

HỆ SỐ MÀI MÒN CERCHAR VÀ VIỆC SỬ DỤNG NÓ ĐỂ TÍNH TOÁN MÀI MÒN CÔNG CỤ CẮT TRONG KHAI ĐÀO ĐÁ CỨNG

CERCHAR ABRASIVENESS INDEX AND IT'S USE FOR WEAR PREDICTION IN HARDROCK EXCAVATION

Phạm Tiến Vũ
Viện Khoa học Công nghệ Mỏ

ABSTRACT

Advanced mechanization in excavation and particularly the growing use made of roadheaders and tunnel boring machines, requires knowledge regarding rock abrasivity. This factor dictates indeed primarily the tool efficiency and replacement rate. As a consequence, abrasivity may in fact result in extra costs.

The Cerchar scratch test is one of the most common testing procedures used for laboratory assessment of hardrock abrasivity worldwide. The paper resumes findings on geological factors and testing conditions influencing the CAI value. Correlations are given for the CAI and other parameters related to rock abrasivity, as for example the Equivalent Quartz Content, the LCPC Abrasimetre or Rock Abrasivity Index (RAI) as well as correlations for tool wear rate estimations on drill bit lifetime, specific point attack pick wear rate and cutter disc lifetime.

TÓM TẮT

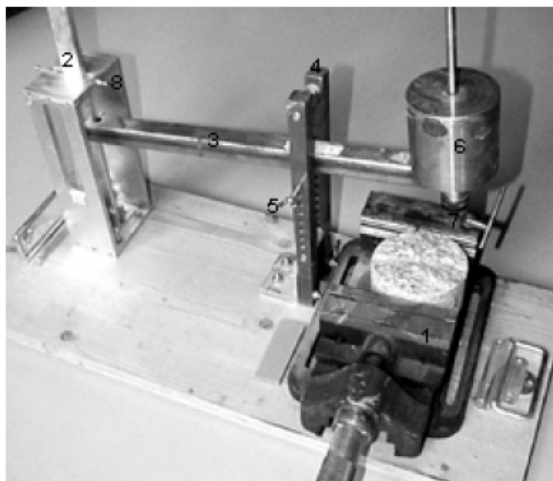
Việc ứng dụng cơ giới hoá khai đào tiến tiến và đặc biệt là ứng dụng các combai đào lò và các TBM đòi hỏi phải có sự hiểu biết về độ mài mòn của đá. Yếu tố này ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của công cụ cắt và chi phí thay thế. Với một tầm quan trọng nhất định, sự mài mòn thực tế có thể dẫn đến việc chi phí bị vượt trội.

Thử nghiệm mài Cerchar là một quy trình thử nghiệm phổ biến nhất trên thế giới được tiến hành trong phòng thí nghiệm để xác định độ mài mòn của đất đá. Bài báo tóm tắt phương pháp tìm kiếm các nhân tố địa chất và các điều kiện thử nghiệm ảnh hưởng đến giá trị CAI. Mỗi liên quan giữa CAI và các thông số khác liên quan đến độ mài mòn của đất đá như hàm lượng Quartz tương đương, độ mài mòn CLPC hay Chỉ số mài mòn đá (Rock Abrasivity Index - RAI) cũng như mối tương quan giữa tốc độ hao mòn công cụ được khảo sát trong tuổi thọ mũi khoan, tốc độ hao mòn răng cắt cụ thể cũng như tuổi đời của đĩa cắt.

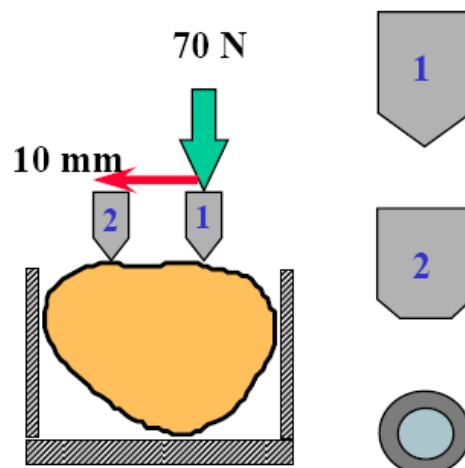
1. KHÁI QUÁT VỀ THỬ NGHIỆM MÀI MÒN CERCHAR

Thử nghiệm Cerchar (được phát triển bởi Centre d'Etudes et de Recherches des Charbonnages de France) là một thử nghiệm về mài mòn được sử dụng rất rộng rãi trong ngành công nghiệp khai thác than ở nước Pháp.

Trong thử nghiệm Cerchar, một mũi thép sắc nhọn (có độ cứng 200 kG/mm²) với mũi vát góc 90° tỳ lên bề mặt của một mẫu đá với tải trọng tĩnh là 70 N. Mũi thép được dịch chuyển chậm trên một khoảng 10 mm. Quá trình này được lặp đi lặp lại 5 lần ở nhiều hướng khác nhau trên bề mặt đá, và luôn sử dụng mũi thép mới. Độ mài mòn của đá thu được bằng cách đo lường thông qua một kính hiển vi do độ mài mòn trên mũi mũi thép. Đơn vị của độ mài mòn được định nghĩa bằng độ cùn vệt 0,1 mm đường kính mũi.



Hình 1. Bộ dụng cụ thử nghiệm



Hình 2. Sơ đồ thử nghiệm

Sự áp dụng rộng rãi thử nghiệm này của các nhà sản xuất thiết bị thi công hầm, các viện nghiên cứu và các đơn vị tư vấn trong lĩnh vực khai đào đất đá đã đưa CAI trở thành một thông số “tiêu chuẩn” để phân loại độ mài mòn của đá cứng. Cũng trong mục đích này, CAI đã được ÖGG – nước Áo khuyến dùng cho các thiết kế địa kỹ thuật – kết cấu công trình ngầm (ÖGG, 2001).

1. MÔ TẢ CƠ CẤU THỬ NGHIỆM CERCHAR

2.1. Thiết bị thử nghiệm và tốc độ thử nghiệm

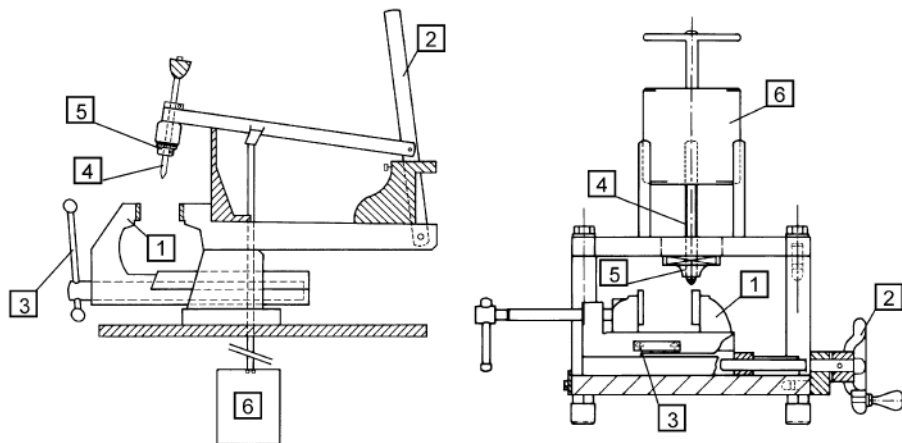
Có hai loại thiết bị thử nghiệm được sử dụng: Sơ đồ bố trí nguyên thủy [1], ở đây được gọi bằng “Bộ dụng cụ thí nghiệm Cerchar” và thiết bị thử nghiệm được giới thiệu trong [2], được gọi bằng “Bộ dụng cụ thí nghiệm West” (hình 3).

Sơ đồ bố trí nguyên thủy (Hình 1 bên trái) có cấu tạo chính gồm: bộ phận ôm phụ kẹp mẫu đá và một tay đòn thử nghiệm và liên kết trực tiếp với đỉnh kim thép. Đỉnh kim thép được gia tải bằng một lực 70N. Trong thiết lập thử nghiệm này, đỉnh kim thép được chà xát lên bề mặt đá bằng cách di chuyển tay đòn với tốc độ 10mm/s.

“Bộ dụng cụ thí nghiệm West” (hình 3 bên phải) cấu tạo chính cũng gồm: một bộ phận ôm kẹp đá và một kim thép được gia tải bằng một lượng 70N. Đối lập với “bộ dụng cụ thí nghiệm Cerchar”, tốc độ cắt thấp hơn, cứ 10 giây cho 10mm khoảng cách chà xát. Đó là do sự điều khiển dịch chuyển di hướng khác nhau mà ở đây là được thực hiện bằng tay làm dịch chuyển mẫu đá bên dưới mũi thép. Bỏ qua tác động của các tốc độ thử nghiệm đa dạng, các giá trị CAI được tìm thấy từ hai loại được xác định là bằng nhau.

2.2. Hình dạng của mũi kim và các tính chất của vật liệu

Các đặc trưng hình học của kim thử nghiệm được sử dụng được định nghĩa một cách rõ ràng trong các quy trình hướng dẫn thử nghiệm bên trên [1] và vì thế nó trở thành phổ biến ở châu Âu. Mặc dù các quy trình hướng dẫn đã gợi ý sử dụng loại thép đã được tôi với một độ cứng C Rockwell (Rockwell C Hardness - HRC) từ 54-56 và cường độ kháng kéo khoảng 2000 MPa, các mũi thép được sử dụng trong thí nghiệm có chất lượng khác nhau, được phân hạng với nhiều lí do khác nhau, chẳng hạn như lý do về độ khó tìm kiếm vật liệu [2] hoặc các kết quả thử nghiệm “tốt hơn” trong thử nghiệm các loại đá có độ mài mòn thấp [6]. Bất kỳ sự thay đổi nào trong tính chất cơ khí của các mũi (răng) thực nghiệm có thể tạo ra sự thay đổi đáng kể tới các giá trị CAI thu được. Hiện nay, không hề có các điều tra để so sánh các giá trị CAI thu được từ các thử nghiệm với các loại mũi thép với chất lượng vật liệu thép khác nhau vì thế các kết quả thử nghiệm không thể so sánh với các kết quả tiêu chuẩn. các tác giả [3][4][5] đề nghị một loại thép có tên 115CrV4, nó được tôi lên từ thép có độ cứng là 55 HRC. Cần phải hết sức lưu tâm đến việc mài nhọn lại các mũi thử nghiệm này. Nhiệt độ tăng lên khi chà xát qua nhanh và làm ảnh hưởng đến độ cứng của mũi và có thể do đó gây nên hiệu quả tác động ngược lại trong các giá trị CAI thu được khi sử dụng các mũi như thế.



Phía trái: Bộ dụng cụ thử nghiệm Cerchar: 1, 3 - bộ kẹp mẫu; 2 – tay đòn; 4 – mũi dùi (kim) thử; 5- khe trượt dùi; 6-trọng vật.
Phía phải: Bộ dụng cụ thử nghiệm West: 1-bộ kẹp mẫu; 2-tay xoay; 3-tấm trượt; 4-dũi thử; 5-khe trượt dũi; 6-trọng vật.

2.3. Các điều kiện về bề mặt và mẫu đá

Bằng việc tham khảo các quy trình hướng dẫn thử nghiệm Cerchar, các thử nghiệm phải được thực hiện trong các bề mặt bằng phẳng đã được tạo ra. Kinh nghiệm đã chỉ ra rằng trong nhiều các loại đá không đồng nhất (chẳng hạn như cuội kết, granit cỡ hạt thô hoặc các loại đá phiến), Việc phá vỡ các mẫu đá với một búa đập hay bất kỳ một thiết bị chia tách nào không thể đem lại một bề mặt điển hình cho thử nghiệm. Vì vậy, người ta sử dụng các phương pháp khác nhau: (a) các mẫu với bề mặt thô ráp, được tạo nên bởi việc chia tách bằng búa đập; (b) các mẫu với bề mặt nhẵn, được tạo nên bằng cách cắt bằng lưỡi

cắt kim cương làm mát bằng nước và (c) các mẫu với bề mặt “sơn” được tạo nên bằng cách sơn lên bề mặt đá một loại bột khoáng corundum cỡ hạt 100-140 μm .

Các kết quả đã chỉ ra rằng các giá trị CAI trên các mẫu đá với bề mặt thô ráp có một CAI cao hơn 0,5 so với các mẫu với bề mặt mịn (Công thức (1) hình 4). Phương pháp này chỉ ra sự thuận lợi để tạo nên sự thuận lợi tương đối và sự phân bố dữ liệu trơn tru, mà nó không phụ thuộc vào các đặc tính trầm tích của mẫu đá.. với các mẫu đá không đẳng hướng và không đồng nhất tạo ra các bề mặt mẫu không thuận lợi sau khi phá vỡ vì thế các tác giả đã đề nghị sử dụng lưới cưa kim cương cho định dạng bề mặt và hiệu chỉnh, bổ sung kết quả thử nghiệm bằng việc sử dụng Công thức (1).

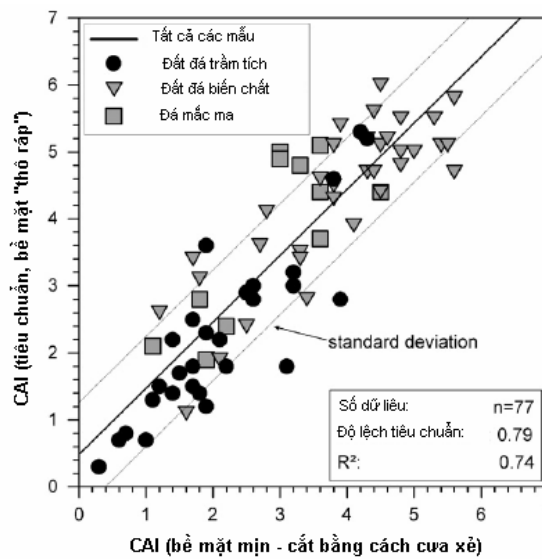
Công thức bổ sung cho chỉ số độ mài mòn Cerchar thu được trong các mẫu đá cưa là:

$$CAI = 0,99CAI_s + 0,48; \quad (1)$$

Trong đó:

CAI – Chỉ số độ mài mòn Cerchar (tiêu chuẩn, các bề mặt thô ráp)

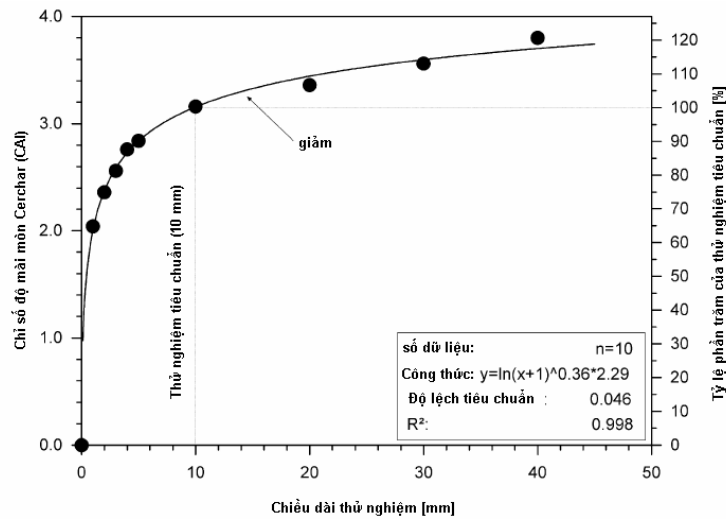
CAI_s – Chỉ số độ mài mòn Cerchar (các bề mặt nhẵn, mẫu được cắt bằng cưa kim cương)



Hình 4. Biểu đồ các giá trị CAI thu được trên cùng một loại đá qua các kiểu định dạng bề mặt khác nhau

2.4. Chiều dài thử nghiệm

Tuân theo quy trình hướng dẫn thử nghiệm [1], khoảng cách chà xát trên mẫu đá được định nghĩa là một khoảng 10 mm. Trong những giai đoạn đầu nghiên cứu của Đại học kỹ thuật Munich (TU Munich), chiều dài thử nghiệm được lấy lớn hơn và được thực hiện trên một bề mặt chà xát lớn hơn và vì thế việc xác định dễ dàng hơn để tìm ra giá trị CAI. Một loạt các thử nghiệm được thực hiện trên các mẫu đá giống nhau với chiều dài thử nghiệm khác nhau (hình 5) mà đã được xác thực lại bằng các sự quan sát của Al-Ameen và Wallter [6] Khoảng 70% lượng hao mòn dùi xảy ra ở những milimet đầu tiên của chiều dài thử nghiệm, khoảng 85% CAI thu được sau 2 mm, và 15% còn lại thu được ở 8 mm chiều dài thử nghiệm còn lại. Các sự phát hiện này cho thấy, chiều dài thử nghiệm sẽ được mở rộng tới 5-10 cm để thu được độ mài mòn để quan sát hơn trên dùi thử nghiệm. Dựa trên những kết quả này, sự làm dài khoảng cách chà xát phải được lưu tâm để sử dụng. Kết quả này cho ra một kết quả chủ động là sự sai lệch trong CAI thu được từ sự thay đổi chiều dài chà xát sẽ không đáng kể khi sự thay đổi chiều dài thử nghiệm được giữ trong khoảng $\pm 0,5\text{mm}$ chiều dài.



Hình 5. Biểu đồ thể hiện CAI đối với chiều dài thử nghiệm

2.5. Số lần thử nghiệm

CERCHAR [1] coi các thử nghiệm đơn lẻ là hiệu quả cho các mẫu đá nguyên khối và có cỡ hạt mịn và đề nghị năm hoặc nhiều hơn nữa chỉ cho các thử nghiệm với các kích cỡ lớn hơn 1 mm. Dựa trên kinh nghiệm thử nghiệm, các tác giả [3][4][5] đề nghị nên sử dụng năm thử nghiệm đơn lẻ cho mỗi mẫu đá để thu được giá trị trung gian rõ ràng hơn.

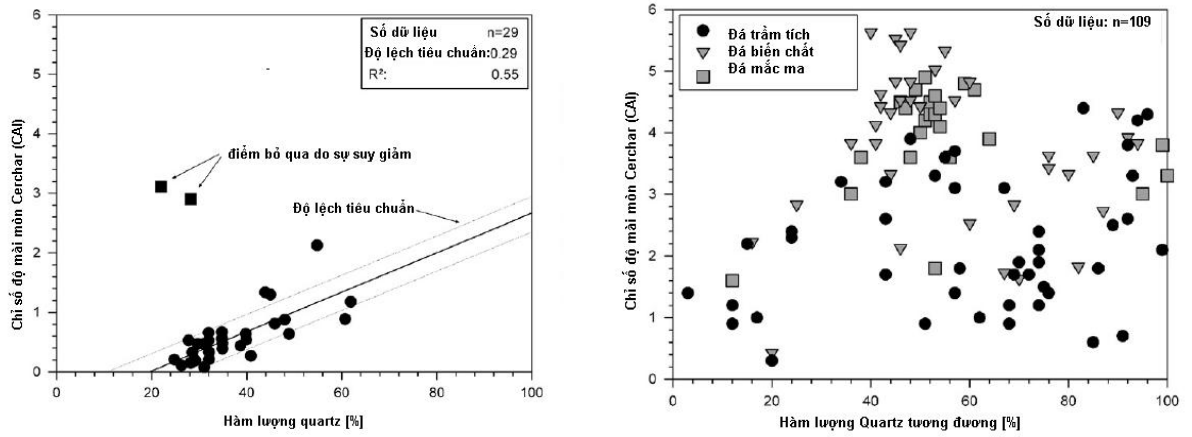
2.6. Xác định các kết quả thử nghiệm

Báo cáo gốc [1] đã giới thiệu một “phương pháp đọc kính hiển vi” về độ phóng to của độ mài mòn đầu dùi, mà nó đã không được mô tả chi tiết. Từ các kinh nghiệm thử nghiệm của họ, các tác giả đã đề nghị sử dụng kính hiển vi ánh sáng phản xạ và xác định độ hao mòn với độ phóng đại gấp 50 lần so với một đơn vị thực tế. Sai số của phương pháp này là vào khoảng 0,02 mm (= 0,2 CAI). Thông qua độ phóng đại gấp 50 lần không tạo ra sai số lớn, việc sử dụng ống kính bỏ túi với độ phóng đại vào khoảng 10 lần cũng không được khuyến khích dùng bởi lỗi đọc lên tới 0,1 mm (= 1 CAI).

Trong chương trình nghiên cứu tại Đại học Kỹ thuật Munich, sự mài mòn dùi thử nghiệm đã được tổng hợp. Điều này đã làm cải thiện đáng kể khi thử nghiệm các loại đá với kích cỡ không đồng nhất thô đến rất thô, nơi mà sự mài mòn có giá trị rất chênh lệch. Trong trường hợp như vậy, hai giá trị đo lường khác phải được thực hiện tại một góc nghiêng 90° và một giá trị cơ bản sẽ được sử dụng cho việc làm sáng tỏ hơn.

2.7. Sự ảnh hưởng của điều kiện địa chất đến CAI

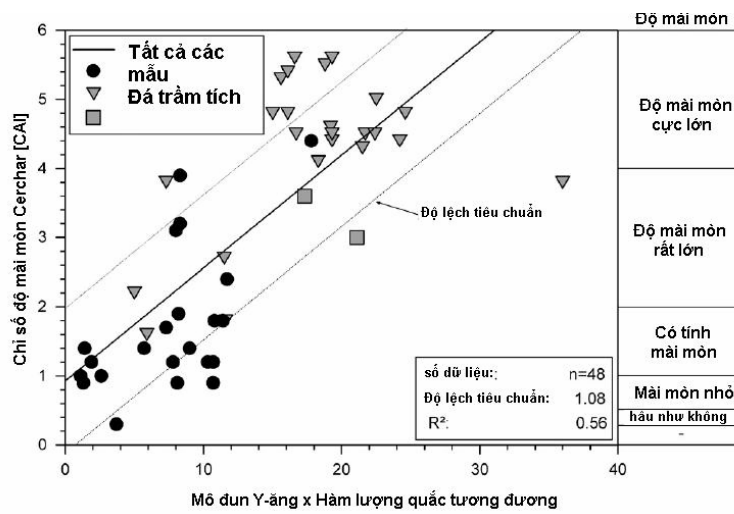
Trọng tâm nghiên cứu khác đã được đặt trong việc xác định số lượng các nhân tố địa chất ảnh hưởng đến các kết quả thử nghiệm. Vì thế, 109 các loại đất đá khác nhau với dải độ mài mòn (CAI = 0,3-5,6) được khảo sát sử dụng Thử nghiệm mài mòn Cerchar và vài quá trình thử nghiệm đá cứng “tiêu chuẩn” khác, chẳng hạn như thử nghiệm UCS, mô đun Y-ăng và cường độ kháng kéo của Brazil cũng như sự phân tích mặt cắt thạch học, phân tích cỡ hạt và các đại lượng đo lường mật độ khô của đá. So với West [2] người đã xác định rõ hàm lượng Quartz ảnh hưởng đến CAI, các kết quả ghi chép đã thể hiện trong hình 6 chỉ ra rằng chỉ Hàm lượng Quartz tương đương thì không thích hợp để làm sáng tỏ giá trị độ mài mòn của thử nghiệm chà xát Cerchar. Mỗi tương quan tương tự được đưa ra là giữa CAI và hàm lượng khoáng mài mòn được đưa ra bởi AL-Almeen và Waller [6] cũng không thể được thừa nhận.



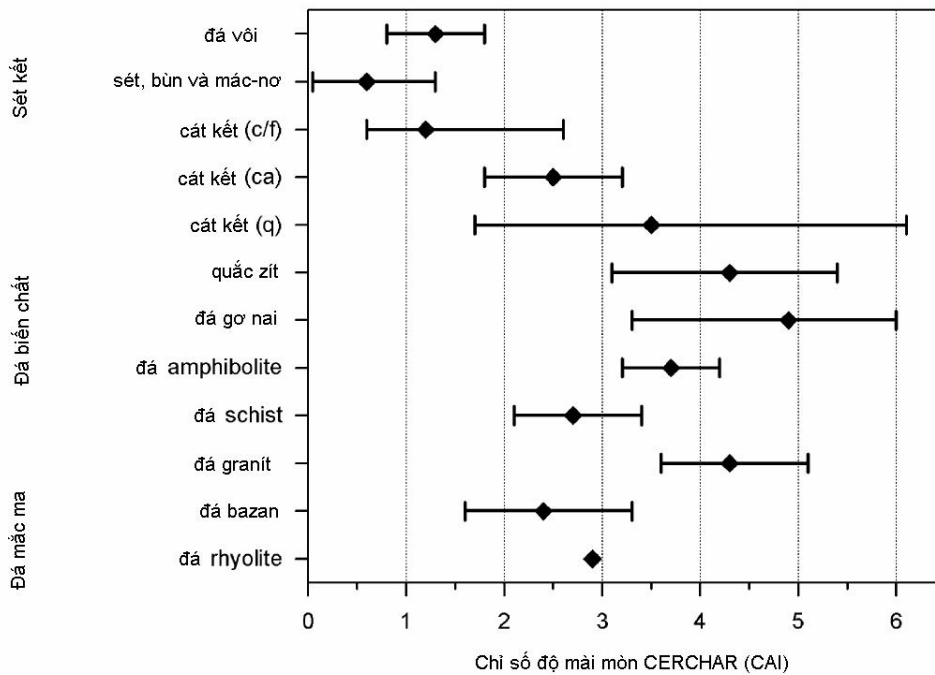
Hình 6. Chỉ số mài mòn CAI nghịch biến với hàm lượng Quartz tương đương

Hình trái là các kết quả của West [2]

Hình phải là các kết quả trong chương trình nghiên cứu của Đại học kỹ thuật Munich (TUM)



Hình 7. Chỉ số CAI nghịch biến với mô đun Y-ăng và hàm lượng Quartz tương đương



Hình 8. Tổng hợp các giá trị CAI đặc trưng cho các loại đá tuân theo [3, 4, 7].

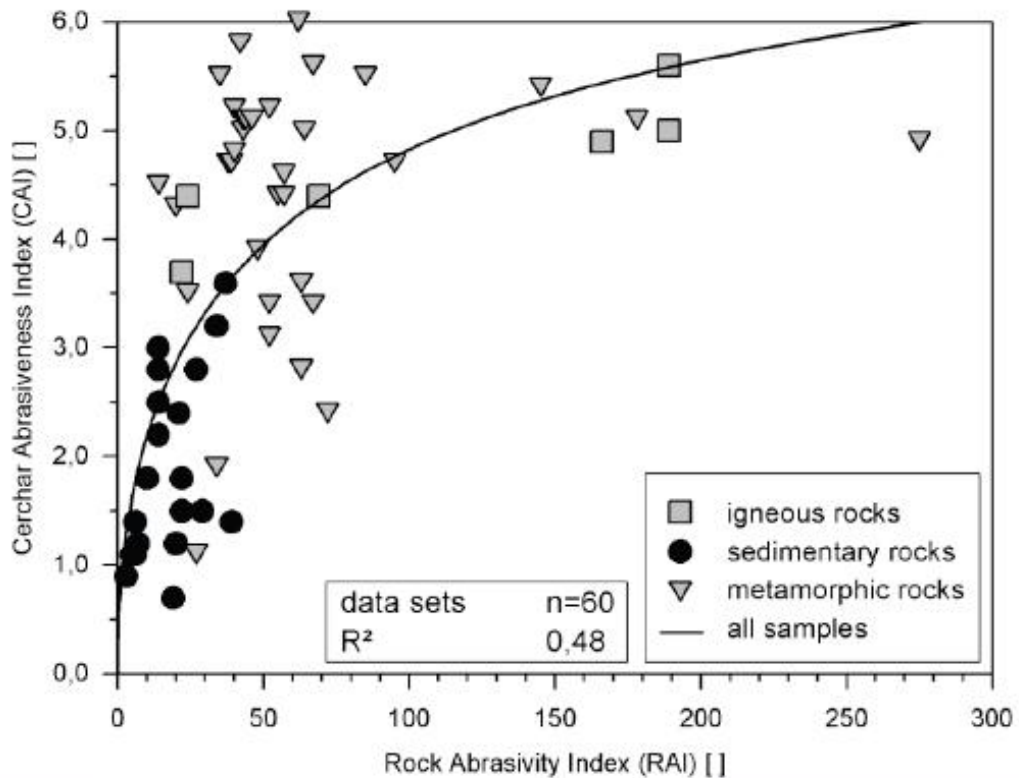
Chú giải: c/f – chất gắn kết sét/sắt, ca – chất gắn kết can xi, s – chất gắn kết si líc

Kết hợp tất cả các thông số của đá dẫn đến việc tìm được kết quả là mô đun Y-ăng và hàm lượng quartz tương đương của một mẫu đá là thích hợp nhất để làm sáng tỏ CAI bằng các thông số cơ học đá “cổ điển”. Mối liên hệ thuận lợi trong hình 7 làm gia tăng giả thuyết về độ mài mòn của đá sử dụng thử nghiệm mài mòn Cerchar ảnh hưởng chính bởi sự biến dạng của nó và hàm lượng các khoáng mài mòn. Hình 8 đưa ra một sự tổng hợp các giá trị CAI tiêu biểu cho các loại đá chính thu được từ chương trình nghiên cứu của các tác giả [3][4][5] tại Đại học Kỹ thuật Munich và bản giới thiệu dữ liệu bổ sung của Büchi và nnk. [7].

3. SỬ DỤNG CAI ĐỂ DỰ BÁO HAO MÒN MŨI, RĂNG CẮT

CAI được sử dụng chủ yếu trong điều tra và phân loại độ mài mòn đá cứng. Với mục đích như vậy một kế hoạch phân loại đã được vạch ra từ quy trình thử nghiệm của Cerchar (1986).

Một ứng dụng chủ yếu khác của CAI là để xác định tốc độ hao mòn công cụ trong quá trình khai đào đá cứng. Với nhiệm vụ này, các công thức cơ bản và các mối liên hệ đã được sử dụng. Một khó khăn gặp phải đó là những số liệu đó lại rất hiếm, từ việc sử dụng máy và các công cụ khác nhau trong khoảng rộng và nhiều các nghiên cứu tình huống chi tiết là tốn kém hơn trong về thời gian và chi phí. Hình 10 và hình 12 tóm tắt mức độ hiện hiểu biết hiện tại về tốc độ hao mòn công cụ được xác định dựa trên CAI hay kết hợp CAI và các thông số đất đá bổ sung khác như cường độ kháng nén không giới hạn của đá (UCS).



Hình 9. Chỉ số mài mòn CERCHAR (CAI) đối với Chỉ số Mài mòn Đá (RAI)

Chú thích:

CERCHAR ABRASIVENESS INDEX - Chỉ số mài mòn CERCHAR (CAI)

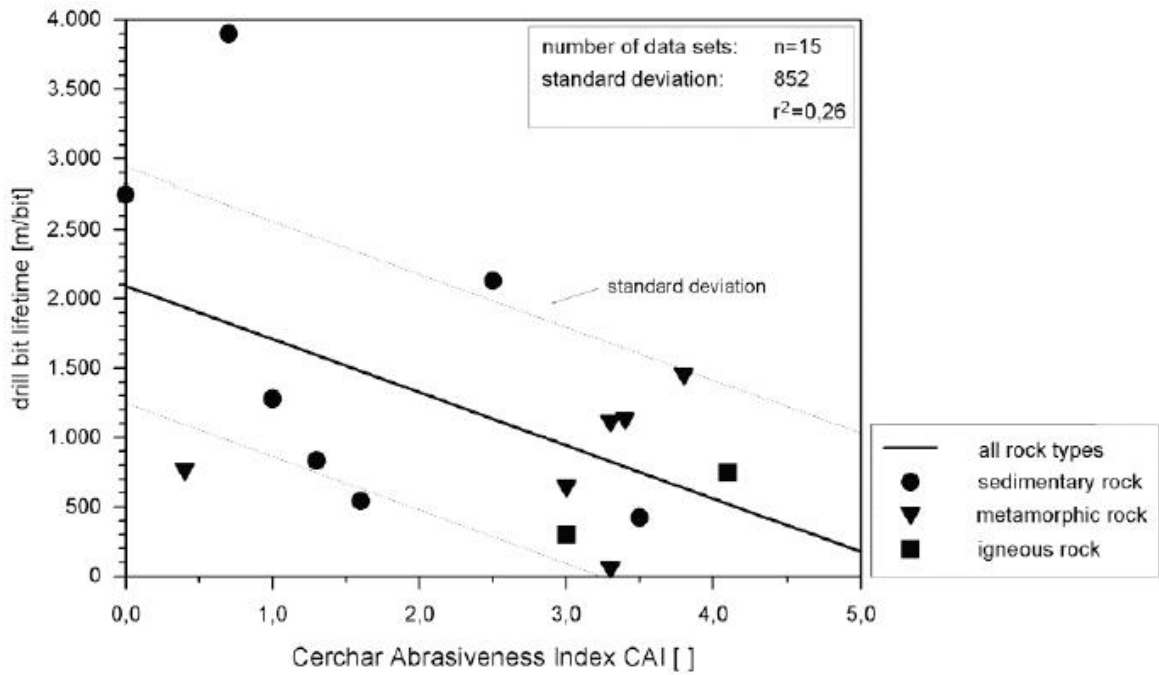
Data sets – điểm giá trị

igneous rocks – đá mắc ma

sedimentary rocks – đá trầm tích

metamorphic rocks – đá biến chất

all samples – tất cả các mẫu



Hình 10. Mối liên hệ tuổi thọ đầu mũi đỉnh 45 mm [m/răng] và CAI (Pinninger, Spaun và Thuro, 2002]

Chú thích:

CERCHAR ABRASIVENESS INDEX - Chỉ số mài mòn CERCHAR (CAI)

drill bit lifetime – tuổi thọ đầu mũi khoan

number of data sets – lượng điểm giá trị

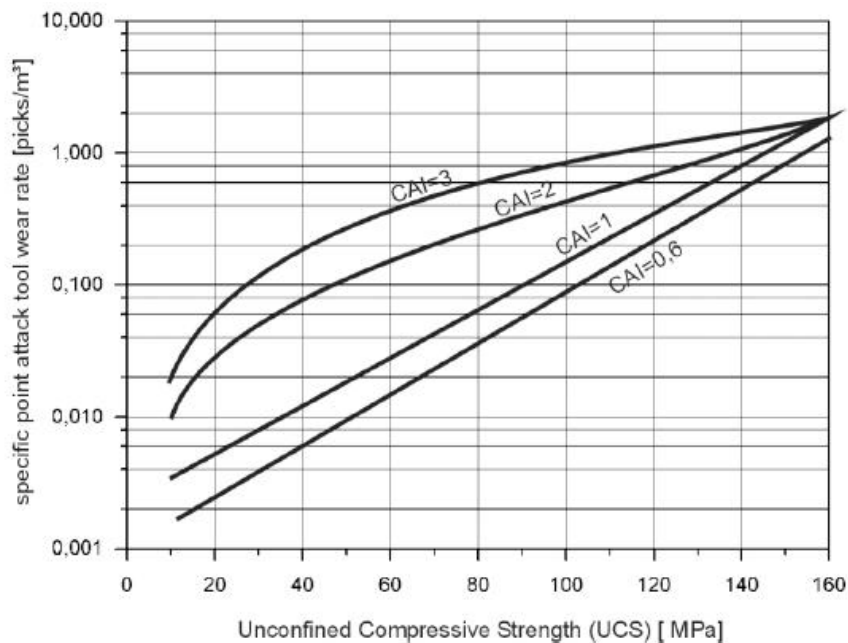
standard deviation – độ lệch tiêu chuẩn

igneous rocks – đá mắc ma

sedimentary rocks – đá trầm tích

metamorphic rocks – đá biến chất

all samples – tất cả các mẫu



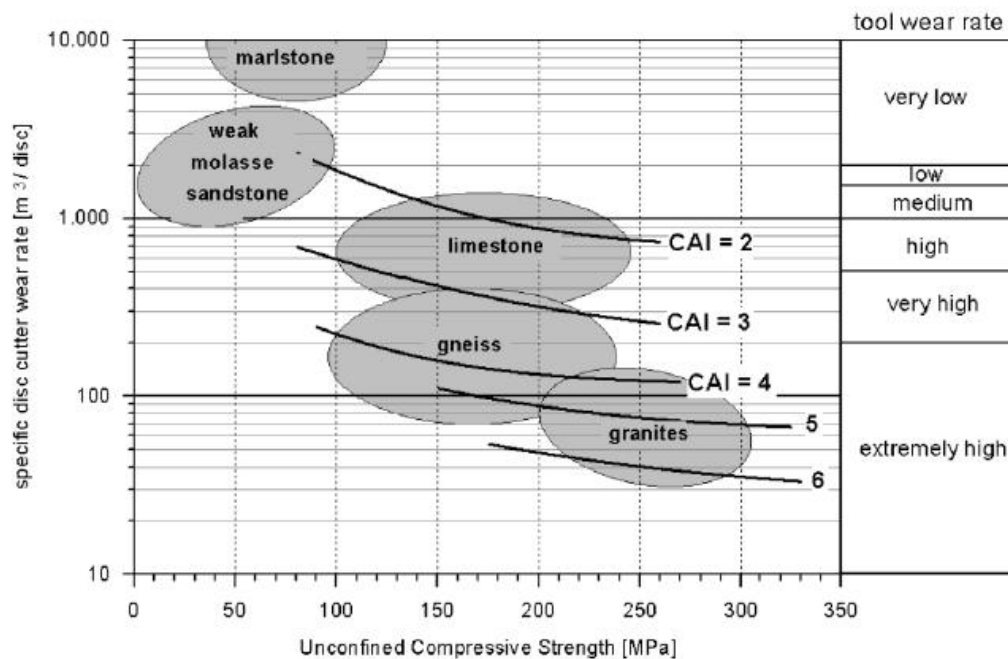
Hình 11. Mối liên hệ giữa tiêu hao răng cắt điểm và [răng/m³] và CAI (Voest Alpine)

Chú thích:

CERCHAR ABRASIVENESS INDEX - Chỉ số mài mòn CERCHAR (CAI)

specific point attack tool wear rate – tốc độ tiêu hao mòn răng điểm cắt cụ thể, răng/m³

unconfined compressive strength (UCS) – cường độ kháng nén không giới hạn, MPa



Hình 12. Mối liên hệ giữa tuổi thọ răng cắt đĩa của TBM [m³/đĩa], UCS và CAI trong các loại đá phổ biến (Maidl, Schid, Ritz & Herrenknecht, 2001)

Chú thích:

CERCHAR ABRASIVENESS INDEX - Chỉ số mài mòn CERCHAR (CAI)
 specific disc cutter wear rate – tốc độ hao mòn đĩa cắt cụ thể m³/đĩa
 unconfined compressive strength (UCS)- cường độ kháng nén không giới hạn, MPa
 tool wear rate – tốc độ hao mòn công cụ
 very low – rất thấp, low – thấp, medium – trung bình, high – cao, very high – rất cao, extremely high – cực cao
 marlstone – đá man xơ, weak molasse sandstone – cát kết molasse yếu, limestone – đá vôi, granites – đá granit.

4. KẾT LUẬN

Chương trình thử nghiệm được thực hiện đã cải thiện các nhân tố kỹ thuật và có một tác động hợp lý trong kết quả thử nghiệm của Thử nghiệm mài mòn CERCHAR. Việc sử dụng các dữ liệu thử nghiệm với các tính chất vật liệu được giới thiệu và xác định bằng kính hiển vi một cách cẩn trọng sự hao mòn của mũi cắt đã đóng góp phần quan trọng trong việc thu được các kết quả thử nghiệm có thể so sánh được. Việc dùng cửa kim cương để cắt bề mặt được nêu ra để khảo sát các loại đá không đồng nhất, khi làm vỡ một mẫu bề mặt của nó tạo nên có thể sẽ không thích hợp với việc thử nghiệm. Các kết quả thử nghiệm trong các bề mặt như thế có thể được so sánh với các giá trị CAI tiêu chuẩn được khảo sát từ sự phá vỡ bề mặt bằng cách dùng công thức kinh nghiệm bổ sung. Sự so sánh với các thông số đá tiêu chuẩn đem lại sự gia tăng giả thuyết rằng CAI ảnh hưởng chủ yếu tới sự biến dạng của đá và hàm lượng khoáng mài mòn của nó.

Thử nghiệm về mài mòn CERCHAR và Chỉ số Mài mòn Cerchar thu được là một trong những thông số địa kỹ thuật phổ biến nhất để mô tả và phân loại độ mài mòn của đá. Các chi tiết kỹ thuật của thử nghiệm CERCHAR đã được nghiên cứu một cách rộng rãi bởi các viện nghiên cứu trên toàn thế giới. Với một tóm tắt các dữ liệu đã được trình bày, các tác giả đã cho rằng Thử nghiệm Cerchar là một phương pháp thử nghiệm rất đơn giản, nhanh chóng để phân loại độ mài mòn của đá, tuổi thọ của đầu mũi khoan, tiêu thụ răng cắt tiếp xúc điểm hay các đĩa cắt dựa trên mối liên hệ có thể có.

Tuy nhiên, các sự so sánh giữa các quy trình dự báo mài mòn địa kỹ thuật khác nhau (ví dụ Deketh, 1995; Plinninger, 2002) đã chỉ ra các thử nghiệm mẫu đơn giản, như thử nghiệm CERCHAR có vài nhược điểm, chúng làm tăng giả thuyết rằng với các dự báo về mài mòn công cụ có nhiều thiết lập dữ liệu hơn thì cũng không làm tăng lên được độ chính xác hơn. Các chương trình nghiên cứu địa kỹ thuật bao gồm toàn bộ các dạng từ khoáng chất tới đất đá và các thông số của khối đá hứa hẹn một sự dự báo mang chính xác hơn. Các chỉ tiêu về địa kỹ thuật chẳng hạn như chỉ số mài mòn Schimazek, hàm lượng Quartz tương đương (EQC) hay chỉ số mài mòn của đá (RAI) được sử dụng trong chương trình nghiên cứu cũng có thể đưa ra làm sáng tỏ về những gì liên quan đến độ mài mòn của đá, hơn là một thử nghiệm mài mòn đơn giản.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] CERCHAR—Centre d' Etudes et Recherches de Charbonnages de France. The CERCHAR abrasiveness index, 12 S., Verneuil, 1986.
- [2] West G. Technical note—rock abrasiveness testing for tunnelling. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 1989;26(2):151–60.
- [3] Kasling H. Der CERCHAR-Abrasivitätstest: Aussagekraft und Verbesserungsmöglichkeiten eines Indextests zur Bestimmung der Gesteinsabrasivität (translated title: The Cerchar Scratch Test: Value and possibilities of improvement, 47 S. 28 Abb., 9 Tab., 9 Anl.). Diploma thesis TU Munich (unpublished), 2000.
- [4] Plinninger RJ. Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen ebergsl. osungsverfahren im Festgestein. Munchner Geologische Hefte, Reihe B—Angewandte Geologie, 17, 147 P., 909 Abb., 36 Abb, 2002.
- [5] Plinninger RJ, Spaun G, Thuro K. Prediction and Classification of tool wear in drill and blast tunnelling. In: Van Rooy JL, Jermy CA (Eds.), Engineering geology for developing countries. Proceedings of the Ninth IAEG Congress, Durban, South Africa. 2226–36.
- [6] Al-Ameen SI, Waller MD. The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. Eng. Geol. 1994;36:293–301.
- [7] Büchi E, Mathier JF, Wyss Ch. Gesteinsabrasivität—ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergesteinen. Tunnel 1995;5:38–43.