

XÁC ĐỊNH CÁC VÙNG TÁC DỤNG NỔ TRONG MÔI TRƯỜNG ĐẤT ĐÁ BẰNG PHẦN MỀM MÔ PHỎNG CHUYÊN SÂU VỚI PHƯƠNG PHÁP THỦY ĐỘNG LỰC HỌC HẠT MỊN - SPH

KS. Đỗ Văn Triều, KS. Hoàng Mạnh Thắng

Viện Khoa học Công nghệ Mỏ - Vinacomin

KS. Đào Trọng Ngọc Long

Tổng công ty Kinh tế Kỹ thuật Công nghiệp quốc phòng (GAET)

Biên tập: TS. Lưu Văn Thực

Tóm tắt:

Hiện nay, có nhiều phương pháp nghiên cứu, phân tích vùng tác dụng nổ trong môi trường đất đá trên mô phỏng. Nổi bật trong số đó là sử dụng phần mềm mô phỏng chuyên sâu với khả năng tính toán, phân tích có độ chính xác cao, các thông số cơ lý đá, tính chất thuốc nổ thay đổi một cách nhanh chóng, dễ dàng, thuận tiện. Do đó, bài báo nghiên cứu ứng dụng phần mềm LS-Dyna với các mô hình vật liệu đặc trưng cho đất đá, thuốc nổ để xây dựng mô hình 2D mô phỏng các vùng tác dụng nổ trong trường hợp nạp 3 hàng lỗ khoan khô với thuốc nổ Anfo thường. Từ kết quả mô phỏng, đưa ra các đánh giá về khả năng ứng dụng phần mềm LS-Dyna trong nghiên cứu các giải pháp công nghệ nâng cao hiệu quả công tác nổ mìn trên mô phỏng.

1. Đặt vấn đề

Khoan – nổ mìn là phương pháp phổ biến được sử dụng rộng rãi để phá vỡ đất đá trên các mỏ lộ thiên thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng do các ưu điểm vượt trội của nó về mặt kỹ thuật và kinh tế. Trên các mỏ lộ thiên, công tác nổ mìn phải đảm bảo các yếu tố: Đất đá được phá vỡ có đường kính cỡ hạt phù hợp với các quá trình sản xuất sau đó; tỉ lệ đá quá cỡ, mô chân tầng là ít nhất; hình dạng và góc dốc sườn tầng đảm bảo theo yêu cầu thiết kế, đảm bảo an toàn cho công tác khoan, nạp mìn cho các lần nổ sau;...

Hiện nay, việc nghiên cứu, đánh giá các vùng tác dụng nổ trong môi trường đất đá chủ yếu dựa trên phân tích bằng phương trình lý thuyết của các nhà khoa học Liên Bang Nga, điển hình là của giáo sư Pakrobski, giáo sư B. N. Kutuzov với việc phân chia các giai đoạn tác dụng của sản phẩm kích nổ [1], quan điểm của giáo sư Pakrobski đã nêu ra được các tính chất cơ bản của sóng kích nổ tác dụng lên khối đá như: Sóng đập, sóng đàn hồi, sóng ứng suất, sóng phản xạ và tính chất của khối đá như: Giới hạn bền nén động lực, mô đun đàn hồi, mật độ đất đá, ứng suất hướng tâm trong đất đá,... Tuy nhiên, việc phân biệt ranh mạch biên giới các vùng chỉ ở mức tương đối [1].

Cùng với đó, các nhà khoa học Anh, Mỹ,

Canada,... đã bổ sung thêm các tính chất về: Tốc độ truyền âm, độ lỗ rỗng, mô đun cắt, mô đun kéo, lực kháng kéo, cắt tối đa,... Với sự phát triển của khoa học máy tính, các phương trình lý thuyết đã được mô hình hóa cụ thể. Qua đó, tạo điều kiện xây dựng các trường hợp khoan, nổ mìn khác nhau để phân tích, đánh giá trên mô hình mô phỏng. Từ kết quả mô phỏng và kiểm nghiệm thực tế của các nhà khoa học cho thấy phần mềm cung cấp kết quả phân tích với mức độ chính xác cao.

Do đó, việc mô phỏng vùng tác dụng nổ trong môi trường đất đá bằng phương pháp thủy động lực học hạt mịn (Smooth Particle Hydrodynamics – SPH); mô hình vật liệu đất đá (Riedel Hiermaier Thoma - RHT); mô hình vật liệu nổ (High Explosive Burn - HEB); phương trình lan truyền sóng ứng suất của vật liệu nổ (Jones Wilkins Lee - JWL) với sự hỗ trợ của phần mềm mô phỏng LS-Dyna sẽ cung cấp giải pháp công nghệ hiệu quả để nghiên cứu, phân tích, đánh giá công tác nổ mìn trên mô phỏng. Kết quả mô phỏng là cơ sở để đánh giá khả năng ứng dụng phần mềm mô phỏng nổ mìn vào công tác nghiên cứu, nhằm nâng cao hiệu quả của công tác nổ mìn trên mô phỏng.

2. Cơ sở xây dựng mô hình mô phỏng vùng tác dụng nổ trong môi trường đất đá

2.1. Các vùng tác dụng nổ trong môi trường

đất đá và các nghiên cứu ứng dụng phần mềm mô phỏng điển hình

Theo các quan điểm lý luận, kết hợp với kết quả của các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm công tác nổ mìn của các nhà khoa học trên thế giới đã phân vùng tác dụng nổ lên đất đá như sau [1]:

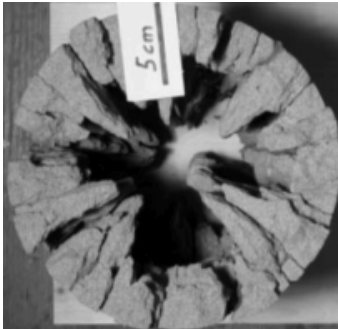
- *Vùng 1 (vùng nghiền nát)*: Nằm sát lượng thuốc, đất đá chịu tác dụng trực tiếp của áp lực khí

nổ dẫn đến đất đá rắn bị nát vụn;

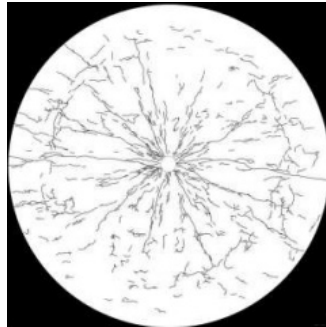
- *Vùng 2 (vùng nứt nẻ)*: Chịu tác động của biên độ sóng nhỏ hơn vùng 1 nhưng đủ để phá vỡ môi trường và tạo thành các khe nứt nẻ;

- *Vùng 3 (vùng chấn động)*: Biên độ sóng nhỏ hơn sức kháng tạm thời của đất đá và không đủ phá hủy hay làm nứt nẻ đất đá mà chỉ gây tác dụng chấn động.

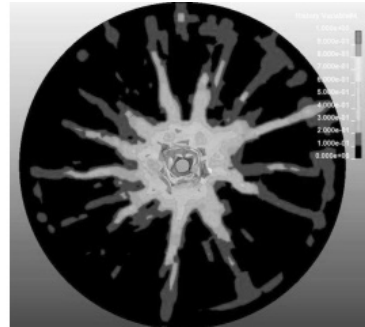
Trong 20 năm trở lại đây, với sự phát triển của



a)



b)



Hình 1. Thí nghiệm thực tế (a) và mô phỏng bằng phần mềm (b) các vùng tác dụng nổ lên mẫu đất đá của L.B. Jayasinghe

Bảng 1. Các công trình nghiên cứu điển hình về việc ứng dụng phần mềm mô phỏng trong đánh giá hiệu quả công tác nổ mìn

TT	Tác giả	Cách tiếp cận nghiên cứu	Nội dung nghiên cứu	Mục tiêu nghiên cứu
1	L.B. Jayasinghe và cộng sự	Phần mềm LS-Dyna, phương pháp thủy động lực học hạt mịn kết hợp với phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), mô hình RHT, HEB, JWL.	Cơ chế phá hủy đất đá do nổ mìn có xét tới vai trò của ứng suất nén, kéo và sóng phản xạ.	Xác định phạm vi phát triển khe nứt từ tâm lượng thuốc trong đất đá.
2	Jian Tao và cộng sự	Phần mềm LS-Dyna, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), mô hình JH – II, mô hình JWL, ...	Phân tích sự phân mảnh đất đá do tác dụng của lượng thuốc.	Xác định thay đổi đường kính cơ hạt, khi thay đổi thông số của mạng nổ.
3	Yingguo Hu và cộng sự	Phần mềm LS-Dyna, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), mô hình JH-II, JWL,...	Nghiên cứu giải pháp nâng cao hiệu quả góc dốc sườn tầng bằng lỗ khoan tạo biên.	Xác định thông số lỗ khoan tạo biên phù hợp để nâng cao góc dốc bờ tầng.
4	Hesam Dehghani và cộng sự	Phần mềm LS-Dyna, Abaqus, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), mô hình RHT, JWL,...	Nghiên cứu chất lượng đập vỡ đất đá trong nổ mìn lỗ khoan có nước.	Xác định mức độ đập vỡ đất đá trong 3 trường hợp: Anfo trong lỗ khoan khô, Anfo trong lỗ khoan có nước và nhũ tương trong lỗ khoan có nước.
5	Wenbo và cộng sự	Phần mềm LS-Dyna, phương pháp thủy động lực học hạt mịn (SHP) kết hợp với phương pháp phần tử hữu hạn động (DFEM), mô hình RHT, JWL,...	Nghiên cứu ảnh hưởng của mặt thoáng đến phạm vi lan truyền sóng chấn động.	Xác định mức độ suy giảm sóng chấn động theo khoảng cách và đề xuất giải pháp giảm thiểu sóng chấn động.

thuật toán máy tính và các trình mô phỏng, ranh giới các vùng đã có thể được xác định một cách trực quan. Các nghiên cứu điển hình về công tác nổ mìn được thực hiện trên phần mềm mô phỏng và thực nghiệm đối chứng trong phòng của các nhà khoa học trên thế giới, chi tiết xem hình 1, bảng 1.

Ở trong nước, việc nghiên cứu ứng dụng phần mềm mô phỏng trong phân tích vùng tác dụng nổ còn nhiều hạn chế. Các phân tích phụ thuộc chủ yếu vào công thức thực nghiệm của các nhà khoa học Liên Bang Nga, tiêu biểu của G. I Pakrovski với công thức thực nghiệm xác định vùng phá hoại sau [1]: $R = k\sqrt[3]{C}$ (1). Trong đó: R – bán kính vùng tác dụng nổ, m; C – khối lượng thuốc nổ, kg; k – hệ số phụ thuộc vào đặc trưng phá hủy và điều kiện địa chất.

Tuy nhiên, việc phân biệt rãnh mạch biên giới các vùng theo công thức thực nghiệm trên chỉ mang tính chất tương đối.

Như vậy, kế thừa kết quả nghiên cứu, ứng dụng phần mềm mô phỏng công tác nổ mìn của các nhà khoa học trên thế giới. Bài báo sử dụng phương pháp thủy động lực học hạt mịn (Smooth Particle Hydrodynamics – SPH), mô hình vật liệu đất đá (Riedel Hiermaier Thoma - RHT); mô hình vật liệu nổ (High Explosive Burn – HEB); phương trình lan truyền sóng ứng suất của vật liệu nổ (Jones Wilkins Lee - JWL) của phần mềm LS-Dyna để thực hiện mô phỏng vùng tác dụng nổ của lượng thuốc trong môi trường đất đá.

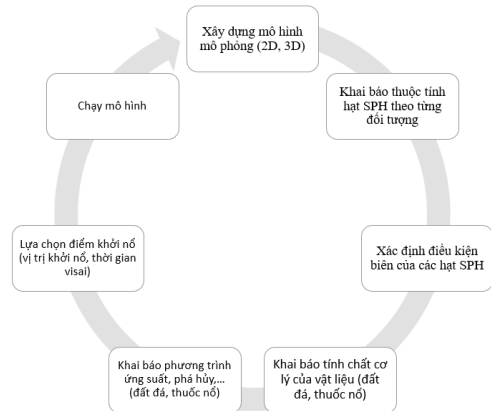
2.2. Quy trình mô phỏng nổ mìn với phần mềm LS-Dyna

Trong các phân tích chuyên sâu nổ mìn với phần mềm LS-Dyna, trình khai báo thuộc tính đối tượng, điều kiện biên cần phải thực hiện theo quy trình hình 2. Như vậy, từ quy trình hình 2 cho thấy việc phân tích nổ mìn với phần mềm LS-Dyna tập trung chủ yếu vào 2 vấn đề lớn sau:

- Thuộc tính hạt trong phương pháp thủy động lực học hạt mịn (SPH);
- Thuộc tính vật liệu đặc trưng cho đất đá, thuốc nổ.

a) Thuộc tính hạt trong phương pháp thủy động lực học hạt mịn (SPH):

Thủy động lực học hạt mịn (SPH) được phát triển bởi Lucy, Gingold và Monaghan [1977]. Phương pháp này được phát triển để tránh những hạn chế gặp phải trong các bài toán biến dạng cực trị bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Sự khác



Hình 2. Quy trình phân tích vùng tác dụng nổ của lượng thuốc với phần mềm LS-Dyna

biệt chính giữa các phương pháp cổ điển và SPH là không có lưới. Quy trình khai báo thuộc tính SPH trong phần mềm LS-Dyna xem hình 2. Các hạt là phần tử đại diện cho đối tượng và mang tính chất chung và riêng tùy theo thuộc tính khai báo. Phương pháp này yêu cầu một trình tính toán mới, được thể hiện ngắn gọn như sau [5]:

$$\Pi^h f(x) = \int f(y)W(x - y, h)dy \quad (1)$$

với W là hàm hạt nhân i

Hàm hạt nhân W được xác định bằng cách sử dụng hàm θ qua mối liên hệ [5]:

$$W(x, h) = \frac{1}{h(x)^d} \theta(x) \quad (2)$$

Với d là số chiều không gian, h là độ dài được làm mịn thay đổi theo thời gian và trong không gian W(x,h) phải là hàm trung tâm.

Phương pháp SPH dựa trên phương trình các hạt chuyển động $x_i(t) \in 1...N$, với $x_i(t)$ là vị trí của hạt i, hạt này chuyển động dọc theo trường vận tốc v. Như vậy, trạng thái của các hạt có thể được xác định xấp xỉ bằng công thức:

$$\Pi^h f(x_i) = \sum_{j=1}^N w_j f(x_j)W(x_i - x_j, h) \quad (3)$$

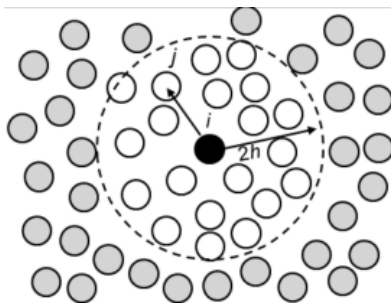
Với $w_j = m_j/\rho_j$ là trọng số của các hạt [5].

Tính chất tác dụng giữa các hạt đặc trưng cho đất đá và thuốc nổ xem hình 3. Tất cả các thuộc tính (ứng suất, mật độ,...) đặc gán cho từng hạt trong từng đặc trưng.

b) Thuộc tính vật liệu đặc trưng cho đất đá, lượng thuốc nổ:

- **Mô hình vật liệu đất đá (RHT):**

Một hình vật liệu đất đá RHT phản ánh đặc tính giòn của đá, được phát triển bởi Riedel, Hiermaier



Hình 3. Tính chất tác dụng giữa các hạt đặc trưng và Thoma trong LS-Dyna [6]. Mức độ phá hủy của mô hình vật liệu RHT được xác định qua hàm số:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^P}{\varepsilon^f} \quad (4)$$

$$\varepsilon^f = D_1 (p^* - p_{spall}^*)^{D_2} \geq \varepsilon_f^{min} \quad (5)$$

Trong đó, $\Delta \varepsilon^P$ - biến dạng dẻo tích lũy; ε^f - biến dạng phá hủy; D_1 và D_2 - các hằng số phá hủy được sử dụng để mô tả biến dạng ảnh hưởng đến nứt nẻ như là một hàm của ứng suất; ε_f^{min} là biến dạng tối thiểu để đạt đến phá hủy, p_{spall}^* là cường độ nứt vỡ được chuẩn hóa.

- Phương trình lan truyền sóng ứng suất của lượng thuốc (JWL):

Đối với lượng thuốc nạp trong lỗ, mô hình vật liệu thuốc nổ (High Explosive Burn – HEB) sử dụng trong LS-Dyna với phương trình lan truyền sóng ứng suất JWL được xác định qua phương trình [6]:

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6)$$

Trong đó, P là sóng ứng suất, A, B, R1, R2 và ω là các hằng số, V là thể tích riêng và E0 là nội năng có giá trị ban đầu là E0.

3. Xây dựng mô hình mô phỏng nổ mìn

Để đánh giá vùng tác dụng nổ của lượng thuốc trong môi trường đất đá, xây dựng mô hình 2D với các thông số khoan nổ như bảng 2.

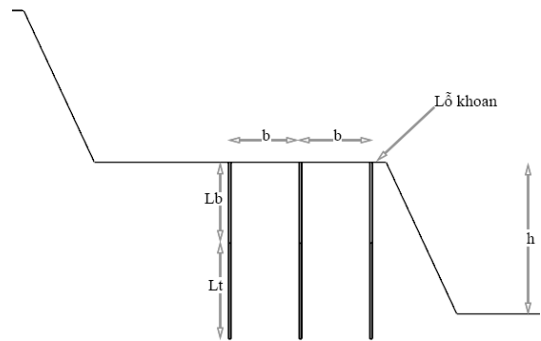
Thông số vật liệu môi trường đất đá, thuốc nổ tương thích với các thuộc tính của vật liệu RHT, HEB, JWL trong LS-Dyna được xác định dựa trên các nghiên cứu đã có về tính chất cơ lý của lớp cát kết [3],[4],[6]. Các thông số chính của vật liệu xem bảng 3.

4. Kết quả mô phỏng của phần mềm LS-Dyna

Kết quả tính toán trên mô hình mô phỏng được ghi nhận sau 0,1s tính từ khi bắt đầu nổ lượng

Bảng 2. Thông số khoan nổ

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Chiều cao tầng	h	m	15
Khoảng cách các hàng	b	m	7
Chiều dài nạp búa	Lb	m	8
Chiều dài nạp thuốc	Lt	m	9,5
Đường kính lỗ khoan	dk	m	0,25
Loại thuốc			Anfo
Thời gian visai		ms	17



Hình 4. Mô hình 2D mô phỏng vùng phá vỡ đất đá của lượng thuốc

thuốc của lỗ khoan gần mặt thoáng nhất (thời gian visai giữa các lỗ là 17 ms) như sau:

- Thời gian từ 0 – 0,03 giây (hình 5)

Trong thời gian từ 0 – 0,03 giây, 2 cột thuốc ngoài cùng được kích nổ, đất đá dịch chuyển tối đa 2,5 m và hướng về mặt tự do (hình 5a). Hệ khe nứt được hình thành hướng về tâm 2 cột thuốc (hình 5b) và sóng chấn động lan truyền trong môi trường đất đá (hình 5c).

- Thời gian sau 0,1 giây (hình 6)

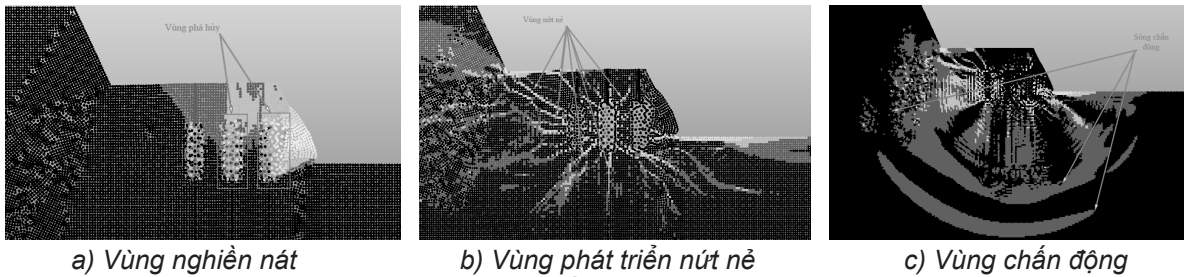
Sau 0,1 giây: Đất đá xung quanh 3 cột thuốc bị nghiền nát, đất đá dịch chuyển tối đa 9,5 m từ tâm bãi nổ, với tác dụng của năng lượng nổ, đất đá bị hất về phía mặt thoáng (hình 6a); hệ khe nứt phát triển hướng tâm được hình thành về phía bờ tầng (hình 6b); sau khi kích nổ lượng thuốc, sóng chấn động hình thành và lan truyền trong môi trường đất đá (hình 6c).

Đồng thời, sóng ứng suất sinh ra lan truyền trong môi trường đất đá được ghi nhận trên 4 điểm như hình 6a, b.

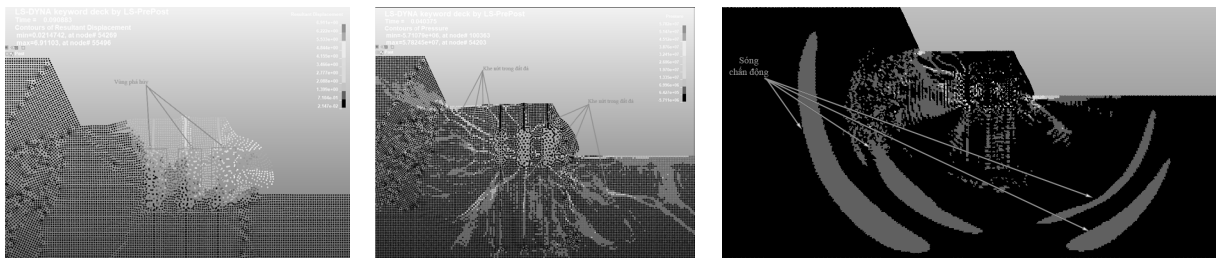
Hình 7 cho thấy: Sóng ứng suất thay đổi theo khoảng cách và thời gian từ bãi nổ đến bờ mỏ. Điểm 1, sóng ứng suất sẽ lớn nhất sau khi lỗ khoan cuối cùng được kích nổ và giảm nhanh chóng về 0 trong suốt thời gian ghi nhận.

Bảng 3. Thuộc tính vật liệu khai báo trong mô hình mô phỏng

TT	Thuộc tính	Giá trị	Thuộc tính	Giá trị
I	Tính chất cơ lý đá theo RHT			
1	Khối lượng thể tích, g/cm ³	2,60	Áp lực phá vỡ, Pa	1,25e ⁺⁸
2	Lực kháng nén, Kg/cm ²	1.237,03	Tốc độ biến dạng kéo	3e ⁺²⁵
3	Lực kháng kéo, Kg/cm ²	124,58	Tốc độ phá vỡ	3e ⁺²⁵
4	Góc nội ma sát	34°28'	Cường độ nén, Pa	1,68e ⁺⁸
5	Biến dạng phá hủy tối thiểu	0,015	Tốc độ truyền âm, m/s	2.610–2.800
6	Thông số bề mặt phá hủy (A)	2,44	Tốc độ biến dạng kéo tham chiếu	3.0e-5
7	Thông số bề mặt phá hủy (N)	0,76	Thông số bề mặt ứng suất nén	0,53
8	Tốc độ biến dạng nén tham chiếu	3.0e ⁻⁵	Độ lỗ rỗng ban đầu	1,1
II	Tính chất thuốc nổ ANFO theo HEB			
1	Tỷ trọng, kg/m ³	931	Áp lực nổ, Pa	5,15e ⁺⁹
2	Tốc độ nổ, m/s	4.200		
III	Phương trình lan truyền ứng suất của lượng thuốc theo JWL			
1	Hệ số trạng thái (A), Pa	4,95e ⁺¹⁰	Hệ số trạng thái (R2)	1,118
2	Hệ số trạng thái (B), Pa	1,89e ⁺⁹	Hệ số trạng thái (ω)	0,33
3	Hệ số trạng thái (R1)	3,907	Năng lượng nổ trên 1 đơn vị thể tích, Pa/m ³	2,48e ⁺⁹



Hình 5. Vùng tác dụng nổ trong thời gian từ 0 – 0,03 giây



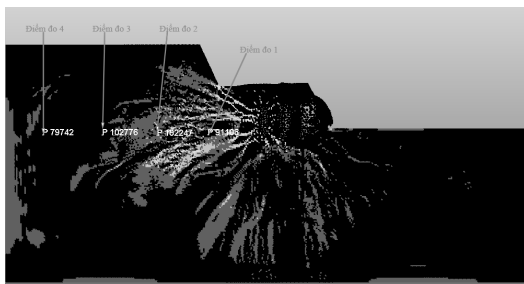
Hình 6. Vùng tác dụng nổ trong thời gian sau 0,1 giây

Kết quả mô phỏng, ưu – nhược điểm của phần mềm LS-Dyna trong việc mô phỏng công tác nổ mìn như sau:

- **Ưu điểm:** Các tính chất cơ lý của vật liệu, đặc tính phá hủy, đặc tính lan truyền sóng của đất đá, thuốc nổ được thể hiện đầy đủ, các bài toán phân tích đa dạng thuận tiện cho công tác nghiên cứu,

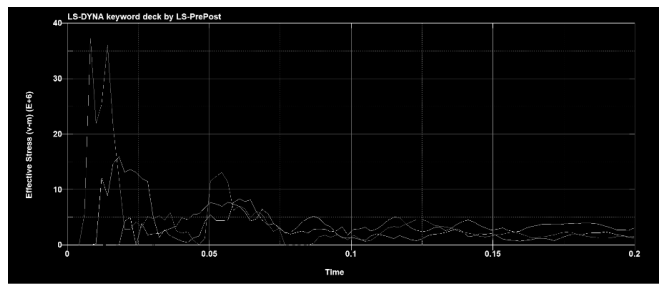
đánh giá (sóng ứng suất, cự li dịch chuyển, sóng chấn động,...), thư viện vật liệu đa dạng được kiểm chứng qua thử nghiệm thực tế,...

- **Nhược điểm:** Mất nhiều thời gian tính toán đối và khai báo biến số đầu vào, các thông số về tính chất đất đá cần được khai báo chính xác để đảm bảo độ tin cậy trong kết quả tính toán, công tác xây



a) Điểm đo sóng ứng suất

Hình 7. Điểm khảo sát sóng ứng suất và giá trị đo tại 4 điểm trên mô hình mô phỏng



b) Giá trị đo sóng ứng suất trên 4 điểm

dựng mô hình, khai báo điều kiện biên để mô hình hoạt động tương đối phức tạp.

Như vậy, từ kết quả mô phỏng, các đánh giá ưu, nhược điểm của phần mềm LS-Dyna nhận thấy: Phần mềm LS-Dyna hoàn toàn phù hợp trong việc ứng dụng phần mềm mô phỏng để xây dựng các giải pháp công nghệ nhằm nâng cao hiệu quả của công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên.

5. Kết luận

Từ kết quả mô phỏng vùng tác dụng nổ trên hình 2D với 3 lỗ khoan đường kính $d = 250$ mm, thời gian visai 17 ms với phần mềm LS - Dyna, nhận thấy: Các vùng tác dụng nổ trong môi trường đất đá được xác định dễ dàng, hiển thị trực quan, và đa dạng trong các bài toán phân tích. Qua đó, phần mềm LS-Dyna đủ cơ sở để ứng dụng phần mềm mô phỏng nổ mìn vào công tác nghiên cứu, nhằm nâng cao hiệu quả của công tác nổ mìn trên mỏ lộ thiên

Tài liệu tham khảo:

[1]. PGS. TS. Đàm Trọng Thắng, PGS. TS. Bùi Xuân Nam, TS. Trần Quang Hiếu, *Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình*, Nhà xuất bản Khoa học và Công nghệ, 2015.

[2]. GS.TS Nhữ Văn Bách. *Nâng cao hiệu quả phá vỡ đất đá bằng nổ mìn trong khai thác mỏ*. NXB Giao thông vận tải. Hà Nội 2003.

[3] *Dự án cải tạo mở rộng nâng công suất mỏ than Cao Sơn*, Báo cáo nghiên cứu khả thi đầu tư xây dựng, 2021.

[4] Yingguo Hu, *Comparison of blast induced damage between presplit and smooth blasting of high rock slope*;

[5]. Tran Thanh Thung, *Study of the SPH method for Simulation in LS-Dyna*, 2017.

[6]. Peng, J.; Zhang, F.; Du, C.; Yang, X. *Effects of confining pressure on crater blasting in rock-like materials under electric explosion load*. Int. J. Impact Eng. 2020, 139, 103534.

Determination of explosive zones in rock environment by intensive simulation software with SPH fine-grained hydrodynamics method

Eng. Do Van Trieu, Eng. Hoang Manh Thang

Vinacomin-Institute of Mining Science and Technology

Eng. Dao Trong Ngoc Long - Defence Economic Technical Industry Corporation (GAET)

Abstract:

At present, there are many methods of studying and analyzing explosive effect zones in rock environment on open-pit mines. Prominent among them is the use of in-depth simulation software with high-precision calculation and analysis capabilities, rock-mechanical parameters, explosive properties that change quickly, easily and conveniently. Therefore, the article studies the application of LS-Dyna software with specialized material models specific for rock and explosives to build 2D models to simulate explosive impact zones in the case of loading 3 rows of dry boreholes with ordinary Anfo explosives. From the simulation results, the evaluation of the applicability of LS-Dyna software in the study of technological solutions to improve the efficiency of blasting work on open-pit mines is given.