1 1 5 微小円孔を有する電着金属薄膜による平均応力検出法 (疲労き裂の進展速度を利用した測定法)

Measurement of Mean Stress Using Electrodeposited Metal Foil with a Microcircular Hole (Method by Fatigue Crack Propagation)

正 北岡 征一郎 (鳥取大) 正 小野 勇一 (鳥取大)
○ 学 池上 洋一 (鳥取大) 学 田中 赴夫 (鳥取大)

Seiichiro KITAOKA, Yuichi ONO, Yoichi IKEGAMI, Yukio TANAKA,
Tottori university, Koyamacho Minami 4-101, Tottori

Key Words : Experimental Stress Analysis, Fatigue, Crack Propagation rate,
Mean Stress, Metal Electroplating Method, Microcircular Hole

1. 緒言

微小円孔を有する電着金属薄膜による平均応力検出法⁽¹⁾は、繰返し負荷を受ける要素表面に微小な円孔を有する電着金属薄膜を接着し、繰返し負荷により円孔縁から発生する疲労き裂の進展速度を計測することで、平均応力を検出することが可能となる。今まで、金属薄膜として銅薄膜を用い、平面曲げに対して平均応力を求めるための構成式が確立できた。しかしながら、一般に要素には二軸応力が作用するため、本手法を二軸応力状態となる要素にまで拡張し、適用の可否を検討した。さらに、ニッケル薄膜について同様の試験を実施し、二軸応力状態となる要素に作用する平均応力を求めるための構成式を得た。

2. 実験方法

2・1 試験片および試験機 金属薄膜を接着する試験片素材には、A7075 アルミニウム合金を使用した。図1に試験片の形状・寸法を、表1に機械的性質を示す。また、薄膜は電着により作製し、厚さは銅薄膜で30 μ m、ニッケル薄膜で20 μ mである。次いで、円孔をマイクロボール盤により作製した。円孔間隔は1mmで千鳥格子状に配列した。また、円孔直径は銅薄膜で0.2mm、ニッケル薄膜で0.1mmとした。

Fig.1 Geometry of dimensions of test specimen

Table 1 Material properties of A7075Al alloy

Poisson's ratio	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Proof stress (MPa)
0.33	78.6	590	531

試験機には、PWO型疲労試験機(25Hz)、シェンク式疲労試験機(60Hz)を使用し、き裂長さの測定には、光学顕微鏡(OLYMPUS)と精密投影機(神港精機)を使用した。

2.2 実験方法

2・2・1 銅薄膜 試験片中央部に約10個の円孔を有する銅薄膜を接着し、二軸応力比 $C(=\sigma_2/\sigma_1)=-0.52, -1$ において、第一主応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m を種々に設定し、PWO型疲労試験機を用いて試験を実施した。円孔縁より発生した疲労き裂を光学顕微鏡(100倍)で写真撮影し、これを精密投影機により10倍に拡大してき裂長さを測定した。また、き裂長さ $2a$ は、円孔の直径を含む全体の長さとした。

2・2・2 ニッケル薄膜 ニッケル薄膜は銅薄膜に比較して静的強度が高く、疲労き裂が発生しにくい。そこで、シェンク式疲労試験機を用いて、予めき裂長さの半長 a が0.1~0.5mmとなる疲労き裂を作製し、 $C=0, -0.52, -1$ において、銅薄膜と同様の試験を実施した。このとき、予めき裂が第一主応力の方向と直交するように薄膜を試験片に接着した。き裂長さの測定にはレプリカ法を採用し、レプリカに転写された疲労き裂を光学顕微鏡(200倍)に備え付けたミクロスケールを用いて測定した。図2に円孔縁より発生した疲労き裂の顕微鏡写真を示す。

Fig.2 Appearance of crack propagation (Nickel)

3. 実験結果および考察

3・1 き裂長さとの繰返し数の関係 図3にき裂長さの半長 a と繰返し数 N の関係の一例を示す。図3から両者の関係は線形関係となり、本実験すべての条件に対して、同様の関係が認められた。

Fig.3 Relationship between a and N

3-2 き裂進展速度と応力比の関係 図3において得られるき裂進展速度 da/dN の平均値を各応力条件について求め応力比 $R (= \sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ を用いて整理すると各薄膜について図4(a),(b)となる。なお、図中の曲線は後述の方法により求めたものである。ニッケル薄膜においては、 R の増加とともに da/dN の増加が認められる。また、 R が一定であれば、 σ_a の増加とともに da/dN も増加することがわかる。一方、銅薄膜では、その差は認められない。これは多軸応力下では、材料の降伏点が低下するため、薄膜全体に降伏が生じたことによるものと考えられる。したがって、多軸応力下にある要素の平均応力を検出するには、ニッケル薄膜を用いる必要がある。

また、ニッケル薄膜では、 C の如何に関わらず、 da/dN と R の関係はほぼ同一となる。これは、疲労き裂の進展を支配するのはき裂に垂直な第一主応力振幅であり、き裂に平行な第二主応力振幅が進展に及ぼす影響は軽微であることを示唆している。

Fig.4 Relationship between da/dN and R

3-3 き裂進展速度を利用した平均応力の検出 R の相違による da/dN の差異が認められたニッケル薄膜に対し、図4の関係を最大応力で整理すると図5となる。ここでは、図4で各 C において得られた da/dN の平均値を用いた。

Fig.5 Relationship between da/dN and $\sigma_{\max}$

図5から各 σ_a において、 $\sigma_{\max}$ と da/dN は線形関係にある。 da/dN は $\sigma_{\max}$ と σ_a の関数であると考えられるから、図5の勾配は、 $\partial(da/dN)/\partial\sigma_{\max}$ で表される。この勾配と σ_a の関係は図6となる。両者は線形関係であるので次式が成立する。

$$\frac{\partial(da/dN)}{\partial\sigma_{\max}} = A\sigma_a + B \quad \dots\dots(1)$$

ここで A, B は定数であり、その値を表2に示す。これより、

$$da/dN = (A\sigma_a + B)(\sigma_{\max} + F(\sigma_a)) \quad \dots\dots(2)$$

ここで $F(\sigma_a)$ は σ_a のみの関数である。各応力条件に対し、式(2)より $F(\sigma_a)$ を求め、 σ_a で整理すると、両者は線形関係にあることが認められたので、次式とおける。

$$F(\sigma_a) = C\sigma_a + D \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 C, D は定数であり、その値は表2に示す。したがって、式(3)を式(2)に代入し、

$$\sigma_{\max} = \frac{2\sigma_a}{1-R} \quad \dots\dots(4)$$

の関係を用いると、

$$da/dN = (A\sigma_a + B) \left(\frac{2\sigma_a}{1-R} + C\sigma_a + D \right) \quad \dots\dots(5)$$

これは、図4(b)の曲線となり、実験値と良好な一致を示す。したがって、 $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ を用いて、平均応力 σ_m を求めるための構成式は、

$$\sigma_m = \frac{da/dN}{A\sigma_a + B} - (1+C)\sigma_a - D \quad \dots\dots(6)$$

と表せる。ここで、 σ_a はこれまでの方法⁽²⁾により測定可能であるから、円孔縁より発生する疲労き裂のき裂進展速度 da/dN を計測すれば、平均応力の測定が可能となる。

Fig.6 Relationship between da/dN and $\sigma_{\max}$

Tabele 2 Coefficients A, B, C , and D

A	B	C	D
2.90×10^{-13}	-1.32×10^{-11}	2.17	-296.71

4. 結言

微小円孔を有する電着ニッケル薄膜を用い、円孔縁から発生するき裂の進展速度を測定すれば、二軸応力状態となる要素に作用する平均応力を求めることが可能となる。

参考文献

- (1) 北岡・小野，機講論，025-1(2002)，137-138
- (2) 北岡・宇田・矢田，機論，66-647，A(2002)，1398-1403