

横波超音波を用いた金属疲労非破壊評価技術の開発

加工技術課 山岸英樹* プロジェクト推進担当 富田正吾**

1. 緒言

H.17年度より横波超音波(SV波およびSH波)を用い、簡便で実用に資するための金属疲労損傷度非破壊評価技術の開発に取り組んでいる。これまでのアルミニウム合金における単軸引張疲労試験結果から、反射法であるSV波の内部摩擦増加が主に転位の増殖に関連し、また透過法であるSH波の減衰率増減が主に残留応力の変動を示しているものと理解されている^[1,2]。これらはそれぞれ金属疲労における横波超音波の音粘弾性および音弾性効果と考えることができる^[3]。

本報では、本評価技術の実用化のため重要となるこれらの効果について、先に取得されている音波の疲労に対する挙動^[1]を材料評価により検討した。

2. 実験方法

SEMによる疲労破面観察のほか、XRD($\sin^2\psi$ 法)により疲労に伴う残留応力の測定を行った。また、疲労を与える前の受入れ材(圧延)において、万能試験機を用い、応力付加下におけるSH波減衰率の関係を取得した。

3. 実験結果および考察

供試材は超ジュラルミン(A2024T3)であり、溶体化処理の後冷間加工を行い、更に自然時効されたものである。本材の疲労試験におけるSV波の内部摩擦は、疲労度が0.5を超えた辺りから急激に増加する傾向を示す^[1]。

Fig. 1は、疲労破面の起点近傍SEM像である。結晶粒

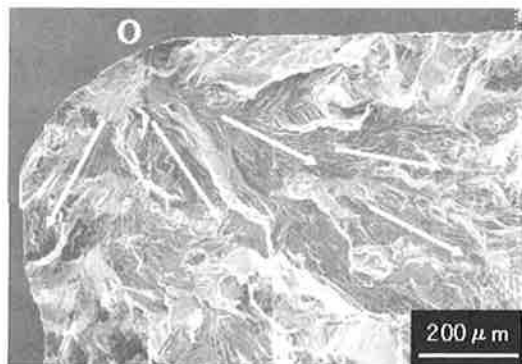


Fig. 1. SEM image of crack initiation site. Arrows indicate the directions of fracture propagation.

内では明瞭な疲労破面を示すが、粒界付近では脆性破面となっていることが分かる。本材では、疲労初期段階において、時効により生じた析出物が転位の急激な増殖機構作用を強く抑制していると考えられ、SV波による内部摩擦の結果は、この疲労過程を良く感知していたものと理解できる。

超音波は歪の伝播のため、材料内部の応力状態によりそのエネルギーフローがシフトする。SH波のエネルギーフラックスモデルを考えた場合、材料内部の残留応力とSH波の伝播時間 T_I および減衰率 $\ln(A_1/A_2)$ にはFig. 2に示すような相関が期待される^[3]。引張側へ応力場が移行すると、音波エネルギーはより表層側へシフトし、音圧 A_2 が A_1 に対し相対的に大きくなる。結果、伝播時間お

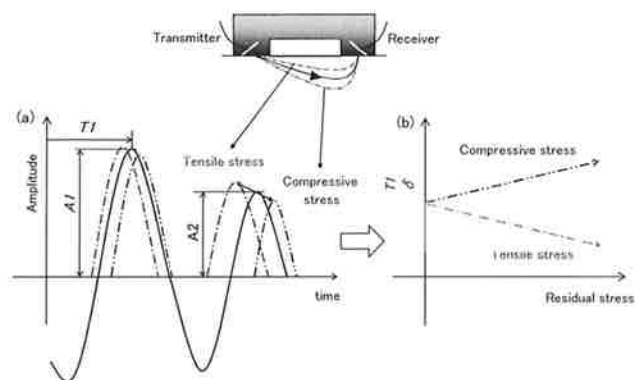


Fig. 2. Effects of the acoustoelasticity affecting a receiving waveform (a) and two stress dominating lines evaluating a relation between propagation time T_I or logarithmic damping δ and residual stress (b).

よび減衰率は減少する。圧縮の場合はその逆となる。

本材の疲労試験におけるSH波の減衰率は、疲労度の増加にともない、減少傾向を示す^[1]。このことから、上述の音弾性効果を考慮すると、本実験の疲労モードでは、疲労の蓄積に伴い、残留応力が引張り側に増加することが示唆される。

Fig. 3は、同じ疲労負荷条件において、XRDにより測定された各疲労度における残留応力である。これより、音弾性効果に基づき推定されたとおり、本疲労負荷条件では、残留応力が疲労度の増加に伴い引張り側へ単調に増加していくことが確認できる。またその増加量は破損

*現 プロジェクト推進担当

**現 企画情報課

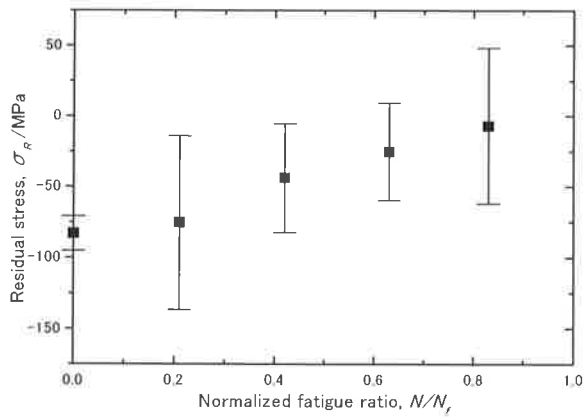


Fig. 3. Variation of the residual stress with the normalized fatigue ratio N/N_f . Confidence limit is 68.3%.

までに 76 MPa 程度であることが分かる。

Fig. 4 に、万能試験機により受け入れ材に付加した応力と SH 波の減衰率に対する関係を、疲労評価データ^[1]とともに示す。なお、いずれも減衰率は、受け入れ材の状態を 1.0 として規格化したものである。応力付加下試験では、付加応力の増加とともにその減衰率は減少しており、前述の音弾性効果を確認できる。また、疲労破壊直前(疲労度 0.98)における疲労材の減衰率(約 0.48)から、この残留応力の相当付加応力は約 63 MPa と推定される。これは XRD による残留応力測定結果(約 76 MPa) とほぼ同等な結果となった。つまり、SH 波の減衰率変化量より、疲労過程における残留応力値の変化量を推定することが可能であることを示す。

なお、伝播時間 T_l は音弾性効果に強く影響を受け、その挙動は減衰率と良く同期するが、転位の増殖機構が活発化する疲労度 0.5 以上では、転位による音速低下の影響を顕著に受けていることが理解できる^[1]。このことから、疲労過程における残留応力の評価は伝播時間よりも減衰率が適していると言える。逆に言えば、転位の増殖は伝播時間と減衰率の変化率に乖離を生じさせると

キーワード：金属疲労、非破壊検査、横波超音波、アルミニウム合金、粘弾性、音弾性

Development of Nondestructive Testing Technique Using Ultrasonic Shear Waves

Processing Technology Section; Hideki YAMAGISHI^{**}, Project Promoter; Shogo TOMIDA^{**}

Cyclic-tension fatigue of aluminum alloy, Al-4Cu-1Mg, has been determined by usage of SV wave reflection and SH wave transmission methods. Internal friction measured by SV method begins to increase rapidly from normalized fatigue ratio of about 0.5, showing dominating interaction of movable dislocations with the waves, as viscoelastic effect. Logarithmic damping ratio and propagation time in SH method decrease with increase of the fatigue degree due to acoustoelastic effect. According to SH wave flux model that SH wave energy shifts to specimen surface under crystal-lattice distortion by tensile load, the cyclic-tension induced residual-stress shift which correlates to the decreases in the damping ratio and the propagation time.

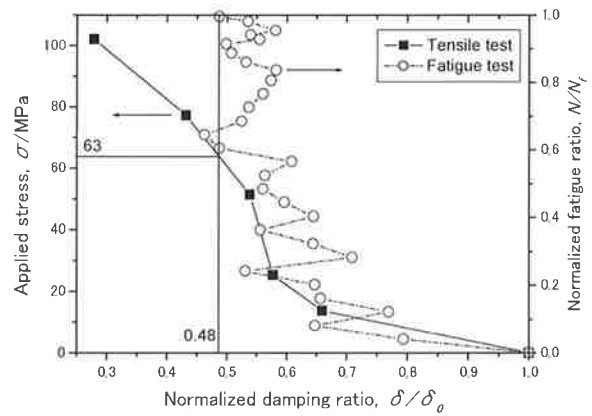


Fig. 4. Variations of the applied stress or the normalized fatigue ratio with the normalized damping ratio δ/δ_0 .

考えることができ、この点に着目すれば、SV 波を用いずとも、転位の増殖が活発化するクリティカルポイントおよび転位の蓄積を検知することが可能になると考えられる。また、SH 波は透過法のため、肉厚が大きくとも検査に問題はなく、より実用に向くと考えられる。

4. 結言

横波超音波の金属疲労における音粘弾性および音弾性効果を、異なるモードの音波挙動相互理解により検討したほか、材料評価によっても検証した。これより、SV 波は転位の増殖を、また SH 波は残留応力および転位の増殖と良い相互作用を示していることが分かった。

「参考文献」

- [1] 山岸：富山県工業技術センター研究報告、21 (2007) pp. 34-35.
- [2] H. Yamagishi and M. Fukuhara: Mater. Trans., **48** (2007) 550-555.
- [3] H. Yamagishi and M. Fukuhara: Proc. 4th Int. Conf. on NDT in Progress, (EF NDT, Prague, 2007) pp. 233-242.