

วิธีการทำนายการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองของชายฝั่งทะเล Predictive approach for corrosion study of low alloy steel in a simulated coastal atmosphere

ธีร์ เชาวนนทปัญญา¹, ชัยวัฒน์ พีรทัตสุวรรณ²

Thee Chowwanonthapunya¹, Chaiyawat Peeratatsuwan²

Received: 7 April 2017 ; Accepted: 20 June 2017

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอแนวทางในการทำนายพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองของชายฝั่งทะเลโดยใช้ Linear bi-logarithmic law ในการทดลองนี้ใช้วิธีการศึกษาน้ำหนักของเหล็กกล้าผสมต่ำที่หายไปในช่วงการทดลอง เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้นสนิมของเหล็กกล้าผสมต่ำ โดยผลการศึกษาพบว่า จลนศาสตร์ของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำแบ่งเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ 1 อัตราการกัดกร่อนสูง และ ช่วงที่ 2 อัตราการกัดกร่อนลดลง โดยโครงสร้างสนิมทั้งสองช่วงนั้นต่างกัน โดยช่วงที่ 1 ชั้นสนิมบางและช่วงที่ 2 สนิมนั้นหนาและยึดเกาะกับผิวเหล็กได้ดี ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของการเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ของการกัดกร่อน ดังนั้นค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ของการกัดกร่อนในแต่ละช่วงเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับ Linear bi-logarithmic law สามารถใช้แสดงข้อมูลเชิงทำนายของพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำได้

คำสำคัญ : การทำนายการกัดกร่อน เหล็กกล้าผสมต่ำ จลนศาสตร์ของการกัดกร่อน สนิม

Abstract

This article presents a predictive approach to study the corrosion behaviors of low alloy steel in a simulated coastal environment using linear bi-logarithmic law. The corrosion mass loss was monitored to gain the transition of the corrosion kinetics and Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to observe rust morphologies. The results showed that the kinetics of corrosion process of steel can be divided into two stages i.e. a higher rate in the first stage and a lower rate in the second stage. Observations on rust morphologies revealed that the rust layer was thin and porous in the first corrosion stage, but it became thicker and more adherent on the surface in the second stage. This finding indicated the accuracy of kinetics transition of corrosion processes. Thus, the kinetics constant value from each corrosion stage can be used with the modified linear bi-logarithmic law to provide the predictive information of low alloy steel exposed to a simulated coastal environment.

Keywords: Predictive Approach, Low Alloy Steel, Corrosion Kinetics, Rust

¹ อาจารย์, คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดชลบุรี 20230

E-mail: thee.c@ku.th, (+66)38352606-7 ต่อ 2684

² อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา 30000,

E-mail: chaiyavat66@gmail.com, (+66)4423-3000 ต่อ 3350

¹ Instructor, Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University, Chonburi, 20230

E-mail: thee.c@ku.th, (+66)38352606-7 Ext. 2675

² Instructor, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima, 30000,

E-mail:chaiyavat66@gmail.com, (+66) 4423-3000 Ext. 3350

บทนำ

การกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำโดยบรรยากาศเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กกล้ากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียของเนื้อเหล็กและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการรับแรงของโครงสร้างเหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การกัดกร่อนภายใต้บรรยากาศชายฝั่ง¹ ดังนั้นการศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำเพื่อทำนายพฤติกรรมของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่ใช้ในบรรยากาศชายฝั่งจึงเป็นเรื่องที่สำคัญและได้รับการวิจัยอย่างแพร่หลายจากนักวิทยาศาสตร์การกัดกร่อนทั่วโลก โดยวิธีการทำนายการกัดกร่อนที่ใช้กันมากคือวิธีการในมาตรฐาน ISO 9223 และ ISO 9224 ซึ่งวิธีการดังกล่าวนั้นกำหนดให้ตัวแปรที่สำคัญต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำโดยบรรยากาศ คือปริมาณของซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไฮโดรเจนคลอไรด์ นอกจากนี้เวลาที่ผิวหน้าของเหล็กกล้าที่เปียก (Time of Wetness, TOW) ยังมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของ

เหล็กกล้าผสมต่ำ² ถึงแม้วิธีการทำนายการกัดกร่อนโดย ISO นั้นได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่วิธีการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่สูงและใช้คนเป็นจำนวนมากเพื่อเก็บข้อมูล และได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในวิธีการประเมินสูง เช่น ค่า TOW ของ มาตรฐาน ISO นั้นจะเริ่มต้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) 80% แต่ในความเป็นจริงผิวหน้าของเหล็กกล้าโดยเฉพาะเมื่อมีสนิมเคลือบจะเริ่มที่ 60 % RH³ ซึ่งข้อจำกัดดังกล่าว ทำให้การประเมินพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าโดยวิธีนี้คลาดเคลื่อนและเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาเหล็กกล้าผสมต่ำ⁴ อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Linear Bi-logarithmic law เข้ามาใช้ในการทำนายการกัดกร่อนของเหล็กกล้า เช่น Q. C. Zhang และคณะ⁵ ได้นำวิธีการดังกล่าวไปศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศชายฝั่งทะเล

โดยผลการทดลองที่ได้แสดงถึงความถูกต้องของการทำนาย ซึ่งทำให้ Linear Bi-logarithmic law ได้ถูกนำมาใช้มากขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ท่านอื่น เช่น ในงานวิจัยของ Long Hao และคณะ⁶ และ Ch.Thee และคณะ⁷ โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวนี้ได้ทำการทำนายพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศโดยรวมผลของการเกิดขึ้นสนิมของเหล็กกล้าเข้าไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศซึ่งโดยทั่วไปผิวหน้าของเหล็กกล้าจะถูกเคลือบด้วยชั้นสนิม⁸

จากจุดเด่นของวิธีทำนายดังกล่าว ในการศึกษาครั้งนี้จึงนำ Linear Bi-logarithmic law เข้ามาประยุกต์ใช้กับการทดสอบการกัดกร่อนในบรรยากาศจำลองของเหล็กกล้าผสม

ต่ำในบรรยากาศชายฝั่งทะเล โดยมีการจำลองสภาวะการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่เกิดขึ้นจริงในบรรยากาศชายฝั่ง เช่น การกัดกร่อนภายใต้สารละลายคลอไรด์ชั้นบางแบบเปียกสลับแห้ง และมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °C และ 60 ± 3 % RH เพื่อศึกษาจลนศาสตร์จากค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการกัดกร่อนและใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นสนิมบนพื้นผิวของเหล็กกล้าผสมต่ำและยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์จลนศาสตร์และประยุกต์ Linear bi-logarithmic law เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองเพื่อจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประเมินประสิทธิภาพของการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำ ซึ่งจะเป็นแนวทางต่อการพัฒนาการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศจำลองต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เหล็กกล้าผสมต่ำ โดยมีส่วนผสมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังนี้ : 0.15 C, 0.21 Cu, 0.14 Cr, 0.61 Mn, 0.25 Si, 0.02 P, 0.041 S และส่วนที่เหลือเป็น Fe โดยชิ้นงานมีขนาด 3 X 3 X 0.5 เซนติเมตร ทำการเตรียมผิวโดยการขัดจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 800 ก่อนทำการทดสอบการกัดกร่อนในสภาวะจำลองชายฝั่ง

การทดสอบในบรรยากาศจำลอง

สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนในสภาวะบรรยากาศจำลองของการทดลองนี้จะทำในตู้อบซึ่งจำลองสภาวะอากาศ อุณหภูมิที่ 30 ± 2 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 60 ± 3 % โดยสารละลายที่ใช้คือ สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.05 % โมล ทำการทดสอบต่อหนึ่งรอบการกัดกร่อนดังนี้ (1) ชั่งและบันทึกน้ำหนักชิ้นงานก่อนทำการทดสอบโดยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (2) จำลองการกัดกร่อนโดยฉีดสารละลายชั้นบางลงบนผิวหน้าชิ้นงาน (0.05 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร) (3) นำชิ้นงานทั้งหมดเข้าตู้อบและปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำมาล้างผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำกลั่น ทิ้งไว้ให้ชิ้นงานแห้ง จึงชั่งและบันทึกน้ำหนักของชิ้นงานหลังการทดสอบแล้วจึงทำการฉีดสารละลายชั้นบางลงบนผิวชิ้นงานอีกครั้งหนึ่ง (4) สำหรับชิ้นงานในรอบการกัดกร่อนอื่นๆ นั้นจะทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอน (2)-(4) โดยชิ้นงานในรอบที่ 10 , 20, 40 และ 60 จะถูกนำมาวิเคราะห์รูปร่างและโครงสร้างของสนิมโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FEI Quanta 250)

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดสอบการกัดกร่อนในบรรยากาศจำลองของชายฝั่งทะเล

จาก Figure 1 แสดงถึงการสูญเสียมวลของชิ้นงานเหล็กกล้าผสมต่ำในแต่ละรอบการทดสอบแบบเปียกแห้ง (Wet and dry Cycles) โดยพบว่า การสูญเสียความหนานั้นเพิ่มขึ้นเมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้น

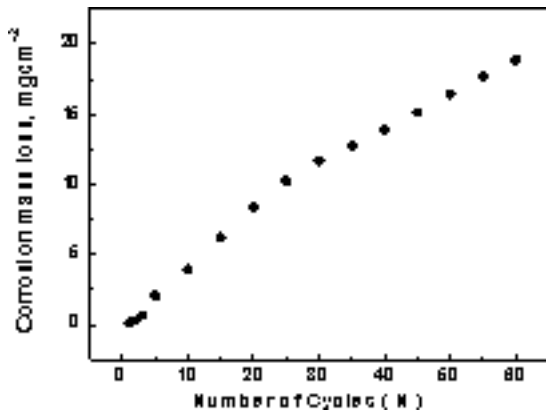


Figure 1 Corrosion Mass loss as a function of the number of wet and dry cycle

เราจะใช้กฎ Bi-logarithmic เพื่ออธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำ ดังสมการที่ 1⁸

$$W = AN^n \quad (1)$$

โดย W คือ มวลที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าผสมต่ำ A คือ ค่าคงที่ และ N คือ รอบของการเปียกแห้งที่ทดลอง ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์ สมการที่ 1 จะถูกตัดแปลงโดยใช้ Logarithm ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\log(W) = \log A + n \log(N) \quad (2)$$

โดย ค่า n ในสมการที่ 1 และ 2 นั้นแสดงถึงจลนศาสตร์ของกระบวนการกัดกร่อน กล่าวคือ เมื่อ n มากกว่า 1 แสดงถึงการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ n น้อยกว่า 1 แสดงถึงการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่มีอัตราการกัดกร่อนน้อยลง [9] เมื่อนำข้อมูลของมวลที่หายไปมาพล็อตในสเกล Log ตามสมการที่ 2 เราจะได้ข้อมูลที่แสดงใน Figure 2

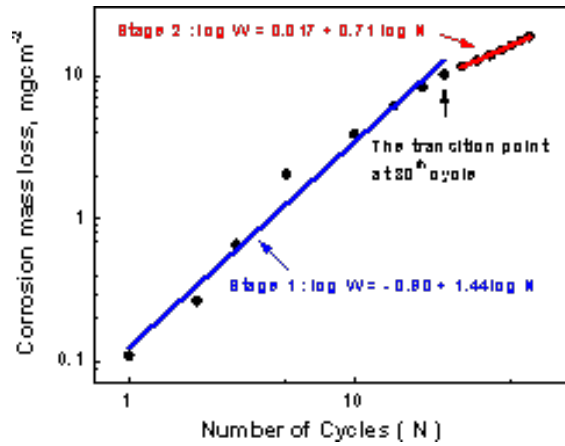


Figure 2 Corrosion kinetic estimation using Bi-logarithmic Law

จาก Figure 2 พบว่ากระบวนการกัดกร่อนจะแบ่งเป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

กระบวนการที่ 1 เมื่อรอบการทดลองน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 ($N \leq 30$)

$$\log(W) = -0.9 + 1.44 \log(N) \quad (3)$$

กระบวนการที่ 2 เมื่อรอบการทดลองนั้นมากกว่า 30 ($N > 30$)

$$\log(W) = 0.017 + 0.71 \log(N) \quad (4)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3 และ 4 พบว่า กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในช่วงแรกเกิดขึ้นที่จำนวนรอบการทดลองที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 โดยมีค่า n เท่ากับ 1.44 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 ดังนั้น การกัดกร่อนในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น และกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในช่วงที่ 2 เกิดที่จำนวนรอบที่มากกว่า 30 โดยค่า n มีค่าเท่ากับ 0.71 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นการกัดกร่อนลดลง

ลักษณะรูปร่างของชั้นสนิมจาก SEM

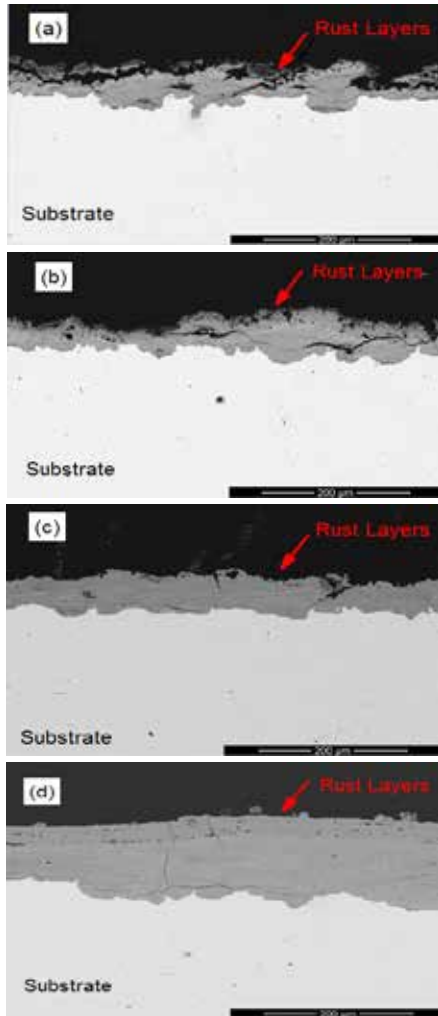


Figure 3 Cross sectional analysis of the rust layer on low alloy steel at (a) 10 Cycle (b) 20 Cycle (c) 40 cycle and (d) 60 cycle

Figure 3 แสดงภาพตัดขวางของชั้นสนิมที่เกิดขึ้นบนเหล็กกล้าผสมต่ำ โดยเมื่อพิจารณาโครงสร้างของสนิมจากภาพตัดขวางพบว่า โครงสร้างชั้นสนิมของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการกัดกร่อนในช่วงแรก เช่นในรอบที่ 10 และ 20 ซึ่งแสดงในรูป 2 (a) และ (b) ตามลำดับ นั้นจะเป็นชั้นสนิมที่บาง โครงสร้างยังไม่มีความหนาแน่น และ มีการกระจายตัวของรอยแยกในชั้นสนิม โดยโครงสร้างชั้นสนิมดังกล่าว ไม่สามารถต้านทานการแพร่ของ ออกซิเจน และ คลอไรด์ไอออนที่เข้าไปกัดกร่อนผิวได้¹⁰ ดังนั้นการกัดกร่อนจึงมีอัตราสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาโครงสร้างชั้นสนิมของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการกัดกร่อนที่สอง เช่น ในรอบที่ 40 และ 60 ซึ่งแสดงในรูป 2 (c) และ 2(d) ตามลำดับ พบว่าชั้นสนิมมีโครงสร้างที่

หนาแน่นขึ้น จำนวนรอยแยกลดลง และชั้นสนิมยึดกับผิวเหล็กได้มากขึ้น แสดงถึงการพัฒนาประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำจากบรรยากาศชายฝั่ง ซึ่งส่งผลให้การกัดกร่อนในช่วงที่ 2 ลดลง

การทำนายการกัดกร่อน

ผลการทดลองใน Figure 1 และ 2 แสดงถึงกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในสภาวะจำลองนั้นประกอบไปด้วย 2 กระบวนการ คือ ช่วงแรก อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น และช่วงที่สอง อัตราการกัดกร่อนลดลง โดยผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสนิมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ของการกัดกร่อน ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของจลนศาสตร์ที่ได้วิเคราะห์ไว้ในผลการทดสอบการกัดกร่อนในบรรยากาศจำลอง ดังนั้น เราจะสามารถหาอัตราการกัดกร่อนต่อรอบการทดลองดังต่อไปนี้

จากกฎ Bi-logarithmic¹¹

$$W = AN^n \tag{5}$$

$$dW / dN = AnN^{n-1} \tag{6}$$

โดย dW / dN คือ อัตราการกัดกร่อน (C) ดังนั้น

$$C = AnN^{n-1} \tag{7}$$

จากผลการทดลองใน Figure 1 และ 2 กระบวนการกัดกร่อนประกอบไปด้วย 2 ช่วง ดังนั้น สมการในการทำนายการกัดกร่อน คือ

1. อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น (N น้อยกว่าหรือเท่ากับ 30) ค่า $\log A = -0.9$ และ $n = 1.44$ ดังนั้น

$$C_1 = 10^{(-0.90)} \times 1.44 N^{0.44} \tag{8}$$

2. อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น (N มากกว่า 30) ค่า $\log A = 0.017$ และ $n = 0.71$ ดังนั้น

$$C_2 = 10^{(0.017)} \times 0.71 N^{-0.29} \tag{9}$$

เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับจำนวนรอบการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยกราฟดังกล่าวนี้ได้อามาจากค่า A และ n จากผลการ

วิเคราะห์จลนศาสตร์ซึ่งได้จากการทดสอบการกัดกร่อนในบรรยากาศจำลอง ดังนั้นกราฟดังกล่าวจึงแสดงถึงข้อมูลของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลอง ได้จากรอบที่ 1 จนถึง 65 ซึ่งสอดคล้องกับจลนศาสตร์และชั้นสนิมในแต่ละช่วงของกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองชายฝั่งทะเล

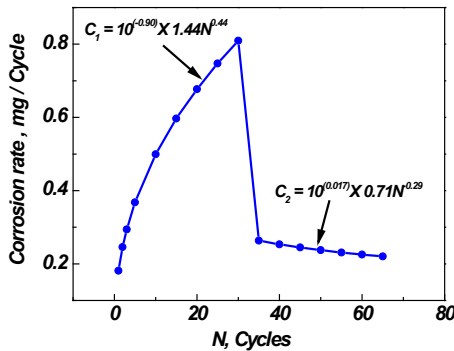


Figure 4 Estimated corrosion rate from the predictive approach

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศจำลองชายฝั่ง ข้อสรุปที่สำคัญแสดงดังต่อไปนี้

1. กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองแบ่งเป็น สองช่วง คือ ช่วงที่ 1 การกัดกร่อนสูงขึ้นและช่วงที่ 2 การกัดกร่อนลดลง
2. ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นสนิมสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ กล่าวคือ ในช่วงแรก ชั้นสนิมบาง และไม่ยึดเกาะผิวเหล็ก ลักษณะสนิมดังกล่าว ไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นและในช่วงที่สองชั้นสนิมหนาและยึดติดพื้นผิวได้ดี ลักษณะสนิมชนิดนี้ต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ไอออนได้ดี ดังนั้น การกัดกร่อนจึงลดลง
3. กฎ Bi-logarithmic สามารถนำมาใช้วิเคราะห์จลนศาสตร์ของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสภาวะจำลองได้ และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อสร้างสมการการทำนายการกัดกร่อนที่ครอบคลุมช่วงที่ทดสอบได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Prof.Dr. Dawei Zhang, University of Science and Technology Beijing, สำหรับความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ชิ้นทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

1. C. Leygraf, T.E. Graedel. Atmospheric corrosion. New York : John Wiley& Sons. Inc.; 2000.
2. T. Chowwanonthapunya (2016). Study on Anti-Atmospheric corrosion Performance of Steel in Coastal and Urban Atmosphere in Thailand, Journal of Materials Science and Applied Energy 2016 ; 5(3): 61- 65.
3. F. Corvo, T. Perez, L. R. Dzib, Y. Martin, A. Castañeda, E. Gonzalez, and J. Perez. Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres, Corrosion Science 2008 ; 50 (1) : 220–230.
4. J.H. Dong, E.H. Han, K. Wei. Introduction to atmospheric corrosion research in China, Science and Technology of Advanced Materials 2007; 8(78): 559-565.
5. Q.C. Zhang, J.S. Wu, J.J. Wang, W.L.Zheng, A.B. Li. Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere, Materials Chemistry and Physics 2002; 77(2): 603–608.
6. Long Hao, S.X. Zhang, J.H. Dong, W. Ke (2012). Evolution of atmospheric corrosion of MnCuP weathering steel in a simulated coastal-industrial atmosphere. Corrosion Science 2012; 59: 270–276.
7. Ch.Thee, L. Hao, J.H. Dong, X. Wie, X.F. Li, W. Ke. Atmospheric corrosion monitoring of a weathering under an electrolyte film in cyclic wet-dry condition, Corrosion Science 2014; 78:130-137.
8. M. Pourbaix.The Linear Bilogarithmic Law for Atmospheric Corrosion., in Atmospheric Corrosion. W.H. Ailor, Ed., New York: John Wiley& Sons. Inc.; 1982: 107-121.
9. Long Hao, S.X. Zhang, J.H. Dong, W. Ke. Atmospheric corrosion resistance of MnCuP weathering steel in simulated environments, Corrosion Science 2011; 53 : 4187-4192
10. Ch. Thee, Long Hao, Junhua Dong, Mu Xin, Wei Ke (2014). One numerical approach for atmospheric corrosion monitoring based on EIS of a weathering steel. Acta Metallurgica Sinica (English Letter), 2015, 28(2): 261-271.
11. W.J. Chen, Long Hao, Junhua Dong, Wei Ke. Effect of sulphur dioxide on the corrosion of a low alloy steel in simulated coastal industrial atmosphere, Corrosion Science 2014; 83: 155–163.