

## クリープ損傷を受けた Cr-Mo 鋼の高温での機械的性質

塚本光夫・妻鹿雅彦\*

### Mechanical Properties at Elevated Temperature of Cr-Mo Steel Subjected to Creep Damage

Mitsuo TSUKAMOTO and Masahiko MEGA\*

(Received September 1, 1997)

The accumulation of microstructural damage in materials subjected to quasi-static long-term loading at elevated temperature occasionally affects the service life of the structures, e.g. reactor vessels. This damage, for example, brings lower ductility and toughness of a material than in its initial condition as well as lower creep strength so that the risk of fracture of the structures increases during its shutdown and subsequent loading. Cr-Mo steel has excellent properties at elevated temperatures as steel for several kinds of reactor vessels. It has, as is well known, poor strength, ductility and toughness after long use at elevated temperatures.

Examinations have been conducted on tensile test results of damaged material: creep-prestrained and long-term aged  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steels. Round bar specimens were extracted from the  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steels subjected to creep-prestrain at 827K under 90MPa stress level, and tensile tests at several temperatures have been carried out. Several mechanical properties, e.g. ultimate tensile strength et al., of damaged material were obtained. Ultimate tensile strength and 0.2% proof stress of damaged material are lower than virgin material. Uniform elongation and elongation of damaged material are larger than virgin material. Effect of prestrain on elongation is negligible, effect of long-term elevated temperature holding, on the other hand, is high. Strain hardening exponent of 8% prestrained material is smaller than the other.

**Key words** : creep, prestrain, damage, Cr-Mo steel, mechanical properties

#### 1. 緒 言

各種反応容器用鋼板として使用されている Cr-Mo 鋼を高温中において長時間保持すると、強度、靱性および破断延性の低下が生じることがよく知られている<sup>1)4)</sup>。また、実際の構造物は高温にさらされると同時に荷重も受けており、クリープによる予ひずみやキャビティ生成のような損傷を受けている場合がある。特に残存強度や延性が低下した場合、長期間高温で使用した圧力容器等の操業停止、再開等による荷重履歴によって破壊の危険が生じることと考えられ、クリープ損傷による機械的性質の変化を知ることは重要である。

前報<sup>5)</sup>で、クリープ予ひずみと高温で長時間保持した Cr-Mo 鋼のシャルピ衝撃試験を実施し、靱性値に及ぼすクリープ損傷の影響を明らかにしたが、本報ではクリープ損傷が Cr-Mo 鋼の機械的性質に及ぼす影響を明らかにするため、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼を取り上げ、室温および高温での丸棒引張試験を行い、各々の材料の各温度での変形挙動を調べて、クリープ損傷および高温での恒温保持ならびに試験温度が材料の強度、延性等の機械的性質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

---

\* 三菱重工業株式会社

## 2. 実 験

### 2.1 供試材料と試験片の作成要領

本実験では供試鋼材として、板厚 25mm の 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub> Cr-1Mo 鋼 (ASTM A387 GR22) を用いた。その化学成分を Table 1 に示す。

Fig.1(a) に示すような直径 8mm の丸棒試験片にクリープひずみを導入し、その試験片から Fig. 1 (b) のような直径 6mm の丸棒引張試験片を作製した。試験片には標点間距離 32mm 間での伸びが測定できるように突起が設けてある。Fig. 2 に素材の丸棒引張試験片を示す。平行部直径や標点間距離は Fig.1(b) のクリープ予ひずみを導入した後作製した試験片と全く同じである。

温度 873K、負荷応力 90MPa の下でクリープ試験を行い、クリープ予ひずみを与えた。あらかじめ 873K、90MPa で予備実験を行い、標点間距離 50mm での公称ひずみを測定して、保持期間を、2% 予ひずみの場合には 350 時間、8% 予ひずみの場合には 750 時間と設定した。

保持温度 873K は実際の供用温度よりも高いが、2% 予ひずみは実用構造物で実際に供用時間内で受ける平均的な最大クリープレベルとして、8% 予ひずみは一般に加速クリープの開始に近いレベルとして選んだ。

なお、各試験片のクリープひずみ量はクリープ特性のためにばらつきを持つが、同一試験に供した試験片群の予ひずみのばらつきが最小限になるように試験片を選定した。

### 2.2 実験方法

丸棒高温引張試験は容量 245kN のオートグラフを用いて行った。高温での試験は電気炉を用い、試験温度は室温 ~ 773K とした。試験片の標点間距離間の上下と中央部の 3 箇所にアスベストのひもによって取り付けられた白金-白金ロジウム (PR) 熱電対からの出力を基に電気炉の出力を自動調節する装置を用いて、試験片温度を所定温度の ±3℃ の範囲に保つように制御した。

標点間距離 32mm 間の伸びを左右に各 1 つずつ取り付けられた作動トランス式ひずみ計によって計測し、2 つのひずみ計からの出力を平均して伸びを求めた。また、荷重をロードセルで計測し、引張試験中 X-Y レコーダに荷重-伸び曲線を自動記録し、得られた応力-ひずみ曲線から引張強さ、0.2% 耐力、最大荷重時の一様伸び、破断絞り、破断伸び、そしてひずみ硬化指数を求めた。

高温での引張試験結果はひずみ速度の影響を受けやすいことを考慮し、JIS G0567 に規定されているひずみ速度制限に従って、標点間距離のひずみ速度を耐力まで 0.3%/min、耐力以後 7.8%/min になるように制御して実験を行った。

Table 1 Chemical composition of Cr-Mo steel used.

Chemical composition (mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.14	0.07	0.46	0.07	0.003	2.38	1.04

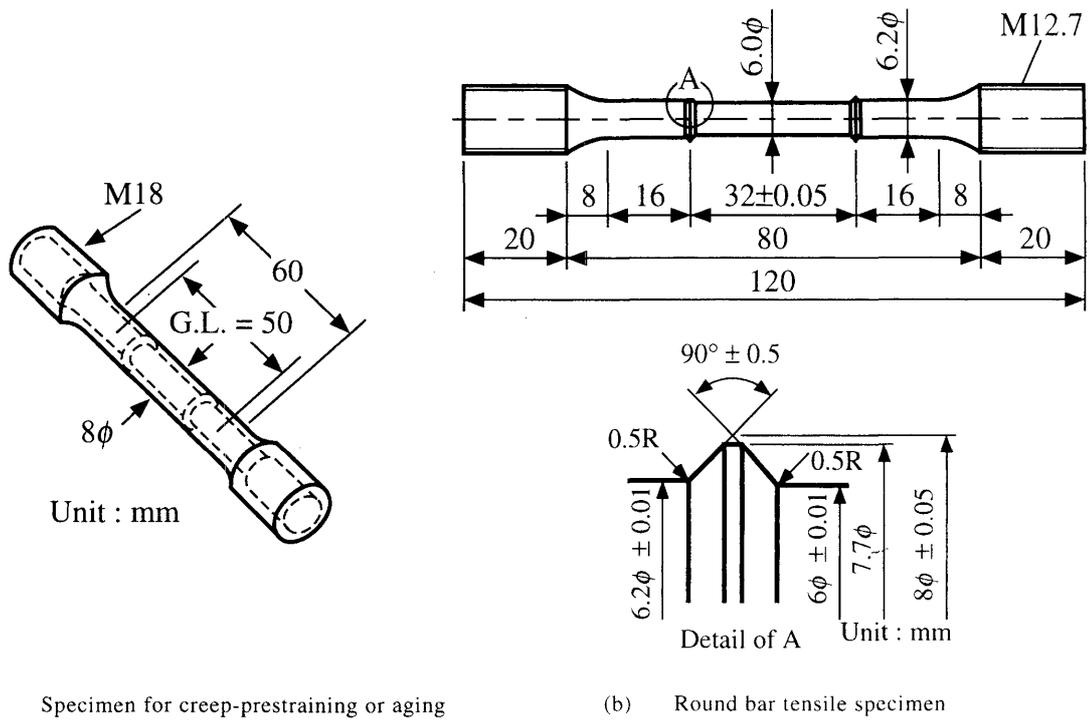


Fig.1 Specimen for creep-prestraining or aging and tensile specimen extracted from specimen subjected pre-treatment

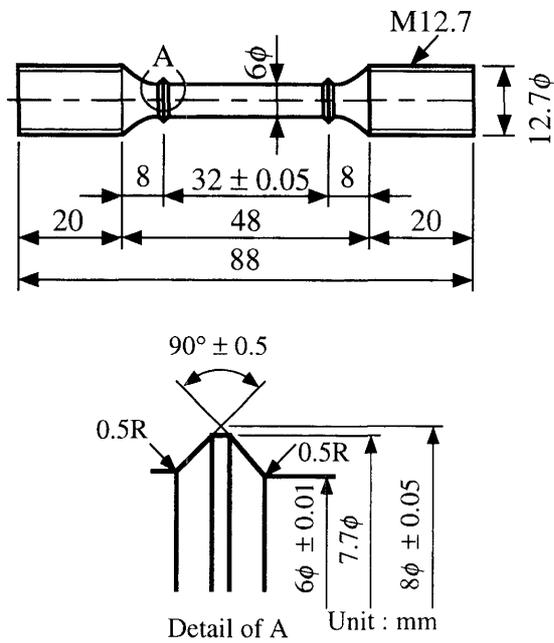


Fig.2 Round bar tensile specimen extracted from virgin steel

### 3. 機械的性質に及ぼすクリープ予ひずみおよび高温下での長時間保持の影響

Fig.3 は素材および各損傷材の引張強さの温度依存性を示した図である。どの試験温度においても損傷材は素材に比べ低下し、損傷材と素材の強度差は室温より高温の方が大きい。保持時間が350時間の2%クリープ予ひずみ材と5320時間時効材との強度低下があまり変わらないことから、このような強度低下を示す冶金的变化は比較的短時間で生じることがわかる。強度低下が起こる原因としては高温時効中にマトリックス中のCr, Moなどが炭化物として析出することによってマトリックス中のCr, Mo, Cの濃度が低下することなどが考えられる。高温保持されていた時間の長いほど強度低下は大きいという傾向が見られるものの、損傷材についてはほぼ一つの曲線で表され、損傷材の間には顕著な相違は見られない。素材では、450～650Kで引張強さの回復が見られるのに対し、損傷材ではそのような傾向はなく、温度の上昇にしたがって緩やかに強度は減少する。

Fig.4 は0.2%耐力の温度依存性を示したものである。損傷材は素材に比べ耐力が低下する。2%予ひずみ材を除くと引張強さと同様に高温で保持されていた時間が長い材ほど低下度が大きいという傾向があるものの、耐力においても引張強さと同様に損傷材はおおまかにはほぼ一つの曲線で表され、耐力は試験温度の上昇にしたがい緩やかに減少する。2%予ひずみ材よりも8%予ひずみ材の方が耐力が大きいのは予ひずみが大きいことによる影響と考えられるが、室温において時効材の耐力よりも2%予ひずみ材の耐力が小さいことの明確な理由は不明である。

Fig.5 は最高荷重点での一様伸びの温度依存性を示す。素材、損傷材とも500Kくらいまで温度上昇とともに一様伸びは低下した後、600Kで一旦回復し、その後大きな変化はない。クリープ予ひずみ材の一様伸びは600K以下の温度では素材の値と時効材の値の間にあり、600K以上の温度では素材とほぼ同じ程度である。若干の例外があるものの、一様伸びは高温中での保持時間の長い材ほど大きくなるという傾向があり、全体的にみて予ひずみそのものによる影響は高温保持の影響に比べ少ないようである。このことからクリープ予ひずみの一様伸びに及ぼす影響は高温保持の影響と予ひずみそのものの影響の複合的なものであり、その中でも、高温保持の影響が比較的大きいようである。

Fig.6 は素材および損傷材の絞りの温度依存性を示すもので、絞りについては損傷材は素地とほぼ一致しており、損傷の影響はほとんどない。このことから、クリープキャビティなどの初期欠陥が破断延性低下をもたらすような現象は起こっていないと考えられ、本供試材料は実用的には十分な延性を確保していることがわかる。

Fig.7 は素材および損傷材の破断伸びの温度依存性を示すものである。損傷材の破断伸びはすべての温度において素材より多少大きい。クリープ予ひずみ材のこのような破断伸びの増加は予ひずみそのものの影響よりも高温保持における材質変化の影響の方が大きいからであると考えられる。

Fig.8 は素材および損傷材のひずみ硬化係数の温度依存性を示したものである。丸棒高温引張試験で得られた公称応力-公称ひずみ曲線の公称ひずみ2%の値から最高荷重点までの値を変形中は体積一定であるという条件を仮定して、真応力-真ひずみ関係に換算し、それを基にひずみ硬化係数を算出した。2%クリープ予ひずみ材および時効材のデータは室温を除けば、素材と近い値を示しているのに対し、8%予ひずみ材の値はそれらよりも極端に小さい。このことから8%クリープ予ひずみが材の加工硬化能の低下をもたらしたと考えられ、2%程度のクリープ予ひずみでは加工硬化能はほとんど低下しない。

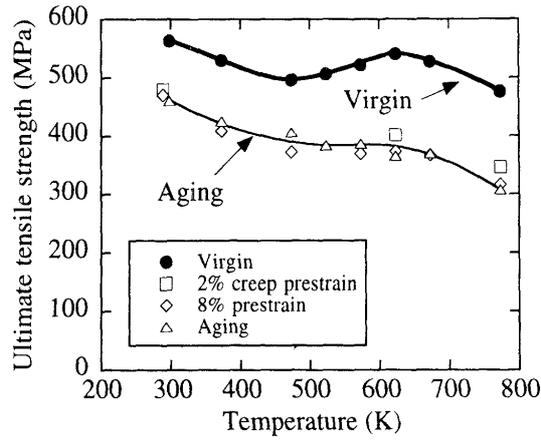


Fig.3 Temperature dependency of ultimate tensile strength

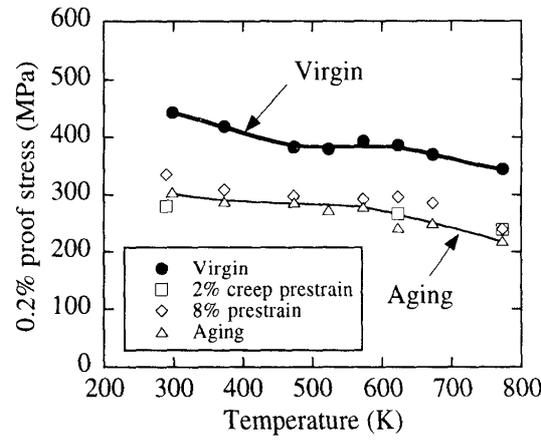


Fig.4 Temperature dependency of 0.2% proof stress

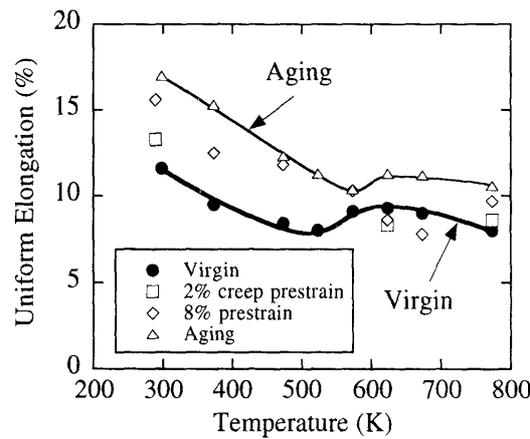


Fig.5 Temperature dependency of uniform elongation

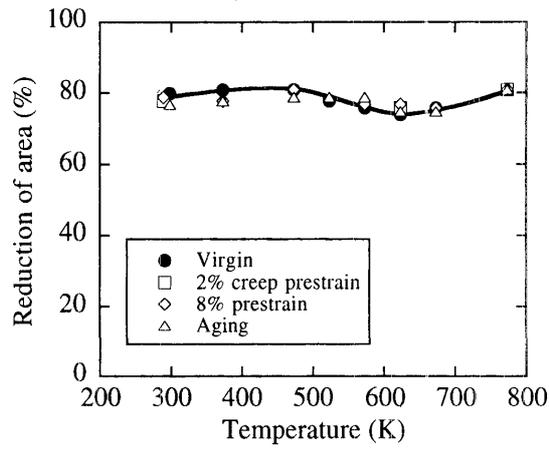


Fig.6 Temperature dependency of reduction of area

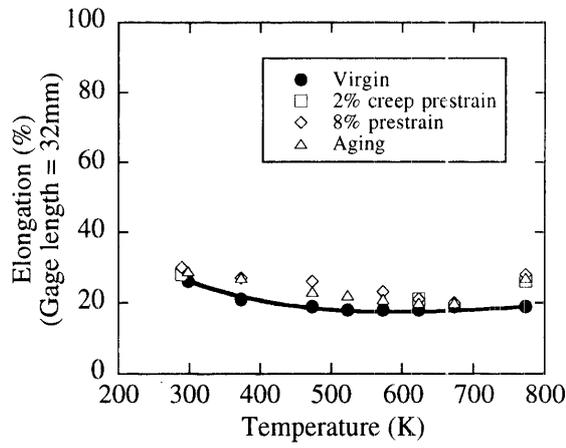


Fig.7 Temperature dependency of elongation

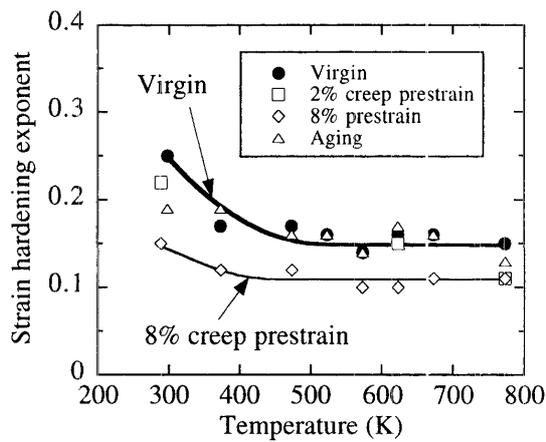


Fig.8 Temperature dependency of strain hardening exponent

#### 4. 結 論

クリープ損傷が  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の機械的性質に及ぼす影響を調べるため、素材、2% クリープ予ひずみ材 (600℃, 90MPa で 350 時間保持), 8% クリープ予ひずみ材 (600℃, 90MPa で 1104 時間保持), 長時間高温保持材 (600℃ で 5320 時間保持) の高温引張試験を実施し、結果を比較検討した。以下に得られた結論を示す。

- 1) クリープ予ひずみ材, 長時間高温保持材とも, 素材よりは引張強さが低下するが, 損傷の違いによる引張強さの相違はほとんどない。
- 2) 損傷材は素材に比べ, 0.2% 耐力も低下するが, 損傷の違いによる相違はほとんどない。
- 4) 一様伸び, 破断伸びは素材よりも損傷材の方が大きい。伸びに及ぼす予ひずみの影響はほとんどなく, 高温保持による材質変化の影響が大きいと思われる。また, 素材と損傷材の絞りにはほとんど差がなく, 破断延性低下はない。
- 5) 8% 予ひずみ材は素材や他の損傷材に比べひずみ加工係数が小さい。8% のクリープ予ひずみにより, 加工硬化能は著しく低下する。

#### 参 考 文 献

- 1) 高松利男, 乙黒靖男, 塩塚和秀, 橋本勝邦:  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の焼きもどしぜい化特性, 鉄と鋼, 67, 第1号, 178-187, 1981.
- 2) 中村正久, 篠田哲守, 渡辺宏: Cr-Mo鋼, 65, 第13号, 102-111, 1979.
- 3) 高松利男, 乙黒靖男, 塩塚和秀, 橋本勝邦: 鋼のクリープ脆化におよぼす金属的因子の影響, 鉄と鋼, 65, 第7号, 129-138, 1979.
- 4) 井上泰, 山本広一: (討論28) 低合金鋼の焼戻脆性におよぼすPの粒界偏析とそれによる脆化, 鉄と鋼, 65, 第13号, 102-111, 1979.
- 5) 塚本光夫, 妻鹿雅彦: クリープ損傷を受けたCr-Mo鋼のシャルピ衝撃特性, 熊本大学教育学部紀要, 第45号, 自然科学, 163-170, 1996.