317

Ni 系ろう材を用いた拡散接合体の破壊と疲労特性

(株)コベルコ科研	ΤĒ	○横幕	俊典	(株)神戸製鋼所	武田 裕之
(株)神戸製鋼所		池田	正一	㈱神戸製鋼所	仲山 善裕

1. はじめに

拡散接合は溶融溶接に比べて熱変形が少ないた め、寸法精度の高い機械部材の接合方法として期 待されている。しかし接合に伴う靭性低下と界面 欠陥の発生が問題になる場合があり、これらの防 止対策と、仮に欠陥が存在してもこれを設計上で 考慮する損傷許容設計概念の確立が必要となる。 そこで本研究では 13Cr-4Ni 鋼を母材とする Ni 系 ろう材を用いた拡散接合体を対象に混合モード下 の静的破壊基準と、疲労き裂伝ぱ特性を調査し、 欠陥を考慮した設計許容応力を決定した。

2. 解析および実験

2.1 接合体の界面き裂に対する応力拡大係数の解析

Fig. 1 に示す片側き裂材(母材のヤング率: $E_1 = 206$ GPa,接合層のヤング率 $E_2 = 167$ GPa,ポアソン 比: $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ 、接合部厚さ 40 μ m)に軸力が作 用する時の応力拡大係数 $K_1 \ge K_1$ を FEM 解析と結 城ら方法 ¹¹により求め、後述の破壊靭性の計算に 適用した。接合界面に半円き裂を有する平板の応 力拡大係数についても同様の手法で求め、欠陥付 き平面曲げ疲労試験片の Kの計算に適用した。



Fig.1 応力拡大係数解析および破壊靭性用試験片

2.2 破壊靭性および疲労試験

(1) 供試材料および試験片

母材を 13Cr-4Ni 鋼とし、Ni 系ろう材 MBF-20 (Ni-7Cr-4.5Si-3Fe-3.2B)をインサート材として真空 炉中で 1175℃×30 分間加熱することにより拡散接 合処理を行い、その後 550℃×4 時間の焼戻しを行 った。接合層厚さはほぼ 40µm となった。

この接合体から破壊靭性試験片(Fig. 1)、平面曲 げ疲労試験片(幅 20mm,厚さ 4mm)及び CT 試験 片(幅 50mm,厚さ 12.7mm)を採取した。平面曲 げ試験片では平滑材と接合界面微小欠陥材を用い た。平面曲げ、CT 試験片では接合角を 0°とした。 (2) 破壊靭性試験

Fig. 1の片側き裂材を用い静引張試験を行い、後述のように最大荷重点における応力拡大係数 Kmm

を破壊靭性値と定義した。

(3) 疲労および疲労き裂伝ば試験

シェンク式平面曲げ疲労試験機により平滑材と 微小欠陥材の S-N 特性を求めた。微小欠陥材では レプリカ法によりき裂長さ計測を行った。

CT 試験片を用いた巨視き裂伝ば試験では応力比 一定試験(R=0.05)と、K_{max}一定で応力比を漸増 する 2 種類の試験を油圧サーボ試験機により実施 した。なお CT 試験片に対する応力拡大係数は、 片側き裂材の接合体と均質体に対する解の比が適 用できると仮定して均質体の解から求めた。

3. 結果および考察

3.1 接合体の応力拡大係数

Fig. 2 に片側き裂を有する接合体の応力拡大係数 $F_{l} = K_{l} / \sigma \sqrt{(\pi a)}, F_{ll} = K_{ll} / \sigma \sqrt{(\pi a)}$ (1)

の接合角(θ) 依存性を示す。接合体では同じ接 合角において均質体より K_i が小さく、逆に K_{II} が 大きい。特に $\theta = 60^\circ$ で K_i 成分は非常に小さくな っており、混合モード下では接合体においてモー ド II 成分の寄与が大きいことがわかる。

3.2 接合体の混合モード下の限界破壊基準

本接合体は弾塑性破壊したため ASTM-E399 で 定める Ke は有効な破壊靭性値とならなかった。し かし $\theta=0^{\circ}$ の試験片において最大荷重点における K_{l,max} が板厚及びき裂長さにほとんど依存しなかっ たため、これを破壊靭性値と考えることができる。

θ=0°,45°及び60°の試験片の破壊靭性をFig. 3の*K*_{1, max}-*K*_{11, max}線図に示した。これより本接合体の静的破壊基準として池田らの結果²と同様

 $\sqrt{\{K_{l,max}^2 + K_{ll,max}^2\}} = 51.2$ (2) がほぼ成立し、接合体の界面き裂破壊基準がエネ ルギー解放率で支配されていることが示された。

3.3 接合体の疲労および疲労き裂伝ば特性

(1) 疲労特性

Fig. 4 に平滑及び微小欠陥材(欠陥半径 a=0.5mm) の S-N 線図を示す。比較のため 13Cr-4Ni 鋼 DEPO 及び HAZ の結果も示した。平滑接合体の疲労強度 は溶接部の約 60%である。しかし溶接ままの突合 せ継手の疲労強度は余盛除去継手の 60%程度であ る っこと、又溶接部においては不溶着部等の粗大 欠陥が避けられない場合があり更に疲労強度が低 くなり得ることから、本接合体は従来の溶接継手 に劣らない疲労特性を有していると考えられる。

半径 0.5mm の表面欠陥材は平滑材の約 1/2 の疲労強度になっている。拡散接合体においては微視的な欠陥が存在し得るため任意の欠陥寸法に対する疲労強度推定が必要となる。

(2) 疲労き裂伝ば特性

Fig. 5 に巨視き裂及び微視き裂伝ば特性を示す。 拡散接合体においても均質体と同様に明確にき裂 伝ば下限界値が存在した。応力比Rに関しては、

 $\Delta K^* = \{ 1/(1-R) \}^{r} \cdot \Delta K, (r = 0.7)$ (3) で与えた等価応力拡大係数を用いれば影響を消去 することができた。また任意の R におけるき裂伝 ぱ下限値 $\Delta K_{th, R}$ は R=0 におけるそれを用いて次式 で与えることができた。

 $\Delta K_{ih,R} = (1-R)^{r} \cdot \Delta K_{ih,R=0}$ (4) a=0.5mm 程度の微小欠陥に対する ΔK_{ih} (10⁷回疲 労強度から計算)についても巨視き裂に対する(4) 式によりほぼ近似できることがわかった。

3.4 接合体の不安定破壊と疲労に対する許容応力

モードI負荷に対する上記 $K_{l,max}$ と ΔK_{th} を用いて、 接合界面に半円状欠陥を有する半無限体の不安定 破壊と疲労破壊に対する許容応力をFig. 6(北川ダ イヤグラム)に示した。なお実験値は半無限体の 等価欠陥寸法に変換し、又平滑材における欠陥寸 法は 40 μ m(接合部厚さ)としてプロットした。本 図から疲労に対しては a_0 =0.2mm 前後の欠陥、不安 定破壊に対しては a_0 =3mm 前後の欠陥については 微小欠陥として取り扱う必要があることが分かる。 これらの微小欠陥に対して Haddad⁴⁾や Tanaka⁵⁾の手 法を適用して許容応力を評価できると考えられる。



Fig.2 接合体の応力拡大係数の角度依存性



Fig.3 混合モード下の限界破壊条件

4. 結言

- 引裂き及びせん断混合モード下の静的界面破壊 基準として√(K_{1,max}² + K_{11,max}²) = const.が成立する。
- (2) 疲労破壊については平滑材の疲労限と巨視き裂 下限界特性を用いた北川ダイヤグラムで評価できる。

参考文献

- 1)結城、曹:機械学会論文集(A編),55,(1989)340
- 2)池田他: 機械学会論文集(A編), 58, (1992) 2080
- 3)日本鋼構造協会編:鋼構造物の疲労設計指針・ 同解説、技報堂出版, (1993)
- 4) El Haddad et al., Eng. Fract. Mech. 11, (1979) 573

5) K. Tanaka et al., Int. J. Fract., 17, (1981) 519

