩa nếu công tác thi công không đảm bảo độ chính xác. Trong quá trình triển khai trên bãi nổ, việc định vị sai vị trí lỗ khoan từ hộ chiếu ra bãi nổ và góc nghiêng của lỗ khoan có sự sai khác so với thiết kế sẽ làm thay đổi các giá trị đường kháng và khoảng cách giữa các lỗ khoan thực tế, dẫn đến kết quả nổ không thể đoán trước. Mặt khác, việc nạp không đủ hoặc thừa thuốc, chiều dài búa không đúng, hoặc búa chèn không được lèn chặt đúng cách đều là những sai sót thi công, có tác động trực tiếp dẫn đến rủi ro.

Như vậy, yếu tố kỹ thuật không chỉ là một tập hợp các con số, mà là một quy trình động, đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa lý thuyết, kinh nghiệm và sự giám sát chặt chẽ trong quá trình thi công trên bãi nổ. Bất kỳ sự chủ quan nào trong khâu này, dù vì lý do gì, đều góp phần trực tiếp làm tăng nguy cơ về rủi ro, mất an toàn trong công tác nổ mìn tại mỏ lộ thiên.

3.3. Yếu tố con người và tổ chức

Trong mô hình phân tích rủi ro hiện đại, yếu tố con người và tổ chức ngày càng được thừa nhận là nhân tố quyết định, đóng vai trò là nguyên nhân gốc rễ của

hầu hết các sự cố kỹ thuật và vận hành. Các thất bại của hệ thống an toàn thường không phải là lỗi đơn lẻ của thiết bị mà là biểu hiện của những yếu kém sâu xa hơn trong năng lực con người, văn hóa tổ chức và hệ thống quản lý.

Hiệu quả và an toàn của công tác nổ mìn phụ thuộc trực tiếp vào năng lực của đội ngũ kỹ sư khai thác mỏ và công nhân nổ mìn. Ngành khai thác mỏ hiện nay đang đối mặt với một nghịch lý về nhân sự: một bên là lực lượng kỹ sư, thợ nổ mìn có kinh nghiệm đang già đi, có xu hướng chuyển đổi công việc khác, đỡ vất vả hơn và một bên là bộ phận kỹ sư, thợ mìn trẻ có tỷ lệ “nhảy” việc cao, chưa kịp tích lũy kinh nghiệm thực tế (Wade, N.D., 2002). Thực tế này làm gia tăng nguy cơ nảy sinh các sai sót trong quá trình tính toán thiết kế nổ mìn cũng như thi công nạp thuốc. Nghiên cứu của Verma và Chaudhari (2017) đã chỉ ra rằng các sai sót này là một trong những nguyên nhân hàng đầu gây ra tai nạn, qua đó nhấn mạnh tầm quan trọng không thể thiếu của việc đào tạo bài bản, người lao động có kinh nghiệm kèm người lao động mới tại công trường giúp họ tích lũy kinh nghiệm để hình thành khả năng phán đoán và xử lý tình huống phức tạp.

Mặt khác, văn hóa an toàn của một tổ chức nói chung, doanh nghiệp mỏ nói riêng là yếu tố nền tảng, định hình mọi hành vi liên quan đến an toàn. Nó được định nghĩa là tập hợp các giá trị, thái độ, nhận thức và khuôn mẫu hành vi chung của các thành viên, quyết định mức độ cam kết và sự ưu tiên dành cho an toàn (Doyle, 2022). Trong một doanh nghiệp mỏ có văn hóa an toàn yếu kém, áp lực khai thác, sản lượng thường được đặt cao hơn các quy định an toàn. Điều này tạo ra một môi trường dung túng cho các hành vi rủi ro, như việc bỏ qua các bước kiểm tra, làm tắt bước trong quy trình khai thác, quy trình khoan, quy trình nổ mìn,... hoặc không báo cáo các mối nguy. Những hành vi này chính là biểu hiện của các sự cố tiềm ẩn, chúng có thể tồn tại trong mỏ một thời gian dài trước khi hội tụ đủ điều kiện để gây ra một sự cố nghiêm trọng.

Các quy định và hành động của giám đốc điều hành mỏ tạo ra khung vận hành cho toàn bộ quy trình khai thác mỏ. Những thiếu sót trong quản lý của giám đốc điều hành mỏ, chỉ huy nổ mìn chính là nguồn gốc của các sự cố tiềm ẩn. Các biểu hiện cụ thể bao gồm: thiếu giám sát hoặc giám sát không hiệu quả tại công trường khai thác mỏ; ban hành các quy trình làm việc an toàn không được kiểm chứng, không thực tế hoặc không được cập nhật; và thờ ơ trong việc khắc phục các vấn đề an toàn đã được nhận diện (Verma và Chaudhari, 2017). Những yếu kém này của cấp quản lý, cụ thể là giám đốc điều hành mỏ hay chỉ huy nổ mìn không

chỉ tạo ra các điều kiện làm việc không an toàn một cách trực tiếp mà còn gửi đi một thông điệp ngầm tới bộ phận công nhân mỏ, thợ mỏ rằng an toàn không phải là một ưu tiên thực sự, từ đó làm xói mòn văn hóa an toàn của mỏ.

Tóm lại, để nâng cao an toàn trong công tác nổ mìn một cách bền vững, việc tập trung vào các giải pháp kỹ thuật là cần thiết nhưng chưa đủ. Cần phải có một sự chuyển dịch chiến lược, tập trung vào việc phát triển năng lực con người cụ thể là thợ mỏ, xây dựng một văn hóa an toàn tích cực và củng cố hệ thống quản lý, giám sát. Đây chính là cách tiếp cận chủ động để giải quyết tận gốc các nguyên nhân gây ra rủi ro.

4. Đề xuất biện pháp kiểm soát rủi ro trong công tác nổ mìn

Việc kiểm soát và quản lý rủi ro trong công tác nổ mìn đòi hỏi một phương pháp tiếp cận khoa học và có cấu trúc, trong đó các biện pháp đề xuất được lựa chọn và ưu tiên hành động dựa trên tính hiệu quả và tính bền vững của chúng. Hệ thống phân cấp kiểm soát rủi ro, một nguyên tắc cơ bản trong lĩnh vực an toàn và sức khỏe nghề nghiệp, cung cấp một khung quản lý tiên tiến và hiệu quả cho mục đích này. Nguyên tắc này ưu tiên các biện pháp loại bỏ mối nguy ngay tại nguồn, được xem là hiệu quả nhất, và tuân tự đi xuống các biện pháp ít hiệu quả hơn, vốn chỉ tập trung vào việc bảo vệ con người khỏi mối nguy còn tồn tại.



Hình 6. Hệ thống phân cấp kiểm soát rủi ro

4.1. Các biện pháp loại bỏ và thay thế mối nguy trong công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên

Đây là cấp độ lý tưởng nhất, hướng tới việc loại bỏ hoàn toàn rủi ro bằng cách loại bỏ chính mối nguy. Trong bối cảnh khai thác mỏ lộ thiên, việc thay thế công nghệ nổ mìn bằng các phương pháp phá vỡ đá không sử dụng vật liệu nổ

là một giải pháp khả thi, đặc biệt tại các khu vực nhạy cảm, gần các công trình cần bảo vệ. Công nghệ này bao gồm: phá vỡ bằng cơ học (búa đập thủy lực, máy xới,...), khai thác liên tục bằng máy phay, hoặc sử dụng phương pháp vật lý, hóa học (bột nò). Mặc dù các phương pháp này loại bỏ triệt để các rủi ro như đá văng, rung chấn và khí độc, nhưng việc áp dụng chúng trên quy mô lớn thường bị hạn chế do chi phí đầu tư cao, năng suất thấp hơn và chỉ phù hợp với một số điều kiện địa chất - kỹ thuật mỏ nhất định.

4.2. Các biện pháp kỹ thuật kiểm soát môi nguy trong công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên

Đây là cấp độ kiểm soát quan trọng, thực tế và có khả năng áp dụng nhất trong công tác nổ mìn trên các mỏ lộ thiên, tập trung vào việc đưa các biện pháp an toàn vào ngay trong quy trình thiết kế, thi công và thiết bị để giảm thiểu rủi ro tại nguồn. Hiệu quả của các biện pháp này không phụ thuộc nhiều vào hành vi của người lao động. Các biện pháp kỹ thuật có thể áp dụng để kiểm soát môi nguy trong công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên bao gồm:

Thứ nhất, tối ưu hóa thiết kế nổ mìn. Đây là giải pháp kỹ thuật quan trọng, bao gồm việc tính toán, tối ưu hóa các thông số hình học bãi mìn (đường kháng, khoảng cách giữa các lỗ khoan trong hàng, khoảng cách giữa các hàng lỗ khoan,...), cấu trúc cột thuốc và chiều cao cột bua dựa trên mô hình địa chất - địa kỹ thuật chi tiết của khối đá. Mục tiêu là phân bố năng lượng nổ một cách hiệu quả nhất cho việc phá vỡ đá, giảm thiểu năng lượng dư thừa.

Thứ hai, ứng dụng phương pháp nổ mìn bằng kíp nổ điện tử, việc sử dụng các hệ thống khởi nổ điện tử cho phép kiểm soát thời gian vi sai với độ chính xác cực cao. Điều này tạo điều kiện cho việc thiết kế các bãi nổ phức tạp hơn, tạo ra sự giao thoa sóng có chủ đích nhằm triệt tiêu chấn động, kiểm soát hướng văng và tối ưu hóa mức độ đập vỡ của đất đá.

Thứ ba, xây dựng các mô hình toán học từ các công thức thực nghiệm hay các thuật toán máy học. Các mô hình này có khả năng dự đoán phạm vi đá văng và mức độ rung chấn với độ tin cậy cao, cung cấp cơ sở khoa học để kiểm chứng và điều chỉnh thiết kế trước khi thi công (Aruna và cộng sự, 2025; Guo, Fei, & Yan, 2025).

Cuối cùng, sử dụng các biện pháp che chắn vật lý tại các khu vực có rủi ro đặc biệt cao có liên quan đến nổ mìn, các biện pháp vật lý như sử dụng lưới B40,

chăn bông, tấm che đan, bao cát... để che phủ bề mặt bãi nổ là một giải pháp kỹ thuật hiệu quả để ngăn chặn đá văng.

4.3. Các biện pháp hành chính kiểm soát mối nguy trong công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên

Nhóm biện pháp này bao gồm các chính sách, quy định, quy trình và biện pháp tổ chức thi công để giảm thiểu sự phơi nhiễm của công nhân nổ mìn với các mối nguy còn lại. Dưới đây là một số giải pháp hành chính nhằm kiểm soát mối nguy trong công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên:

- Xây dựng, phổ biến và thực thi nghiêm ngặt các quy trình làm việc an toàn chi tiết cho mọi công đoạn, từ công đoạn cấp phát vật liệu nổ công nghiệp, vận chuyển vật liệu nổ, sử dụng vật liệu nổ công nghiệp đến xử lý mìn câm.

- Thiết lập và tổ chức gác mìn theo đúng quy định dựa trên việc tính toán chính xác bán kính vùng nguy hiểm do đá văng cho từng vụ nổ cũng như dựa trên điều kiện địa hình khu vực nổ mìn, kết hợp với hệ thống cảnh báo bằng camera AI và thiết lập kênh thông tin liên lạc rõ ràng giữa các trạm gác.

- Định kỳ tổ chức các chương trình đào tạo, huấn luyện kỹ năng thi công, đảm bảo mọi người lao động liên quan đều có đủ năng lực để thực hiện công việc của mình một cách an toàn và nhận diện được các mối nguy.

- Xây dựng văn hóa an toàn cho toàn mỏ nói chung và đội mìn nói riêng, đây là một biện pháp hành chính quan trọng, thúc đẩy trách nhiệm giải trình, giao tiếp cởi mở giữa các thành viên trong đội mìn, và khuyến khích sự tham gia của công nhân nổ mìn vào hệ thống quản lý an toàn, nơi an toàn được xem là một giá trị chung không thể thỏa hiệp (Doyle, 2022).

4.4. Biện pháp cung cấp trang bị bảo vệ cá nhân

Trang bị bảo vệ cá nhân là lớp bảo vệ cuối cùng và ít hiệu quả nhất vì nó không làm giảm mối nguy mà chỉ bảo vệ cá nhân người sử dụng. Tuy nhiên, trong môi trường nổ mìn, việc sử dụng đầy đủ và đúng cách các trang bị như mũ, kính, giày bảo hộ, thiết bị bảo vệ thính giác và hô hấp là bắt buộc. Hiệu quả của trang bị bảo vệ cá nhân phụ thuộc hoàn toàn vào ý thức tuân thủ của thợ mìn và hệ thống quản lý cung cấp, đào tạo và giám sát sử dụng. Sự phụ thuộc quá mức vào trang bị bảo vệ cá nhân mà không chú trọng các biện pháp kiểm soát ở cấp cao hơn phản ánh một chiến lược quản lý rủi ro yếu kém.

Tóm lại, một chiến lược quản lý rủi ro tối ưu phải là một hệ thống phòng thủ theo chiều sâu, kết hợp và ưu tiên các biện pháp kiểm soát theo đúng hệ thống phân cấp. Trong đó, các giải pháp kỹ thuật đóng vai trò trung tâm, được hỗ trợ bởi một hệ thống biện pháp hành chính bài bản và một văn hóa an toàn tích cực và được củng cố bởi tuyên bảo vệ cuối cùng là trang thiết bị bảo vệ cá nhân.

5. Đề xuất giải pháp quản lý rủi ro nổ mìn trong giai đoạn hiện nay

Công tác nổ mìn tại các mỏ lộ thiên đang bước vào một giai đoạn chuyển đổi sâu sắc, được thúc đẩy bởi các yếu tố như: tiến bộ công nghệ trong công tác nổ mìn, yêu cầu ngày càng khắt khe về an toàn, sức khỏe, môi trường và sự thay đổi trong nhận thức về quản lý rủi ro. Các xu hướng này đang định hình lại cách tiếp cận truyền thống, chuyển dịch trọng tâm từ quản lý mang tính bị động sang quản lý chủ động và dự báo. Để thực hiện được mục tiêu đề ra, công tác nổ mìn trên các mỏ lộ thiên cần thực hiện một số nội dung sau:

Thứ nhất, tích hợp công nghệ 4.0 vào quá trình thi công nổ mìn. Cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư đang mở ra một kỷ nguyên mới cho an toàn nổ mìn thông qua việc số hóa và tự động hóa. Việc ứng dụng các cảm biến Internet vạn vật (IoT) cho phép thu thập dữ liệu rung chấn, sóng đập không khí, và các thông số môi trường theo thời gian thực với mật độ cao. Nguồn dữ liệu lớn này là dữ liệu đầu vào để xây dựng các mô hình máy học, các thuật toán trí tuệ nhân tạo, cho phép các mỏ xây dựng được các mô hình dự báo động. Các mô hình này không chỉ dự báo chính xác hơn các tác động tiêu cực mà còn có khả năng “học” và tự hiệu chỉnh sau mỗi vụ nổ, tạo ra một vòng lặp cải tiến liên tục. Thay vì chỉ dựa vào các công thức kinh nghiệm, các hệ thống này cho phép kỹ sư khai thác mỏ dự đoán các kịch bản rủi ro tiềm tàng và đưa ra các biện pháp can thiệp phòng ngừa kịp thời, chẳng hạn như điều chỉnh thiết kế ngay trước khi nổ dựa trên dữ liệu thời tiết thực tế tại mỏ (Aruna và cộng sự, 2025; Guo, Fei, & Yan, 2025). Ngoài ra, hiện nay, các hệ thống khoan tự động hoặc bán tự động, robot nạp thuốc đang được nghiên cứu và áp dụng, giúp giảm thiểu sự hiện diện của con người tại các khu vực nguy hiểm, qua đó loại bỏ trực tiếp nguy cơ phơi nhiễm rủi ro.

Thứ hai, nghiên cứu cải tiến và áp dụng các vật liệu nổ xanh, phương tiện kích nổ điện tử. Công nghệ vật liệu nổ xanh và hệ thống kích nổ điện tử tiếp tục đóng góp vào việc giảm thiểu rủi ro cố hữu của vật liệu nổ. Cần đẩy mạnh nghiên cứu và thử nghiệm các vật liệu nổ mới theo hướng an toàn hơn trong quá trình vận

chuyên và sử dụng, ít nhạy cảm với các kích thích ngoài ý muốn. Đồng thời, các công thức “xanh” hơn, giảm thiểu việc tạo ra khí độc NOx sau nổ, cũng đang là một xu hướng quan trọng, cần đẩy mạnh. Bên cạnh đó, hệ thống khởi nổ không dây cũng cần được đưa vào áp dụng với quy mô công nghiệp, công nghệ này loại bỏ hoàn toàn hệ thống dây dẫn vật lý trên bề mặt bãi nổ, qua đó triệt tiêu các rủi ro liên quan đến việc hư hỏng dây do thiết bị di chuyển, sét đánh, hoặc lỗi đấu nối. Nó cũng mang lại sự linh hoạt tối đa trong việc thiết kế các mạng nổ phức tạp và tăng cường an toàn cho người lao động.

Thứ ba, nâng cao nhận thức về an toàn của người động và phát triển văn hóa an toàn chủ động cho mỏ. Công nghệ dù tiên tiến đến đâu, cũng không thể thay thế hoàn toàn vai trò của con người, do đó cần đưa yếu tố con người và tổ chức trở thành trọng tâm của các chiến lược an toàn hiện đại. Thay vì xem văn hóa an toàn là một khái niệm trừu tượng, các tổ chức đang áp dụng các mô hình đánh giá định lượng như mô hình Hudson hay mô hình Bradley Curve. Các công cụ này cho phép doanh nghiệp mô “đo lường” mức độ trưởng thành văn hóa an toàn của mình, xác định các điểm yếu và xây dựng một lộ trình cải tiến có cấu trúc và đo lường được (Doyle, 2022).

Trong tương lai, việc quản lý rủi ro nổ mìn sẽ là một hệ sinh thái tích hợp, nơi dữ liệu từ các cảm biến IoT, mô hình dự báo AI, và thông tin từ con người (báo cáo suýt sự cố, phản hồi về quy trình) được kết hợp để tạo ra một bức tranh toàn cảnh về rủi ro theo thời gian thực. Sự an toàn sẽ không còn là một bộ quy tắc tĩnh, mà là một quá trình học hỏi và thích ứng liên tục, được dẫn dắt bởi công nghệ và củng cố bởi một văn hóa tổ chức vững mạnh.

Bảng 1 cung cấp một cái nhìn tổng quan, có hệ thống về các mối nguy hiểm chính, phân tích các nguyên nhân gốc rễ, mô tả các hậu quả tiềm tàng, và đề xuất các biện pháp kiểm soát theo nguyên tắc phân cấp nhằm quản lý rủi ro một cách hiệu quả và chủ động.

Bảng 1. Bảng tổng hợp quản lý rủi ro trong công tác nổ mìn tại mỏ lộ thiên

Loại Rủi ro	Nguyên nhân chính	Hậu quả tiềm tàng	Các biện pháp kiểm soát (theo thứ tự ưu tiên)
1. Đá văng	- Kỹ thuật - thiết kế + Đường kháng chân tảng quá nhỏ. + Chiều dài cột bua không đủ hoặc vật liệu bua kém chất lượng. + Nạp thuốc quá nhiều. + Khoan lỗ mìn không chính xác (sai góc, sai vị trí). - Địa chất: khối đá có nhiều khe nứt, đứt gãy, hoặc các đới yếu không được nhận diện trước. - Con người - vận hành: lỗi của thợ mìn khi thi công không tuân theo thiết kế.	- Nghiêm trọng nhất: gây tử vong hoặc thương tích nặng cho người lao động, người dân trong khu vực lân cận. - Thiệt hại tài sản: phá hủy máy móc, thiết bị, phương tiện vận tải, nhà cửa, công trình. - Sản xuất: buộc phải dừng sản xuất để phục vụ điều tra, gây thiệt hại kinh tế lớn. - Pháp lý: bị truy cứu trách nhiệm hình sự, kiện tụng, bồi thường thiệt hại.	- Kiểm soát kỹ thuật + Tối ưu hóa thiết kế nổ mìn (tính toán chính xác đường kháng chân tảng, khoảng cách giữa các lỗ khoan, lượng thuốc, chiều dài bua). + Sử dụng các phần mềm mô phỏng nổ mìn để dự báo quỹ đạo và khoảng cách đá văng. + Sử dụng kíp nổ điện tử để kiểm soát thời gian vi sai chính xác. + Sử dụng các loại vật liệu che chắn mặt tảng tại các khu vực nhạy cảm. - Kiểm soát hành chính + Thiết lập, khoanh vùng và canh gác nghiêm ngặt vùng nguy hiểm theo đúng tính toán. + Tuân thủ tuyệt đối quy trình thông báo, sơ tán và sử dụng tín hiệu cảnh báo trước khi nổ.
2. Rung chấn	- Năng lượng nổ dư thừa không được sử dụng hiệu quả để phá vỡ đá. - Lượng thuốc nổ trên một cấp vi sai quá lớn. - Thời gian trễ giữa các lỗ mìn hoặc hàng mìn không hợp lý, gây ra hiện tượng cộng hưởng sóng. - Điều kiện địa chất thuận lợi cho việc lan truyền sóng (đá cứng, liên khối).	- Gây nứt, hư hỏng, giảm tuổi thọ hoặc sụp đổ các công trình xây dựng (nhà dân, đập, cầu...). - Gây mất ổn định bờ mỏ, tầng khai thác, bãi thải. - Gây phiền toái, lo lắng và khiếu kiện kéo dài từ người dân sinh sống quanh khu vực nổ mìn. - Ảnh hưởng đến các thiết bị nhạy cảm.	- Kiểm soát kỹ thuật + Tối ưu hóa lượng thuốc/vi sai, chia nhỏ bãi nổ thành nhiều đợt với lượng thuốc phù hợp. + Sử dụng kíp nổ điện tử để tạo ra các sơ đồ thời gian phức tạp, giúp triệt tiêu sóng rung. + Sử dụng các mô hình dự báo suy giảm rung chấn để xác định mức độ an toàn. - Kiểm soát hành chính + Giám sát rung chấn bằng các thiết bị đo chuyên dụng tại các vị trí nhạy cảm. + Điều chỉnh thiết kế cho các lần nổ tiếp theo dựa trên dữ liệu giám sát thực tế.

Loại Rủi ro	Nguyên nhân chính	Hậu quả tiềm tàng	Các biện pháp kiểm soát (theo thứ tự ưu tiên)
3. Sóng nổ không khí	- Năng lượng nổ thoát trực tiếp ra không khí do búa phụt búa. - Sử dụng dây nổ trên bề mặt mà không che phủ. - Sử dụng kíp nổ trên mặt. - Nổ phá đá quạ cỡ trên bề mặt. - Điều kiện khí quyển (ngịch nhiệt, hướng gió) làm tăng cường độ sóng lan xa.	- Gây ra tiếng nổ lớn, gây giật mình, hoảng sợ. - Có thể làm vỡ cửa kính, hư hỏng các kết cấu nhẹ. - Gây phiền toái nghiêm trọng cho người dân. - Gây suy giảm thính lực cho người lao động nếu tiếp xúc thường xuyên.	- Kiểm soát kỹ thuật + Đảm bảo chất lượng vật liệu và chiều dài búa chèn đúng tiêu chuẩn. + Chôn dây nổ trong các rãnh nhỏ hoặc phủ bằng vật liệu phù hợp. + Hạn chế nổ kíp trên mặt. + Hạn chế nổ phá đá quạ cỡ, ưu tiên các phương pháp khác (búa thủy lực). - Kiểm soát hành chính + Lựa chọn thời điểm nổ mìn có điều kiện thời tiết thuận lợi. + Thông báo trước cho người dân xung quanh về thời gian nổ.
4. Khí độc và bụi	- Phản ứng nổ không hoàn toàn của thuốc nổ (đặc biệt là ANFO) sinh ra khí CO và NOx. - Quá trình phá vỡ đá và dịch chuyển đất đá tạo ra một lượng lớn bụi, đặc biệt là bụi silic tự do. - Điều kiện thông gió tự nhiên kém.	- Sức khỏe nghề nghiệp: gây ra các bệnh mãn tính về đường hô hấp như bệnh bụi phổi, bệnh bụi phổi silic, viêm phế quản. - An toàn: giảm tầm nhìn ngay sau vụ nổ, gây nguy hiểm cho việc di chuyển của người và thiết bị. - Môi trường: gây ô nhiễm không khí cục bộ.	- Kiểm soát kỹ thuật + Sử dụng loại vật liệu nổ có cân bằng oxy bằng không, chống nước tốt để đảm bảo nổ hoàn toàn. + Sử dụng các hệ thống phun sương dập bụi tại khu vực nổ và trên các thiết bị. - Kiểm soát hành chính + Thiết lập thời gian chờ đợi an toàn sau vụ nổ để khí và bụi khuếch tán. + Trang bị đầy đủ và giám sát việc sử dụng trang thiết bị bảo hộ cá nhân (mặt nạ phòng độc, kính...). + Tổ chức khám sức khỏe định kỳ cho người lao động.
5. Sự có nổ (nổ sớm, mìn cầm)	- Nổ sớm: do sét đánh, tĩnh điện, va đập cơ học, thiết bị khởi nổ lỗi. - Mìn cầm: do hồng kíp nổ, đứt dây dẫn, đầu nối sai, thuốc nổ bị ngấm nước hoặc mất phẩm chất.	- Hậu quả thảm khốc: gây thương vong hàng loạt, phá hủy hoàn toàn thiết bị và công trình. - Mìn cầm còn sót lại có thể phát nổ bất ngờ trong các công đoạn sau (xúc bốc, vận chuyển, nghiền sàng), gây nguy hiểm chết người.	- Kiểm soát kỹ thuật + Sử dụng các hệ thống khởi nổ an toàn, có khả năng chống tĩnh điện, dòng rò. + Lắp đặt hệ thống cảnh báo và phòng chống sét. - Kiểm soát hành chính

Loại Rủi ro	Nguyên nhân chính	Hậu quả tiềm tàng	Các biện pháp kiểm soát (theo thứ tự ưu tiên)
	- Vi phạm quy trình an toàn khi xử lý, vận chuyển vật liệu nổ.		+ Tuân thủ tuyệt đối các quy trình, quy định về vận chuyển, bảo quản và sử dụng vật liệu nổ. + Kiểm tra kỹ lưỡng mạng nổ và các thiết bị trước khi nổ. + Xây dựng và diễn tập thường xuyên quy trình xử lý mìn cầm theo đúng quy định.
6. Yếu tố con người và tổ chức	- Thiếu kiến thức, kỹ năng, kinh nghiệm. - Vi phạm quy trình, làm tắt để tiết kiệm thời gian. - Văn hóa an toàn yếu kém, không coi trọng an toàn. - Giám sát lỏng lẻo, thiếu trách nhiệm. - Sự mệt mỏi, căng thẳng, áp lực công việc. - Giao tiếp và phối hợp không hiệu quả giữa các bộ phận.	- Là nguyên nhân gốc rễ dẫn đến hầu hết các sai sót kỹ thuật và thi công, làm gia tăng tần suất và mức độ nghiêm trọng của tất cả các loại rủi ro trên. - Gây ra một môi trường làm việc không an toàn, tiềm ẩn nguy cơ tai nạn cao.	- Kiểm soát hành chính + Xây dựng và thực thi một hệ thống quản lý an toàn toàn diện. + Tăng cường đào tạo, huấn luyện và đánh giá năng lực định kỳ. + Xây dựng văn hóa an toàn tích cực. + Lãnh đạo cam kết và làm gương, khuyến khích báo cáo sự cố và suýt sự cố, khen thưởng các hành vi an toàn. + Thực hiện giám sát chủ động và thường xuyên tại hiện trường. + Phân tích kỹ lưỡng các sự cố để tìm ra nguyên nhân gốc rễ thay vì đổ lỗi cho cá nhân.

6. Kết luận

Rủi ro trong công tác nổ mìn tại các mỏ lộ thiên là một vấn đề đa chiều, xuất phát từ sự tác động qua lại của các yếu tố địa chất, kỹ thuật, công nghệ và con người. Mặc dù công nghệ đã có những bước tiến dài trong việc giảm thiểu tai nạn, các phân tích cho thấy yếu tố con người và tổ chức vẫn là mắt xích yếu và là nguyên nhân sâu xa của nhiều sự cố.

Đề quản lý rủi ro một cách hiệu quả, không thể chỉ dựa vào các giải pháp đơn lẻ. Một phương pháp tiếp cận toàn diện và tích hợp là yêu cầu cấp thiết, bao gồm: (i) đánh giá rủi ro một cách khoa học và có hệ thống ngay từ giai đoạn lập kế hoạch; (ii) áp dụng các giải pháp kiểm soát kỹ thuật tiên tiến, đặc biệt là tối ưu hóa thiết kế và ứng dụng công nghệ giám sát, dự báo; và (iii) xây dựng một văn hóa an toàn chủ động thông qua đào tạo nâng cao nhận thức cho thợ mìn, tăng cường giám sát và cam kết mạnh mẽ từ cấp lãnh đạo cao nhất của mỏ.

Trong tương lai, việc tích hợp sâu hơn các công nghệ của cách mạng công nghiệp 4.0 vào quy trình quản lý rủi ro hứa hẹn sẽ mang lại những đột phá, chuyển đổi ngành khai thác mỏ từ trạng thái bị động với sự cố sang chủ động ngăn ngừa rủi ro, hướng tới mục tiêu cuối cùng là không có tai nạn thương tích.

Tài liệu tham khảo

[1] Aruna, M., Vardhan, H., Tripathi, A. K., et al (2025). Enhancing safety in surface mine blasting operations with IoT based ground vibration monitoring and prediction system integrated with machine learning. *Scientific Reports*, 15(3999).

[2] Doyle, K. (2022). *The safety and sustainability of mining at diverse scales: Placing health and safety at the core of responsibility*. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Mining & Minerals Engineering, University of Exeter.

[3] Dworzak, M. (2023). *Occupational Risk Management Method for Quarry Blasting Operations Based on Modified FMECA Algorithm*. Inżynieria Mineralna - Journal of the Polish Mineral Engineering Society.

[4] <https://baolangson.vn/xa-hoi/51596-am-anh-no-min-pha-da-o-hong-phong.html>.

[5] <https://nld.com.vn/thoi-su/no-min-pha-da-vang-troi-dan-keo-ra-duong-chan-xc-phan-doi-20170824190031787.htm>.

[6] Kiani, M., Hosseini, S. H., Taji, M., & Gholinejad, M. (2019). *Risk assessment of blasting operations in open pit mines using FAHP method*. Mining of Mineral Deposits, 13(3), pp. 76 - 86.

[7] Kricak, L., Kecojevic, V., Negovanovic, M., Jankovic, I., & Zekovic, D. (2012). Environmental and Safety Accidents Related to Blasting Operation. *American Journal of Environmental Science*, 8(4), pp. 360 - 365.

[8] Roy, P. P. (2021). Emerging trends in drilling and blasting technology: concerns and commitments. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(652).

[9] Ural, S., & Demirkol, S. (2008). Evaluation of occupational safety and health in surface mines. *Safety Science*, 46(6), pp. 1016 - 1024.

[10] Verma, S., & Chaudhari, S. (2017). Safety of Workers in Indian Mines: Study, Analysis, and Prediction. *Safety and Health at Work*, 8(3), pp. 267 - 275.

[11] Wade, L. V. (2002). *Challenges and Opportunities Facing the Mining Industry in the Quest for Improved Safety*. National Institute for Occupational Safety and Health.



ISBN: 978-604-76-3270-1



9 786047 632701

SÁCH KHÔNG BÁN