過渡的温度こう配下の熱疲労寿命に及ぼす 最高温度保持時間の影響*

上 田 太 郎** 田 中 政 夫*** 菅 野 寛***

Effect of the Holding Time at Maximum Temperature 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)

Investigations were made of the 18-8 and 13Cr steels that had been exposed to the thermal fatigue under conditions of transient temperature gradient as to what was the effect of their holding time on them at maximum temperature and what was their crack-growth behavior in comparison with the results of Coffin's type thermal fatigue.

In the case of Coffin's type the thermal fatigue in which the cross-section of specimen was thermal-cycled uniformly and the thermal strain was restrained by outer supports, it was seen that the compressive stress was introduced in the specimen during the holding process at maximum temperature and the thermal fatigue life was prolonged as the holding time was prolonged by the recovery of strain hardening at elevated temperature.

But in the thermal fatigue under conditions of transient temperature gradient, though it had the same relationship between the plastic strain range and thermal fatigue life as that in the Coffin's type thermal fatigue and in addition the crack-growth ratio reduced with increasing the holding time, the thermal fatigue lives decreased as the holding time at maximum temperature was prolonged. It was likely that the working time of tensile stress on heating surface was prolonged by raising the internal temperature of the specimen during the holding process at maximum temperature.

(Received July 25, 1966)

1 緒 言

熱疲労試験において、最高温度保持時間は熱サイクル速度と試験片が高温にさらされる時間に関係し、従来の試験片断面が一樣に加熱・冷却される Coffin 形熱疲労試験では、最高温度保持時間の増加は熱サイクル速度の緩和とひずみ硬化の回復により熱疲労寿命を少し増大させることが報告されている。

しかし、試験片断面の過渡的温度こう配によって生ずる熱疲労においては、これらのほかに最高温度保持

時間の増大に伴う試験片内部の温度上昇の影響が考えられる。これについては前報⁵⁾でも少し述べたが、加熱過程中に試験片加熱面に生ずる圧縮ひずみがこの温度上昇により減少し、その結果供試片に大きな熱疲労損傷を与える。そこで本報ではこのような過渡的温度こう配下の熱疲労寿命に及ぼす最高温度保持時間の影響をいっそう明確にするため、前報⁶⁾に引き続き高周波誘導加熱・水冷方式熱疲労試験機（くさび形試験片使用、曲げモーメント拘束形）を用い、18-8鋼および 13Cr 鋼について追究した。また、これらの結果はさらに Coffin 形熱疲労試験結果と比較し、検討を行なった。

2 供試材および試験方法

供試材および試験片の形状寸法は前報におけるものとまったく同一である。Fig. 1 は 20~800℃の温度範

* 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3報）」(Studies on the Thermal Fatigue Originated from the Transient Temperature Gradient in Cross-Section, III) とする

原稿受理 昭和41年7月25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

Fig. 1. Stress-strain curves of specimens (Tensile strain rate is constant, $1 \times 10^{-3}/\text{sec}$).

図における供試18-8鋼および13Cr鋼の定引張りずみ速度下の応力対ひずみ線図の一部を示したものである(後述の過渡的温度こう配下の熱疲労試験における試験片加熱面の熱応力は Fig. 1 を用いて推定した)。

Coffin 形熱疲労試験においては18-8鋼(SUS 27)、軟鋼(SS 41)および球状黒鉛鑄鉄の中空円筒状試験片を試験に供し、熱サイクルの平均温度一定の下で最高温度保持時間が0, 10および20 secの場合の熱疲労試験を行ない、熱疲労寿命(N , 破断繰返し数)に及ぼすこれらの保持時間の影響を究明した。また、過渡的温度こう配下の熱疲労試験においてはくさび形試験片で試験を行ない、熱サイクルの下限温度を一定(20°C)に保って供試18-8鋼(SUS 27)および13Cr鋼(SUS 51)に高周波誘導加熱(加熱速度約200°C/sec)、最高温度保持(5, 10および20 sec)および水冷の熱サイクルを繰り返して熱疲労寿命(N_0 , 加熱面の平均き裂成長さが0.1mmになる熱サイクル数)とその後のき裂成長の様相を追究した。

3 試験結果および考察

3・1 Coffin 形熱疲労試験結果

Fig. 2 は Coffin 形熱疲労試験機を用いて平均温度を350°C一定に保ち最高温度保持時間を0, 10および20 secとした場合の18-8鋼, 軟鋼および球状黒鉛鑄鉄の熱疲労試験結果である。保持時間10 secの場合, 温度振幅が400 deg(C)のとき, 18-8鋼, 軟鋼および球状黒鉛鑄鉄の熱疲労寿命 N は保持時間0 secの場合のそれぞれ1.6, 1.4および4.3倍となり, また, 温度振幅が250 deg(C)のときはそれぞれ1.1, 1.1および1.6倍となった。高温保持時間が20 secの場合は,

Fig. 2. Effect of holding time at maximum temperature on the thermal fatigue life (Mean temperature 350°C).

Fig. 3. Changes of thermal stress and temperature during one thermal cycle (Coffin's type thermal fatigue testing machine).

温度振幅が250 deg(C)のときには18-8鋼と球状黒鉛鑄鉄では保持時間10 secの場合より寿命 N は大きい, 軟鋼では著しい寿命の短縮が認められる。また, 温度振幅が400 deg(C)のときにはいずれの供試材も保持時間10 secの場合より寿命 N が短縮している。

Fig. 3 は試験片に生ずる熱応力の変化を示したもので, 平均温度350°C, 温度振幅400 deg(C)のときの結果である。保持時間の増加に伴い, 熱サイクル速度の緩和と高温におけるひずみ硬化の回復が大きくなって, 最高温度保持時間が10 secの場合, 各供試材とも保持時間0 secの場合より寿命が増大する。しかし, 保持時間が20 secの場合は温度振幅が大きくなると,

Fig. 4. Effect of holding time at maximum temperature on the thermal fatigue life.

熱サイクルの最高温度における酸化の影響が著しくかえって寿命が短縮する。なお、軟鋼の温度振幅 250 deg (C) における著しい寿命の短縮は前報で述べたように青熱ぜい性のためと考えられる⁵⁾。

Fig. 4 は平均温度 500°C の場合の球状黒鉛鋳鉄の寿命および平均温度 650°C の場合の 18-8 鋼の寿命に及ぼす最高温度保持時間の影響を示したものである。球状黒鉛鋳鉄の保持時間 20 sec のときの熱疲労寿命は最高温度における酸化の影響のため温度振幅に関係なく保持時間 10 sec のときの寿命より小さくなる。18-8 鋼では最高温度保持時間の増大に伴い熱疲労寿命が短縮するが、これは最高温度が 775°C であるため保持時間中の炭化物の析出や σ 相の析出などによるぜい化が原因と考えられる。

このように最高温度保持時間の増大に伴い、温度振幅の小さい場合は熱疲労寿命 N が増大するが、温度振幅が大きい場合および平均温度が高い場合は最高温度における酸化の影響で熱疲労寿命が短縮し、特にぜい化を起こす温度領域では寿命の減少が著しいことが判明した。

Fig. 5 は平均温度 350°C 一定の下で最高温度保持時間を 0, 10 および 20 sec に変えた場合の塑性ひずみ⁵⁾ $\Delta\epsilon_p$ と破断繰返し数 N との関係を、また Table I は得られた実験式 $N^k \cdot \Delta\epsilon_p = C$ の定数 k と C の値を

Fig. 5. Relationship between number of cycles to fracture and plastic strain range.

Table I. Summaries of constant k and C in equation $N^k \cdot \Delta\epsilon_p = C$ (From Fig. 5).

Holding time at max temp (sec)	18-8 steel		Mild steel		Nodular cast iron	
	k	C	k	C	k	C
0	0.56	0.23	0.36	0.032	0.67	0.14
10	0.55	0.26	0.32	0.034	0.72	0.36
20	0.33	0.085	(Blue-shortness)		0.40	0.036

示したものである。保持時間 10 sec の場合、定数 k の値は保持時間 0 sec の場合とほとんど変わらず、また定数 C は増大していることが認められ、最高温度保持時間は実験式 $N^k \cdot \Delta\epsilon_p = C$ において供試材の塑性変形能の大きさを示す定数 C に影響を及ぼす因子であると考えられる。保持時間が 20 sec になると最高温度における酸化の影響で温度振幅の大きい所で熱疲労寿命 N が短縮して定数 k が減少し、このため定数 C も減少することが認められる。

3・2 過渡的温度こう配下の熱疲労試験結果

Fig. 6 は温度振幅約 800 deg (C) の場合の試験片加熱面温度 T_0 および試験片長軸方向の熱膨張ひずみ $\Delta l_0/10$ の変化を示したものである。18-8 鋼では最高温度保持時間の増大に伴い、試験片内部の温度が上昇して試験片長軸方向熱膨張ひずみが増大するが、13Cr 鋼では 18-8 鋼に比べて熱伝導度が約 50% 程度大きい⁶⁾ため、試験片内部の温度上昇が早く、保持時間の増大に伴う試験片長軸方向の熱膨張ひずみの増加が少ない。

Table II は過渡的温度こう配下の熱疲労寿命 N_0 およびその後のき裂成長 (平均き裂長さ 0.2 および 0.3 mm になる繰返し数 $N_{0.2}$, $N_{0.3}$) に及ぼす最高温

Fig. 6. Changes of heating surface temperature T_0 and thermal expansive strains during one thermal cycle.

Table II. Effect of holding time at maximum temperature on the number of thermal cycles to definite crack length.

Specimen	Temp amplitude, deg (C)	Holding time at max temp (sec)	Number of thermal cycles to definite crack length			Crack growth ratio $\frac{2N_{0.1}}{(N_{0.3}-N_{0.1})}$
			Average crack length (mm)			
			0 1	0 2	0 3	
18-8 steel	810	5	100	165	220	1 67
		10	75	140	200	1 29
		20	40	80	125	0 94
	610	5	210	385	500	1 45
		10	130	210	280	1.73
		20	75	160	235	0.94
13 Cr steel	790	5	100	195	290	1 05
		10	50	90	125	1 33
		20	30	50	75	1 33
	630	5	155	300	430	1.13
		10	80	160	270	0 84
		20	55	95	180	0 88

Table III. Total strain on heating surface during one thermal cycle.

Specimen	Temp. amplitude, deg (C)	Holding time at max temp. (sec)	Total strain, ϵ_T ($\times 10^{-4}$)			
			Total strain range, $\Delta\epsilon_T$	Compressive strain, $-\epsilon_c$	Tensile strain, $+\epsilon_t$	ϵ_H^*
18-8 steel	810	5	153.5	77.7	75.8	35.9
		10	177.7	87.6	90.1	53.5
		20	183.3	87.1	96.2	68.6
	610	5	100.0	81.3	18.7	39.2
		10	123.0	79.9	43.1	48.9
		20	137.4	78.5	58.9	66.0
13 Cr steel	790	5	112.0	50.4	66.8	39.4
		10	116.0	43.2	67.8	45.5
		20	119.5	55.0	64.5	54.9
	630	5	73.3	38.5	34.8	27.5
		10	96.5	41.7	54.8	41.5
		20	100.5	40.8	59.7	41.5

* ϵ_H : Reduction of compressive strain during holding time at maximum temperature

度保持時間の影響を示したものである。両鋼とも保持時間の増大に伴い熱疲労寿命 $N_{0.1}$ は短縮する。また、熱疲労寿命 $N_{0.1}$ 後のき裂成長率(熱疲労寿命 $N_{0.1}$ 後のき裂成長速度 $(0.2\text{mm}/(N_{0.3}-N_{0.1}))/$ 熱疲労寿命 $N_{0.1}$ までのき裂成長速度 $(0.1\text{mm}/N_{0.1})=2N_{0.1}/(N_{0.3}-N_{0.1})$)は保持時間の増大により熱サイクル速度が緩和される

ため小さくなる傾向にあるが、13 Cr鋼の温度振幅790 deg (C) の場合は最高温度における酸化の影響で寿命の短縮も大きく、き裂成長率も大きくなっている。

Table III は1サイクル中に試験片の加熱面に生ずる全ひずみ幅 $\Delta\epsilon_t$ 、引張全ひずみ量 $+\epsilon_t$ 、圧縮全ひずみ量 $-\epsilon_c$ および最高温度保持時間中の圧縮ひずみの減少量 ϵ_H を示したものである。保持時間が増加しても圧縮全ひずみ量はほとんど変化しないが保持時間中の圧縮全ひずみの減少量が増加し、このため冷却過程中的引張全ひずみ量が增大して全ひずみ幅が増大する。Coffin 形熱疲労試験においては、最高温度保持時間中のひずみの変化は最高温度における応力緩和が主であるが (Fig. 3)、過渡的温度こう配下の熱疲労においては、保持時間中にも試験片内部の温度が変動し、このため、保持時間の増大に伴い加熱過程の前半に生じた圧縮全ひずみの減少量と、冷却過程に生ずる引張ひずみ量が增大して、熱疲労寿命 $N_{0.1}$ が短縮するものと考えられる。なお、これらの熱ひずみの大きさは加熱・冷却方法、試験片の形状・寸法および供試材の熱伝導度に関係し、13 Cr 鋼のほうが18-8鋼より熱伝導度が大きいので、最高温度保持時間中の試験片内部温度上昇が大きくなり、保持時間の増大に伴う寿命 $N_{0.1}$ の短縮が大きい。

これらの結果から、過渡的温度こう配下の熱疲労損傷は最高温度保持時間中の圧縮ひずみの減少と冷却過程中的引張ひずみおよび高温における酸化の合成効果によって生ずるものと考えられる。

加熱と負荷が同時に作用する過渡の状態の下での応力解析は一般に非常に複雑であるが、Willhelm⁸⁾ は近年 Ludwick の力学的状態方程式 $\sigma=f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ の概念⁹⁾を用いて、静的引張試験の応力対ひずみ線図から過渡の状態の応力対ひずみ特性を推定する図解法を発表

Fig. 7. Behavior of thermal strain during one thermal cycle and thermal stress analysis method.

している。本研究においても、この方法を適用して、過渡的温度こう配下の熱疲労で生ずる熱応力と塑性ひずみ幅との関係を以下に解析した。

Fig. 7 は熱応力および塑性ひずみ幅の解析方法を示したものである。Fig. 7 (a) は著者らの試験機における加熱・冷却の 1 サイクル中の加熱面の温度振幅 ΔT および試験片長軸方向の熱膨張ひずみ $\Delta l_{10}/10$ の時間的变化で、試験片の加熱面に生ずる全ひずみ $\{\epsilon_t = (\Delta l_{10}/10) - \alpha \cdot \Delta T\}$ は点 0-1-2-3-4 のように変動する。Fig. 7 (b) は力学的状態方程式の概念を用いた熱応力の図解法で、横軸に全ひずみ、縦軸に熱応力 σ_T をとり、破線で示したような各温度における応力対ひずみ線図（一定引張ひずみ速度）を求めておけば、Fig. 7 (a) の全ひずみの変動につれ、Fig. 7 (b) 上で熱応力の変化（点 1-2-3-4-1）が求まる。また、点 1 と点 3 の応力が求まれば、全ひずみ幅 $\Delta \epsilon_t$ から各点の弾性ひずみを差し引くことにより塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p = \bar{a} \cdot b$ が算出できる。一般に繰返し塑性変形を受ける場合には、応力対ひずみ線図の形状が変化し、また、高温におけるクリープおよび応力緩和などのため、このような方法で求めた熱応力と実際に加熱面に生ずる熱応力とは多少絶対値において異なるも、1 サイクル中の熱応力の変化および最大応力の生ずる時期などは正しく示されるものと考えられる。

本研究で行なった熱疲労試験の熱ひずみ速度の範囲は $4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ から $1 \times 10^{-4}/\text{sec}$ であるが、この範囲のひずみ速度でひずみの小さい所では応力対ひずみ線図にきほど相違が認められなかったので、熱応力の解析には引張ひずみ速度 $1 \times 10^{-3}/\text{sec}$ の応力対ひずみ線図 (Fig. 1) を用いて行なった。

Fig. 8 はこの方法で求めた 18-8 鋼の温度振幅 $\Delta T = 810 \text{ deg (C)}$ の場合の 1 サイクル中の熱応力と加熱面温度との関係を示した一例である（図中の○印および●印の各点はそれぞれ最高温度保持時間 10 および 20 sec のときの 1 サイクル中の熱応力の値を示し、Fig. 7 で述べた図解法で求めたものである）。熱ひずみが外

Fig. 8. Changes of temperature on heating surface and thermal stress during one thermal cycle (Heating rate is $200^\circ\text{C}/\text{sec}$).

部拘束される Coffin 形熱疲労試験では最高温度保持時間中は圧縮応力が作用するが (Fig. 3), 断面の過渡的温度こう配下の熱疲労においては熱ひずみが試験片自体でも拘束され、加熱過程の後半および最高温度保持時間中の圧縮ひずみが減少する過程で加熱面には引張応力が作用し、保持時間が增大するに伴い、高温で引張応力の作用する時間が長くなることが認められる。また、冷却過程の引張応力の大きさはほとんど同じであることから、最高温度保持時間の増大に伴う熱疲労寿命 N_{01} の短縮はこの高温保持時間中の引張応力の影響と考えられる。

Fig. 9 は熱疲労寿命 N_{01} と 1 サイクル中の塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ との関係を示したものである。両供試材

Fig. 9. Relationship between thermal fatigue life N_{01} and plastic strain range $\Delta \epsilon_p$.

とも最高温度保持時間 5 sec のとき Coffin 形熱疲労試験結果と同様に $N_{01} \cdot \Delta \epsilon_p^k = C$ の関係が認められ、18-8 鋼では $k=0.61$, $C=0.21$; 13Cr 鋼では $k=1.6$, $C=27$ となっている。最高温度保持時間が増すに従い、18-8 鋼では塑性ひずみ幅が増加し、熱疲労寿命 N_{01} が短縮する。また各保持時間の関係直線のこう配はほぼ等しく、過渡的温度こう配下の熱疲労においても保持時間は定数 C に影響を及ぼすことが判明した。しかし、13Cr 鋼の温度振幅 790 deg (C) の場合に認められるように、高温における酸化の影響が著しいときには、保持時間が増大しても、塑性ひずみ幅はほとんど変化しないが、熱疲労寿命 N_{01} は著しく短縮する。

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最高温度保持時間の影響を追究し、Coffin 形熱疲労試験結果と比較検討した。得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 試験片断面がほぼ一様に加熱・冷却される Coffin 形熱疲労試験においては、熱サイクル中における最高温度保持時間の増大に伴い、熱サイクル速度の緩和とひずみ硬化の回復などにより熱疲労寿命は一度増大するが、さらに保持時間が増すと高温における酸化の影響で熱疲労寿命は短縮する。また熱サイクルが

供試材のぜい化温度範囲を含む場合も寿命の短縮が認められた。

(2) 断面の過渡的温度こう配によって生ずる熱疲労においても、熱疲労寿命 $N_{0.1}$ と塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ との間には Coffin 形熱疲労試験結果と同様に $N_{0.1}^k \cdot \Delta \varepsilon_p = C$ の関係が認められ、最高温度保持時間は定数 C に関係し保持時間が増大すると酸化の影響の少ない場合には定数 k はほとんど変わらず定数 C が減少する。

(3) また、最高温度保持時間が増大すると熱疲労寿命 N_0 、後のき裂成長率は低下する傾向にあることが認められた。

(4) しかし、過渡的温度こう配下の熱疲労においては加熱面の温度を最高温度に保持している間にも試験片内部温度が上昇し、加熱面には加熱過程後半と最高温度保持時間中に引張応力が作用し、保持時間の増大に伴い、この引張応力の作用時間が長くなる。この結果、この引張応力と冷却過程で生ずる引張応力および高温における酸化の影響などで最高温度保持時間が増大するにつれ熱疲労寿命が短縮してくる。

(昭和41年5月18日 日本材料学会第15期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Coffin, L.F., and R.P. Wisley, Trans. ASME, **76**, 923 (1954).
- 2) 平修二, 大南正瑛, 機械の研究, **13**, 1 447 (1961).
- 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, **29-200**, 738 (1963).
- 4) 鶴戸口英善, 加藤則忠, 山根雅巳, 機械学会誌, **68**, 17 (1965).
- 5) 上田太郎, 田中政夫, 菅野寛, 材料, **15**, 589 (1966).
- 6) 上田太郎, 田中政夫, 菅野寛, 材料, **14**, 904 (1965).
- 7) 上田太郎, 菅野寛, 第6回材料試験連合講演会前刷, p. 29 (1962).
- 8) Willhelm, A.C., and J.R. Kattus, Proc. ASTM, **63**, 613 (1963).
- 9) Dorn, J.E., "Mechanical Behavior of Materials at Elevated Temperatures", p.356 (1961) McGraw-Hill Book Co.