

## クリープ損傷を受けた Cr-Mo 鋼のシャルピ衝撃特性

塚本光夫 妻鹿雅彦\*

### Charpy Impact Test Results of Cr-Mo Steel Subjected to Creep Damage

Mitsuo TSUKAMOTO and Masahiko MEGA\*

(Received September 2, 1996)

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 shut-down and subsequent loading. Cr-Mo steel has excellent properties at elevated temperature as steel for several kind of reactor vessel. It has, as is well known, poor ductility and toughness after long use at elevated temperature. The real structures sometimes have such damage as creep-prestrain or cavities because of subjection to elevated temperature and service loads.

Examinations have been conducted on Charpy impact test results of creep-prestrained and long-term aged  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steels. V-notch Charpy specimens were extracted from the  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steels subjected to creep-prestrain at 827K under 90MPa stress level, and Charpy impact tests at several temperatures have been carried out. Absorbed energy, crystallinity and lateral expansion were measured. 2% creep prestrain hardly affects impact test properties. Therefore this material has excellent ductility and toughness. It has, on the other hand, lower shelf energy and lateral expansion in specimens subjected to long-term elevated temperature so that long-term aging decreases ductility.

**Key words** creep, prestrain, damage, Cr-Mo steel, Charpy impact test

#### 1 緒 言

Cr-Mo 鋼は高温での優れた機械的性質から各種反応容器用鋼板として多用されている。しかし、Cr-Mo 鋼を高温中において長時間保持すると、靱性および破断延性の低下等の劣化をおこす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。

これら材料的な損傷はクリープ強度に影響を与えるばかりでなく、材料の延性および強度を初期状態よりも低下させ、その結果一時的な荷重による構造物破壊の危険性が増す可能性がある。たとえば、長時間高温で使用したプラントを検査のため一時的に操業を停止し、点検後再開する場合、材料の延性および靱性が劣化すると、熱応力や水圧試験時の圧力などにより構造物が破壊する危険性がある。したがって、材料の靱性に及ぼす材料的な損傷の影響を知ることは不安定破壊防止の点から重要である。

Clayton ら<sup>5)</sup>は低合金においてあらかじめ予ひずみを導入しておいた試験片を用いて室温で COD

---

\* 三菱重工業株式会社

(Crack Opening Displacement) 試験を行った結果、予ひずみが COD 値や延性破壊様式に影響を与えることを示している。また高温構造物にしばしば用いられている SUS316 鋼の長時間使用劣化に関する研究によれば、クリープ損傷を受けた材料は単に高温で長時間保持された材料よりも延性と靱性の低下が大きいという結果<sup>6)</sup>や、熱衝撃による引張残留応力のためクリープキャビティが比較的早期に発生し、破損に至った発電プラントの例<sup>7)</sup>も報告されている。Cr-Mo 鋼の化学成分および熱膨張係数、機械的性質は SUS316 鋼とは異なるため一概に SUS316 鋼の例と同一とは限らないが、Cr-Mo 鋼においてもクリープ損傷が機械的性質に何らかの影響を与えることが考えられる。

そこで本研究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、シャルピ衝撃試験を行い、クリープ損傷および高温での高温保持が材料の靱性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. 実 験

### 2.1 供試材料

本実験では供試鋼材として、板厚 25mm の  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼 (ASTM A387 GR22) を用いた。その化学成分を Table 1 に示す。Table 2 は室温での丸棒引張試験結果から得られた本供試鋼材の機械的性質である。

### 2.2 クリープ予ひずみの導入方法と試験片の作成要領

クリープ予ひずみ導入には容量 9.8kN のクリープ試験機を用いた。Fig.1 にシャルピ試験片への予ひずみ導入法を示す。Fig.1 に示すように矩形断面の試験片をクリープ試験機にかけ、図中の斜線部を機械加工することによりシャルピ試験片を作製した。クリープ試験機の容量の関係から、断面 10mm×10mm の標準試験片の作製は困難であったので、断面 5mm×10mm のサブサイズ試験片を用いてクリープ予ひずみの影響を調べた。供試材料そのものについては試験片の寸法効果を調べるため、Fig.2 に示すようにサブサイズの試験片とは別に標準試験片も作製した。

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

Table 2 Mechanical properties of Cr-Mo steel used.

Mechanical properties at 298K (MPa)	
0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$	444
Ultimate tensile strength $\sigma_U$	562

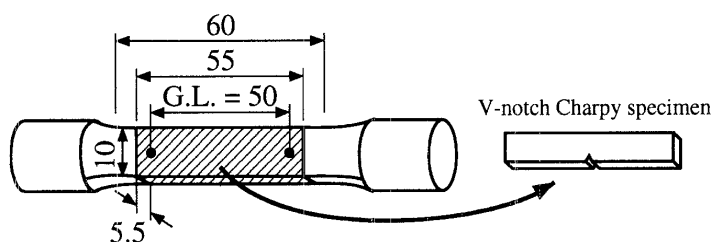


Fig.1 Charpy specimen extracted from creep specimen subjected to pre-treatment

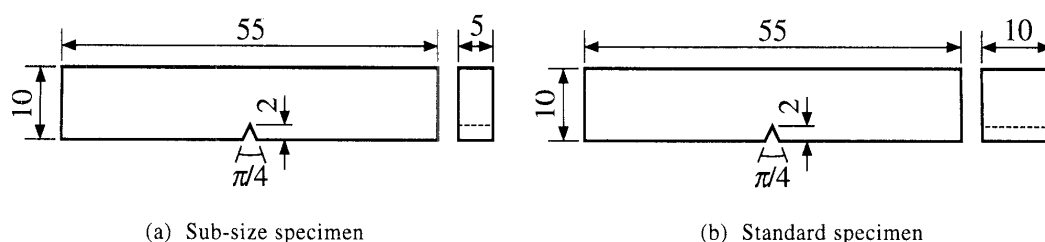


Fig.2 V-notch Charpy specimens

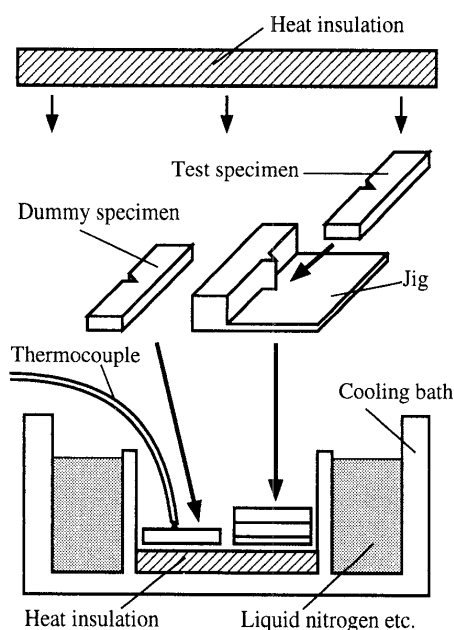
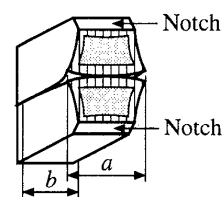


Fig.3 Procedure for temperature control



$$\text{Lateral expansion} = a - b$$

Fig.4 Definition of lateral expansion

クリープ予ひずみの目標値を 2% とし、温度 873K、負荷応力 90MPa のもとでクリープ試験を行った。あらかじめ 873K、90MPa で予備実験を行い、Fig.1 に示すポンチで印を入れた標点距離間の公称ひずみを測定して、2% の予ひずみを付加するための保持期間を 350 時間と設定した。この予備実験の結果を基に、873K、90MPa の条件で 350 時間経過後除荷を行い、試験片を作製した。長時間高温で恒温保持する試験片の場合には温度 873K で 5320 時間保持した。保持温度 873K は供試鋼の実際の供用温度よりもかなり高いが、ひずみ量 2% は実用構造物の供用時間内で受ける平均的な最大クリープ量として採用した。最終的に除荷した時点で標点距離間の伸びの測定を行い、クリープ予ひずみ量が 1.7 ~ 2.0% の試験片を選択した。

### 2.3 実験方法

容量 294Nm のシャルピ衝撃試験機を用いて試験を行った。試験片の温度管理には Fig.3 に示すような冷却槽を用いた。実際に試験を行う試験片の寸法と材質が同一であるダミー試験片を用意し、ダミー試験片に銅-コンスタンタン熱電対をそのノッチ近傍に取り付けて、実際に使用する試験片と同時に冷却槽中に設置した。試験温度に応じて氷、エチルアルコール、液体窒素を適宜混合した冷媒を用い、ダミー試験片の温度が目標値  $\pm 2\text{K}$  の範囲内になるようにした。試験片を冷却槽内 10 分以上放置し、取り出してから 5 秒以内に試験を行い、試験片内の温度勾配が大きくなるように留意した。

試験後、ハンマーの振り上げ角度から吸収エネルギーを計算し、拡大投影機により破面を観察し、脆性破面率を計算した。また、Fig.4 に示す長さを測定し、横膨出を算出した。

### 3. 供試材料の破壊靱性試験結果

ここでは、クリープ予ひずみの影響の検討に先立ち、供試材料そのものの衝撃特性について調べる。また、本研究ではクリープ試験機の容量の関係からサブサイズ試験片を用いてクリープ損傷の影響を比較したため、標準サイズとサブサイズの試験片の試験結果の違いも明らかにする。

Fig.5(a) ~ (c) は素材のシャルピ衝撃試験の結果である。(a) は吸収エネルギー、(b) は脆性破面率、(c) は横膨出と試験温度の関係を示す。プロット点はばらつきをもつが図中の実線は板幅 5mm の、破線は板幅 10mm の試験結果の傾向を示したものである。板幅 5mm の試験片の断面積は板幅 10mm の試験片の断面積の半分であるため、板幅 5mm の試験片の吸収エネルギーの値は板幅 10mm の試験片の吸収エネルギーの値の半分になるはずであるが、Fig.5(a) をみると、板幅 5mm の試験片の高温側で生じる棚での吸収エネルギーの値は板幅 10mm の試験片の値の半分以下になっており、断面積の比率よりも吸収エネルギーは小さくなることがわかる。また、Fig.5(a) ~ (c) の線を基にエネルギー遷移温度  $vT_E$  と破面遷移温度  $vT_S$  を求めたところ板幅 5mm の試験片の  $vT_E$  と  $vT_S$  は板幅 10mm の試験片のものよりもいずれも約 10K 低かった。この傾向は横膨出の遷移温度についても同様であった。これらの遷移温度は 213K 以下で、本供試材は高温材料としては十分な靱性を有している。

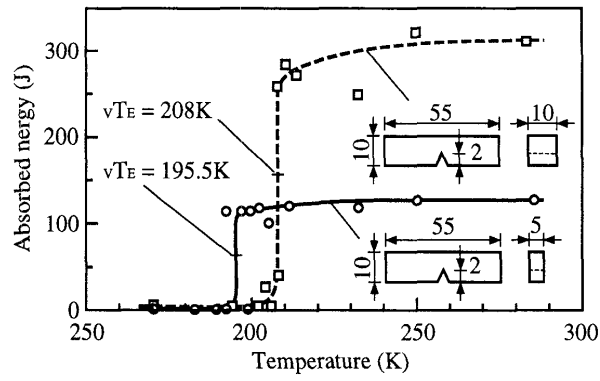
### 4. 衝撃特性に及ぼすクリープ予ひずみや高温下での長時間保持の影響

ここでは供試材がクリープ予ひずみや高温下での高温長時間保持を受けたときに、それらがシャルピ衝撃特性に及ぼす影響について検討する。以下簡単のために本供試材そのものを素材、供試材にクリープ予ひずみを与えた材をクリープ予ひずみ材、供試材を高温下で長時間恒温保持した材を時効材と呼ぶことにする。

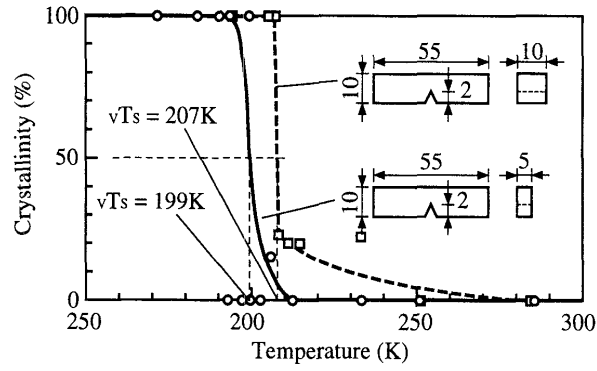
素材と 2% クリープ予ひずみ材のシャルピ衝撃試験結果を Fig.6(a) ~ (c) に示す。(a) は吸収エネルギー、(b) は脆性破面率、(c) は横膨出と試験温度の関係を示す。○印は素材を、■印は 2% クリープ予ひずみ材のデータであり、素材についてはデータのばらつきを考えて、遷移挙動を斜線領域で示した。吸収エネルギー、脆性破面率、横膨出ともに 2% クリープ予ひずみ材のプロット点は素材の遷移曲線と比べて明確な有意差がなく、ばらつきの範囲にあり、2% 程度のクリープ予ひずみでは供試材のシャルピ衝撃試験結果へおよぼす影響はほとんどないことがわかる。ただし、Fig.6(c) の横膨出の図をみると、高温領域での横膨出は素材の横膨出よりもわずかに低下している傾向がみられ、クリープ予ひずみにより若干延性が低下することがわかる。

次に素材と時効材のシャルピ衝撃試験結果を Fig.7(a) ~ (c) に示す。(a) は吸収エネルギー、(b) は脆性破面率、(c) は横膨出と試験温度の関係を示す。▲印が時効材であり、その遷移曲線を波線で示した。Fig.6 と同様に素材の結果も併せて示す。両者の遷移温度を比較すると吸収エネルギー、脆性破面率、横膨出のいずれも時効材の方が素材に比べやや高温側に移行する傾向があるものの、大きな違いは認められない。しかし、時効材の遷移温度以上の温度でのシェルフエネルギーならびに横膨出が素材のそれに比べて低下している。この結果から長時間の時効によって延性が低下していることがわかる。

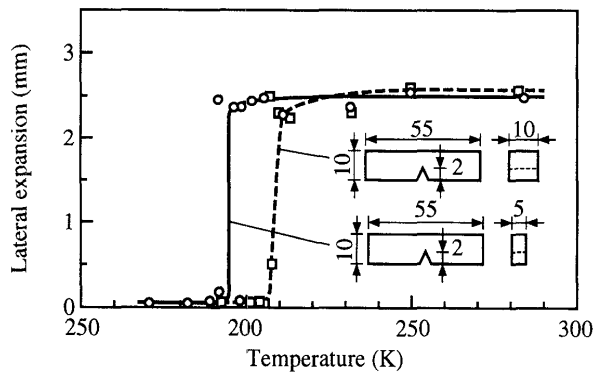
延性低下の原因としては不純物の粒界偏析等が考えられるため、試験後の破面を走査式電子顕微鏡で観察した。しかし、2% クリープ予ひずみ材も時効材も粒界破壊らしきものは見あたらず、素材とはほぼ同様のデインブル破面を示しており、材質変化の原因を究明することはできなかった。



(a) Absorbed energy

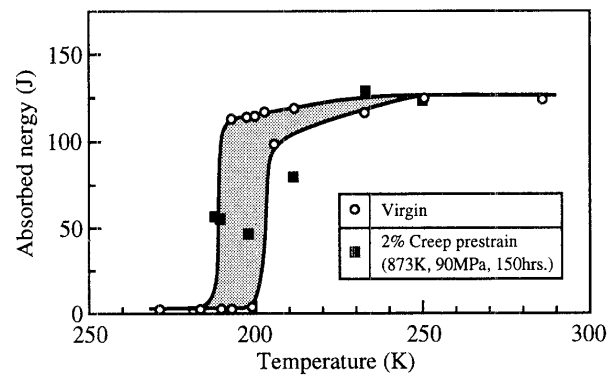


(b) Crystallinity

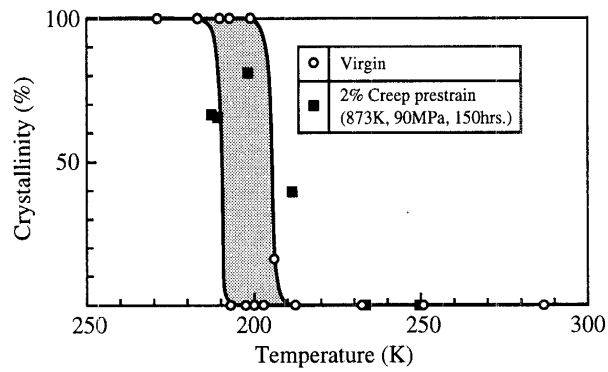


(c) Lateral expansion

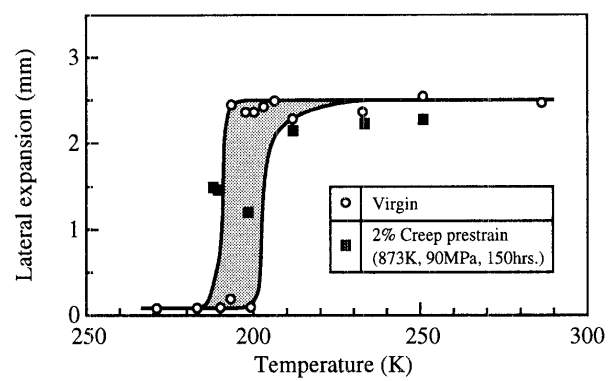
Fig.5 Charpy test results for virgin material



(a) Absorbed energy

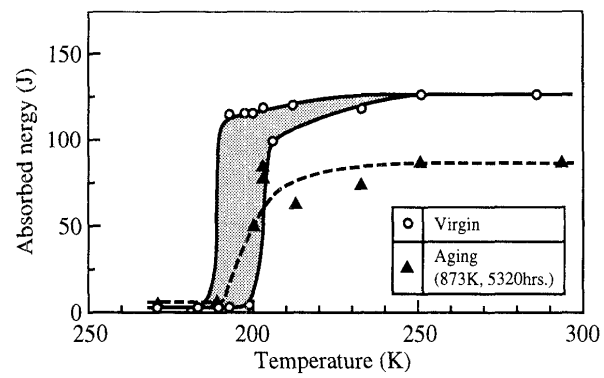


(b) Crystallinity

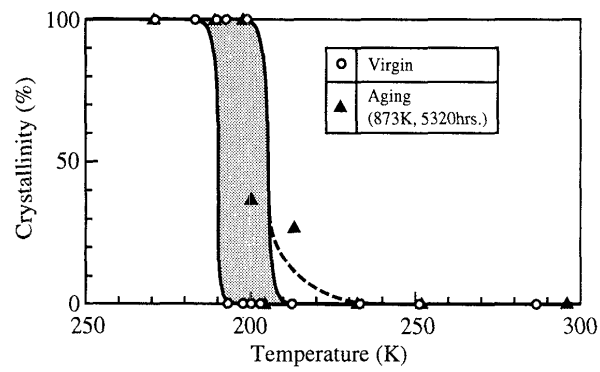


(c) Lateral expansion

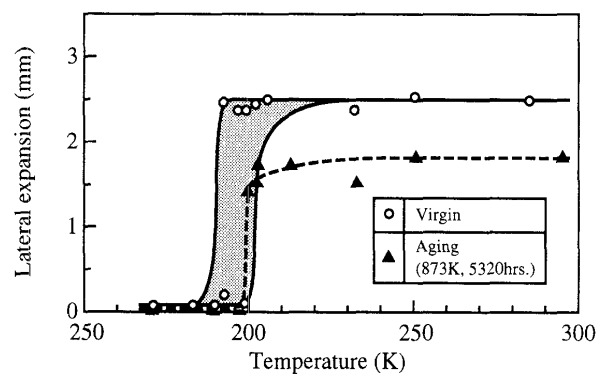
Fig.6 Charpy test results for virgin and 2% creep-prestrained materials



(a) Absorbed energy



(b) Crystallinity



(c) Lateral expansion

Fig.7 Charpy test results for virgin and aged materials

## 5. 結 論

$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼を対象とし、シャルピ衝撃試験結果に及ぼすクリープ予ひずみと高温での長時間保持の影響を検討した。以下に得られた結論を示す。

- 1) 2% 程度のクリープ予ひずみを与えたときの本供試鋼のシャルピ衝撃試験結果は素材の結果とほとんど差がなく、高温用鋼として十分な延性と靱性を有している。
- 2) 長時間高温保持した材の遷移温度以上の温度でのシェルフエネルギーならびに横膨出は素材のそれに比べて低下する。したがって、長時間の時効によって延性が低下する。

## 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) J.Q.Clayton and J.F.Knot: Observations of fibrous fracture modes in a prestrained low-alloy steel, Metal Science, February, 63-71, 1976.
- 6) D.Gan: Tensile and Fracture Properties of Type 316 Stainless Steel after Creep. Metallurgical Transactions A, Vol.13A, December, 2155-2163, 1982.
- 7) J.F.Delong, J.E.Bynum, F.V.Ellis, M.H.Rafiee, W.F.Siddall, T.Daikoku and H.Haneda: Failure Investigation of Eddystone Main Steam Piping, WJ., Vol.64, No.10, October, 271s-280s, 1985.