過渡的温度こう配下の熱疲労寿命に及ぼす 加熱速度および冷却速度の影響*

上 田 太 郎** 田 中 政 夫*** 菅 野 寛***

Effects of Heating Rate and Cooling Rate on the Thermal Fatigue Life under Conditions of Transient Temperature Gradient

by

Taro UEDA,

(Faculty of Engineering, Gifu University, Kagamigahara)

Masao TANAKA and Hiroshi KANNO

(Faculty of Engineering, Osaka University, Osaka)

In the thermal fatigue caused by transient temperature gradients in cross-section, the strain range and the degree of thermal strain restraint seem to be affected by the thermal cycling rate. The following study was performed to make clear the effects of heating and cooling rate on the thermal fatigue life and crack growth behavior of 18-8 and 13Cr steels under conditions of transient temperature gradient.

The results obtained are summarized as follows :

(1) When the heating rate is 100°C/sec (average heating rate to 600°C), the thermal fatigue life $N_{0.1}$ decreases from 10% to 70% of the rate at 200°C/sec. This decrease is understood as the result of the growing tensile strain during the cooling process occasioned by the rising internal temperature of the specimen.

(2) When the heating rate is 300°C/sec (or 250°C/sec for 13Cr steel), the crack growth ratio rises by the increasing degree of thermal strain restraint, but the thermal fatigue life has about the same value as the rate at 200°C/sec. This is the effect of the tensile stress at elevated temperature.

(3) In the case of air cooling, the plastic strain range and the crack growth ratio decrease compared with water cooling, but the thermal fatigue life does not increase perceptively.

(4) From these results, it is evident that under conditions of transient temperature gradient the thermal fatigue life is affected not only by the plastic strain range, but also by the working temperature while the strain and thermal stress act on it, and the remarkable thermal fatigue damage is brought about by the tensile stress introduced on the heating surface at the maximum temperature.

(Received Oct. 28, 1966)

1 緒 言

熱疲労寿命に影響を及ぼす諸因子のうち、熱サイク

ルの速さに関するものとして、前報で述べた最高温度保持時間のほかに加熱・冷却速度の影響が考えられる。

試験片断面がほぼ一様に加熱・冷却され、熱ひずみが試験片外部から拘束される Coffin 形熱疲労試験の場合には、加熱速度が減少すれば供試材が高温にさらされる時間が長くなって、最高温度保持時間を増大したときと同様に、ひずみ硬化の回復のため熱疲労寿命

* 本報を「断面の過渡的温度こう配によって生ずる熱疲労の研究 (第4報)」(Studies on the Thermal Fatigue Originated from the Transient Temperature Gradient in Cross-Section, IV) とする

原稿受理 昭和41年10月28日

** 正 会 員 岐阜大学工学部 各務原市那加門前町

*** 正 会 員 大阪大学工学部 大阪市都島区東野田町9丁目

は少し増大するが、同時に高温における酸化およびぜい化の影響も著しくなることが知られている。^{2,3)} 一方、冷却速度の影響は一般に少ないといわれている。^{2,3)}

しかし、断面の過渡的温度こう配によって生ずる熱疲労の場合には、試験片に生ずる熱ひずみが試験片内部でも拘束されるため、加熱および冷却速度の減少に伴い供試材の熱伝導度に関係して試験片の加熱面に生ずる熱ひずみが減少し、1 サイクル中の熱ひずみ拘束率が低下する。また、熱サイクル速度の減少により、試験片内部温度の上昇の影響が考えられる。

そこで、本報では18-8および13Cr鋼の過渡的温度こう配下の熱疲労寿命に及ぼす加熱・冷却速度の影響を熱疲労過程中的熱ひずみの挙動とき裂成長の様相などの点から追究し、Coffin 形熱疲労試験結果と比較検討を行なった。

2. 供試材および試験方法

試験片は前報⁴⁾のものとその化学成分、熱処理、形状寸法においてまったく同一のものを使用した。

加熱速度は熱疲労試験装置の高周波誘導加熱発振器⁵⁾の出力を制御する方法で変化させ、くさび形試験片の先端の加熱面温度が600℃になるまでの平均加熱速度として100, 200および300℃/sec (13Cr鋼においては250℃/sec)の3種の場合について試験した。一方、冷却は

水冷と空冷で行なった。空冷の場合は試験片周囲に取り付けた冷却槽⁵⁾の代わりに、試験片先端の両側に冷却ノズルを取り付け0.5kg/cm²の圧縮空気を噴射して行なった。なお、空冷だけでは約300℃以下の冷却が困難なため、300℃以下の冷却は噴霧冷却とし、これより熱サイクルの最低温度を水冷の場合と同じ20℃にした。また、空冷の場合は後述のように冷却過程中に引張ひずみが生じないように最高温度で保持時間を与えることなく冷却したが、水冷の場合は保持時間を5 secにした。

さらに、熱疲労寿命に及ぼす熱ひずみ拘束率の影響を究明する目的で、Coffin 形熱疲労試験機を使用して熱ひずみ拘束率約95%と80%、平均温度350℃一定、保持時間なしの条件で円筒状試験片を通电加熱・空冷(加熱・冷却速度約30℃/sec)して試験した。

3 試験結果および考察

Table I は18-8および13Cr鋼の過渡的温度こう配下の熱疲労試験結果(加熱および冷却速度の影響)を総括したものである。ここで N_{01} 、 N_{02} 、 N_{03} は加熱面の平均き裂長さ⁴⁾がそれぞれ0.1, 0.2, 0.3mmになる熱サイクル数⁴⁾。また、Table IIは熱疲労寿命 N_{01} 後のき裂成長率 $(2N_{01}/(N_{03}-N_{01}))$ を示したものである。

3・1 熱疲労寿命に及ぼす加熱速度の影響

Table I. Summaries of the thermal fatigue data of 18-8 and 13 Cr steels under conditions of transient temperature gradient.

Material	Heating rate (°C/sec)	Hold time at max temp (sec)	Cooling method	Temp variation (deg (C))	Number of thermal cycles			Total strain (×10 ⁻⁴)				Stcscs range (kg/mm ²)	Plastic strain range (×10 ⁻⁴)
					N _{o 1}	N _{o 2}	N _{o 3}	Range Δε _T *	Compressive strain ε _{TC}	ε _H **	Tensile strain ε _{TL}		
18-8 steel	100	5	Water cooled	810	90	150	210	140 4	63 4	23 4	77 0	47 8	119 8
				610	138	255	334	100 9	69 1	18 9	31 8	46 2	81.5
	810			100	165	220	153 5	77 7	35 9	75 8	48 4	134.0	
	610			210	385	500	100 0	81 3	39.2	18 7	44 8	80.5	
	810			100	150	195	156 0	96 9	37 0	59 1	49.8	136 0	
	610			200	300	400	116 7	99 4	32 2	17 3	46.3	96 9	
	200	0	Air cooled	810	130	270	455	87 0	87 0	10 0	0	45 8	65 1
				610	540	1110	1600	79 3	79 3	10 0	0	44 0	57 5
13Cr steel	100	5	Water cooled	790	30	60	93	109 9	44 1	33.9	65 8	58 5	89 2
				630	60	190	260	71 5	35 4	8 3	36 1	51 8	50 3
	790			100	195	290	112 2	50 4	39.4	61 8	56 8	103 5	
	630			155	300	430	73 3	33 5	27 5	34 8	51 7	51 8	
	790			105	150	200	118 8	58 8	43 3	60 0	57 8	97 3	
	630			120	170	215	75 6	54 5	44 5	21 1	54 8	55 3	
	200	0	Air cooled	790	160	325	485	56 0	47 7	15 2	8 3	45.5	39 0
				630	240	510	780	41 9	35 4	9 4	6 5	28 8	24 1

* $\Delta \epsilon_T = \epsilon_{TC} + \epsilon_{TL}$

** ϵ_H : Reduction of compressive total strain during heating time and holding process at maximum temperature

Table II. Crack growth ratios.

Heating rate (°C/sec)	Cooling method	Crack growth ratio $2N_{01}/(N_{03}-N_{01})$			
		18-8 steel		13Cr steel	
		$\Delta T=810$ deg (C)	$\Delta T=610$ deg (C)	$\Delta T=790$ deg (C)	$\Delta T=630$ deg (C)
100	Water	1 50	1 41	0 95	0 60
200	Water	1 67	1 45	1 05	1 13
	Air	0 81	1 02	0 99	0 89
250	Water	—	—	2 22	2 53
300	Water	2 10	2 10	—	—

Fig. 1. Changes of heating surface temperature and thermal expansive strains during one thermal cycle.

Fig. 2. Effect of heating rate on thermal fatigue life, total strain and crack-growth ratio.

Fig. 1 は温度振幅約800deg(C)の場合の1サイクル中の加熱面温度 T_0 , 加熱面の自由熱膨張ひずみ $\alpha(T_0 -$

20) および試験片長軸方向の熱膨張ひずみ $\Delta l_{10}/10$ の変化に及ぼす加熱速度の影響を示したものである。試験片の加熱面に生ずる全ひずみは $\varepsilon_e = (\Delta l_{10}/10) - \alpha(T_0 - 20)$ で与えられ, 加熱速度が変化しても 18-8 鋼および 13Cr 鋼とも加熱過程中的試験片長軸方向の熱膨張ひずみの相違が少ないことから, 加熱速度の増大に伴い圧縮全ひずみ量が増大することがわかる。

Fig. 2 は熱疲労寿命 N_{01} , N_{02} , N_{03} , 熱疲労寿命 N_{01} 後のき裂成長率および加熱面の全ひずみ量に及ぼす加熱速度の影響を示したものである。18-8 鋼の場合, 加熱速度 100 および 300°C/sec における熱疲労寿命 N_{01} は温度振幅 810 deg(C) のときそれぞれ加熱速度 200°C/sec の寿命 N_{01} の 0.90 および 1.0 倍を示し, 温度振幅 610 deg(C) のときはそれぞれ 0.66 および 0.95 倍の値を示す。また, 13Cr 鋼の場合でも温度振幅 790 deg(C) のとき, 加熱速度 100 および 250°C/sec の寿命 N_{01} は加熱速度 200°C/sec の寿命 N_{01} のそれぞれ 0.3 および 1.05 倍, 温度振幅 630 deg(C) のときはそれぞれ 0.39 および 0.88 倍を示す。すなわち, 加熱速度 200°C/sec の場合に比べて加熱速度 100°C/sec の場合は寿命の短縮が著しく, 加熱速度 300°C/sec (13Cr 鋼では 250°C/sec) の場合は寿命 N_{01} の変化が少ない。

一方, 熱疲労寿命 N_{01} 後のき裂成長率は加熱速度の増大に伴い大きくなる。また, 加熱速度の増大に伴い, 加熱過程で試験片の加熱面に生ずる圧縮全ひずみ量 ε_{tc} および加熱過程と最高温度保持時間中の圧縮ひずみの減少量 ε_H は増大し, 冷却過程に生ずる引張全ひずみ量 ε_{tt} は減少する(ここで全ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_e = \varepsilon_{tc} + \varepsilon_{tt}$)。

Fig. 3 は加熱速度を変えた場合の 1 サイクル中の加熱

Fig. 3. Changes of temperature and thermal stress on heating surface during one thermal cycle.

面の温度 T_0 と熱応力 σ_T との変化状況を示した一例で 18-8 鋼の温度振幅 810 deg(C) の結果である。図中の各点は前報で述べた力学的状態方程式の概念を用いた図解法により, 引張ひずみ速度 $1 \times 10^{-3}/\text{sec}$ の応力対ひず

み線図から推定した熱応力値を示す。なお、この熱応力値をもとにして算出した1サイクル中の熱応力幅および塑性ひずみ幅の値をTable Iに示した。加熱過程後半と最高温度保持時間中の圧縮全ひずみの減少により試験片の加熱面にはいずれも引張応力が作用していることがわかる。

加熱速度100°C/secの場合、熱疲労寿命 $N_{0.1}$ が加熱速度200°C/secの場合に比べて著しく短縮するのは、加熱速度がおそいため試験片加熱面温度の上昇に伴い試験片内部温度も上昇し、次の冷却過程で大きな温度こう配が生じ、引張全ひずみ量 ϵ_{tt} が増大するためと考えられる。これは、18-8鋼より熱伝導度のよい13Cr鋼のほうが寿命 $N_{0.1}$ の短縮が著しいことから明らかである。なお、1サイクル中の全ひずみ幅および塑性ひずみ幅は加熱速度200°C/secの場合より小さくなる(Table I)ことから、熱疲労寿命は塑性ひずみ幅だけで決定されるものではなく、熱ひずみおよび熱応力の作用する温度に影響されるものと考えられる。

加熱速度300°C/sec (13Cr鋼では250°C/sec) の熱疲労寿命 $N_{0.1}$ と加熱速度200°C/secの寿命 $N_{0.1}$ との差があまり認められないのは、加熱速度が増大すると試験片内部の温度上昇は少なく、またこのため冷却過程で生ずる引張全ひずみ量 ϵ_{tt} は減少するが、加熱過程前半で生ずる圧縮全ひずみ量 ϵ_{cc} が増大する結果 (Fig. 1)、続く加熱過程後半と最高温度保持時間中に圧縮ひずみの減少量 ϵ_{tt} が増大し、高温で試験片の加熱面に引張応力が作用する (Fig. 3) ためと考えられる。

加熱速度の増大に伴い、熱疲労寿命 $N_{0.1}$ 後のき裂成長率が大になるのは、1サイクル中の全ひずみ幅が増大し (Table I)、熱ひずみ拘束率が増大するためと考えられる。

3・2 Coffin 形熱疲労試験結果

Fig. 4はCoffin形熱疲労試験機の拘束支柱の直径を変え、熱ひずみ拘束率を約95%および80%にして18-8鋼、軟鋼および球状黒鉛鋳鉄の熱疲労寿命(破断繰返し数 N)を求めたもので熱サイクルの平均温度が350°C一定の下での結果である。Fig. 4(a)は熱疲労寿命 N と温度振幅、Fig. 4(b)は熱疲労寿命 N と熱応力幅、Fig. 4(c)は熱疲労寿命 N と塑性ひずみ幅との間の関係を示したものである。

熱ひずみ拘束率の減少に伴い、軟鋼と球状黒鉛鋳鉄では塑性ひずみ幅と熱応力幅が減少して熱疲労寿命 N が増大するが、18-8鋼では塑性ひずみ幅は減少するが熱応力幅が逆に増大して寿命 N の差はほとんど認められない。

これらの結果から、Coffin形熱疲労試験の場合にも熱疲労寿命は塑性ひずみ幅のほかに熱応力の影響も受けることが判明し、熱疲労寿命式 $N^k \cdot \Delta \epsilon_p = C$ の定数

Fig. 4. Coffin's type thermal fatigue test results.

k と C には熱応力の影響も含まれるとする鶴戸口らの研究結果と一致する。

3・3 熱疲労寿命に及ぼす冷却速度の影響

Coffin形熱疲労試験においては冷却速度の影響は少ないことが報告されているが、前報および上述の結果から、過渡的温度こう配下の熱疲労においては冷却過程中的引張ひずみにより最も大きな損傷を受ける。また、同時に加熱過程後半と最高温度保持過程中的圧縮ひずみの減少に伴う引張応力によっても熱疲労損傷を受けることが判明している。そこで、冷却を空冷で行ない、水冷の結果と比較し、冷却速度の影響を検討した。

Fig. 5は水冷および空冷の場合の1サイクル中の加熱面温度 T_0 と試験片長軸方向の熱膨張ひずみ $\Delta l_{10}/10$ の変化を示したもので、加熱速度200°C/sec、温度振幅約800deg(C)の結果である。なお、熱疲労寿命 $N_{0.1}$ に及ぼす高温での引張応力の影響を究明するため、空冷の場合には最高温度での保持時間を与えないで冷却し、冷却過程の引張ひずみがなるべく生じないようにして水冷の場合と比較した。

Fig. 6は熱疲労寿命 $N_{0.1}$ 、 $N_{0.2}$ 、 $N_{0.3}$ および1サイクル中の加熱面に生ずる全ひずみ量に及ぼす冷却速度の影響を示したものである。また、Fig. 7は水冷および

Fig. 5. Changes of temperature and thermal expansive strains during one thermal cycle (Heating rate is 200°C/sec).

Fig. 6. Effect of cooling methods on thermal fatigue life and total strains (Heating rate is 200°C/sec).

Fig. 7. Changes of temperature and thermal stress on heating surface during one thermal cycle (Heating rate is 200°C/sec).

空冷の場合の1サイクル中の加熱面の温度と熱応力との変化を示した一例で18-8鋼の温度振幅 810deg (C)の結果である。

Fig. 6 から空冷の場合, 18-8鋼の熱疲労寿命 N_{01} は温度振幅 810 および 610deg (C) でそれぞれ水冷の場合の寿命 N_{01} の 1.3 および 2.6 倍を示し, 13Cr 鋼では温度振幅 790deg (C) のときも 630deg (C) のときも水冷の場合の約 1.6 倍の寿命 N_{01} を示しいずれも増大することが認められる。また, 熱疲労寿命 N_{01} 後のき裂成長率は空冷の場合, 水冷より小さくなることが認められる (Table II)。

空冷の場合でも加熱過程の初期に生ずる圧縮全ひずみ ϵ_{tc} は 18-8 鋼および 13Cr 鋼とも水冷の場合とほぼ同じ値を示す (Table I) が, 18-8 鋼では加熱過程後半の圧縮ひずみの減少量 ϵ_H は水冷の場合の約 27% を示す。このため空冷の場合でも Fig. 7 でみられるように試験片の加熱面には最高温度付近で引張応力が作用し, また, 水冷の場合と異なり冷却過程で引張全ひずみ ϵ_{te} は生じないが, 冷却の全過程で引張応力が作用するため, 温度振幅 810deg (C) のときの熱疲労寿命 N_{01} は水冷の場合より 30% 増大するだけである。また, 温度振幅 610deg (C) の場合寿命が増大するのは最高温度付近における引張応力の影響が減少するためと考えられる。一方, 空冷によって 13Cr 鋼の温度振幅 630deg (C) のときの寿命 N_{01} の増加が水冷の場合の 60% 程度であるのは加熱過程後半の圧縮ひずみの減少量が水冷の場合の約 35% の値を示しているほか, Fig. 5 および Table I から明らかなように冷却過程で水冷の場合の約 20% の引張ひずみが生じているためと考えられる。

なお, 空冷により全ひずみ幅 $\Delta \epsilon_t$ は水冷の場合の 20% から 50% 減少し, また, 塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ も 30% から 60% 減少して熱ひずみ拘束率が低下しているため (Table I), 熱疲労寿命 N_{01} 後のき裂成長率が低下すると考えられる。

4 総 括

18-8 鋼および 13Cr 鋼の過渡的温度こう配下の熱疲労寿命とその後のき裂成長率に及ぼす加熱および冷却速度の影響を追究した。得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 18-8 鋼および 13Cr 鋼とも加熱速度 200°C/sec の場合に比べて, 加熱速度が減少 (100°C/sec) すると塑性ひずみ幅は減少するが加熱面温度上昇に伴う試験片の内部の温度上昇が大となり, 続く冷却過程での引張ひずみが増大して熱疲労寿命 N_{01} が著しく短縮する。一方, 加熱速度が増大 (18-8 鋼では 300°C/sec, 13Cr 鋼では 250°C/sec) しても高温での引張応力の値とその作用時間が加熱速度 200°C/sec の場合と同程度のため寿命 N_{01} はあまり変化しない。

(2) 加熱速度の増大に伴い、熱ひずみ拘束率が增大して熱疲労寿命 $N_{0.1}$ 後のき裂成長率が增大する。

(3) これらの結果から、過渡的温度こう配下の熱疲労寿命は塑性ひずみ幅だけで決定されるものでなく、熱ひずみおよび熱応力の作用する温度に影響されることが判明した。

(4) 熱ひずみ拘束率を変えて18-8鋼、軟鋼および球状黒鉛鑄鉄に関して行なった Coffin 形熱疲労試験結果から、断面が一樣に加熱・冷却される熱疲労の場合にも、熱疲労寿命は塑性ひずみ幅のほかに熱応力の影響を受けることが明らかになった。

(5) 空冷によって冷却速度が減少すると熱ひずみ拘束率が低下するため熱疲労寿命 $N_{0.1}$ 後のき裂成長率は減少するが、熱サイクルの最高温度が高い（温度振幅が大きい）場合には最高温度における引張応力の作用で水冷の場合に比べて寿命 $N_{0.1}$ はそれほど増加しない。

(昭和41年9月8日 第10回材料試験連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 上田太郎, 田中政夫, 菅野 寛, 材料, **16**, 228 (1967).
- 2) 鵜戸口英善, 加藤則忠, 山根雅巳, 機械学会誌, **68**, 17 (1965).
- 3) 河本 実, 仲嶋 浩, 野中寿夫, 淵上泰宏, 東村員正, 日本機械学会論文集, **29-299**, 738 (1963).
- 4) 上田太郎, 田中政夫, 菅野 寛, 材料, **15**, 589 (1966).
- 5) 上田太郎, 田中政夫, 菅野 寛, 材料, **14**, 904 (1965).
- 6) Dorn, J.E., "Mechanical Behavior of Materials at Elevated Temperature", p. 356 (1961) McGraw-Hill Book Co.
- 7) Willhelm, A.C., and J.R. Kattus, Proc. ASTM, **63**, 613 (1963).