高経年火力ボイラー蒸発管の TEM サイズ SP クリープ試験による特性評価

Damage Assessment of Highly Aged Thermal Power Boiler Tubes by TEM-Size SP Creep Test

○正 駒崎 慎一 (鹿児島大)
正 藤岡 照高 (電中研)

学 藤田 一太 (鹿児島大)
正 小林 謙一 (千葉大)

Shin-ichi KOMAZAKI and Kazuto FUJITA, Kagoshima Univ., Kagoshima 890-8580, Japan

Terutaka FUJIOKA, CRIEPI, Yokosuka 240-0196, Japan

Ken-ichi KOBAYASHI, Chiba Univ., Chiba 263-8522, Japan

Small punch (SP) creep test with TEM disk-size specimen ($\phi 3\text{mm}$, $t 0.25\text{mm}$) was applied to the aged boiler tube (STBA24), which had been used in excess of 140,000 hours, to investigate the distribution of material degradation and/or damage in the thin tube wall. Experimental results revealed that there was no significant difference between the creep properties of specimens removed from the inside and the outside of thin wall, and the material degradation and/or damage had been accumulated uniformly. Additionally, it was also revealed that the SP creep rupture data might be converted into uniaxial data by the average equivalent stress in steady state, σ_s , which has been newly proposed by the authors.

Key Words: Small Punch Creep Test, Boiler Tube, STBA24, Material Degradation, Damage Evaluation

1. はじめに

高経年プラントにおける機器の健全性を確保するため、高精度な余寿命診断技術の開発が求められている。微小サンプル試験法の一つであるスモールパンチ (Small Punch: SP) クリープ試験法⁽¹⁾は、破壊試験であることから評価精度の優位性を有し、小型試験片を用いるため試験片採取時に実機に及ぼす影響を必要最小限に低減させることができる。さらに、ガスタービン動静翼、燃焼器などの薄肉部材や溶接熱影響部など、標準サイズの試験片の採取が困難な局所部位のクリープ特性評価も可能である。今後、この SP クリープ試験法を実機構造部材の余寿命診断技術として普及させるには、評価試験法としての信頼性向上を図ることが重要課題である。そのためには、実証データの収集とその検証の積み重ねが必須であり、基礎的な知見を含めてデータの充実が求められる。

本研究では、長時間使用したボイラー蒸発管より採取した TEM ディスク形状の小型円盤状試験片を用いて SP クリープ試験を実施し、管厚方向での劣化・損傷状態の分布を調査した。また、著者ら⁽¹⁾が提案している定常平均相当応力 σ_s を用いて SP クリープ破壊試験結果を単軸クリープ破壊試験結果に変換する試みも併せて行った。

2. 供試材および実験方法

供試材は、メタル温度が 500°C に達しない使用条件のボイラー蒸発管にて 14 万時間以上使用した低合金鋼 STBA24 (2.25Cr-1Mo 鋼) である。光学顕微鏡観察等の結果、ボイドや微小き裂などの明瞭な損傷は認められなかった。

図 1 の模式図に示すように、外径 51.2mm、管厚 8.6mm、長さ 90mm の廃棄材より直径 3mm の小型ロッドを円周方向に垂直になるようワイヤー放電加工により切り出した。その後、板厚が 0.3mm 程度になるようにロッドをスライスし、各ロッドよりそれぞれ 9 枚程度の小型円盤状試験片を採取した。切り出した小型円盤状試験片は管外面側より #1、#2、#3、#4、#5、#6、#7、#8、#9 とナンバリングした。最終的な試験片形状は $\phi 3\text{mm} \times t 0.25 \pm 0.005\text{mm}$ であり、試験片両面を $0.3\mu\text{m}$ のバフ研磨にて鏡面仕上げとした。

SP クリープ試験は、温度 $600 \sim 670^\circ\text{C}$ 、荷重 $45 \sim 150\text{N}$ の試験条件にて実施した。荷重は、 $\phi 1.0\text{mm}$ の Si_3N_4 ボールを介して上下ダイの間にクランプした試験片の上面中央に負荷した。また、試験片の変形量は荷重線変位とし、圧縮ロッドの移動距離を差動トランス式伸び計を用いて測定することにより計測した。なお、試験片の過度の酸化を防ぐため、試験中アルゴンガスをフローした。

3. 結果および考察

3.1 クリープ特性に及ぼす試験片採取位置の影響

SP クリープ試験結果の一例として、 $630^\circ\text{C}/45\text{N}$ の試験条件で計測された #1 (もともと管外面側) と #9 (もともと管内面側) の時間-変位曲線および時間-クリープ変位速度曲線を図 2 に示す。#9 の方がわずかに破断時間が短くなったが、クリープ変形特性に大きな差異は認められない。また、破断後の試験片の外観写真の例として、#5 (管厚中心付近) のものを図 3 に示す。いずれの試験片も破壊はボールと試験片が接する円周に沿って生じており、巨視的には延性破壊であった。

クリープ破断時間を試験片採取位置ごとに整理したものが図 4 である。計測は一回ずつのみではあるが、クリープ破断時間に及ぼす採取位置の影響は現時点では認められない。この結果は、劣化・損傷状態の分布が管厚方向で比較的均一であることを示唆している。

Fig.1 Schematic view of removal of SP specimens.

Fig.2 SP creep curves measured on #1 and #9 specimens.

Fig.3 SEM micrograph of ruptured specimen (650°C/85N).

Fig.4 Effect of sampling portion on creep rupture time.

3. 2 単軸クリープ試験結果との関係

採取位置にかかわらずすべての SP クリープ破断試験結果を Larson-Miller パラメータで整理したものを図 5 に示す。同図には本鋼の単軸クリープ試験結果^{(2), (3)}も併せて示してある。多少ばらつきはあるものの、試験結果が Larson-Miller パラメータで良好に整理されているのがわかる。

標準の単軸クリープ試験では力学的パラメータが応力であるのに対し、SP クリープ試験は荷重である。そのため、SP クリープ試験結果を単軸のそれに変換するためには、SP クリープ荷重 F と単軸クリープ応力 σ の関係を明らかにする必要がある。著者ら⁽¹⁾は、有限要素解析結果に基づいた荷重／応力換算式の導出に関する検討を行っている。解析で得られた破断位置での板厚方向の平均相当応力はクリープ試験時間の大部分においてほぼ一定で推移する。そのため、この定常状態における平均相当応力（定常平均相当応力 σ_s ）が単軸クリープ試験の応力に対応すると考えており、

Fig.5 Rupture test results of SP and uniaxial creep tests.

Fig.6 Conversion of SP creep test results into uniaxial ones.

実際、 F の代わりに σ_s で SP クリープ破断試験データを整理すると、 σ で整理した単軸クリープ破断試験データと良く一致する。

長時間使用した本鋼の材料定数が十分整備されていないため、今回は高 Cr フェライト系耐熱鋼 Gr.92 で得られている関係 ($F=0.47\sigma_s$) を用いて SP クリープ破断試験結果を σ_s で整理してみた。その結果を図 6 に示す。限られたデータ数ではあるが、 σ で整理した単軸クリープ破断試験結果と比較的良好に一致しており、他鋼種と同様、 σ_s を用いた単軸クリープ試験結果への変換の可能性が示唆された。

4. まとめ

14 万時間以上使用したボイラー蒸発管 (STBA24) より採取した TEM ディスク形状の小型円盤状試験片を用いて SP クリープ試験を実施した。その結果、劣化・損傷状態は管厚方向で比較的均一に分布していることがわかった。また、他鋼種と同様、定常平均相当応力 σ_s を用いた単軸クリープ試験結果への変換の可能性が示唆された。

参考文献

- (1) 駒崎慎一, 材料, Vol.61, pp.980-986 (2012).
- (2) 藤岡照高, 小林謙一, 駒崎慎一, 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 日本機械学会 (2013). 講演予定
- (3) 小林謙一, 永峰陽介, 藤岡照高, 駒崎慎一, 第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 日本機械学会 (2013). 講演予定