

東京都立大学大学院エ
東京都立大学工学部
東京都立大学工学部

○多賀系 靖
児玉 昭太郎
三沢 啓志

1. はじめに

近年、欠陥やき裂を含む材料の強度評価には、破壊力学的手法が用いられており、その試験方法も確立され、さまざまな研究が行われている。高じん性高延性材料は、通常の使用状態では延性挙動を示していても、低温あるいは高ひずみ速度状態ではぜい性挙動に変化するため、破壊じん性値が著しく低下することが知られている。したがって、破壊じん性値の温度依存性およびひずみ速度依存性を解明することは非常に重要であると思われる。

本研究では、低強度高延性材料のSS41を用いて、高じん性高延性材料の評価に用いられる弾塑性破壊じん性値JICの温度依存性およびひずみ速度依存性を調べ、ひずみ速度が増加した場合と、温度が低下した場合の材料の破壊挙動がどのように変化するかを調べる。さらに、速度過程理論を考慮して温度とひずみ速度を組み合わせた活性化エネルギーパラメータ $H^*(J) = RT \ln(A_0/\dot{\epsilon})$ を考え、このパラメータと破壊じん性値 $K(JIC)$ との関係を調べ、このパラメータが $K(JIC)$ の推定に有効であることを明らかにした。

2. 実験方法

供試材としては、延性ぜい性遷移が顕著に現われる一般構造用圧延鋼材SS41を用いた。表1に化学成分を示す。熱処理は890℃で30分間保持した後炉冷する完全焼なましを行った。機械的性質を調べる引張試験では、JIS 4号試験片(G.L.=28mm)を用い、ひずみ速度と温度を変化させて試験を行った。破壊じん性試験では、ASTM規格に基づく $1/2$ "CT試験片を用い、ひずみ速度と温度を変化させて試験を行い、JICの温度およびひずみ速度依存性を調べた。き裂発生点の検出には交流電気ポテンシャル法を用い、J積分の算出にはMerkleの簡便式を用いた。なお、ひずみ速度は、 $\dot{\epsilon} = \dot{V}/2\rho$ ($\dot{V}$ は荷重点き裂開口変位速度、 ρ はき裂先端半径)から求めている。さらに、破断後のストレッチ・ゾーン幅(SZW)を測定し、 $K(SZW)$ を求めて検討を加えた。

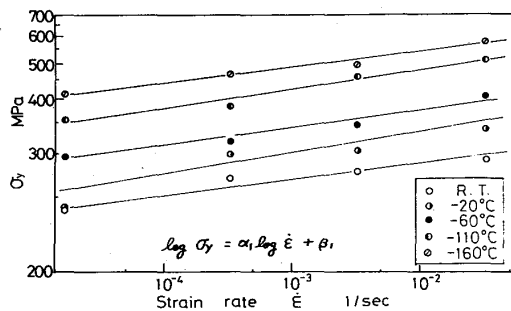


図-1. σ_y とひずみ速度との関係

表-1. 供試材の化学成分 (wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SS 41	.16	.20	.70	.021	.012

表-2. 機械的性質の変化

Test temp. °C	C.H.S. speed mm/min.	σ_y MPa	σ_b MPa	σ_T MPa	伸び %	絞り %
R.T.	0.1	240	397	308	35.6	57.0
	2	270	403	307	37.9	59.0
	20	279	416	311	38.4	60.2
	200	294	424	321	37.0	60.3
-20	0.1	242	413	314	40.0	63.6
	2	302	430	327	40.6	60.1
	20	308	438	321	38.7	61.0
	200	340	449	333	37.1	58.6
-60	0.1	294	427	323	38.2	58.9
	2	318	451	343	37.7	56.5
	20	346	468	344	39.9	60.9
	200	408	474	351	39.3	61.5
-110	0.1	356	446	341	—	62.1
	2	385	465	350	35.1	57.2
	20	463	491	362	41.3	58.6
	200	516	509	364	36.9	61.6
-160	0.1	413	492	355	—	54.9
	2	463	496	385	38.9	58.9
	20	501	532	384	30.9	57.8
	200	586	553	397	24.9	57.2

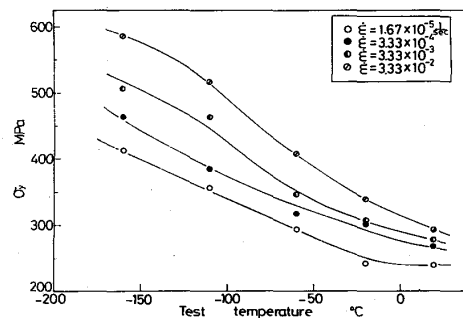


図-2. σ_y と温度との関係

3. 実験結果および考察

3-1. 降伏応力の温度およびひずみ速度依存性

機械的性質の試験条件による変化を表2に示し、降伏応力とひずみ速度との関係を図1に、温度との関係を図2に示す。ひずみ速度が増加すると σ_y は増加し、その割合は低温になるほど著しい。どの試験温度においても $\log \sigma_y$ と $\log \dot{\epsilon}$ の間にはほぼ直線関係が得られ、 σ_y は次の関係式で表わすことができる。

$$\log \sigma_y = \alpha_1 \log \dot{\epsilon} + \beta_1 \quad (\alpha_1, \beta_1 \text{は温度で定まる定数}) \quad (1)$$

速度過程理論によって降伏応力の挙動を考える時は、Sinclair¹⁾にならって次式を用いた。

$$\dot{\epsilon} = A_1 e^{-H(\sigma)/RT}$$

この式で、 $\dot{\epsilon}$ はせん断ひずみ速度、 A_1 は振動数因子と呼ばれる定数、 $H(\sigma)$ は応力による活性化エネルギーパラメータ、 R はガス定数、 T は絶対温度である。式(2)の σ を σ_y に置き換えて変形すると、

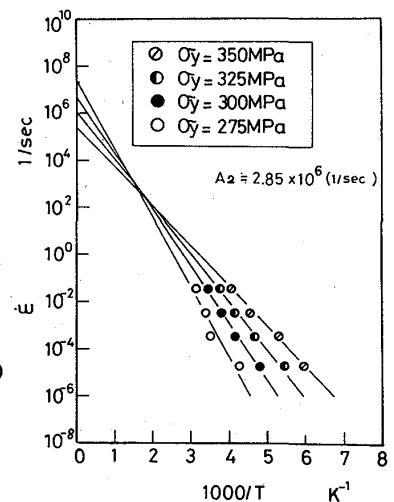
$$\ln \dot{\epsilon} = \{-H(\sigma)/R\} \{1/T\} + \ln A_2 \quad (3)$$

となる。 $H(\sigma)$ の値が一定の条件で、式(3)の関係から振動数因子 A_2 を求めたのが図3である。図より、 A_2 の値は $A_2 = 2.85 \times 10^6$ (1/sec)となり、この値から式(3)を用いて、任意の $H(\sigma) = RT \ln(A_2 / \dot{\epsilon})$ の値を推定できる。このようにして求めた $H(\sigma)$ と降伏応力 σ_y の関係を示したのが図4である。 σ_y と $H(\sigma)$ の関係は、 $H(\sigma) = 12$ (kcal/mol)を境にして2本の直線で近似できることがわかる。本実験で得られた σ_y と $H(\sigma)$ の関係式は次式のようにになる。

$$\begin{cases} \sigma_y = -37 H(\sigma) + 680 & (H(\sigma) \leq 12 \text{ kcal/mol}) \\ \sigma_y \approx 260 & (H(\sigma) > 12 \text{ kcal/mol}) \end{cases} \quad (4)$$

3-2. J_{Ic} の温度およびひずみ速度依存性

J_{Ic} とひずみ速度との関係を図5に、温度との関係を図6に示す。ひずみ速度が増加するほど、また、温度が低下するほど J_{Ic} の値は低くなっている。図中の -60°C 以下の温度域で J_{Ic} として表示したものは、日本機械学会 J_{Ic} 基準の疲労予き裂条件を満足できなかったものである。仮りに有効な J_{Ic} の値が得られた場合には、 J_{Ic} の値より若干低くなることが予想される。図より、 J_{Ic} のひずみ速度依存性は次式の形で表わすことができる。



(2) 図-3. 振動数因子 A_2 の決定

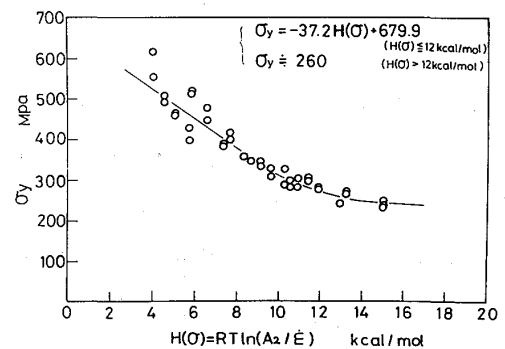


図-4. σ_y と $H(\sigma)$ との関係

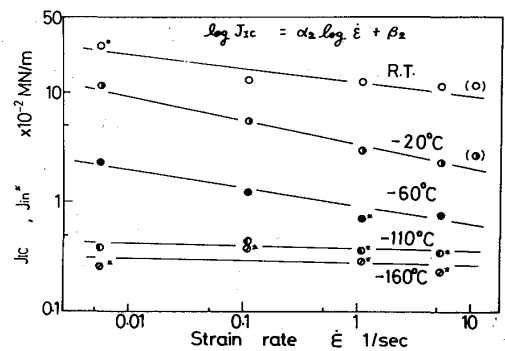


図-5. J_{Ic} とひずみ速度との関係

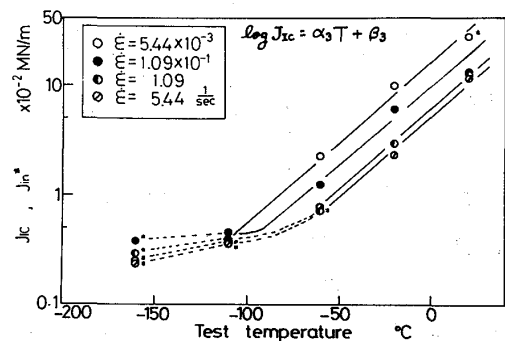


図-6. J_{Ic} と温度との関係

$$\log J_{Ic} = \alpha_2 \log \dot{\epsilon} + \beta_2 \quad (5)$$

(α_2, β_2 は温度で定まる定数)

また、 -60°C 以上の温度域での J_{Ic} の温度依存性は次式で表わすことができる。

$$\log J_{Ic} = \alpha_3 T + \beta_3 \quad (6)$$

(α_3, β_3 はひずみ速度で定まる定数)

本実験で求めた J の値から次に示す

式(7)を用いて換算した $K(J)$ と、限界

ストレッチゾーン幅から式(8)を用いて換算した $K(SZW)$ の値を比較したのが図7である。

$$K(J) = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} J} \quad (7) \quad K(SZW) = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{E}{89} SZW \right)} \quad (8)$$

若干ばらつきはみられるが、 $K(J)$ と $K(SZW)$ の値はほぼ等しくなっている。破壊じん性値 $K(J_{Ic})$ と降伏応力 σ_y の関係を調べたのが図8であり、 $K(J_{Ic})$ の値は σ_y の増加とともに急激に減少している。得られた実験式は次式のようにになる。

$$K(J_{Ic}) = \frac{2.7 \times 10^{10}}{\sigma_y^{3.3}} \quad (9)$$

式(9)より $K(J_{Ic})$ と σ_y は密接な関係があることがわかり、降伏応力の場合と同様、速度過程理論によって破壊じん性値 $K(J_{Ic})$ の挙動を考察した。振動数因子 A_3 の値は、 $A_3 = 3.27 \times 10^{16}$ (1/sec) となり、この値を用いて、 $K(J_{Ic})$ と破壊じん性値による活性化エネルギーパラメータ $H^*(J)$ の関係を示したのが図9である。温度やひずみ速度によらず $K(J_{Ic})$ と $H^*(J)$ の関係は図のような1本の直線で近似することができる。その実験式を示すと次式のようにになる。

$$\log K(J_{Ic}) = 0.084 H^*(J) + 0.348 \quad (10)$$

式(10)を用いると、任意の温度、任意のひずみ速度での破壊じん

性値 $K(J_{Ic})$ を推定することが可能で、この活性化エネルギーパラメータ $H^*(J)$ は非常に実用性の高いパラメータといえよう。破壊発生時のき裂線上塑性域長さ $R_{F,max}$ は、 $R_{F,max} = 0.05 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$ で表わすことができるが、 $R_{F,max}$ のパラメータ $K(J_{Ic})/\sigma_y$ と $H^*(J)$ の関係を示したのが図10である。図より、 $K(J_{Ic})/\sigma_y$ もまた $H^*(J)$ と関連づけられることがわかり、 $R_{F,max}$ を推定したい場合にも活性化エネルギーパラメータ $H^*(J)$ が有効であることがわかる。

4. 結言省略

5. 参考文献

- たとえば、1) Sinclair, G.M., and Bennett, P.E., J. Bas. Engng. Trans. ASME 88 (1966)
2) Corten, H.T., and Shoemaker, A.K., J. Bas. Engng. Trans. ASME (1967)

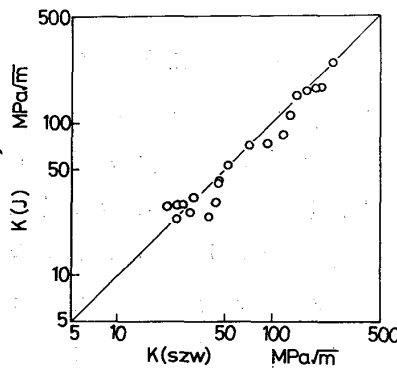


図-7. $K(SZW)$ と $K(J)$ の関係

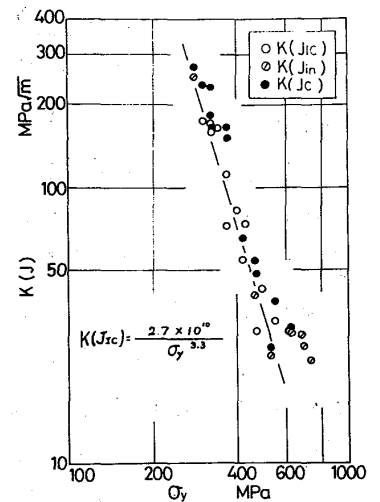


図-8. σ_y と $K(J)$ の関係

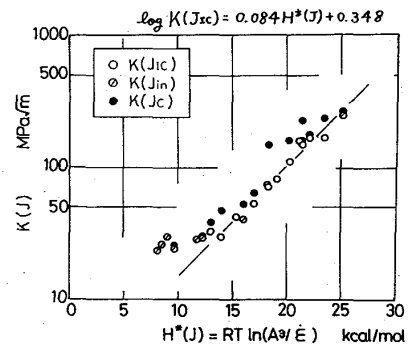


図-9. パラメータ $H^*(J)$ と $K(J)$ の関係

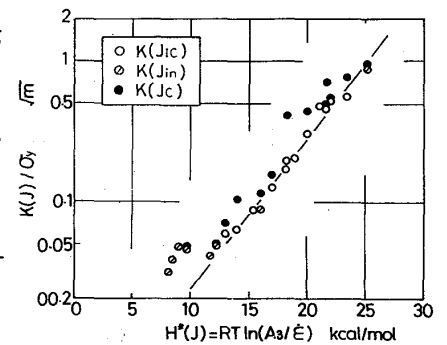


図-10. パラメータ $H^*(J)$ と $K(J)/\sigma_y$ の関係