The Society of Materials Science, Japan

204 超音波散乱理論を用いた水素侵食によるメタンボイドの絶対評価

非破壊検査株式会社　安全工学研究所　　今中　拓一，末次　純

○向井　一弘，吉村　剛

1．緒言

高度経済成長期からほぼ３０年を経過しようとする今日、当時建設され、今尚稼働している巨大設備、機器の安全性に対する懸念が高まりつつある。これらの機器においては、材料損傷は確実に累積しており、これに伴い余寿命予測の必要性、信頼性の向上に対する要求も強くなってきている。

これら材料の経年劣化を非破壊的に評価するには、材料の力学特性を支配している個々の組織因子の変化を非破壊的に検出するのが直接的で望ましい。

本報では、劣化現象として、水素侵食の問題を取り上げ、組織因子である結晶粒とボイドを、超音波散乱理論により評価する方法について検討する。

2．水素侵食

石油、石化プラントの装置は、高温、高水素圧力下で操業されており、このような条件に曝された炭素鋼や低合金鋼には、様々な劣化現象が生じる。これら中でも、現在大きな問題となっているのが、水素侵食である。これは、鋼中に侵入した溶解水素と合金炭化物M_xCが次の反応を起こして、結晶粒界にメタン気泡を生じる現象である。

$$M_xC + 2H_2 \rightarrow xM + CH_4$$

これにより、粒界の結合力が低下し、更にはメタン気泡が成長、合体して著しい延性と靭性が低下する。

3．超音波散乱理論

3.1 超音波の減衰

超音波は材料中を伝搬する際に、そこに存在するボイドや結晶粒などの微小散乱体によって散乱され、そのエネルギーを低下させる。距離x伝搬後の音圧A(x)は、入射時の音圧をA_0として次式で表される。

$$A(x)=A_0 \exp(-\alpha x) \quad 。$$

ここで、αは減衰係数であり、水素侵食材では、減衰係数αは(1)式のように、ボイドによる減衰係数α_vと、結晶粒による減衰係数α_gの和で与えられる。

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_g \quad 。 \quad (1)$$

ボイドによる減衰係数α_vは(2)式で求められる。

$$\alpha_v = n\gamma/2 \quad 。 \quad (2)$$

(2)式で、nは単位体積中のメタンボイドの数であり、γはボイド１個の散乱断面積である。

また、結晶粒による減衰係数α_gは(3)式で与えられる。

$$\alpha_g = \frac{2}{3^2 \cdot 5^3}\left(\frac{A}{\rho v_L^2}\right)^2 k^4 D^3 \left[2+3\frac{v_L^5}{v_T^5}\right] \quad 。 \quad (3)$$

ρ；母材の密度、　D;結晶粒径、

$A=C_{11}-C_{12}-2C_{44}$（C_{ij}は弾性定数）、

v_T；横波の音速、　v_L；縦波の音速。

3.2 超音波の速度分散

多重散乱理論によると、ボイドの散乱による音速変化率$(v'/v_L)_v$は、(4)式で与えられる。ここで、P及びQは、v_Lとv_Tで計算される定数である。

$$\left(\frac{v'}{v_L}\right)_v = 1 + \frac{2\pi}{3} n a^3 (P + Q k^2 a^2) \quad 。 \quad (4)$$

また、結晶粒による音速変化率$(v'/v_L)_g$は、(5)式で与えられる。ここで、R及びSは、v_Lとv_Tで計算される定数である。

$$\left(\frac{v'}{v_L}\right)_g = \left\{1 + \left(\frac{A}{\rho v_L^2}\right)^2 \frac{2}{3 \cdot 5^3 \cdot 7}\left[R + S k^2 D^2\right]\right\}^{-1} \quad 。 \quad (5)$$

従って、全音速変化率は、(6)式のように(4)式と(5)式の各音速変化率の積で与えられる。

$$\frac{v'}{v_L} = \left(\frac{v'}{vL}\right)_v \times \left(\frac{v'}{vL}\right)_g \quad 。 \quad (6)$$

鋼の場合について以上の(2),(3),(4),(5)式を解くと、以下の(7)式～(10)式になる。

$$\alpha_v = 8.1 \times 10^{-13} n a^6 f^4 \ \mathrm{dB/cm} \quad 、 \quad (7)$$

$$\alpha_g = 3.1 \times 10^{-15} D^3 f^4 \ \mathrm{dB/cm} \quad 、 \quad (8)$$

$$(v'/v_L)_v = 1 - 2.7 n a^3 \ 4.4 \times 10^{-6} n a^5 f^2 \quad 、 \quad (9)$$

$$(v'/v_L)_g = 1 \ 2.2 \times 10^{-8} D^2 f^2 \quad 。 \quad (10)$$

4．実験方法及び結果

実験材は、不純物の量を変化させた２種類の0.5Mo鋼を、オートクレーブ内で高温、高圧水素下で曝露して作製した。暴露条件は温度:723K、水素分圧:14.7Mpa、曝露時間100時間、300時間、500時間である。測定器はMatec社製の高精度音速減衰測定装置（MBS-8000-DSP）を用いた。測定は水深法により25MHz広帯域探触子で行った。入射波にはバースト波を用い、周波数を10MHz～24MHzまで2MHz間隔で変化させて音速及び減衰の測定を行った。

5．解析

実験によって測定した、音速と減衰が(7)～(10)式、及び(1)式と(6)式の全ての式に矛盾しないようにボイド数nと径a、ならびに結晶粒径Dを決定する。図１に、

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

そのアルゴリズムを示す。

以上の解析により求まったHigh Impurity材の解析結果を表1に、Ultra Low Impurity材の解析結果を表2示す。

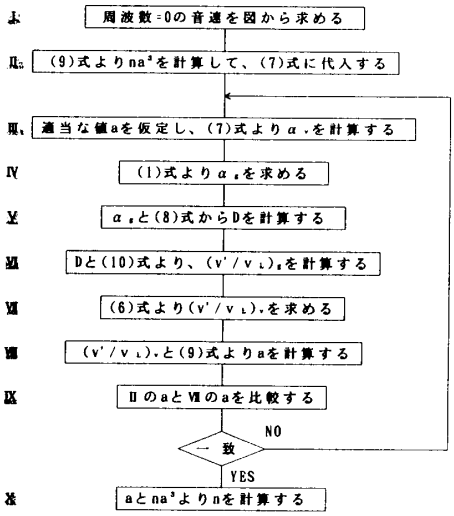

fig 1 algorithm

Table 1 Size and Number of Voids(High Impurity)

EXPOSURE Time	a [μm]	n [m^{-3}]
100h	17.6	1.5×10^{11}
300h	15.1	1.9×10^{11}
500h	16.8	1.2×10^{12}

Table 2 Size and Number of Voids(Ultra Low Impurity)

EXPOSURE Time	a [μm]	n [m^{-3}]
100h	17.5	1.1×10^{10}
300h	17.8	1.1×10^{10}
500h	19.5	1.2×10^{10}

6. 特性パラメータによる劣化評価

図2は、実験材の50mm×50mmの範囲を1mmピッチで走査して測定した後方散乱波の周波数スペクトルより、1次モーメントを計算して、平面表示したものである。図において色調の高い部分は、1次モーメントの値がが低く、劣化の進行に伴って1次モーメントは低周波側に移行することを示している。この図は1次モーメントを用いて劣化度を評価できることを示しており、次に後方散乱波についての検討を行う。

後方散乱波の周波数スペクトルの強度A(f)は、次の(11)式で表される。ここでCは比例係数である。また、$A_0(f)$, $\alpha_s(f)$, $\alpha(f)$は各々、入射波のスペクトル、モード変換を考慮した散乱による減衰係数、全減衰係数の周波数fでの値である。

$$A_{(f)}=\int C\cdot A_{0(f)}\cdot\alpha_{s(f)}^{1/2}\cdot exp(-2\alpha_{(f)}\cdot x)\ dx \quad (11)$$

ただし、(2)、(3)式で与えられる値は、散乱による減衰係数であるが、この値の中の縦波成分のみを取り出して、$\alpha_s(f)$に用いる必要がある。図3は、ボイド数の変化に伴う後方散乱波の周波数スペクトルの変化を計算した結果であり、ボイド数の増加に伴い、スペクトルは低周波側に移行しながら全体の強度が増加している。図4は、図3より求めた1次モーメントとボイド数の関係であり、ボイド数の増加により1次モーメントの低下が示されている。以上の検討結果は1次モーメントより、劣化度を定量化できることを示している。

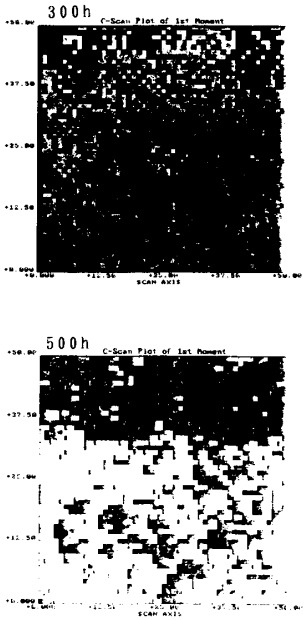

fig 2 C-Scope Image

7. まとめ

超音波の音速と減衰、及びそれらの周波数依存性を測定することにより、水素侵食の絶対評価を行った。

また、後方散乱波を周波数解析することにるより、劣化度の評価を行えることが明らかとなった。

これらの非破壊的評価技術を用いて、材料劣化を早期に検出することで、設備の安全性を確保し、信頼性の向上に結びつけることが可能である。

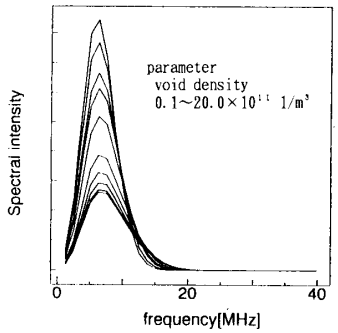

fig 3 Back Scattering (Spectral Intensity)

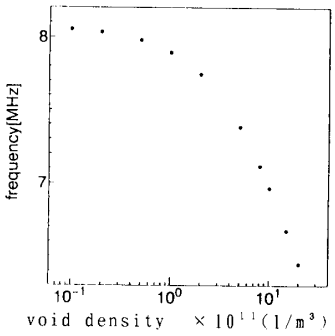

fig 4 First Moment

NII-Electronic Library Service