

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA GÓC MỞ VÀ BỀ DÀY PHỄU LÓT TỚI UY LỰC XUYỀN THÉP CỦA ĐẠN LỖM QUAY CỖ 40 MM

STUDY ON THE INFLUENCE OF THE LINER APEX ANGLE AND LINER THICKNESS ON THE STEEL PENETRATION PERFORMANCE OF A 40 MM ROTATING SHAPED CHARGE

ThS. Phùng Văn Cường, TS. Bùi Xuân Sơn*, PGS, TS. Đỗ Văn Minh

Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

*Email: buixuanson.mta@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số góc mở và bề dày phễu lót đến uy lực đạn xuyên lõm quay. Nhóm tác giả đã sử dụng mô phỏng 3D bằng phương pháp không lưới SPH trên phần mềm Ansys Autodyn để khảo sát ảnh hưởng của góc mở và bề dày phễu lót đạn xuyên lõm quay. Đối tượng nghiên cứu là đầu đạn xuyên lõm cỡ 40 mm, góc mở phễu lót α gồm năm phương án: 24°, 27°, 30°, 33° và 36°. Bề dày phễu lót δ gồm sáu phương án: 0,6 mm, 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm, 1,4 mm và 1,6 mm. Mô phỏng số tiến hành với tốc độ quay quanh trục đối xứng của đạn ở hai trường hợp: không quay và quay 10000 vòng/phút. Kết quả mô phỏng số cho thấy khi đạn không quay tồn tại một giá trị tham số thiết kế phễu lót tối ưu, tại đó chiều sâu xuyên của đạn đạt giá trị tối ưu, tương tự ở trường hợp đạn quay 10000 vòng/phút cũng tồn tại một giá trị tham số thiết kế phễu lót tối ưu. Phương pháp nghiên cứu này có thể được sử dụng để tối ưu thiết kế kết cấu đạn lõm quay.

Từ khóa: Đạn xuyên lõm quay 40 mm; Uy lực đạn xuyên lõm; Phương pháp SPH; Phễu lót đạn xuyên lõm.

ABSTRACT

This paper investigates the influence of the liner apex angle and liner thickness on the penetration performance of a rotating shaped charge. The authors employed three-dimensional numerical simulations using the mesh-free Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method implemented in ANSYS Autodyn to analyze the effects of the liner apex angle and liner thickness on the performance of the rotating shaped charge. The object of study is a 40-mm caliber shaped charge warhead. The liner apex angle α was considered in five configurations: 24°, 27°, 30°, 33°, and 36°, while the liner thickness δ was investigated in six configurations: 0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm, 1.2 mm, 1.4 mm, and 1.6 mm. Numerical simulations were carried out for two rotational conditions about the charge axis of symmetry: non-rotating and rotating at 10000 rpm. The simulation results indicate that, in the non-rotating case, there exists an optimal set of liner design parameters at which the penetration depth reaches a maximum value. Similarly, for the rotating case at 10000 rpm, an optimal liner design parameter set is also observed. The proposed research approach can be applied to optimize the structural design of rotating shaped charges.

Keywords: Rotating shaped charge warhead 40 mm; Penetration of shaped charge warhead; SPH method; Shaped charge liner.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong đạn xuyên lõm, khi sóng nổ lan truyền dọc phễu lót, áp suất sản phẩm nổ có thể đạt tới 10^6 atm với vận tốc nén ép $5\div 15$ km/s, tạo nên trạng thái biến dạng cực lớn của kim loại. Trong điều kiện này, vật liệu phễu lót có thể được coi như chất lỏng lý tưởng chịu nén, xảy ra quá trình phân bố lại động năng và tập trung năng lượng vào lớp kim loại mỏng phía trong phễu. Do chênh lệch vận tốc dịch chuyển, lớp kim loại phía trong (khoảng $10\div 20\%$) hình thành phần đỉnh dòng, trong khi lớp ngoài tạo thành chuỗi dòng xuyên [6].

Các đặc tính hình học phễu lót, bao gồm hình dạng, góc mở và độ dày, có ảnh hưởng quyết định đến đặc điểm dòng xuyên. Giảm góc mở làm tăng vận tốc và chiều dài dòng nhưng đồng thời giảm khối lượng và độ bền dòng; tăng độ dày phễu làm tăng khối lượng và độ bền dòng song lại làm giảm vận tốc dòng. Thực tế tồn tại một giá trị tối ưu của độ dày phễu, tại đó khả năng xuyên sâu đạt lớn nhất [6].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về ảnh hưởng của tham số kết cấu phễu lót đến uy lực đạn xuyên lõm, tuy nhiên các công bố liên quan đến đạn xuyên lõm quay còn hạn chế. Các kết quả lý thuyết và thực nghiệm cho thấy chuyển động quay gây bất lợi cho dòng xuyên do chênh lệch vận tốc quay giữa đỉnh và chuỗi dòng, kết hợp với lực ly tâm làm dòng bị xoắn, giảm độ bền và dễ gãy, từ đó làm suy giảm khả năng xuyên.

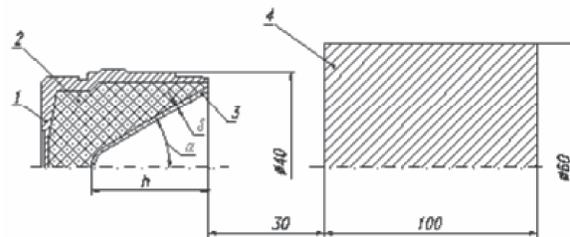
Việc mô phỏng uy lực đạn xuyên lõm quay bằng mô hình 2D gặp nhiều hạn chế; do đó, phương pháp không lưới SPH mô phỏng 3D trên phần mềm Ansys LS-DYNA được lựa chọn [3, 4, 7]. Trên cơ sở phương pháp SPH, bài báo khảo sát ảnh hưởng của góc mở và bề

dày phễu lót đến uy lực đạn xuyên lõm cỡ 40 mm trong hai trường hợp đạn quay ở tốc độ 10000 vòng/phút (vì tốc độ quay lớn hơn 6000 vòng/phút thì ảnh hưởng lớn đến uy lực xuyên của đạn [6]) và đạn không quay.

2. CÁC MÔ HÌNH CỦA BÀI TOÁN MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH HÌNH VÀ XUYÊN CỦA ĐẦU ĐẠN XUYÊN LỖM CÓ CHUYỂN ĐỘNG QUAY VÀO MỤC TIÊU BẰNG THÉP

2.1. Mô hình hình học của bài toán

Mô hình hình học khảo sát là đầu đạn xuyên lõm cỡ 40 mm và mục tiêu là đích thép có kích thước $\Phi \times L = 60 \times 100$ mm được thể hiện ở hình 1 dưới đây:



Hình 1. Mô hình nghiên cứu

1. Thân vỏ; 2. Thuốc nổ; 3. Phễu lót; 4. Mục tiêu

Đầu đạn xuyên lõm khảo sát bao gồm các bộ phận: thân vỏ, phễu lót và thuốc nổ. Đầu đạn khảo sát có dạng tròn xoay, trong quá trình khảo sát bài báo giữ nguyên kích thước đường kính và tính chất vật liệu của thân vỏ, mục tiêu, giữ nguyên khối lượng thuốc nổ (35 gam), vật liệu và khối lượng phễu lót (13 gam). Chỉ thay đổi bề dày δ và góc mở phễu lót α để tiến hành đánh giá ảnh hưởng của các tham số kết cấu phễu lót đạn xuyên lõm quay đến uy lực xuyên lõm.

Bài toán sử dụng phương pháp tính toán SPH trên phần mềm Ansys Autodyn để mô

phóng quá trình từ khi kích nổ đầu đạn đến khi dòng xuyên được hình thành hoàn toàn và mô phỏng quá trình tương tác giữa dòng xuyên với mục tiêu bản thép. Chọn kích thước hạt 0,4 mm [4]; thời gian chạy máy của mỗi phương án là 12 đến 72 giờ.

2.2. Mô hình vật liệu trong bài toán mô phỏng

2.2.1. Mô hình vật liệu thuốc nổ

Căn cứ vào sự tương đương giữa vật liệu thực tế của đầu đạn xuyên lõm và vật liệu trong thư viện phần mềm Ansys, trong mô hình mô phỏng sử dụng thuốc nổ trong đầu đạn là Comp B [2].

Bảng 1. Các thông số trong phương trình trạng thái JWL của chất nổ Comp B

ρ_0 kg/m ³	D km/s	A Gpa	B Gpa	R ₁	R ₂	ϕ
1,717	7,98	524,2	7,678	4,20	1,10	0,34

2.2.2. Mô hình vật liệu thân vỏ, phễu lót và mục tiêu

Căn cứ vào sự tương đương giữa vật liệu dùng trong đầu nổ lõm và vật liệu trong thư viện phần mềm Ansys, chọn các vật liệu thân vỏ, phễu lót và mục tiêu như sau:

Vật liệu thân vỏ là nhôm AL 6061-T6, khi chịu áp suất của sản phẩm nổ, vật liệu này có biến dạng lớn. Vì vậy, trong khi mô phỏng sử dụng phương trình trạng thái Shock để mô tả mô hình vật liệu của thân vỏ. Vật liệu phễu lót

chọn là đồng CU-OFHC2.

Vật liệu mục tiêu là thép có kích thước $\Phi \times L = 60 \times 100$ mm, chọn vật liệu mục tiêu là thép C45. Căn cứ vào sự tương đương giữa thép C45, ta chọn trong thư viện vật liệu của phần mềm Ansys là thép STEEL 1006.

Các thông số phương trình trạng thái Shock và mô hình tăng bền Johnson-Cook của các loại vật liệu được cho trong bảng 2, 3 [1] dưới đây.

Bảng 2. Các thông số phương trình trạng thái Shock của vật liệu

TT	Tên vật liệu	ρ_0 g/cm ³	Γ	C ₁ cm.μs ⁻¹	S ₁	C ₂ cm.μs ⁻¹	S ₂	$\frac{VB}{v_0}$
1	AL 6061-T6	2,703	1,97	0,5240	1,4	0	0	0
2	STEEL 1006	7,896	2,17	0,46	1,49	0	0	0

Bảng 3. Các thông số mô hình tăng bền Johnson-Cook của vật liệu

TT	Tên vật liệu	ρ_0 g/cm ³	A Mbar	B Mbar	C	n	m	T _{nc} K
1	STEEL 1006	7,896	0,00275	0,0035	0,022	0,36	1	1811
2	CU-OFCH2	8,960	0,00292	0,0009	0,025	0,31	1,09	1355

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phương án thay đổi góc mở phễu lót

Bài báo khảo sát ảnh hưởng của góc mở α phễu lót với 5 trường hợp: 24° , 27° , 30° , 33° và 36° tương ứng với chiều cao h của phễu lót lần lượt là: 24,5 mm, 24 mm, 24,5 mm, 22 mm và 20 mm. Tiến hành mô phỏng bằng phần

mềm Ansys Autodyn, module SPH trong 5 trường hợp trên với 2 phương án đầu đạn quay quanh trục với các vận tốc quay 0 vòng/phút (không quay) và 10000 vòng/phút (tương ứng với 0 rad/s và 1047 rad/s). Bảng 4 là hình ảnh kết quả mô phỏng ở các góc mở phễu lót: 24° , 30° và 36° tại thời điểm 0,1 ms (hình ảnh mô phỏng đã bỏ hình ảnh của thuốc nổ và thân vỏ).

Bảng 4. Kết quả mô phỏng quá trình hình thành dòng xuyên tương tác với bản thép với các trường hợp thay đổi góc mở phễu lót

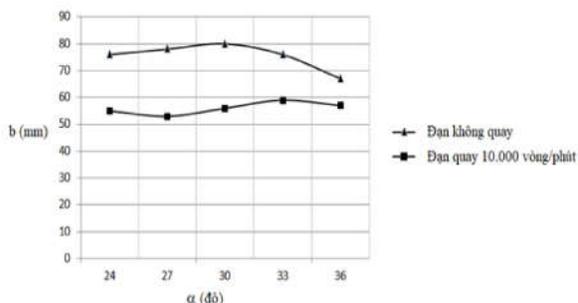
Góc mở α (độ)	Tốc độ quay của đạn (vòng/phút)	
	0	10.000
24°		
30°		
36°		

Từ kết quả mô phỏng với các trường góc mở phễu lót có thể thấy: khi đạn không quay, hình ảnh dòng xuyên khi góc mở phễu lót tăng dần có hình dạng lớn và ngắn hơn, đường kính dòng tăng dần. Khi đạn quay, hình ảnh tương tự nhưng ngắn hơn đạn không quay. Kết quả khảo sát chiều sâu xuyên mục tiêu tương ứng các trường hợp góc mở phễu lót được cho trong bảng 5 (kết quả chiều sâu xuyên có thể có sai số với phép đo chiều dài trên phần mềm Ansys).

Bảng 5. Chiều sâu xuyên thép của đạn đối với các trường hợp góc mở phễu lót khi đạn quay và không quay

Góc mở α (độ)	Chiều sâu xuyên b (mm)		Độ giảm chiều sâu xuyên khi đạn quay so với không quay (%)
	Không quay	Quay 10000 vòng/phút	
24°	76,0	55,0	27,6
27°	78,0	53,0	32,1
30°	80,0	56,0	30,0
33°	76,0	59,0	22,3
36°	67,0	57,0	14,9

Có thể thấy, chiều sâu xuyên của đạn càng giảm khi vận tốc quay càng lớn, điều này phù hợp với lý thuyết uy lực đạn. So với đạn không quay, chiều sâu xuyên của đạn quay (10000 vòng/phút) với các trường hợp góc mở phễu lần lượt là: 24°, 27°, 30°, 33° và 36° giảm lần lượt là 27,6%; 32,1%; 30%; 22,3%; 14,9%. Như vậy, ở góc mở $\alpha = 36^\circ$ (góc mở lớn nhất) có độ giảm chiều sâu xuyên ít nhất, tồn tại một giá trị góc mở ở đó độ suy giảm nhiều nhất nhưng độ sâu xuyên khi đạn không quay đạt giá trị tối ưu ($\alpha = 30^\circ$).



Hình 2. Chiều sâu xuyên thép của đạn đối với các trường hợp góc mở phễu lót khi đạn quay và không quay

Từ kết quả bảng 5 và đồ thị hình 2 cho thấy: khi đạn không quay tồn tại một giá trị góc mở phễu lót tối ưu tại đó chiều sâu xuyên của đạn là lớn nhất, tương tự với trường hợp đạn không quay cũng tồn tại một giá trị góc mở phễu lót tối ưu, góc mở phễu lót tối ưu của hai trường hợp trong khoảng $\alpha = (30 \pm 33)^\circ$.

3.2. Phương án thay đổi bề dày phễu lót

Khảo sát ảnh hưởng của bề dày δ của phễu lót với 6 trường hợp: 0,6 mm, 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm, 1,4 mm và 1,6 mm tương ứng với chiều cao h của phễu lót lần lượt là: 32,4 mm, 27 mm, 24,5 mm, 20,5 mm, 19,5 và 17,5 mm. Tiến hành mô phỏng bằng phần mềm Ansys Autodyn, module SPH trong 5 trường hợp trên với 2 phương án đầu đạn quay quanh trục với các vận tốc quay 0 vòng/phút (không quay) và 10000 vòng/phút (tương ứng với 0 rad/s và 1047 rad/s). Bảng 6 là hình ảnh kết quả mô phỏng với phễu lót có bề dày: 0,6 mm, 1,2 mm và 1,6 mm tại thời điểm 0,1 ms (hình ảnh mô phỏng đã bỏ hình ảnh của thuốc nổ và thân vỏ).

Bảng 6. Kết quả mô phỏng quá trình hình thành dòng xuyên tương tác với bản thép với các trường hợp thay đổi bề dày phễu lót

Bề dày δ (mm)	Tốc độ quay của đạn (vòng/phút)	
	0	10.000
0,6		
1,2		
1,6		

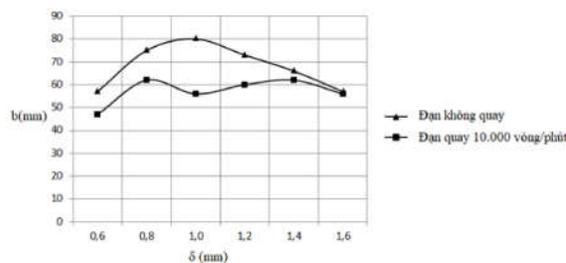
Từ kết quả mô phỏng với các trường hợp bề dày phễu lót có thể thấy: khi đạn không quay, hình ảnh dòng xuyên khi bề dày phễu lót tăng dần có hình dạng thon nhọn hơn, đường kính dòng giảm dần. Khi đạn quay, hình ảnh tương

tự nhưng ngắn hơn đạn không quay. Kết quả khảo sát chiều sâu xuyên mục tiêu tương ứng các trường hợp bề dày phễu lót được cho trong bảng 7 (kết quả chiều sâu xuyên có thể có sai số với phép đo chiều dài trên phần mềm Ansys).

Bảng 7. Chiều sâu xuyên thép của đạn đối với các trường hợp bề dày phễu lót khi đạn quay và không quay

Bề dày δ (mm)	Chiều sâu xuyên b (mm)		Độ giảm chiều sâu xuyên khi đạn quay so với không quay (%)
	Không quay	Quay 10000 vòng/phút	
0,6	57	47	17,5
0,8	75	62	17,3
1,0	80	56	30,0
1,2	73	60	17,8
1,4	66	62	6,1
1,6	57	56	1,8

Có thể thấy, chiều sâu xuyên của đạn càng giảm khi vận tốc quay càng lớn, điều này phù hợp với lý thuyết uy lực đạn. So với đạn không quay, chiều sâu xuyên của đạn quay (10000 vòng/phút) với các trường hợp bề dày phễu lần lượt là: 0,6 mm, 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm, 1,4 mm và 1,6 mm giảm lần lượt là 17,5%; 17,3%; 30%; 17,8%; 6,1% và 1,8%. Như vậy, ở giá trị bề dày phễu lót $\delta = 1,6$ mm (bề dày lớn nhất) có độ giảm chiều sâu xuyên ít nhất, tồn tại một giá trị bề dày ở đó độ suy giảm nhiều nhất nhưng độ sâu xuyên khi đạn không quay đạt giá trị tối ưu ($\delta = 1,0$ mm).



Hình 3. Chiều sâu xuyên thép của đạn đối với các trường hợp bề dày phễu lót khi đạn quay và không quay

Từ kết quả bảng 7 và đồ thị hình 3 cho thấy: khi đạn không quay tồn tại một giá trị góc mở phễu lót tối ưu tại đó chiều sâu xuyên của đạn là lớn nhất, tương tự với trường hợp đạn không quay cũng tồn tại một giá trị bề dày phễu lót tối ưu, giá trị bề dày phễu lót δ của hai trường hợp trong khoảng từ (0,8÷1,2) mm. Khi bề dày phễu tăng dần, chiều sâu xuyên của hai trường hợp suy giảm có xu hướng hội tụ tại một điểm. Điều này có thể được giải thích như sau: khi bề dày phễu lót tăng lên thì chiều dài dòng được tăng lên do dòng được bù liên tục từ vật liệu phễu lót. Tuy nhiên, khi bề dày phễu lót tăng đến một mức nào đó thì tốc độ nén ép phễu lót lại giảm dẫn đến chiều sâu xuyên của dòng bị giảm. Do đó, tồn tại một giá trị bề dày phễu lót phù hợp, cho chiều sâu xuyên thép lớn nhất. Tuy nhiên, điều này chỉ phù hợp với đạn không quay hoặc quay ít. Đối với đạn có tốc độ quay lớn, sự phụ thuộc này tương đối phức tạp vì sự ảnh hưởng bởi lực ly tâm, gradient vận tốc góc... ở mỗi phân tố phễu lót là khác nhau. Các ảnh hưởng kể trên khó được thể hiện trong các mô hình tính toán giải tích, nhưng có thể được thể hiện thông qua phương pháp mô phỏng số.

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu nhận thấy rằng ảnh hưởng của góc mở và bề dày phễu lót đến uy lực của đạn xuyên lõm là đáng kể. Tồn tại

một giá trị tham số kết cấu phễu lót tối ưu ở đó đạn có uy lực tốt nhất, ở hai trường hợp quay và không quay. Đối với góc mở, giá trị tối ưu từ $(30\div 33)^\circ$; với bề dày phễu lót, giá trị tối ưu từ $(0,8\div 1,2)$ mm. Từ kết quả này có thể thấy, đối với đạn xuyên lõm cỡ 40 mm có tốc độ quay quanh trục lớn (trên 10000 vòng/phút) nên thiết kế phễu có bề dày lớn tăng hiệu quả xuyên của đạn, đối với đạn xuyên lõm khác có tốc độ quay quanh trục lớn cũng có thể áp dụng phương pháp tính toán này để thiết kế phễu lót vì phù hợp với lý thuyết.

Kết quả mô phỏng 3D đạn xuyên lõm bằng phương pháp SPH trên phần mềm Ansys Autodyn hoàn toàn phù hợp với lý thuyết toán uy lực đạn lõm khi tối ưu hóa các tham số kết cấu của phễu lót. Có thể ứng dụng phương pháp mô phỏng này để khảo sát hoàn thiện tối ưu kết cấu đạn xuyên lõm có chuyển động quay. ❖

Ngày nhận bài: **16/12/2025**

Ngày phản biện: **06/01/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. ANSYS, Inc. (2011), ANSYS Workbench User's Guide.
- [2]. Dobratz B.M & Crawford P.C. UCRL-52997 Rev.2 January 1985, LLNL Explosives Handbook.
- [3]. L.B. Lucy (1977). "A numerical approach to the testing of the fission hypothesis". *Astron. J.* 82: 1013-1024. Bibcode:1977AJ.82.1013L. doi:10.1086/112164.
- [4]. L.D. Libersky; A.G. Petschek; A.G. Carney; T.C. Hipp; J.R. Allahdadi; F.A. High (1993), "Strain Lagrangian hydrodynamics: a three-dimensional SPH code for dynamic material response". *J. Comput. Phys.* 109 (1): 67-75. Bibcode:1993JCoPh.109...67L. doi:10.1006/jcph.1993.1199.
- [5]. Nguyễn Văn Thủy (2001), "Vật lý nổ". Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [6]. Nguyễn Văn Thủy, Trần Văn Định (2007), "Uy lực đạn". Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [7]. R.A. Gingold; J.J. Monaghan (1977), "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars". *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 181 (3): 375-89. Bibcode:1977 MNRAS.181.375G. doi:10.1093/mnras/181.3.375.
- [8]. Trần Văn Định (2005), "Cấu tạo tác dụng đạn được lực quân". Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [9]. V. Minh Do, M. Thai Le, X. Son Bui, H. Nguyen Pham and P. Linh Nguyen (2020), "Influence of Wave Shaper Position on Jet Formation and Penetration Depth". *Advances in Military Technology*, 15(2), pp. 355-364, DOI 10.3849/aimt.01385.
- [10]. А.А. Плющ (2014), "Физические основы устройства ракетно-артиллерийского вооружения. Боеприпасы". Пензенский артиллерийский инженерный институт.
- [11]. I.B. Минин và O.B. Минин (2013), "Кумулятивные заряды". Сибирская государственная геодезическая академия.