

超音波を用いた高温構造材料の経年劣化損傷の非破壊的検出と余寿命推定に関する研究

岡崎 正和 (長岡技術科学大学工学部)

1. 緒言

近年の電力需要形態の多様化および原子力発電プラントの増設にともない、既設の中・小容量の火力発電用蒸気タービンやボイラー等は、昼夜間の電力需要のアンバランス調整のための運転を強いられ、しかも、このような使用状況にある高温プラントは年々老朽化していることから、毎日の起動・停止あるいは頻雑な負荷変動によるこれら構造材料の熱疲労、クリープ、クリープ・疲労破壊が世界的問題になってきている。以上のような背景から、高温構造材料の余寿命推定技術の確立が急務となっているが、未だ十分な手法は確立されていない。このような余寿命推定技術の確立には、高温構造材料の経年劣化損傷を定量的かつ非破壊的に検出する技術の開発、および、長時間使用された材料の高温強度に関するデータの蓄積とデータベース化がその両輪をなしていると言えよう。本研究では、高温構造材料の経年劣化損傷を非破壊的に検出し、それらの情報をもとに余寿命を推定する手法について検討した。

2. 結果

高温構造材料の余寿命推定技術の確立には、高温構造材料の経年劣化損傷を定量的かつ非破壊的に検出する技術の開発、および、長時間使用された材料の高温強度に関するデータの蓄積とデータベース化がその両輪をなしていると言えよう。そこで、本研究では、(i)超音波法による材料内部に発生するクリープボイドの非破壊的検出と、検出精度向上に関する検討、(ii)実機長時間使用材のクリープ・疲労強度と超音波を用いた損傷検出、および、余寿命推定法の検討、(iii)実機長時間使用材の疲労微小き裂伝ば特性の検討、(iv)(i)~(iv)の結果を応用した溶接継手のクリープ・疲労損傷の検出と余寿命推定に関する検討を行った。以下に、それらの結果の概要を示す。なお、これらの結果の詳細は下記文献に報告しているが、御批判、御助言を賜れば甚幸である。

2.1 超音波法による材料内部に発生する空孔の非破壊的検出¹⁾²⁾

クリープ等の影響により材料内部に発生する空孔をシミュレートし、種々の大きさ、体積率を有する鉄系焼結材を用いて、超音波法による空孔の非破壊検出の可能性について検討した。その結果、空孔の非破壊的検出のための指標として、超音波の原波形を離散フーリエ変換することにより得られる超音波のエネルギー減衰率の変化、および、超音波周波数スペクトルにおける重心周波

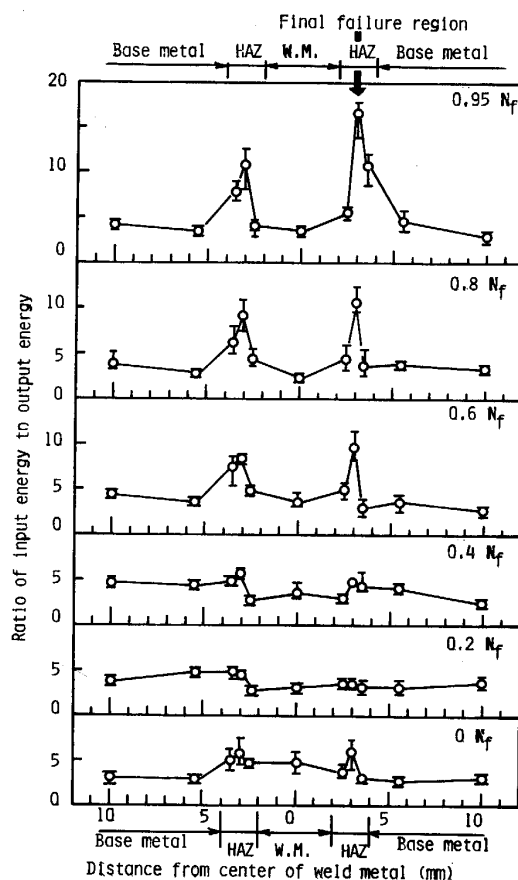


図 1

数の移動量の変化が、極めて有望であることを提示した。また、空孔の体積率、大きさの変化にともなうこれらの物理量の変化に関する理論式を提示し、理論式が実験値と比較的良好一致することも示した。さらに、これらの物理量の変化を指標として空孔の発生率を精度良く検出するためには、使用する超音波の中心周波数の選択が重要であり、また、探触子としては狭帯域のものより広帯域の探触子を使用する必要があることも示した。

2.2 実機長時間使用高温構造材料のクリープ・疲労強度と余寿命推定²⁾⁴⁾

実機ボイラー二次過熱器管として約 10 万 h 使用された 2.1/4Cr-1.0Mo 鋼、同材料を長時間時効した材料、および処女材から採取した試験片を用いて、それらのクリープ・疲労寿命を評価した。また、これらの材料を対象として、超音波原波形をフーリエ解析して得られるエネルギー減衰率 α とクリープ・疲労損傷との関連性について検討するとともに、これらの結果から高温構造材料の余寿命を推定する方法についても検討した。その結果、長時間時効にともなう硬さの変化は、 α の変化と良い対応関係を有し、 α が時効による冶金損傷の検出に有望な指標であることを示した。また、実機使用材のクリープ・疲労寿命は、処女材のそれより低下し、この傾向は、

低ひずみ範囲において顕著であること、実機使用材の高温高サイクル疲労寿命は、処女材のそれより著しく低下することを明らかにした。また、 α は、すべての供試材で、クリープ・疲労損傷の進行とともに増加し、 α はクリープ・疲労損傷の検出に有望な指標であることも示した。さらに、以上の結果を総合し、高温構造材料の余寿命を推定する手法を提案した。この方法の適用により、本研究で得られた実機使用材のクリープ・疲労破壊に対する余寿命を矛盾なく推定可能であった。

2.3 実機長時間使用高温構造材料の高温疲労強度と微小き裂進展³⁾

実機ボイラー二次過熱器管として約 10 万 h 使用された SUS316 鋼管と処女鋼管から採取した試験片を用いて高温疲労試験を行い、両材の高温における疲労破壊特性と微小き裂の進展特性を比較・検討した。なお、対象とした微小疲労き裂長さは約 10 μm から 1 mm 程度である。その結果、実機使用材の高温疲労強度、および、破壊じん性値は処女材のそれらより著しく低下すること、両材の微小疲労き裂は、従来報告されている同系統の処女材料の巨視き裂に対する下限界 J 積分範囲以下の領域でも進展し、この傾向は使用材において顕著であること、使用材における微小き裂の進展速度は処女材のそれより数倍大きく、従って、長時間使用部材に発生したき裂に対する安全性評価は、処女材のき裂進展に関する情報のみにより行うのは危険であることを示した。さらに、使用材の疲労き裂発生には結晶粒界周囲の析出物が重要な役割を果たしており、粒界強度の経年変化を把握することが重要であることも示した。

2.4 超音波法による溶接継手のクリープ・疲労損傷の非破壊的検出⁵⁾

長時間時効した 2.1/4Cr-1Mo 鋼の電子ビーム溶接継手のクリープ・疲労強度を調べるとともに、超音波を用いてそれらの損傷を非破壊的に検出する手法について検討した。その結果、継手上の超音波横波の減衰率の分布により母材部、溶接金属部、熱影響部を識別できること、クリープ・疲労損傷の進行に伴い母材部、溶接金属部、熱影響部における超音波の減衰率は上昇するが、これらの中でも特に熱影響部の上昇が著しく、この領域は最終破損位置と良く対応することを明らかにし (図 1)、超音波横波を用いた非破壊的クリープ・疲労損傷検出および破損箇所推定の有効性について示した。

3. おわりに

高温構造材料の経年劣化損傷を非破壊的に検出し、余寿命を推定する技術の確立の必要性は世界的な課題となっているが、未だ十分な手法は確立していない。上述のように、超音波の原波形を解析して得られる情報は、上記目的に関して有用な知見を与えてくれるものと確信しているが、現在開発段階にあることは言うまでもなく、今後、さらに検討を加えたいと考えている。御指導、御

批判、御鞭撻を賜れば甚幸である。

文 献

- 1) 岡崎正和, 他: 日本機械学会論文集 A 編, **55** (1989), p. 1900
- 2) M. OKAZAKI *et al.*: ASME PVP Conference, Nondestructive Evaluation, ed. by R. D. STREIT, Vol. 5 (1989), p. 253
- 3) 岡崎正和, 他: 材料, **38** (1989), p. 1402
- 4) M. OKAZAKI *et al.*: Trans. ASME, J. Press. Vessel Tech., **113** (1991), in press
- 5) 岡崎正和, 他: 日本材料学会第 40 期学術講演会 (1991), 発表予定

セラミックス-金属焼結複合材料の破壊靱性と組織との関係

松原 秀彰

(東京大学先端科学技術研究センター)

1. 研究の目的

セラミックスを構造用材料として応用しようとする場合、金属との複合化は機械的性質（とくに靱性）を改善するのに有効である。セラミックス粒子を金属結合相によって焼結した材料は一般にサーメットと呼ばれ、これまで多くの種類のサーメットが検討されてきている。サーメットの機械的性質はその組織的因子と密接な関係にあると考えられるが、これまでサーメットの破壊靱性と組織との関係については検討が十分でなく、定量的な理解がなされていない。本研究では近年、鋼の切削工具用材料として大きく発展した Ti(C, N)-Ni 系を対象に、サーメットの破壊靱性値 (K_{IC}) と組織との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

原料として TiC, $\text{TiC}_{0.7}\text{N}_{0.3}$, $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$, Mo_2C , Ni 粉末を用い、湿式ボール・ミル、乾燥、成形を経て、真空または N_2 雰囲気中、(1350~1600) $^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ の焼結によって試料を作製した。主に用いた材種は $\text{TiC}_{0.7}\text{N}_{0.3}$ - Mo_2C -Ni 系であり、炭窒化物粒子の粒径、Ni の体積分率を変化させた。 K_{IC} の測定には寸法 $3 \times 4 \times 18\text{mm}^3$ の試験片を用い、これにまず予備き裂を導入した後、スパン 16 mm の曲げ試験を行い K_{IC} を求めた。組織観察には主として SEM を用い、平均粒径、Ni 相の平均自由行路、炭窒化物粒子の接着率などを測定し、 K_{IC} との関連性を求めた。

3. 結果および考察

まず、 K_{IC} におよぼす平均粒径と Ni 体積分率の影響を調べた。その結果、 K_{IC} は粒径が大きいほど、また Ni 量が多いほど増加することが分かった。ここで、サーメットの組織において粒径および Ni 量が大きくなるほ