実機使用の HK40 材の熱疲労寿命*

丸 山 武 志** 丸 山 四 郎** 車 地 隆 治**

Thermal Fatigue Life of HK40 Used for Actual Plants

by

Takeshi MARUYAMA, Shiroh MARUYAMA and Takaharu KURUMAJI

(Kure Research Laboratory, Babcock-Hitachi K.K., Kure)

The tensile properties and isothermal and thermal fatigue life at high temperatures were measured on the centrifugal casting HK40, which had been used for chemical plants at high temperature for a long time. The results obtained showed that these properties have a tendency to increase a little at higher temperature than 700°C, as the material is aged by using for a long time.

Further, it is found that the area of cyclic σ - ϵ hysteresis loop and fracture tensile strain can be used to predict the isothermal fatigue life, and that the thermal fatigue life is nearly equal to the isothermal fatigue life at the maximum temperature.

(Received Oct. 16, 1976)

1 緒 言

HK40 遠心鑄造管は、改質炉や分解炉に多用されているが、高温下で使用されるために、長時間使用すると粒内に微細な炭化物が析出し、さらに過時効域では析出した 2 次炭化物が球状に凝集・粗大化して材質変化を起し、例えば室温下のかたさを調べると、使用時間につれて硬化し、その後軟化する傾向を示す。このような材料特性の時効による変化は、高温疲労寿命、熱疲労寿命にも影響すると考えられ、高温耐熱材料の疲労強度を評価する場合考慮しなければならない現象である。

時効による疲労寿命への影響を取扱った研究は、Ni 基あるいは Co 基のガスタービン翼材について熱疲労寿命を検討したもの¹⁾、時効処理されたステンレス鋼のき裂伝ば挙動を検討したもの²⁾の等があるが、遠心鑄造管についての研究例はみられない。筆者らは、先に、本供試材である HK40 遠心鑄造管を 982°C × 1 000 hrs 時効した材料について熱疲労寿命を調べ、時効によりやや寿命が低下することを見いだした³⁾。

本報では、さらに長時間実機にて高温下で使用された材料について、引張特性・高温低サイクル疲労寿命・熱疲労寿命を調べ、時効による材質変化の与える影響を明らかにすると共に、熱疲労寿命を引張特性より

推定する方法を検討した。

2 実 験 方 法

2・1 供試材

供試材である HK40 遠心鑄造管の新材 および使用材の化学成分を Table I に、実機使用条件を Table II に示す。また、試験前のマイクロ組織を Fig.1 に示す。K1 材は粒内に微細な 2 次炭化物が析出し、共晶炭化物の近傍には σ 相もみられるが、 σ 相の量はそれほど多くない。K2 材は、高温域で使用されているた

Table I. Chemical composition (%).

Material	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
As-cast	0.34	0.89	1.15	20.7	24.8	0.31
Used	K 1 0.37 ~0.38	0.61 ~0.85	0.64 ~1.31	22.2 ~23.0	24.0 ~25.0	—
	K 2 0.36 ~0.40	0.52 ~0.72	0.61 ~0.95	19.6 ~20.7	23.5 ~25.3	—

Table II. Operating conditions of actual plants.

Material	Temp.	Period	Larson-Miller* parameter P	Product form
K 1	≈900°C	43 000 hrs	≈23.0	Pipe: 138.8φOD ×18.6 t
K 2	1 000~ 1 050°C	28 000 hrs	24.8~25.7	Pipe: 110φOD ×12 t

* 原稿受理 昭和51年10月16日

** 正 会 員 バブcock日立(株)呉研究所 呉市宝町

Fig. 1. Micro-structure of test materials.

め時効が進み、共晶炭化物が球状粗大化している。

2・2 試験片の形状・寸法

試験片は、管の円周を等分割し、長手方向において Fig. 2 に示す形状に機械加工した。引張試験には直径 8 mm、標点間長さ 40 mm の標準型試験片を、繰返し応力-ひずみ試験・高温疲労・熱疲労試験には最小断面部直径 6 mm、標点間曲率 20 mm の砂時計型試験片を用いた。

Fig. 2. Shapes of test pieces.

2・3 試験方法および試験条件

引張試験は、島津製 10 ton オートグラフを使用し、JIS 規定に従って 0.21%/min. ($\sigma \leq \sigma_{0.2}$) および 6.3%/min. ($\sigma > \sigma_{0.2}$) の 2 段階ひずみ速度で行った。

繰返し応力-ひずみ試験は、後述するように、疲労寿命の推定に必要な応力-ひずみ線図を求めるための Fig. 3 に示すパターンのひずみ繰返し条件下でヒステリシス・ループが安定するまで繰返し、そのヒステリシス・ループより破線で示す応力-ひずみ線

Fig. 3. Method of cyclic σ - ϵ test.

図を決定した。

この繰返し応力-ひずみ試験と高温疲労試験、熱疲労試験は電気-油圧サーボ式疲労試験機 (10 ton サーボバルサ) を用いた。ひずみ制御は、最小断面部の径方向ひずみによって行ったが、径方向ひずみから軸方向ひずみへの変換は(1)式によった。

$$\Delta \epsilon_t = \frac{\Delta \epsilon_d}{\nu_p} + \frac{\Delta \sigma}{E} \left(1 - \frac{\nu_e}{\nu_p} \right) \quad (1)$$

ただし、 ν_p 、 ν_e はそれぞれ塑性および弾性変形に関するポアソン比で、 $\nu_p = 0.5$ 、 $\nu_e = 0.3$ である。また、 $\Delta \sigma$ は、 $N_f/2$ 時の応力範囲を用いた。

Table III は試験条件を示す。熱疲労試験は、1000 $\pm$ 700 $^{\circ}$ C と 1000 $\pm$ 600 $^{\circ}$ C の 2 種類の温度サイクルについて行った。1000 $\pm$ 700 $^{\circ}$ C は実機で想定される温度変化に対応したものであり、1000 $\pm$ 600 $^{\circ}$ C は、600 $^{\circ}$ C では時効材の延性が著しく低下することから、この影響を調べるために選んだ。

Table III. Test conditions.

	Tensile	Cyclic curve	Isothermal fatigue	Thermal fatigue
Temperature	R. T. 600 $^{\circ}$ C 1100 $^{\circ}$ C	600 $^{\circ}$ C 700 $^{\circ}$ C 1000 $^{\circ}$ C	600 $^{\circ}$ C 700 $^{\circ}$ C 1000 $^{\circ}$ C	1000 $\pm$ 600 $^{\circ}$ C 1000 $\pm$ 700 $^{\circ}$ C
Strain rate	$\sigma < \sigma_{0.2}$: 0.21%/min. $\sigma > \sigma_{0.2}$: 6.3%/min.	≈ 0.1 %/sec.	0.03 $\sim$ 0.1%/sec.	
Strain range	—	max. 2%	0.5, 1, 2%	

3 実験結果

3・1 引張特性

両使用材の R. T. および 600 $^{\circ}$ C $\sim$ 1100 $^{\circ}$ C における引張強さ σ_B および絞り φ の値を、新材についての在来データのバンドと共に Fig. 4 に示す。両使用材の σ_B は、全体的に新材のバンド内に入っているが、K1 材の 600 $^{\circ}$ C および 700 $^{\circ}$ C における値はバンドより多少低くなっている。また、 φ についてみると、 $T \leq 600^{\circ}$ C

Fig. 4. Results of tensile test.

では新材のバンドより低下し、時効の影響が示されている。一方、 $T \geq 700^\circ\text{C}$ では新材のバンド内で、むしろ時効により延性が向上する傾向がみられるが、このような時効による高温延性の増加傾向は他種の耐熱合金についても報告されている。

3・2 繰返し応力-ひずみ特性

Fig. 5 は、繰返し応力-ひずみ試験の結果の一例を示す。図より、単純引張時とひずみ繰返し後の応力-ひずみ線図には差異があること、温度上昇につれてひ

Fig. 5. Results of cyclic σ - ε test on K1-material.

ずみ硬化の程度が減少することがわかる。これらの線図のひずみ硬化域の塑性ひずみ ε_p と応力 σ の関係は次式で近似できる。

$$\sigma = A \cdot \varepsilon_p^m \quad (2)$$

Table IV は、 A 、 m の値を示す。

3・3 高温低サイクル疲労寿命

Fig. 6 は、新材および使用材の、 $600^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ における高温低サイクル疲労寿命を比較して示す。 600°C ではより時効が進んでいる K2 材の方が K1 材より寿

Table IV. Strain hardening coefficients of cyclic σ - ε_p curves.

Temp.	Material	A	m
600°C	As-cast	—	—
	K 1	0.166	35.9
	K 2	0.111	37.0
700°C	As-cast	0.140	43.3
	K 1	0.133	28.7
	K 2	0.114	30.3
1000°C	As-cast	0.086	9.25
	K 1	0.107	9.30
	K 2	0.072	7.67

Fig. 6. Results of isothermal fatigue test.

命が低下しているが、 700°C では新材 $<$ K1 材 $\approx$ K2 材、 1000°C では新材 $\approx$ K1 材 $<$ K2 材であり、 $T \leq 600^\circ\text{C}$ の低温では時効により寿命低下、 $T \geq 700^\circ\text{C}$ の高温では時効により逆に寿命が増加する傾向が認められ、時効による延性の変化と対応している。

3・4 熱疲労寿命

Fig. 7 は、新材および両使用材の熱疲労寿命を比較したものであるが、 $1000^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ についてみると、両

Fig. 7. Results of thermal fatigue test.

*1 第14回高温強度シンポジウム前刷集に掲載した熱疲労寿命データは座標数値が間違っていましたので訂正いたします。

して得られる。

$$W_f = 4(W_f' - \sigma_{pl} \cdot \varepsilon_f) \quad (8)$$

ここで、 W_f は引張試験によって得た真応力-真ひずみ曲線下の全面積である。また、 ε_f の値は、繰返し変形時の値が不明のため、単純引張試験より得た値を用いた。Fig. 11 は、(7)、(8)式より求めた S 、 W_f の値を用いて、 (S/W_f) vs. N_f 線図をプロットしたものである。各温度に対してこう配が -1 の直線上にほぼ乗っており、新材・使用材の別による偏りはほとんどないことから(5)、(7)、(8)式により、引張延性と繰返し応力-ひずみ特性より高温低サイクル疲労寿命が推定できる。

Fig. 11. Prediction of isothermal fatigue life by hysteresis energy method.

なお、より簡便な面積法の適用として全面積 S_H を用いた整理も行ったが、 (S_H/W_f) vs. N_f 線図のこう配は $-0.55 \sim -0.85$ となり、線型損傷則に合致するよう配 -1 からはずれる結果となった。

4・2 高温疲労寿命より熱疲労寿命の推定

熱疲労寿命を高温低サイクル疲労寿命より求めるために、両者の寿命の等しくなるような相当温度を求める試みがこれまで多くなされており、平均温度に等しいとする説⁸⁾、上限温度あるいはそれ以上とする説⁹⁾がある。また、線型損傷則等を用いて相当温度を広範囲に求める方法¹⁰⁾や、上・下限温度における高温疲労寿命から汎用性のある実験式を用いて推定する方法も提案されている。

本供試材の高温疲労寿命は、温度によりそれほど差がないため、いずれの方法でも大差のない推定値が得られる。Fig. 12 は、上限温度（1000℃）における高温低サイクル疲労寿命と熱疲労寿命を比較したものである。高温低サイクル疲労寿命は、熱疲労寿命を求めた実験と同一の塑性ひずみ範囲における値を Fig. 7 よ

Fig. 12. Comparison between thermal and isothermal fatigue life.

り求めた。両者は、2 倍～1/2 倍の範囲内でほぼ一致しており、他の方法よりも簡易であるので、本供試材の熱疲労寿命は、時効の有無によらず、上限温度における高温低サイクル疲労寿命をもって代用できる。

5 結 論

実機に使用した HK 40 遠心鋳造管について各種高温特性を調べ、以下の点を明らかにした。

- (1) 使用材の引張強さは、 $R.T.$ 、および $600^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$ とともに新材とほぼ同等であるが、延性は $T \leq 600^\circ\text{C}$ では低下、 $700^\circ\text{C} \leq T$ ではやや増加する。
- (2) 長時間使用による時効の効果として、使用材の高温低サイクル疲労および熱疲労強度は本試験条件の範囲においては新材とほぼ同等もしくはやや増加する。
- (3) 面積法を用いて、時効による高温疲労寿命の変化を推定できる。
- (4) 本供試材では、熱疲労寿命は、上限温度における高温低サイクル疲労寿命にほぼ等しい。

(昭和51年7月24日 第14回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 薄田 寛, 作本嘉郎, 西田 隆, 辻 一郎, 河合久孝, 三菱重工技報, **9**, 102 (1972).
- 2) James, L.A., Metallurgical Transactions, **5**, p.831 (1974).
- 3) 丸山武志, 車地隆治, 木村征二, 材料, **25**, 278 (1976).
- 4) Van Echo, J. A., Battelle Technical Report on Materials for Steam Reformer Furnaces-Task 2,3 and 4 (1973).
- 5) 佐々木良一, 幅谷文男, 新山英輔, 福井 寛, 耐熱金属材料委員会研究報告, **11**, 3 (1970).
- 6) Hall, A. M., J. A. Van Echo, D. B. Roach, An ASME Publication, 68-Pub.-6.
- 7) Schmieder, A. K., ASTM STP **462**, 272 (1970).
- 8) Coffin, L. F., Jr., Proceedings of 4th Sagamore Conf., p.219 (1957).
- 9) 河本 実, 仲嶋 浩, 材料, **12**, 482 (1963).
- 10) 平 修二, 藤野宗昭, 土師 隆, 材料, **22**, 241 (1973).
- 11) 平 修二, 藤野宗昭, 材料, **25**, 218 (1976).