

Fig. 3. High temperature strengths of high tensile strength structural steels.

が、試験温度が高くなるほど、また試験時間が長いほどパーライト組織が次第に崩れて粒内に炭化物が細かく分散したフェライト組織になる。しかしこのパーライトの崩れてゆく速さは WEL-TEN 60 よりも遅く、試験温度 550°C、4230hr 後でもパーライト組織が残存していた。WEL-TEN60 の組織は試験前の状態では WEL-TEN 50 と同様フェライト+パーライト組織であるが粒度がかなり小さい。WEL-TEN 60 は焼入れ焼もどしの調質鋼であるため、組織の高温安定性が WEL-TEN50 に比し悪く、パーライトの崩れてゆく速さも速い。WEL-TEN80 の組織は試験前の状態では焼もどしマルテンサイト+ベイナイト組織である。この組織は 550°C までの高温では比較的安定で、550°C、3469・5hr でも大きな組織変化はみられなかったが、それ以上の温度では、フェライト+パーライト組織に変化してゆく傾向の強いことが認められた。

破断部の組織を観察した結果、WEL-TEN60 のみかもつばら粒内破断により破断し、他は主として粒界破断によるものであった。溶接継手ではすべて熱影響粗粒化部に脆性クラックを生じて破断した。典型的なクラックの様相を Photo. 2 d に示す。このような現象は原子炉用高張力鋼³⁾、Cr-Mo 低合金鋼⁴⁾、Cr-Mo 含有 Ni 基合金⁵⁾の溶接継手にも認められている。

3.3 設計基準

ASME の Boiler Construction Code にしたがって許容応力を求めた結果を Fig. 3 に示す。これによると低温域ではいずれの鋼種も引張強さが設計基準となるが、400°C 前後の限界温度以上ではクリープ強度あるいはクリープ破断強度が設計基準となる。この限界温度は WEL-TEN50 では約 400°C、WEL-TEN60 では約 375°C、WEL-TEN80 では約 500°C であった。

4. 結 言

当社製非調質 50 kg/mm² 級高張力鋼、および調質 60 kg/mm²、80 kg/mm² 級高張力鋼ならびに 80 kg/mm² 級高張力鋼溶接継手についてクリープ試験を行なった結果、つぎのことが明らかとなった。

1) 50 kg/mm² 級、80 kg/mm² 級高張力鋼は 60 kg/mm² 級高張力鋼に比し、粒界クリープ破断を起こ

す傾向が強い。60 kg/mm² 級高張力鋼は高温で組織変化が比較的早期に起こり粒内強度が低下する。

2) 80 kg/mm² 級高張力鋼溶接継手のクリープ破断張度は母材のそれより若干低めであったが、高温長時間(550°C、5000hr 以上)では同等以上になると推定された。溶接継手のクリープ破断は常に熱影響粗粒化部での脆性破断であった。

3) 高温引張特性よりもクリープ特性が設計基準となる限界温度は 50 kg/mm² 級高張力鋼では約 400°C、60 kg/mm² 級高張力鋼では約 375°C、80 kg/mm² 級高張力鋼では約 500°C である。

文 献

- 1) V. S. ROBINSON, A. W. PENSE and R. D. STOUT: *Welding J.*, 43 (1964) 12, Research Suppl., p. 531-S
- 2) J. J. DEBARBADILLO, A. W. PENSE and R. D. STOUT: *Welding J.*, 45 (1966) 8, Research Suppl., p. 357-S
- 3) 鈴木, 稲垣, 岡根, 馬田: *溶接学会誌*, 32 (1963) 8, p. 688
- 4) L. M. T. HOPKIN, D. MURRAY and D. DUVAL: *J. Iron & Steel Inst. (U.K.)*, 203 (1965) 8, p. 819
- 5) R. G. GILLILAND and J. T. VENARD: *Welding J.*, 45 (1966) 3, Research Suppl., p. 103-S

2¹/₄%Cr-1%Mo 鋼のクリープ破断特性と破断後の硬さについて*

金属材料技術研究所

横井 信・田中 千秋
門馬 義雄・伊藤 弘

Creep Rupture Behaviour and Hardness Characteristics of a 2¹/₄%Cr-1%Mo Steel

Shin YOKOI, Chiaki TANAKA

Yoshio MOMMA and Hiroshi ITO

1. 緒 言

2¹/₄%Cr-1%Mo 鋼のクリープ破断応力-破断時間曲線には、いわゆる<折れ曲がり>の出現が知られている^{1)~3)}。

当所においても、この鋼種で熱処理をそろえた同一チャージ材について、最高 3 万 hr 破断目標のクリープ破断試験を行なっており、筆者らは現在までに得られた 1 万~2 万 hr までの破断データについて、統計的処理による 2, 3 の検討を行なったが⁴⁾、この種の折れ曲がり が明らかに認められた。

そこで、クリープ破断後の試験片について、組織変化と硬さ変化を調べ、応力-破断時間曲線の折れ曲がりと

* 第73回講演大会にて発表 講演番号 168 昭和42年5月10日受付

Table 1. Chemical composition and heat treatment.

Chemical analysis (%)									Heat treatment
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	930°C × 1hr → F.C.
0.11	0.39	0.47	0.019	0.006	0.11	0.09	2.20	0.98	100°C/hr

Table 2. Mechanical properties at room temperature.

Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness VHN	Impact strength (kg-m/cm ²)	Grain size JIS. ferrite
26.9	53.8	34	58	139	3.7	No. 6

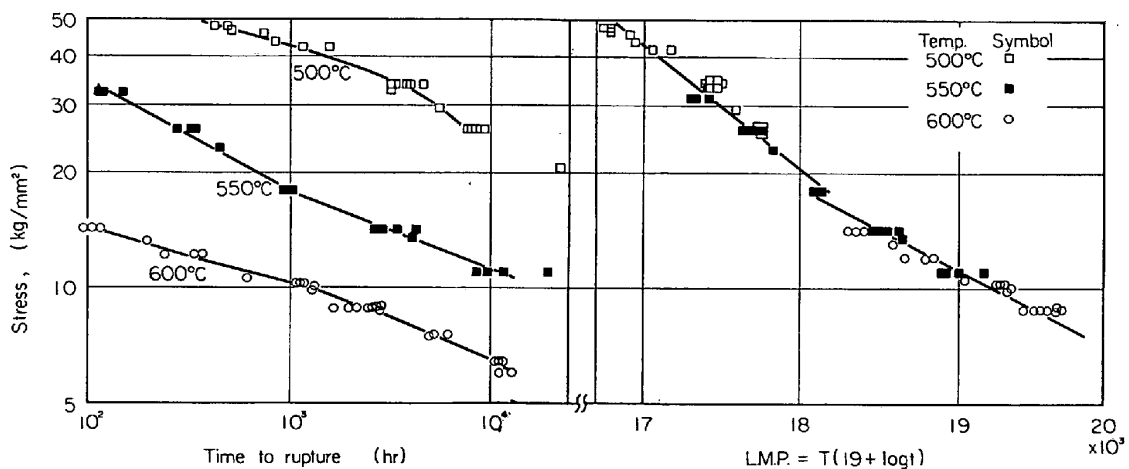


Fig. 1. Creep rupture properties of 2 1/4%Cr-1%Mo steel.

の関連を求めた。

2. 供試材と実験方法

供試材は、電気炉により溶製された Al 脱酸の 2150 kg の鋼塊より、99 mm φ まで圧延され、その後 22 mm φ に鍛伸された丸棒で、140 mm に切断後所定の熱処理を行なった。

供試材の化学成分、熱処理を Table 1 に、室温における機械的性質を Table 2 に示す。

試験前の試料、および破断後の試験片のつかみ部、平行部および破断部より切り出した試料について、研磨後それぞれのピッカース硬さ（荷重 10 kg, 30 sec 間保持）を測定した。次に、HNO₃ 1% を添加した 4% picral により腐食し、光学顕微鏡により組織を調べ、さらに、フェライト領域およびペーナイト+パーライト領域のそれぞれについて、微小ピッカース硬さ（荷重 100 g, 30 sec 間保持）を測定した。

3. 実験結果

3.1 クリープ破断試験

クリープ破断試験の結果、およびこれを Larson-Miller parameter (L.M.P.) によつて整理したものを Fig. 1 に示す。この図に示す各曲線は、得られたデータについて破断時間 (t) の対数、すなわち log t の値が正規分布すると仮定して、直交多項式を用いて、最小自乗法により求めた回帰線の中から、多項式の次数に関する危険率 5% の F-検定と寄与率などにより、もつともよいと思

れるものを採用した。

500, 550 および 600°C の各クリープ破断曲線は、それぞれ特徴的な形状を示しており、採用した回帰式は次のとおりである。

$$500^{\circ}\text{C の場合: } \log t = 202.069 - 394.107 \log \sigma + 262.951 (\log \sigma)^2 - 58.935 (\log \sigma)^3$$

$$550^{\circ}\text{C の場合: } \sigma \geq 18.0 \text{ のとき} \\ \log t = 7.517 - 3.581 \log \sigma$$

$$\sigma \leq 18.0 \text{ のとき} \\ \log t = 9.245 - 4.988 \log \sigma$$

$$600^{\circ}\text{C の場合: } \log t = 2.696 + 6.849 \log \sigma - 6.495 (\log \sigma)^2$$

550°C のクリープ破断曲線は応力 (σ) 18 kg/mm², t ≈ 1000hr 付近で折れ曲がり点を示しているが、これに対応する Larson-Miller 曲線の折れ曲がり点は、L.M.P. = 18100 付近になる。これより、500°C および 600°C における折れ曲がり点を推測すると、27000hr および 60hr 程度となり、この温度での実測点の範囲外になる。

3.2 破断した試験片の硬さ

クリープ破断後の試験片の局所的な硬さ分布をつかみ部、平行部および破断部とにわけて、破断時間について整理したものが Fig. 2 である。ここで、破断部の硬さは軸方向に沿つて急激に変化するとともに、バラツキも大きいので、破断端より 2~4 mm での数個の測定値の最高値を採用した。

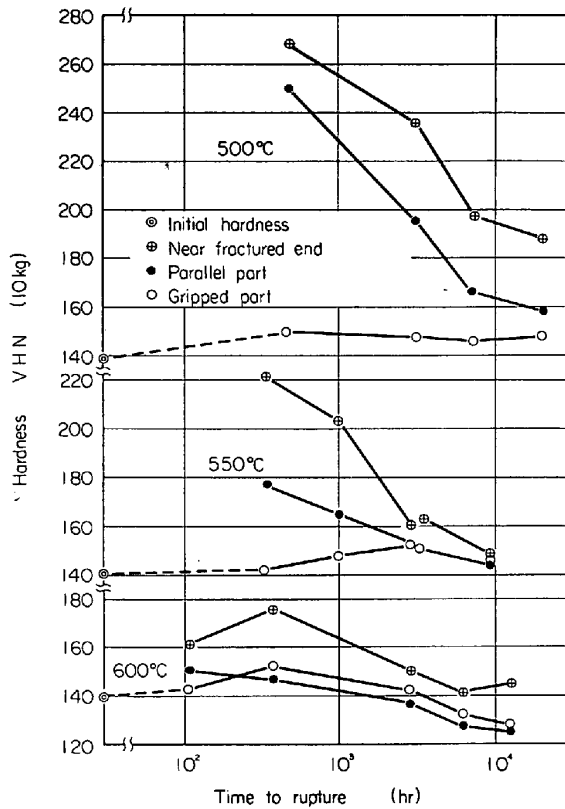


Fig. 2. Hardness vs. time to rupture for 2¹/₄%Cr-1%Mo steel.

Stress-free の状態に対応するつかみ部では、破断時間に依存してゆるやかな硬さの山が現われ、試験温度の上昇とともに、この山は短時間側にずれている。そして高温長時間においては、試験前の硬さより軟化している。

一方、平行部および破断部は、高応力に対応する低温短時間側において、特に 500°C において、大きな硬さの値を示すとともに、破断時間の増加(試験応力の低下)につれてその値を大きく減少する。一般に、長時間側ではつかみ部も平行部もともに硬さはゆるやかに変化しているが、両者は、ある破断時間付近で、接近、一致、または逆転する傾向が見られる。それらは次の付近である。

試験温度	応力	破断時間
500°C	20 kg/mm ² 以下	20,000hr, 以上
550°C	14 kg/mm ²	3000~4000hr
600°C	12~13 kg/mm ²	200~400hr

硬さを L.M.P. により整理すると、Fig. 3 に示すように平行部の硬さ変化には、応力-L.M.P. 関係に対応する折れ曲がり認められるばかりでなく、つかみ部と平行部の硬さの接近一致、逆転もこの折れ曲がりとはほぼ同じ L.M.P. 値で生じていることがわかる。

3.3 顕微鏡組織と微小硬さ

供試材の試験前の組織は、フェライト (F) が約 75% を占め、残りは大部分がベイナイト (B) で粒界にわずかにパーライトが観察された。クリープ試験中に起こる組織変化は大体において、この鋼種について類似の熱処理をした場合の従来の研究と⁵⁾⁶⁾、特別の相違点はなかつ

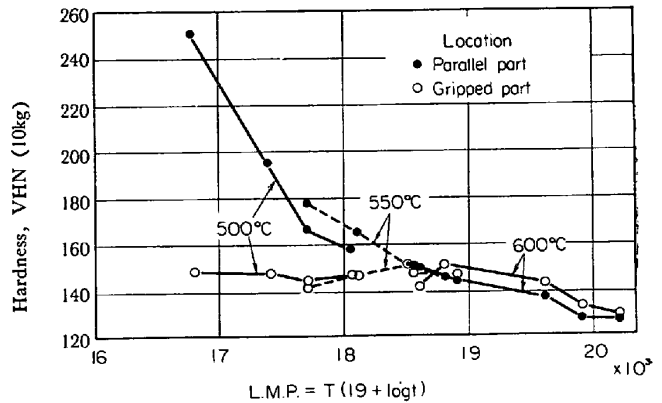


Fig. 3. Hardness vs. L. M. P. for 2¹/₄%Cr-1%Mo steel.

た。F 領域および B + P 領域での微小硬さと破断時間の関係を Fig. 4, 5 に示す。微小硬さは一般にかなりばらつくので、ここでは 3~5 点測定による上限と下限のバンドで表現した。

F 領域では、つかみ部で硬さのゆるやかな丘が試験温度の上昇とともに短時間側に移動すると思われることと 600°C の長時間側で急激な軟化を生じていること、また平行部においては、特に低温高応力側でクリープ変形中の加工硬化の影響が強く残っているが、1 万 hr 程度では各温度ともほぼ試験前の硬さに近づいていることなどが特徴である。

B + P 領域では、つかみ部、平行部ともに F 領域に比べて、特に短時間側では著しく高い硬度レベルにある。そして微小硬さは各温度とも初期の硬さ値より低く、かつ、破断時間の増加とともにほぼ単調に減少するが、同じ試験条件では、平行部の方がつかみ部より小さな硬さ値を示している。

4. 考 察

応力-破断時間曲線の折れ曲がりの出現は、通常の外挿法による長時間側の破断強度にしばしば大きな誤差を伴う²⁾³⁾。したがって、このような場合には、クリープ破断曲線は本質的に分割して考える必要がある。

一般に折れ曲がり、破断様式の遷移やクリープ中の析出に関連していると考えられているが⁷⁾、WILD¹⁾は平行部とつかみ部の硬さの交差する点がこの折れ曲がり点と非常によく一致することを示した。本研究においても

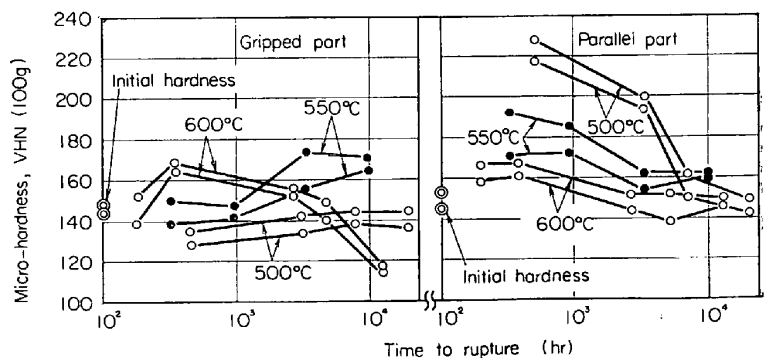


Fig. 4. Dependence on rupture-life of micro-hardness in ferrite field.

Fig. 2 のように一応この傾向を示した。

2¹/₄%Cr-1%Mo 鋼のクリープ中に起こる析出挙動はかなり複雑であるが⁶⁾, Fig. 4, 5 はこのような析出に対応する硬さ変化を見たものである。F 領域ではつかみ部の硬さ変化から, Mo₂C の析出に相当すると思われるピークが認められる。このピークの少し短時間側で破断曲線に折れ曲がりが出ており, GEIGER の観察²⁾によると, 550°C では 760hr 付近から Mo₂C の針状析出物が見え始め, しだいに成長することから, 折れ曲がりの出現には F 領域での Mo₂C 析出が関与しているようにも考えられる。平行部では長時間側でも急激な軟化は認められないのは, クリープ変形中にこの炭化物が微細に分散析出して, 長時間でのクリープ抵抗に寄与しているものと思われる。

これに対して, B + P 領域では, 炭化物の球状化などによる軟化が見られる。さらに平行部はつかみ部より軟化しているが, これは B + P 領域で炭化物の凝集, 成長が促進されたためと思われる。

5. 結 言

焼鈍を行なった 2¹/₄%Cr-1%Mo 鋼の応力-破断時間曲線, および Larson-Miller 曲線に折れ曲がり認められた。この折れ曲がり, 破断後の試験片の平行部の硬さと破断時間または L.M.P. との関係にも現われ, 特に, フェライト領域の微小硬さ変化と比較的によく対応することがわかった。

なお, 本研究は当所材料試験部河田和美部長のご指導により遂行されたもので, ここに厚く謝意を表します。

文 献

- 1) M. WILD: Arch. Eisenhüttenw., 34 (1963).
- 2) J. BENNEWITZ: Joint. Int. Conf. on Creep. (1963), p. 5-81 Paper 69
- 3) P. BROZZO: *ibid.*, p. 6-77 Paper 67
- 4) 河田, 他: 鉄と鋼, 53 (1967) 5, p. 68
- 5) 高尾, 他: 材料試験, 9 (1960), p. 129
- 6) 三好, 岡田: 材料, 13 (1964), p. 144; 住友金属, 18 (1966) 4, p. 95
- 7) H. FABRITIUS: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 35
- 8) G. KRÜGER: Neue Hütte, 9 (1964), p. 743

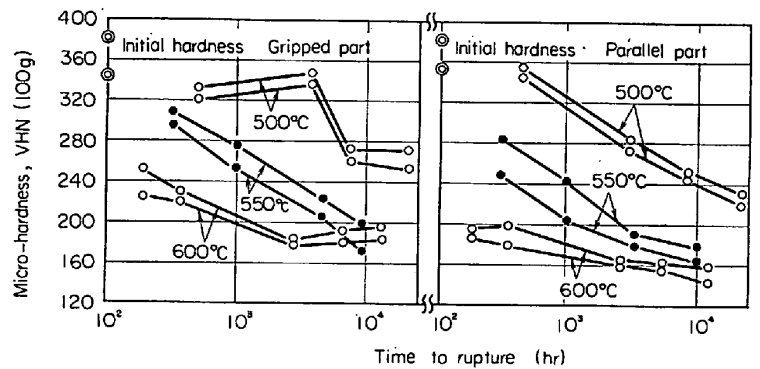


Fig. 5. Dependence on rupture-life of micro-hardness in bainite and pearlite field.

620, 172, 251, 2
クリープ破断データの外挿法について*

日本鋼管技術研究所 木下和久
On Extrapolation Method of Creep-Rupture Data

Kazuhisa KINOSHITA

1. 緒 言

従来クリープ破断強さの長時間強度外挿法については数多くの研究がなされ, いくつかの比較的精度のよい外挿法が提案されている。それらは, いずれも高温短時間のデータから, より低温の長時間強度を推定するものであるが, 個々の試料の長時間強度を推定してみると, 実際の長時間測定値が得られた場合に推定値との差が大きいことが多い。これに対して, 比較的簡易で精度の高い外挿法を提案する。

2. 外 挿 方 法

一般にクリープ機構は温度によって活性化される過程であることは多くの研究者によつていわれており¹⁾, 定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}$ は次式で表わされる。

$$\dot{\epsilon} = f(\sigma) \exp(-\Delta H_c/RT) \dots\dots\dots (1)$$

(σ = 応力, ΔH_c = クリープの活性化エネルギー, R = 気体定数, T = 絶対温度), ごく大まかな近似ではクリープ破断時間 t_r は定常クリープ速度と次式の関係がある²⁾。

$$\dot{\epsilon} \cdot t_r \approx \text{const}, \dots\dots\dots (2)$$

この式は, ある試料においては常に一定のクリープ伸び (定常クリープ部分の) に達すれば破断がおこることを示すが, 実際にはそういうことは成り立たないので, あまりよい近似式ではない。しかし, (1), (2) 両式から導かれる次式は比較的よい近似で成立する。

$$t_r = g(\sigma) \exp(\Delta H_r/RT) \dots\dots\dots (3)$$

(ΔH_r = クリープ破断の活性化エネルギー), これは (1)(2) 両式の誤差を ΔH_r の項に入れてしまったため, そのために ΔH_r は ΔH_c と多少異なつたものになっている。 ΔH_r が温度や応力に関係なく一定であれば外挿は非常に単純な精度の高いものになるが, 実際にはそうならない。

一般に広く用いられているのは Larson-Miller の方法³⁾と Sherby-Dorn の方法⁴⁾である。前者は一定応力では $P = T(\log t_r + C)$ が一定であるとしており, 定数 C

* 第73回講演大会にて発表 講演番号 169 昭和42年5月10日受付