繰返熱応力に対する耐熱材料の強度に関する研究*

(第1報 熱疲労試験機ならびに試験結果)

宇野 九十九** 山内 英和***

A Study on the Effects of Cyclic Thermal Stresses on Heat Resisting Metals

by

Tsukumo UNO and Hidekazu YAMANOUCHI

(Mitsubishi Shipbuilding and Engineering Co., Ltd)

The machinery part which is to be exposed to a high temperature is designed on the basis of creep strength, creep rupture strength and high temperature fatigue strength. However, in the design of jet engine part and other machinery part as well as gas turbine for naval vessels subject to temperature fluctuation because of many start-and-stops, the above data are not sufficient, and data on cyclic thermal stress are required. This is an interim report on the tests we have been making on three kinds of heat resisting material by means of thermal fatigue test apparatuses manufactured to meet this requirement. The test apparatuses used are indirect heating thermal cycling test apparatuses, direct heating thermal cycling test apparatuses and a high temperature constant strain cycling test apparatus; the indirect heating thermal cycling test apparatus is mainly used at present. It has been found from the tests that thermal fatigue strength depends to a great extent on heat treatment condition of material, and has no relation with creep rupture strength.

(Received Nov. 16, 1959)

1. 緒 言

高温で使用される機械部分の設計はいっぱんにクリープ強度、クリープ破断強度および高温疲労強度をもとにしてなされる。ところが艦艇用ガスタービンなどは発停が多く、かつ急速起動が要求されるため、充分なる暖機の時間が与えられず、その始動のさいにはタービン各部に定常運転中よりも大きな温度分布の不均一を生ずる結果、高温部には非常に大きな圧縮の熱応力が生じて材料の降伏およびクリープが起こり、休止中にはこれが引張の残留応力となって、発停ごとに圧縮と引張が繰り返されることになるが、この繰返熱応力が過大であればついには材質のぜい化を来し破損に至るのである。しかしながら、従来このような点に関してはほとんど研究されておらず、このような問題は前述の資料から判断することは困難であり、繰返熱応力に対する強度の資料の必要が痛感される。

延性材料に対する熱疲労の研究は L.F. Coffin が¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 18-8-Cb 材につき本格的研究を行なっているのがはじまりである。

筆者らは自動温度制御電気炉を有する繰返熱応力試

験機、試験片に直接通電する直接加熱式繰返熱応力試験機および油圧式高温定ひずみ繰返試験機を製作し、650°C 付近で使用される3種の耐熱鋼 SEH₄, Timken 16-25-6 および LCN 155 について熱疲労試験を行なっているので、主として間接加熱式繰返熱応力試験機を使用して得られた現在までの試験結果を報告する。

2. 試 験 装 置

(I) 間接加熱式繰返熱応力試験機

試験機4台を1組として2組設置し、自動温度制御電気炉により両端を固定した薄肉中空円筒状試験片に加熱冷却を交互に与えて試験片に熱応力の繰り返しを生ぜしめるものである。Photo. 1 に試験装置を Fig.

Photo. 1 Indirect heating thermal cycling test apparatus

* 原稿受付 昭和34年11月16日

** 三菱造船株式会社本社研究部

*** 正員 三菱造船株式会社本社研究部

1 に試験機の組立図を示す。試験片の形状は Fig. 2 のとおりで試験にさいしてその両端は上, 下支持板に堅く取り付け。上, 下支持板は2本の支柱により連結されているが, 曲りの影響を除くため球面座金を用いている。支柱は中空棒で内部下端にねじ込みされた棒に, 1/1 000 mm ダイヤルゲージを取り付けて, 柱のひずみを計測し試験片の応力を測定している。また, 試験中に試験機が温度変化を受けてひずみの計測に誤差がはいるのを防ぐため, 上, 下支持板には冷却水を循環させて試験機の温度を一定に保っている。

温度調整装置は所要の電流値を得るための加熱電流調整用リアクター, 上, 下限温度自動調整のための指示型電子管式温度調節計, 上, 下限温度保持時間調整用タイマー, 繰返数計測器とうを含むものであって, これらを相互に連動せしめるようにしてあり, かつ冷却のさいには電磁弁が働き圧縮空気が試験片に吹きつけられる。試験温度範囲は常温—800°C で, 上, 下限温度保持時間は上限は0~120分, 下限は0~30分の調整範囲を有している。

(II) 直接加熱式繰返熱応力試験機

試験機3台が1組になっていて, 両端を固定した薄

肉中空円筒状試験片に直接通電して加熱し冷却は強制通風を行ない, 試験時間の短縮を図るとともに, 繰返温度範囲に対するひずみ範囲を独立に変化させるようにしてある。Photo. 2 に試験装置を Fig. 3 に試験機の組立図を示す。試験機の形状は間接加熱式と類似しているが, 支柱に皿ばねを取り付けることにより試験片に生ずる繰返しひずみを変化せしめ, これを高温マイクロスコープで測定するとともに, 試験片の応力は支柱のひずみを電気抵抗線ひずみ計で計測して求めている。試験中の温度変化によるひずみの計測誤差を防ぐため, 上, 下支持板および支柱には冷却水を循環させている。

温度調整装置は加熱トランス, 温度調節計, 上, 下限温度保持時間調整用タイマー, 繰返数計測器とうを含み, これらを相互に連動させ, 温度上昇, 上, 下限温度保持電流がそれぞれ単独に調整できるようになっている。試験温度範囲は常温—1000°C で, 上, 下限温

Fig. 1 An indirect heating thermal cycling tester

Fig. 2 Test specimen

Photo. 2 Direct heating thermal cycling test apparatus

Fig. 3 A direct heating thermal cycling tester

度保持時間は上限は 0~60 分, 下限は 0~30 分の調整範囲を有している。

(III) 高温定ひずみ繰返試験機

熱サイクルの温度振幅が一定な熱疲労は熱ひずみに相当する総ひずみが一定の繰返しを受けるわけであるから, 一定程度で一定のひずみを繰返す場合の強度と, 熱疲労強度とを関連させて考えるために設置したものである。装置は一定温度にある薄肉中空円筒状試験片の一端をピストン・ロッドに取り付け, 油圧ポンプ, ソレノイド・バルブにより引張力および圧縮力を交互に与え所定のひずみ量に達すると, ひずみ検出計に内蔵された電氣的接点の閉開路により, ソレノイド・バルブを切り換えて試験を行なうようになっている。Photo. 3 に試験装置を Fig. 4 に試験機の組立図を示す。試験片の下端はピストン・ロッドにねじ込みされてナットで締め付けられるとともに, 上端はボルトにより固定される。そこで油圧によるシリンダー

Photo. 3 High temperature constant strain cycling test apparatus

Fig. 4 A high temperature constant strain cycling tester

内のピストンの上下動により, 中空試験片内部に取り付けたひずみ検出棒の動きをひずみ検出計にとらえ, 一定の圧縮, 引張ひずみの繰返しを行なう。試験片のひずみとひずみ検出計の目もりとはあらかじめ補正してある。試験片の応力は支柱のひずみを 1/1 000 mm ダイヤルゲージで計測して求めている。なお, 試験機の上部支持板およびピストン・ロッドに冷却水を循環させて試験機の温度を一定に保っている。試験温度は常温—800°C で, 試験速度は 1 サイクル 30 秒—5 分まで変えうる。

3. 間接加熱式繰返熱応力試験

試験片の両端を固定して Fig. 5 のように加熱冷却サイクルを繰返し与えるのであるが, 試験片を上限温度で固定するか下限温度で固定するかによって得られるヒステリシス・ループの形が異なる。いっばんに

Fig. 5 Thermal cycle

Fig. 6 Stress-strain relation for thermal cycling

延性材料の温度サイクルによる応力-ひずみ関係を Fig. 6 について説明すればつぎのとおりである. T_2 を上限温度, T_1 を下限温度とし T_2 で試験片を固定したとする. このときは(a)図において T_2 より冷却されると試験片には引張応力が生じ, 2A のようにはじめ弾性的について塑性変形を起こして1点に達し, ここで温度 T_1 に保持される. つぎに温度が上昇を始めるに従い, 応力は除荷されて圧縮応力に変わり, 温

度 T_2 に戻れば試験片の変形は消失するが, 22' の大きさの圧縮応力が残留する. つぎの熱サイクルが始まれば2'B線に沿って応力が変化していく. 上限の保持中にはクリープのため応力の減少が起り, また, 熱サイクル中に生ずる材質変化, バウシinger効果等のためヒステリシス曲線の中心はしだいに移動するのであるが, 数サイクル後には一定値に落ち着く. 試験片を下限温度で固定した場合は Fig. 6 (b)図のようにな

Fig. 7 Tensile properties of SEH₄ (15 Cr, 14 Ni, 2 W) 1180°C×5hr O. Q.

Fig. 8 Tensile properties of SEH₄ (15 Cr, 14 Ni, 3 W) 1180°C×5hr O. Q. 700°C×24hr A. C.

Fig. 9 Tensile properties of SEH₄ (15 Cr, 14 Ni, 3 W) 1180°C×5hr O. Q. 850°C×32 hr A. C.

Fig. 10 Tensile properties of SEH₄ (15 Cr, 14 Ni, 3 W) 950°C×5hr O. Q.

Table 1 Chemical composition (%) and heat treatment of the material

Material & symbol	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Mo	Cb	Co	N	Heat treatment
SEH ₄ -A	0.42	1.97	0.33	0.020	0.010	14.51	13.92	2.48					(a) 1180°C×5 hr O. Q.
													(b) 1180°C×5 hr O. Q.
													700°C×24 hr A. C.
													(c) 1180°C×5 hr O. Q.
SEH ₄ -B	0.39	1.46	0.29	0.015	0.014	16.16	14.17	2.82					850°C×32 hr A. C.
													(d) 950°C×5 hr O. Q.
													(a) 1180°C×5 hr O. Q.
Timken 16-25-6	0.10	0.39	1.49	0.012	0.014	15.41	25.11		5.70			0.175	(b) 1180°C×5 hr O. Q.
													850°C×32 hr A. C.
													(a) 1200°C×2 hr O. Q.
LCN 155	0.11	0.72	1.50	0.025	0.019	20.39	20.20	2.02	2.82	1.02	20.75	0.145	(b) 1200°C×2 hr O. Q.
													800°C×5 hr A. C.
													(a) 1200°C×2 hr O. Q.
													(b) 1200°C×2 hr O. Q.
													800°C×20 hr A. C.

Fig. 11 Tensile properties of Timken 16-25-6
1 200°C×2hr O.Q.

Fig. 12 Tensile properties of Timken 16-25-6
1 200°C×2hr O.Q. 800°C×5hr A.C.

Fig. 13 Tensile properties of SEH₄ (16Cr,
14Ni, 3W) 1 180°C×5 hr O.Q.

ることが理解されよう。熱疲労現象はこの応力-ひずみ曲線の大きさ、および形におおいに影響されるものであって、ループに影響を与える因子を研究することがたいせつである。重要な因子としては上限、下限の温度 T_1 , T_2 および各温度における保持時間 t_1 , t_4 お

Fig. 14 Tensile properties of SEH₄ (16Cr,
14Ni, 3W) 1 180°C×5 hr O.Q. 850°C×
32hr A.C.

Fig. 15 Tensile properties of LCN 155
1 200°C×2 hr O.Q.

Fig. 16 Tensile properties of LCN 155 1 200°C
× 2hr O.Q. 800°C × 20hr A.C.

Fig. 17 SEH₄ (15Cr, 14Ni, 2W) thermal
cycling (fixed at upper)
{ 650°C (5 min)—300°C (2 min)
{ 650°C (5 min)—200°C (2 min)

Fig. 18 Timken 16-25-6 thermal cycling
(fixed at upper)
{ 650°C (5 min)—300°C (2 min)
{ 650°C (5 min)—200°C (2 min)

Fig. 19 SEH₄ (16Cr, 14Ni, 3W) thermal
cycling (fixed at upper)
{ 650°C (15 min)—300°C (5 min)
{ 650°C (15 min)—200°C (5 min)
{ 650°C (15 min)—100°C (5 min)

よび加熱冷却の速さおよび試験材の弾塑性的性質の温度依存度とがあげられる。

筆者らは3種の耐熱鋼について最高試験温度を 650°C 一定にして、試験材の熱処理、上、下限の温度差、

Fig. 20 SEH₄ (16Cr, 14Ni, 3W) thermal
cycling (fixed at lower)
{ 300°C (5 min)—650°C (15 min)
{ 200°C (5 min)—650°C (15 min)
{ 100°C (5 min)—650°C (15 min)

Fig. 21 SEH₄ (16Cr, 14Ni, 3W) thermal
cycling (fixed at upper)
{ 650°C (60 min)—300°C (5 min)
{ 650°C (60 min)—200°C (5 min)
{ 650°C (60 min)—100°C (5 min)

Fig. 22 SEH₄ (16Cr, 14Ni, 3W) thermal
cycling (fixed at lower)
{ 300°C (5 min)—650°C (60 min)
{ 200°C (5 min)—650°C (60 min)
{ 100°C (5 min)—650°C (60 min)

Fig. 23 LCN 155 thermal cycling
(fixed at upper)
{ 650°C (15 min)—300°C (5 min)
{ 650°C (15 min)—200°C (5 min)
{ 650°C (15 min)—100°C (5 min)

上, 下限温度保持時間, 上, 下限温度における試験片固定方法の相違などによる試験片破断回数に及ぼす影響を調べた。

(I) 供試材料

Fig. 24 LCN 155 thermal cycling (fixed at lower)

$\left\{ \begin{array}{l} 300^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} - 650^{\circ}\text{C} \text{ (15 min)} \\ 200^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} - 650^{\circ}\text{C} \text{ (15 min)} \\ 100^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} - 650^{\circ}\text{C} \text{ (15 min)} \end{array} \right.$

Fig. 25 LCN 155 thermal cycling (fixed at upper)

$\left\{ \begin{array}{l} 650^{\circ}\text{C} \text{ (60 min)} - 300^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} \\ 650^{\circ}\text{C} \text{ (60 min)} - 200^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} \\ 650^{\circ}\text{C} \text{ (60 min)} - 100^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} \end{array} \right.$

Fig. 26 LCN 155 thermal cycling (fixed at lower)

$\left\{ \begin{array}{l} 300^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} - 650^{\circ}\text{C} \text{ (60 min)} \\ 200^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} - 650^{\circ}\text{C} \text{ (60 min)} \\ 100^{\circ}\text{C} \text{ (5 min)} - 650^{\circ}\text{C} \text{ (60 min)} \end{array} \right.$

Fig. 27 Stress change for 650°C (15 min) - 300°C (5 min) thermal cycling test

試験材料は SEH₄ (A, B), Timken 16-25-6, LCN 155 の 3 種でそれらの分析成分および熱処理条件を Table 1 に示し, Fig. 7~16 に各材料の高温機械的性質を示す. SEH₄ に A, B とあるのは鋼塊の種類が違ったものである. 熱処理は各材料とも固溶化処理のものとこれを時効処理したものにと大別して選んだ。

(II) 試験結果

縦軸に温度振幅, 横軸に試験片破断までの熱サイクルの繰返回数をとって表わした試験結果を Fig. 17~Fig. 26 に示した. 図中でたとえば 650°C (15 分) - 200°C (5 分) とあるのは 上限温度 650°C と下限温度 200°C の繰返しで上限温度における保持時間が 15 分 下限温度における保持時間が 5 分であり, かつはじめに書いた温度, すなわち, 650°C で試験片を固定したものであることを表わしている. 各試験とも試験片の初締め付け応力は 0 にして行なった. 試験中における試験片応力の変化 (1 サイクル中における最大引張応力と最大圧縮応力の絶対値の和) の一例を Fig. 27, 28 に示した。

4. 試験結果に対する考察

間接加熱式繰返熱応力試験結果は以上のとおりであるが, 直接加熱式繰返熱応力試験および高温定ひずみ繰返試験も同様な試験結果が得られている. 各耐熱鋼とも熱疲労強度は熱処理によっておおいに左右され, 回溶化処理だけのものが時効処理を行なったものに比べ強いことが判明した. SEH₄ A の熱処理 4 種については焼鈍状態のものは熱疲労強度がもっとも低く, Max. aging 処理を行なったもの, Over aging 処理のものの順に強く固溶化処理のものがもっとも強くなっている. SEH₄ B, Timken 16-25-6, LCN 155 2 種の熱処理についても固溶化ままのものが時効したものより強い. これらの結果はクリープ破断試験によるものとまったく逆な傾向であるが, これはクリープと熱疲労との金属組織に与える変形機構の相違によるものと考えられる. 本報告には組織顕微鏡写真を掲げてないが, 破断型は粒内型と粒界型の両方で, Franson の熱疲労試験による約 40 % 粒界, 約 60 % 粒内との結果に対比される。

Fig. 28 Stress change for 300°C (5 min) - 650°C (15 min) thermal cycling test

試験片の固定方法の相違による影響は、熱サイクルの上限温度で固定するか、下限温度で固定するかによって熱サイクル中に生ずる応力²⁾の上限と下限の大きさが異なるが、破断サイクル数には大差が認められなかったのは Coffin の試験結果と同様である。熱疲労の繰返速度に対する影響は速度が遅くなれば高温に保持される時間が長くなり、上限温度保持中にクリープならびに応力弛緩が起こる結果、ヒステリシス・ループが増大し、繰返総塑性変形量が増すので寿命が短くなることになるが、Coffin はこれを実験的に確かめているもののデータにはかなりのばらつきが見受けられる。本試験では上限温度保持時間を3種変えて行なったが、その時間範囲では差異が認められなかった。試験片の熱サイクル数の増加に伴う応力変化は、時効処理のものはほぼ一定なのに対し、固溶化のままのものは応力が漸増してひずみ硬化していることがわか

る。

試験結果の表わし方として、温度振幅に対する破断回数をもってしたが、熱サイクルが与えられれば試験機の剛性によって繰返しひずみ量が違うので、温度振幅の代わりに試験片の繰返全ひずみあるいは繰返塑性ひずみ量をとるのが正しく、設計者にも有用であるので、その整理法その他を検討中である。

なお、これら試験機の一部は通産省鉱工業技術試験研究補助金の援助により完成されたものである。

参 考 文 献

- 1) L.F. Coffin and R.P. Wesley, Trans. ASME., Vol. 76, p. 923 (1954)
- 2) L.F. Coffin, Trans. ASME, Vol. 76, 931 (1954)
- 3) L.F. Coffin, Trans. ASME, Vol. 78, 527 (1956)
- 4) L.F. Coffin, ASTM, STP, No 165, 31 (1954)
- 5) 織田, 中島, 三菱造船材研課報, 第 593, 634 号
- 6) A. Fransson, Colloquim on Fatigue, Stockholm (1955)

片持はり方式によるクリープ試験法

[Recent Developments in Creep Testing by the Cantilever Bending Method, by G.T. Harris, H.C. Child, A.B. Collier and C.F. West, J.I.S.I. Vol. 190 (1958) PP 136/143]

著者がさきに (J.I.S.I. 1950) 精密鑄造あるいは粉末冶金法によって製作する簡単な形の試験片により比較的 Rough な試験をするために採用した片持はり方式によるクリープ試験装置を改良して、1000°C~1200°C における精密試験をも行ないうるようにしたものについての報告である。旧試験装置では片持はり(長さ 8 in) のたわみを 1/100 in 目もりのスケールで読んでいたものを、マイクロメーターと片持はりの接触をネオンランプで検出して 0.0001 in までの読み取りを可能としている。0.5 ton/in² 以下の低応力試験に対しては 3 in のはりの自重のみにより負荷し、たわみの測定は 1:1 のレバーにより 炉外に変位を取り出してうえ同様の方法にて行なっている。電気炉は白金ロジウム炉で高温にさらされる部分の材料は G 39 (65 Ni-20 Cr-W-Mo-Nb) および W7 (75 Ni-17

Cr-Mo-Al-Nb) である。なお、このほか以上の装置を Vacuum tube 中に封じ込んで真空中あるいは不活性ガス中における試験を可能としたものについても報告している。この試験法の有用性を証明するために著者はチタニウム合金および 12 クロム鋼についての曲げクリープ試験結果を Tapsell-Johnson の与えた曲げクリープと引張クリープの関係式によって引張クリープ試験結果と対比し、満足な一致 (±10%以内) が得られることを示している。著者はさらにこの種の試験の利点としてクリープひずみの小さい場合の試験法として少ない費用で目的を達しうること、入手しう材料の限られている場合小さい試験片による試験の可能なこと、切削不可能で精密鑄造、粉末冶金とうの方法によらなければ試験片の製作が不可能な場合に試験片の形が簡単であるという意味で有利であること、真空中あるいは不活性ガス中での試験に対して簡単に低廉な装置が用いうることなどの利点をあげ議論を行なっている。

(小寺沢良一)