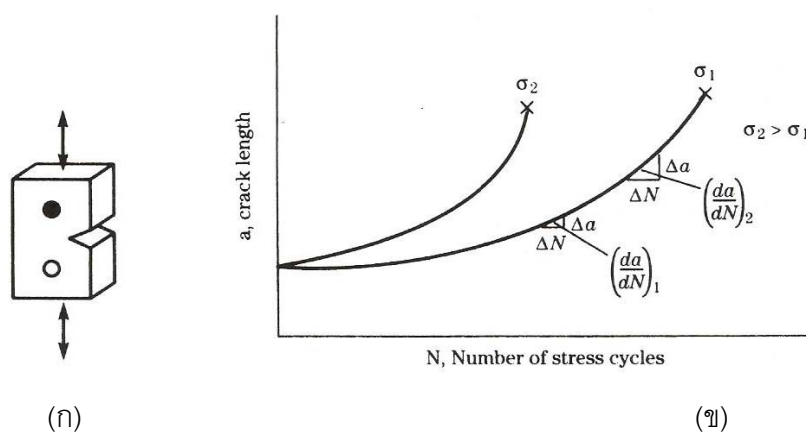


### 2.6.1 ความสัมพันธ์ของความถี่การร้าวจากความล้ากับความเค้นและความยาวของรอยร้าว

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุตัวอย่างหลายตัวอย่างด้วยกัน ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 2.10 ด้วยการจัดการทดลองตามภาพที่ 2.9 โดยใช้ขนาดของ cyclic stress คงที่แล้วทำการวัดรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น เทียบกับจำนวน stress cycle ที่ใช้ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งใช้ stress cycles 2 ระดับ จาก curve ภาพที่ 2.10 (ข) แสดงให้เห็นว่า

1. เมื่อความยาวของรอยร้วยังน้อยอยู่ อัตราการเพิ่มของการร้าว  $da/dN$  ก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย
  2. อัตราการเพิ่มของการแตกร้าว  $da/dN$  จะเพิ่มตามความยาวของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น
  3. ถ้า cyclic stress ( $\sigma$ ) เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มรอยร้าวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย
- นั่นคืออัตราการเพิ่มรอยร้าวของวัสดุภายใต้สภาวะ cyclic stress จะมีลักษณะตามภาพที่ 2.10 และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{da}{dN} \propto f(\sigma, a)$$



ภาพที่ 2.10

(ก) แสดงวัสดุตัวอย่างที่บางๆ ที่จะทดสอบซึ่งมี edge crack ภายใต้ cyclic stress

(ข) แสดงภาพของกราฟที่ได้จาก crack length vs. จำนวน stress cycles สำหรับ  $\sigma_1$  และ

$$\sigma_2 (\sigma_2 > \sigma_1)$$

ที่มา : Principles of Materials Science & Engineering – กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ที่อป/

แมคกรอ-ฮิล, 2549

ซึ่งอ่านได้ว่า fatigue crack growth rate  $da/dN$  ผันแปรตามฟังก์ชันของ cyclic stress ที่ใช้และความยาวของรอยร้าว  $a$  หลังจากที่ได้มีการทำวิจัยเป็นจำนวนมากจะพบว่าวัสดุเป็นจำนวนมากที่ fatigue crack growth rate เป็นฟังก์ชันกับ stress intensity factor,  $\Delta K$  (mode I) ซึ่งเป็นการรวมของความเค้น และความยาวของรอยร้าว สำหรับโลหะผสมทางวิศวกรรมหลายๆอย่างจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบ

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K^m$$

เมื่อ  $da/dN$  = fatigue crack growth rate , mm/cycle หรือ in/cycle  
 $\Delta K$  = stress intensity factor range  
 $= K_{\max} - K_{\min}$  มีหน่วยเป็น  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  หรือ  $\text{ksi}\cdot\text{m}^{1/2}$   
 $A, m$  = ค่าคงที่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับวัสดุ สิ่งแวดล้อม ความถี่ อุณหภูมิ

และ stress ratio

จากสมการข้างบนใช้ stress-intensity factor  $K_I$  (mode I) ไม่ใช่ fracture toughness value  $K_{IC}$  ดังนั้นที่ maximum cyclic stress

$$\text{Stress intensity factor} = K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a}$$

และที่ minimum cyclic stress

$$\begin{aligned} K_{\min} &= \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} \\ \Delta K(\text{range}) &= K_{\max} - K_{\min} = \Delta K \\ &= \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} - \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} = \sigma_{\text{range}} \sqrt{\pi a} \end{aligned}$$

โดยที่ stress intensity factor ไม่ได้กำหนดสำหรับ compressive stress ไปด้วย ถ้า  $\sigma_{\min}$  เป็น compression ต่ำ  $K_{\min}$  กำหนดให้เป็นศูนย์ ถ้ามีค่า  $y$ , geometric correction factor สำหรับ  $\Delta K = \sigma_r \sqrt{\pi a}$  ดังนั้นจะได้สมการเป็น

$$\Delta K = y \sigma_r \sqrt{\pi a}$$

## 2.6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fatigue crack growth rate กับค่า stress- intensity factor range

โดยทั่วไปเมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fatigue crack length vs. stress-intensity factor range data คือ เขียนกราฟของ  $\log da/dN$  vs.  $\log$  stress-intensity factor range  $\Delta K$  ในกรณีทั่วไป จะได้กราฟเส้นตรงหรือเกือบเป็นเส้นตรงแสดงว่า  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  ใกล้จะเป็น  $da/dN = A\Delta K^m$  เมื่อใส่  $\log$  ทั้งสองข้างจะได้เป็น

$$\begin{aligned}\log da/dN &= \log (A\Delta K^m) \\ \log da/dN &= m \log \Delta K + \log A\end{aligned}$$

ถ้าเขียนกราฟระหว่าง  $\log da/dN$  vs.  $m \log \Delta K$  จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งมีความชันเท่ากับ  $m$

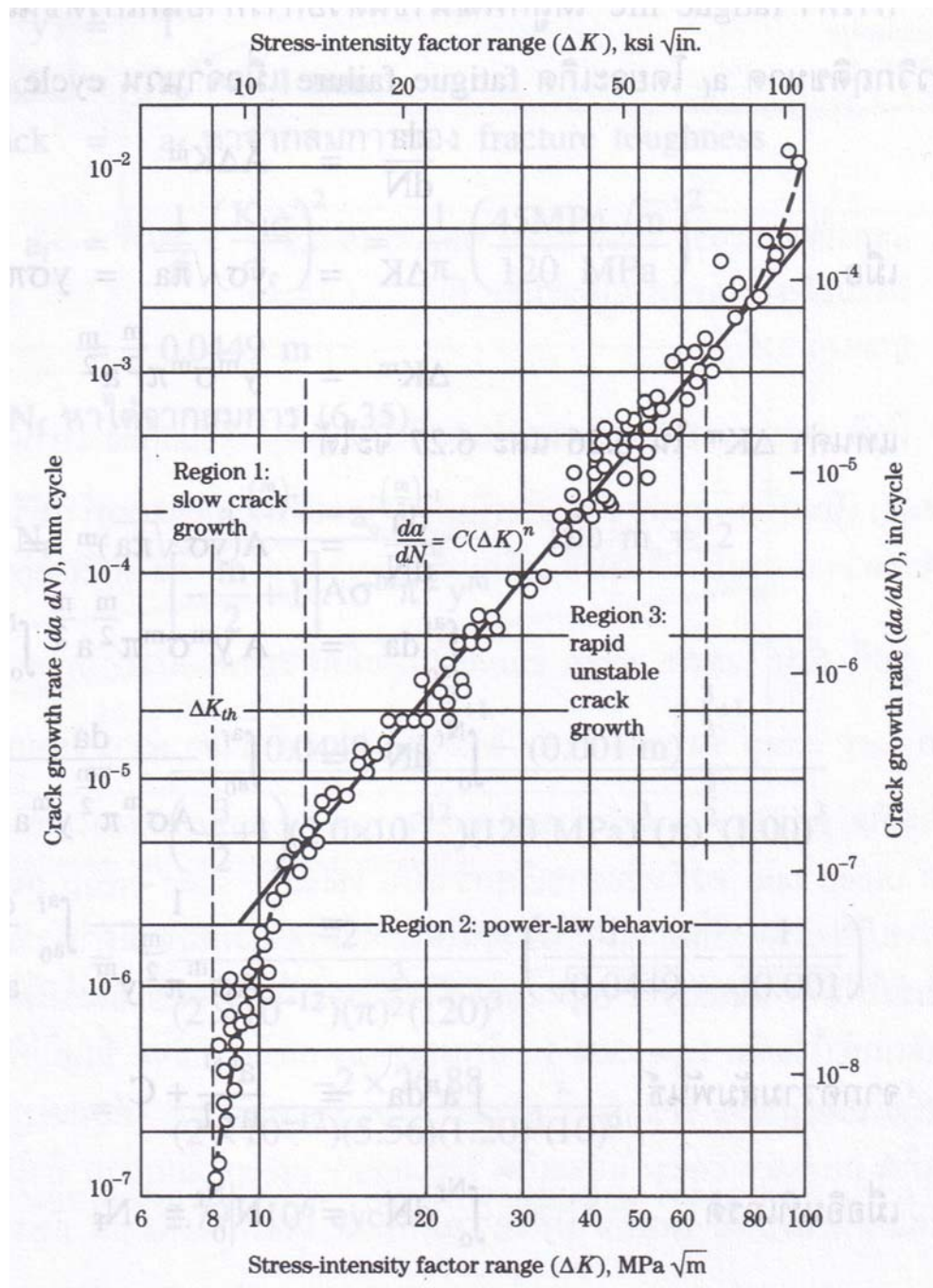
ภาพที่ 2.11 แสดงกราฟของ  $\log$  crack growth rate vs.  $\log$  stress-intensity factor range ของการทดสอบ fatigue ของเหล็กกล้า ASTM A533 B 1 กราฟนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ส่วนที่ I เป็น fatigue crack growth rate ที่เกิดขึ้นช้ามาก ส่วนที่ II จะได้กราฟเป็นเส้นตรงแสดง  $da/dN = A\Delta K^m$  และส่วนที่ III crack growth เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และใกล้จะแตกหัก ค่าจำกัดของ  $\Delta K$  โดยที่รอยแตกวัดไม่ได้เรียกว่า stress-intensity factor range threshold,  $\Delta K_{th}$

ถ้า stress-intensity factor range level นี้ต่ำกว่า  $\Delta K_{th}$  จะไม่มีรอยแตกเพิ่มขึ้น ถ้าค่า  $m$  สำหรับ fatigue crack growth  $da/dN$  ใน region II โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.5-6 บางครั้งในการออกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรม โดยใช้วัสดุที่เฉพาะจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับ fatigue life ของสิ่งนั้นด้วย ในหลายๆกรณีอาจใช้ข้อมูลรวม เช่น fatigue crack growth กับ fracture toughness เพื่อนำไปสร้างสมการที่ใช้ในการหาหรือทำนาย fatigue life

การหา fatigue life ได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยการอินทิเกรตชั้นสมการ  $da/dN = A\Delta K^m$  จากระยะเริ่มต้นถึงระยะวิกฤตขนาด  $a_f$  โดยจะเกิด fatigue failure เมื่อจำนวน cycle เป็น  $N_f$  นั่นคือ

$$N_f = \frac{a_f^{-\left(\frac{m}{2}\right)+1} - a_0^{-\left(\frac{m}{2}\right)+1}}{A\sigma^m \pi^{\frac{m}{2}} y^m \left[-\frac{m}{2} + 1\right]} \quad ; \text{เมื่อ } m \neq 2$$

จากสมการข้างต้นสมมุติว่า  $m \neq 2$  และ  $y$  ไม่ขึ้นกับความยาวของรอยร้าว ซึ่งไม่ใช่ในกรณีทั่วไป ดังนั้นสมการนี้อาจเป็นค่าจริงหรือไม่จริงของ fatigue life ก็ได้ สำหรับกรณีทั่วไป  $y = f(a)$  การคำนวณค่า  $N_f$  จะต้องคำนวณจากความยาวน้อยๆ อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.11

แสดงลักษณะของ Fatigue crack growth ของเหล็กกล้า ASTM A533 B1 (Yield strength 470 MPa) Test condition  $R = 0.1$  room temp  $24^{\circ}\text{C}$

ที่มา : P.C. Paris et al Stress Analysis and Growth of cracks, STP 513 ASTM, Philadelphia, 1972, p. 141-176

### 2.6.3 Crack closure (การปิดรอยร้าว)

Crack closure คือปรากฏการณ์เมื่อพื้นผิวเสียหายของรอยร้าวล้าเคลื่อนที่มาสัมผัสกันในขณะที่ unloading โดยที่ในวัสดุหลายชนิดสามารถเกิด crack closure ขึ้นเมื่อ load มีค่ามากกว่า load ที่ต่ำที่สุดในวัฏจักรนั้นๆ ซึ่งมีหลากหลายกลไกที่ถูกเสนอเพื่ออธิบาย เช่น (a) plasticity-induced crack closure, (b) oxide-induced crack closure, (c) roughness-induced crack closure, (d) fluid-induced crack closure, (e) transformation-induced crack closure และอื่นๆ [14]

โดยที่นิยามของ effective stress intensity factor range,  $\Delta K_{eff}$  คือ

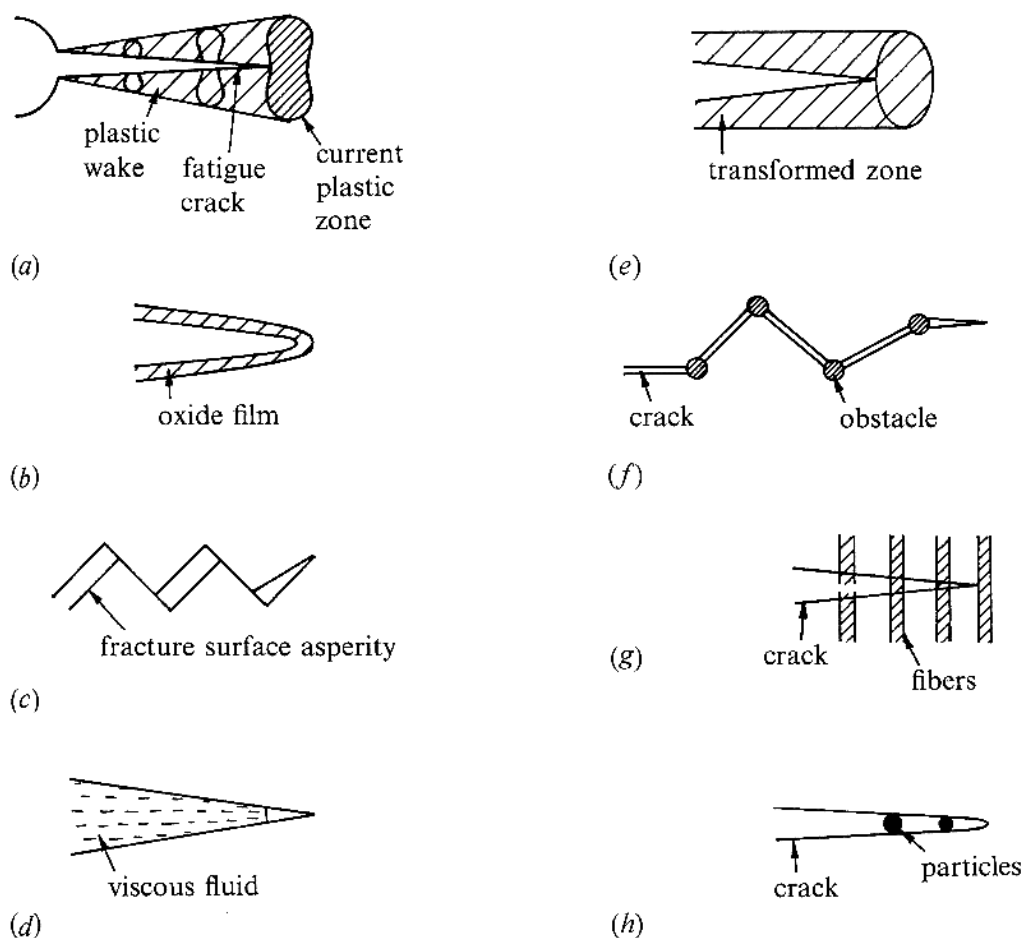
$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl} = U \times \Delta K$$

โดยที่;  $K_{max}$  คือ stress intensity factor ที่คำนวณจาก maximum load และ  $K_{cl}$  คือค่า stress intensity ที่ maximum load ที่รอยร่วมนั้นปิด (closure load,  $P_{cl}$ )  $U$  คือ effective stress intensity range ratio หรือ crack closure ratio ซึ่ง  $U$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$U = \Delta K_{eff} / \Delta K$$

สมการข้างต้นนี้อธิบายได้ว่า มีเพียง load range ระหว่าง closure load และ maximum load เท่านั้นที่มีผลกระทบต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตก

โดยจากการใช้ stain gauge ที่ทำการติดตั้งขึ้นงานเพื่อตรวจสอบ crack closure load ซึ่ง compliance technique (เส้นโค้งแสดงความชันของ stain ต่อ load) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อตัดสิน closure load ดังแสดงในรูปที่ 2.12



ภาพที่ 2.12

แสดงภาพภาพกลไกที่หนึ่งทำให้เกิดการขยายตัวรอยร้าวล้าช้าลงในสภาวะที่ให้ constant amplitude fatigue (a) Plasticity-induced crack closure, (b) oxide-induced crack closure, (c) roughness-induced crack closure, (d) fluid-induced crack closure, (e) transformation-induced crack closure, (f) crack deflection, (g) crack-bridging by fibers, (h) crack-bridging by particles

ที่มา : S. Suresh. Fatigue of Materials (Second Edition). Cambridge University Press, (1998) p.485

## 2.6 วรรณกรรมปริทัศน์

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Yasuo Kobayashi และคณะ [Toshinori Shibusawa, Keisuke Ishikawa, 1997] ได้ทำการศึกษาถึงการขยายตัวของรอยร้าวล้าของโลหะแมกนีเซียมในหลายสภาวะ พบว่าการมีอยู่ของออกซิเจนส่งผลให้เกิดฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวเสียหายใหม่ปรากฏขึ้นในขณะที่มีการให้ภาระเป็นลักษณะวงรอบ ซึ่งนำไปสู่การขยายตัวของรอยร้าวล้าที่แตกต่างกันไปขึ้นกับสภาวะแวดล้อม โดยที่การทดสอบความล้าในสภาวะแห้งและเปียกของอาร์กอนมีผลเช่นเดียวกับที่ทดสอบในอากาศ โดยเฉพาะพบว่าอัตราการขยายตัวของรอยร้าวจะถูกเพิ่มสูงขึ้นในสภาวะเปียก ซึ่งในสภาวะเปียกน่าจะจำกัดรูปแบบการมีอยู่ของฟิล์มออกไซด์ในแบบ hard film และนำไปสู่การสนับสนุนให้เกิดปรากฏการณ์ hydrogen embrittlement

- Z.Y. Nan และคณะ [S. Ishihara, T. Goshima, 2007] ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมความล้าเนื่องจากการกัดกร่อนของ extruded magnesium alloy AZ31 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า Corrosion fatigue life มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับในสภาวะที่มีการควบคุมอากาศในห้องปฏิบัติการ ซึ่ง Corrosion fatigue life ที่ถูกประเมินทางปริมาณโดยการแบ่งกระบวนการ ความล้าเนื่องจากการกัดกร่อนเป็น 2 ระยะคือ (1) ช่วงระยะก่อนการเติบโต corrosion pit ก่อนการเกิด crack จาก pit และ (2) ระยะการเติบโต crack ก่อนที่ชิ้นงานจะเสียหาย พบว่าเกือบทั้งหมดของ Corrosion fatigue lives (70-80%) ที่ stress amplitude ต่ำๆจะถูกครอบครองโดยช่วงระยะเวลาของการเติบโตของ corrosion pit

- Zainuddin Bin Sajuri และคณะ [Yukio Miyashita, Yasunobu Hosokai, Yoshiharu Mutoh, 2006] ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมความล้าของ as-cast และ extruded AZ61 magnesium alloy ในอากาศ (20°C–55%RH) พบว่าขนาดและการกระจายตัวของ cast defect มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการต้านทานแรงดึง และความล้าของ as-cast alloy ซึ่ง fatigue limit ของ as-cast alloy มีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ extruded alloy โดยที่ casting defects จะเป็นบริเวณที่ส่งเสริมการเกิดรอยร้าวล้าเช่นเดียวกับ stress concentration site และพบว่าชิ้นงานทั้งหมดเสียหายจาก inclusion ที่ใกล้กับผิวชิ้นงาน

ผลกระทบของ texture ต่อความล้าและพฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวล้าของ extruded AZ61 magnesium alloy plate ทั้ง 3 ชนิด (longitudinal, transverse และ 45° directions) พบว่า fatigue strength แบบ longitudinal direction มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับ transverse และ 45° directions โดยที่ผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญของทิศทางของชิ้นงานจาก

กระบวนการ extrude ต่อพฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวล้าถูกพบในบริเวณใกล้ threshold region ทั้ง short และ long cracks

อย่างไรก็ตามหากไม่มีการคำนึงถึงทิศทางของชิ้นงานจากกระบวนการ extrude พบว่า  $da/dN-\Delta K_{eff}$  curves ของชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดของ extruded AZ61 magnesium alloy plate (longitude, transverse และ  $45^\circ$  directions) มีลักษณะแคบ ซึ่งคาดได้ว่าความแตกต่างของ fatigue life ของชิ้นงานที่มีทิศทางจากกระบวนการ extrude ที่ต่างกันน่าจะเป็นส่วนสำคัญนำไปสู่ความแตกต่างของพฤติกรรมการ crack closure

- Zainuddin Bin Sajuri [Doctoral Dissertation, 2005] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความถี่ที่มีต่อ พฤติกรรมความล้าของ extrude magnesium alloy ณ สภาวะ  $50^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 80% พบว่ามีพฤติกรรมการความล้าที่แตกต่างกันอยู่ 2 กรณีที่สามารถระบุได้ คือ time dependent behavior at stresses below the fatigue limit และ cyclic dependent behavior at stresses above the fatigue limit โดยที่ fatigue crack growth behavior ที่ความถี่ 1 Hz ภายใต้สภาวะ  $50^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 80% พิสูจน์ได้ว่ามีค่า threshold stress intensity factor และ fatigue crack growth resistance สูงกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับที่ความถี่ 10 Hz

ในส่วนการศึกษา Fatigue crack growth test ภายใต้สภาวะแวดล้อม 2 สภาวะ คือ สภาวะ  $20^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ  $50^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 80% พบว่าในสภาวะความชื้นสูงของอากาศ (high humid air) ไม่มีอิทธิพลต่อ fatigue crack growth behavior ของ magnesium alloy