

I-191

高速負荷時のき裂先端近傍の発熱について

(財)電力中央研究所 正会員 島村和夫
同 上 正会員 伊藤千浩
同 上 正会員 白井孝治

1. はじめに

引張試験におけるくびれの発生時や塑性加工等において、過大な塑性仕事による発熱があることが知られている。一方、衝撃問題では物体に高速飛来物が貫通する場合の貫通点や動的破壊靱性試験時のき裂先端近傍において局所的発熱があり、破壊現象と密接に関係していると考えられる。しかし、これらの問題は現象時間が短いことや、温度測定を行おうとする場合ターゲットが高速で動くことなどにより温度上昇を実験的に確かめることが困難であり詳細に調べられていない。本報告は衝撃負荷を受けるき裂の問題を想定して、き裂先端近傍の温度上昇量を概算し、発熱を考慮する必要性について調べた結果について述べるものである。

2. 定式化

(1) 上昇温度の計算式

リガメントに対し対称な問題を考えると、き裂先端近傍の熱伝導の定式化の一モデル化として無限固体中の線状加熱が考えられる。すなわち、対称性よりリガメント部は断熱境界であり、また現象時間が短いことから熱伝達を無視すれば予き裂表面も断熱境界とみなすことができる。さて、無限固体中に時刻 $t = \tau$ において Δq なる線熱源が瞬間的に与えられたときの温度上昇 ΔT は次のように与えられる¹⁾。

$$\Delta T = (\Delta q / \rho c) \cdot \exp \{-r^2 / 4k(t - \tau)\} / 4\pi k(t - \tau) \quad (1)$$

ここに、 ρ : 密度、 c : 比熱、 r : 熱源からの距離、 k : 熱拡散率、 t : 時間である。き裂先端に発生する塑性仕事は破壊まで継続して与えられるから、式(1)を $\tau = 0 \sim t$ で積分すると次式を得る。但し、熱定数の温度依存性はないものとする。

$$T = \int_0^t \Delta T \Delta \tau \\ = -(\dot{q} / 4\pi\lambda) \cdot Ei(-\xi(r, t, k)) \quad (2)$$

ここに、 $\dot{q}$ は単位時間当たり与えられる熱量 ($= dq/dt$) で一定であるとする。また、 λ は熱伝導率、 Ei は指数積分である。指数積分および ξ は以下の式で与えられる。

$$Ei = -\log \xi - C + \xi - \xi^2 / (2 \cdot 2!) + \dots - (-\xi)^r / (r \cdot r!) - \dots \\ \xi(r, t, k) = r^2 / 4kt \quad (3), (4)$$

ただし、 $C = 0.5772 \dots$ である。

(2) 塑性仕事の熱量への変換

熱源をき裂先端とし、き裂先端近傍の塑性仕事による熱量は全て $r = 0$ に与えられるものとする。熱量を求めるためには塑性域の大きさと塑性域内の応力・ひずみ分布、および熱への変換効率が必要であるが、ここでは次のように単純化して考えた。

$$q = \gamma \sigma_y V_p \epsilon_p \quad (5)$$

ここに、 γ : 変換効率 ($= 1$ とする)、 σ_y : 降伏応力、 V_p : 塑性域面積、 ϵ_p : 相当塑性ひずみ ($= 1\%$ とおく) である。ここで、塑性域の面積はモード I 負荷時の Von Mises の降伏条件を満たす点の軌跡で囲まれた面積で近似すれば次式を得る。

$$V_p = 0.881 (1/2\pi)^2 (K_I / \sigma_y)^2 \quad (6)$$

ここに、 K_I はモード I の応力拡大係数である。式(2)の $\dot{q}$ は一定であるとしたから、破壊までの全発生熱量 q_c を現象時間で平均して求めるものとする。

$$\dot{q} = q_c / \Delta t \quad (7)$$

ここに、 q_c は式（6）で $K_I = K_{Ic}$ を代入したものを式（5）に用いて近似し、また現象時間についても静的破壊靱性値 K_{Ic} を応力拡大係数速度 $\dot{K}_I$ で除したものとした。

$$\Delta t = K_{Ic} / \dot{K}_I \quad (8)$$

3. 計算例

材料として球状黒鉛鋳鉄、A2024-T4、Ti-6Al-4Vの3種類を考えた。これらの材料は表1に示す熱定数より分かるように、本問題の支配因子の1つである熱拡散率 k が大きく異なるように選んだものである。機械的性質は表2に示す値を用い温度依存性は無視した。同表中の塑性域寸法を表すパラメータ $(K_{Ic}/\sigma_y)^2/2\pi$ も示してあるが、A2024-T4の塑性域が大きいことが分かる。また、計算では $\dot{K}_I$ をパラメータとし、 $K_I = 10^5, 10^6, 3.23 \times 10^6$ ($\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2/3}/\text{s}$) の3種類の応力拡大係数速度を用いた。

計算結果を図1に示す。横軸は塑性域寸法を表すパラメータで無次元化している。同図より各材料とも高速負荷となり現象時間が短くなるほど、周囲への熱の広がりが遅れるためき裂先端近傍で局所的に大きく昇温することが分かる。また、塑性域寸法および熱拡散率の小さいTi-6Al-4Vでは、相対的に狭い範囲で高温となるが、その逆に

塑性域寸法、熱拡散率の大きなA2024-T4では昇温域が広がることが分かる。なお、式（2）の T は $\dot{q}$ について線形であるから、異なる γ や ε_p についての上昇温度は図1を縦軸方向に拡大あるいは縮小すればよい。

4. おわりに

熱源をき裂先端の1点に集中させていることの矛盾や、 $\dot{q}$ を求める上での種々の仮定を含む計算結果ではあるが、高速負荷時にはき裂先端近傍でかなりの温度上昇が見込まれることを示した。材料定数の温度依存性を考慮すると、き裂先端近傍の応力状態は、常温の値を用いて得られるものよりかなり緩和されるものと予想される。また、熱膨張も生ずる。その程度は熱的性質と機械的性質の温度依存性によるため材料によりかなり異なるものと考えられる。

今後は、上昇温度のより正確な計算と実験による発熱の確認方法を検討していく予定である。最終的には K_{Ic} と K_{Ia} の関係を、機械的性質の温度依存性と熱定数を用いて説明したいと考える。

参考文献

- 1) 溶接強度ハンドブック、佐藤邦彦編
- 2) 伝熱工学便覧、日本機械学会
- 3) 使用済核燃料輸送容器の構造解析プログラムの開発・整備に関する調査報告書（Ⅲ）、日本機械学会

表1 計算に用いた各種材料の熱定数²⁾

材 料	密度 ρ ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{mm}^2$)	熱伝導率 λ ($\text{kgf}/\text{s} \cdot \text{K}$)	熱拡散率 k (mm^2/s)
球状黒鉛鋳鉄	7.168×10^{-10}	2.050	5.922
A2024-T4	2.827×10^{-10}	12.240	49.200
Ti-6Al-4V	4.510×10^{-10}	0.775	3.200

表2 材料定数³⁾および限界塑性域寸法、現象時間

材 料	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	降伏応力 σ_y (kgf/mm^2)	K_{Ic} ($\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2/3}$)	$(K_{Ic}/\sigma_y)^2/2\pi$ (mm)	K_{Ic}/K_I (μs)
球状黒鉛鋳鉄	-150	58.2	67.8	0.216	678, 68, 21
A2024-T4	20	40.0	110	1.204	1100, 110, 34
Ti-6Al-4V	20	112.0	122	0.189	1220, 122, 38

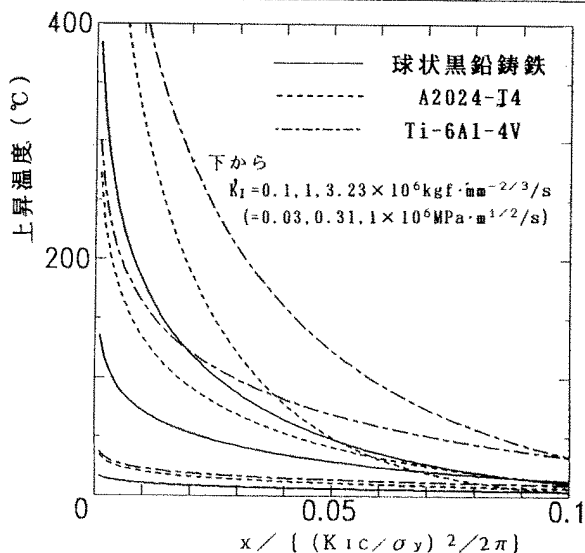


図1 き裂先端近傍の上昇温度