

# Fe-Cr 合金, 定常クリープの応力依存性と Cr 炭化物の効果

The Stress Dependency of Steady State Creep of Fe-Cr Alloys and the Effect of Cr Carbides

宮原 一哉\*・石田 洋一\*

Kazuya MIYAHARA and Yoichi ISHIDA

## 緒 言

金属の高温強度を高める機構として, 固溶強化機構と分散強化機構とがある. 実用耐熱合金において分散強化は重要な因子であり<sup>\*1</sup>, この因子の高温強度への寄与を定量的に評価し, 強化機構を解明することは, 重要である. 分散粒子により強化された金属のクリープ挙動についての研究は多いが, その強化機構は, なお, ほとんど明らかにされていない.

一般に純金属, 固溶合金において, クリープ歪速度  $\dot{\epsilon}$  は,

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n e^{-Q_c/kT} \quad (1)$$

で表わされ ( $A, n$ ; 定数,  $\sigma$ ; クリープ応力,  $Q_c$ ; 原子の自己拡散エネルギー)  $n$  は 3~6 の値をとる. この  $n$  値の理論的説明も多くの研究者により, 試みられている.

分散強化合金についても, (1)式と同様な形で, 歪速

度が, 表現されているが,  $n$  値の理論的説明は, Ansellらが試みているのみである<sup>1)</sup>. しかし, 彼らの理論値は従来の主な実験結果 (表 1) と比較してみると, 必ずしも一致しない. それゆえ, 分散強化合金においては, 歪速度と, 応力, 温度との関係の説明は十分にためされていないといえる.

本実験は分散強化合金のクリープ歪速度と応力との関係を明らかにし, 析出物の効果を理解する目的で行なった.

## 実 験

真空溶解により得た試料の化学成分を表 2 に示す. 表の 3 個の試料を  $1150^\circ\text{C} \times \frac{1}{2}$  hr の溶体化処理後, 油中に焼入れ,  $800^\circ\text{C} \times 1$  hr の焼戻し焼鈍を行ない, 炉冷しクリープ試験片に切削加工した<sup>\*2</sup>. クリープ試験は,  $500^\circ, 600^\circ, 700^\circ\text{C}$  の温度で行なった.

Table 1

alloys	temperature conditions	$n$	$Q_c$ kcal/mole	investigators	literatures
Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (SAP)	540°~660°C (Tm) 660°~735°C	>10	300 190	C. L. Meyer, O. D. Sherby et al	2, 3
Ni-ThO <sub>2</sub> (2.3 vol%)	325°~590°C (0.5 Tm) 590°~1100°C	40	190 46~57	B. A. Wilcox, A. H. Clauer	4
Ni-Cr-ThO <sub>2</sub> (21%) (2.2~2.6vol%)	820°~1040°C (transverse to rolling direction) (parallel to R. D.)	9.7 24.3		B. A. Wilcox et al	5
Ni-Cr-ThO <sub>2</sub> (23%) (1.1wt %)	700~1100°C (recrystallized)	7.2	74	B. A. Wilcox, A. H. Clauer	6
Ni-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1.0wt %)	800°C (as extruded) (20% swaged) 700°C (as extruded) 800°C (as extruded) 650°C (recrystallized) 800°C (recrystallized)	7.8 12.1 11.1 9.1 6.5 4.3	} 92 } 34~72	高橋 飯田 足立	7, 8, 9
Pb-PbO (2.0~2.5wt %)	20°C at high stress at low stress	~27 ~6		K. U. Snowden	10
18Cr-14Ni-C (40ppm) 18Cr-12Ni-Mo (2.6%) 18Cr-12Ni-Ti (0.26%)	650°C 650°C 650°C	5.3 10 17	80 95 140	太田	11

\* 東京大学生産技術研究所 第 4 部

Table 2 Chemical Compositions (wt%)

Specimen	Cr	C	Mn
Fe	Nil	0.009	0.16
Fe-12Cr	11.96	0.009	0.12
Fe-12Cr-C	12.69	0.14	0.29

実験結果

(1) 式の応力指数を求めるために、クリープ試験の結果を、 $\log \dot{\epsilon} \sim \log \sigma$  の関係で図示すると、図 1, 2 となる。各温度において  $n$  値を求めて整理すると表 3 となる。実験結果の注目される事項を箇条書にすると、

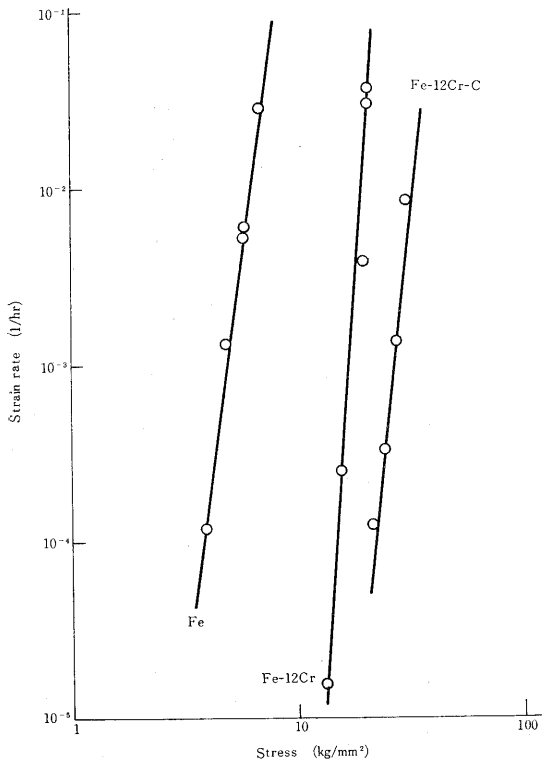


Fig. 1 The creep strain rate-stress relations at 500°C (~0.45Tm)

(1) 析出物あるいは固溶 Cr により、同じ応力下でのクリープ歪速度は、純鉄にくらべ、およそ  $10^{-3} \sim 10^{-10}$  倍小さくなる。また同じクリープ歪速度を与える応力は、2~10 倍高まる。Cr 固溶強化と析出強化とを比較すると、低温側では、Cr 固溶強化も大きい、高温側では小さくなる。一方、析出強化は高温側でも大きい。

(2) 純鉄において、 $n$  値は、およそ 9 で従来の純金属のほぼ 5 の値にくらべ、かなり大きい。純鉄の伸びは、Fe-Cr 合金にくらべ大きく、応力が高い時、歪 0.1 位のところから定常クリープになるので、それまでの断面積変化が大きく、最初に予定した応力での一定応力クリープ試験条件が満足されないため、応力指数はみかけ上

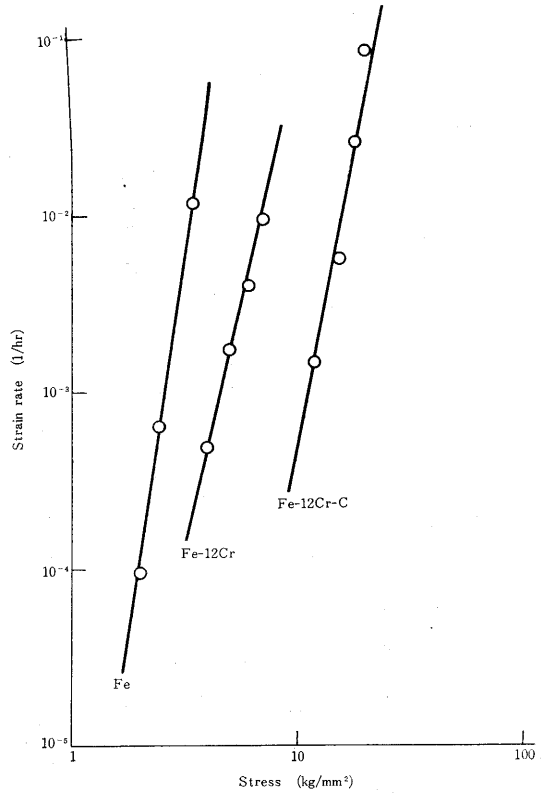


Fig. 2 The creep strain rate-stress relations at 600°C (~0.50Tm)

大きくなるが、それを補正しても、なお 7.5~8 で従来の値より大きい。

Table 3  $n$  values.

Specimen	500°C (0.45 Tm)	600°C (0.50 Tm)	700°C (0.55 Tm)
Fe	9.5	9.0	—
Fe-12Cr	15	5.2	6.1
Fe-12Cr-C	9.0	6.8	5.8

(3) Fe-Cr 合金においては、600°, 700°C で析出物の有無にかかわらず、 $n$  値はおおよそ 6 である。500°C においては、 $n$  値は大きい。しかし、析出物が存在すると、かなり小さくなる。

考察

本実験では、析出物により、 $n$  値がどのように変わるかを調べることに主眼をおいたが、実験結果から、以下の (a), (b) が知られた。

- (a) 試験温度が高くなるにつれ、 $n$  値は小さくなる。
- (b) 析出物が存在する場合、一相金属にくらべ、低温側では、 $n$  値は小さくなる。しかし、高温側では、ほぼ同じである。

(a) については従来の結果 (表 1) と同じ傾向が現われ

研究速報 . . . . .  
 ているが、(b)の事実は、今まで、調べられたことがない。このように、 $n$  値は、温度とともに変わり、また析出物の効果が、必ずしも、はっきりと  $n$  値のちがいで、現われるものでないことが明らかになった。

これらの原因は次のように考察できる。 $n$  は (1) 式によれば

$$n = \frac{d \log \dot{\epsilon}}{d \log \sigma} = \left( \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}} \right) \times \left( \frac{d\dot{\epsilon}}{d\sigma} \right)$$

の意味を持つ。すなわち  $n$  は、 $\sigma/\dot{\epsilon}$  と  $d\dot{\epsilon}/d\sigma$  との積で表わされる

Table 4 Experimental Values of  $\frac{\sigma}{\dot{\epsilon}}$  and  $\frac{d\dot{\epsilon}}{d\sigma}$

Specimen	$\sigma/\dot{\epsilon}$	$d\dot{\epsilon}/d\sigma$
Fe-12Cr-C at 20kg/mm <sup>2</sup> 500°C	$4.0 \times 10^8$	$2.1 \times 10^{-5}$
Fe-12Cr-C at 20kg/mm <sup>2</sup> 600°C	$2.9 \times 10^8$	$3.4 \times 10^{-2}$
Fe-12Cr at 20kg/mm <sup>2</sup> 500°C	$2.5 \times 10^8$	$6.9 \times 10^{-3}$

実験データから  $\sigma/\dot{\epsilon}$ ,  $d\dot{\epsilon}/d\sigma$  について、おおよその値を求めると表 4 となる。(ある一定の応力での値を求めた) この表から知られるように、 $\sigma/\dot{\epsilon}$ ,  $d\dot{\epsilon}/d\sigma$  は、温度の変化、あるいは、析出物の有無により大きく変わり、しかも、その変わり方は、増減が互いに逆である。このように  $n$  値は、大きくなる項と小さくなる項との積で表わされるので、両項の変化のバランスのとれ方により、大きくも、小さくもなると考えられる。

従来、分散強化合金の  $n$  値は、一相金属にくらべ、大きくなるのが指摘されてきたが、その原因は、明らかにされていなかった。筆者らは、上の考察の結果、分散強化により、 $n$  値が大きくなるのは、 $\sigma/\dot{\epsilon}$  の項、すなわちある歪速度と、それを与える応力との比が、 $d\dot{\epsilon}/d\sigma$  の減少量を上まわって大きくなるのが原因と考える。しかし、分散強化機構が、働くことにより、 $\sigma/\dot{\epsilon}$  が大きくなることは、容易に理解できるが、 $d\dot{\epsilon}/d\sigma$  が小さくなることは必ずしも、明白ではない。

また、温度が高くなるに従い、 $n$  値が小さくなることは、 $\sigma/\dot{\epsilon}$  と  $d\dot{\epsilon}/d\sigma$  の変化のバランスがしだいに一相金属

のそれに近づくことを示すが、これらの詳細な機構の理解は今後の研究課題としたい。

本実験は、筆者の一人の大学院在学当時、荒木教授、藤田助教授の御指導下で行なった研究の一部延長であることを付記し、両先生に感謝の意を表したい。

\*1 “分散強化”と呼ぶ場合、ここでは、析出強化を含めて考えることにする。一般には、分散粒子にくらべ、析出粒子は、高温では、不安定で粗大化する点で、同一に考えられない場合もあるが、析出粒子が安定で長範囲のひずみ場をもたない場合転位のすべりを妨げる機構としては同じであると考えられる。

\*2 Fe-12Cr-C においては、Cr 炭化物 ( $Cr_{23}C_6$ ) が析出する。固溶炭素量が、問題になるが、状態図では<sup>12)</sup>、700°C においても、炭素の固溶限は小さく (大きくても 0.04% 以下) また、内部まさつ法のスネークピーク測定によると、固溶炭素は、存在するとしても、数 ppm の量であるので、固溶炭素量は、純鉄、あるいは、他の Fe-Cr 合金と同じとしてよいと考えられる。

(1969年6月29日受理)

#### 文献

- 1) G. S. Ansell, J. Weertman Trans AIME 215 (1959) 838
- 2) C. L. Meyer, O. D. Sherby J. Inst. Metals 90 (1961~62) 380
- 3) O. D. Sherby, P. M. Burke Mechanical Behavior of Crystalline Solids at Elevated Temperatures (1968) p.380
- 4) B. A. Wilcox, A. H. Clauner Trans AIME 236 (1966) 570
- 5) B. A. Wilcox, A. H. Clauner, W. S. McCain 同上 239 (1967) 1791
- 6) B. A. Wilcox, A. H. Clauner Metal Sci. Journal 3 (1969) 26
- 7) 高橋, 飯田, 足立 日本金属学会誌 28 (1964) 334
- 8) 高橋, 飯田, 足立 同上 28 (1964) 560
- 9) 高橋, 足立 同上 30 (1966) 10
- 10) K. U. Snowden J. Materials Sci. 2 (1967) 324
- 11) 太田, クリーブシンボジュウム予稿 (1969年6月) 26
- 12) V. K. Bungardt, E. Kuze, E. Horn Arch. Eisenhütt. p. 29 (1958) 193
- 13) Yu. V. Piguzov, M. E. Alekseenko et al Relaxation Phenomena in Metals and Alloys (1963) p. 46