線熱源による切断におけるき裂進展挙動*

沢田博司** 今井康文*** 才本明秀† 山本良之**

Crack Extension Behavior in a Thermal Stress Cleaving Using a Line Heat Source

Hiroshi SAWADA, Yasufumi IMAI, Akihide SAIMOTO and Yoshiyuki YAMAMOTO

Electronic substrates on which precise circuits were already formed can be cleaved without leaving any micro-cracks on the cleaved surface by a thermal stress cleaving using a line heat source. In order to understand the crack extension behavior, time-dependent stress intensity factors of long and short cracks pre-induced from the end of a thin plate are analyzed when a thin plate is heated by a continual line heat source on the crack line. In the case of a long crack, the stress intensity factor is almost independent from the crack length but, in the case of a short crack, the factor is strongly dependent on the crack length. Accordingly, two different modes of crack extension appear. The condition, which mode appears, can be clarified from the comparison of stress intensity factors of two cases. With high heating power, a strip with narrow width can be cleaved stably. For stable cleaving, therefore, it is essential to use high heating power so long as the heat damage doesn't appear. This conclusion agrees well with experiments using glass plates.

Key words: stress intensity factor, line heat source, fracture, crack extension, thermal stress cleaving

1. 緒 言

一般的なぜい性材料の切断方法としてはダイヤモンドブレードにより研削加工を行うダイシング法やローラチゼル、ダイヤモンドポイント等を用いたスクライビングによりき裂を発生させた後、き裂に曲げ応力を作用させることで切断を行うスクライビング法が知られている。しかし、微細な回路が形成された電子材料をこれらの方法で切断するとマイクロクラックやパーティクルの発生が避けられず、製品に致命的な欠陥をもたらすことがある。そこで、マイクロクラックやパーティクル発生のない切断加工が可能な線熱源による切断が研究されている^{1)~3)}。この方法は線熱源により帯板に熱応力を発生させ、き裂を進展させる方法であり、き裂進展経路上を常に加熱しているため高い直進精度が得られ、ガラスやセラミック基板の切断工程に適用できる。

き裂創生のための端面きずを有する帯板を線熱源により切断する際、主に幅の広い帯板の場合は加熱後しばらくすると、帯板幅の5~20%程度の長さのき裂が瞬間的に発生し、そののち急激に進展速度を低下させる。その後き裂は再び加速しはじめ、滑らかに進展する。一方、幅の狭い帯板の場合、き裂発生とともに一気に終端面近傍までき裂が伝播し、不安定破壊することが多い。後者の場合、切断面にき裂伝播にともなうしま模様が生じ、切断面の平滑性が損なわれることがあるため、極力安定的にき裂進展させることが望まれる。

本研究では線熱源により帯板に発生する熱応力と応力拡大係数の解析を行い、2つの切断モードの現れる条件を明確にした。さらに、ガラスのき裂進展挙動について考察し、実験と比較した。

2. 線熱源による応力拡大係数

図1に示すように幅 $2W$ 、厚さ b の薄い半無限帯板に単位長さ、単位厚さ、単位時間当たり Q_L の熱量を $y=W$ の位置に加えた場合を考える。板の端面や表面からの放熱はなく、断熱されているとする。板厚内での温度変化は小さいとし、板厚平均の温度で代表すると、温度は y 方向のみに変化し、加熱 t 後では、

$$T(y,t) = \frac{2Q_L W}{\lambda} \left\{ \frac{S}{16} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_n^2} (1 - e^{-\omega_n^2 S/16}) \cos \frac{\omega_n y}{2} \cos \frac{\omega_n y}{2W} \right\} \quad (1)$$

と表される⁴⁾。ここで、 λ 、 κ はそれぞれ材料の熱伝導率、熱拡散率、 $\omega_n = n\pi$ 、 $S = 4\kappa t/W^2$ であり、応力場との連成項は小さいとして無視した。

また、式(1)の温度場を持つ無限帯板に生じる熱応力は、

$$\sigma_x^0(y,t) = -\frac{\alpha E Q_L W}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\omega_n^2} (1 - e^{-\omega_n^2 S/16}) \cos \frac{\omega_n y}{2} \cos \frac{\omega_n y}{2W} \quad (2)$$

のように計算される。ここで、 α 、 E はそれぞれ材料の線膨張率、縦弾性係数である。

式(1)で表される温度場を持つ帯板の自由端から、加熱線に沿って x 軸に平行に端面からき裂がある場合のモード I の応力拡大係数 K_I は体積力法を用いて計算することができる⁵⁾。

Fig.1 Heating of a thin strip using a line heat source

* 原稿受付 平成11年11月19日

** 正会員 NEC 機械 (草津市南山田町85)

*** 正会員 長崎大学工学部 (長崎市文教町1-14)

† 長崎大学工学部

 (a) $L/W=4.0$

 (b) $L/W=10.0$

Fig.2 Stress intensity factor versus crack length

Fig.3 Scratch on the end surface by a diamond pen

図2は無次元加熱時間 $4\kappa t/W^2$ をパラメータとし、横軸にき裂長さ c と帯板長さ L の比である無次元き裂長さ c/L を、縦軸に熱量 Q_L 等により無次元化した応力拡大係数をプロットしたものである。 c の増加とともに応力拡大係数はいったん最大値 $K_{I\max}$ となった後若干減少し、 c/L の広い範囲でほぼ一定値 K_{IL} を保った後にリガメント長さ $(L-c)/W=2$ 付近からき裂長の増加にしたがい減少し、 $c/L \rightarrow 1$ の極限で0に収束する。また、無次元加熱時間 $4\kappa t/W^2$ が短いほど $K_{I\max}$ の発生する位置は端面に近づき、 $K_{I\max}/K_{IL}$ は大きくなっている。

3. き裂進展挙動

通常、線熱源による割断は、図3に示すような端面きずをダイヤモンドペンにより導入して行われる。この時端面きず先端に微小なき裂が形成されている。

長さ c_0 の微小なき裂を有する帯板を線熱源により加熱した場合のき裂進展挙動を、図2を模式的に描いた図4により考える。

(a) Short heating time

(b) Long heating time

Fig.4 Schematic diagram showing crack extension behavior

図4(a), (b)はそれぞれ無次元加熱時間 $4\kappa t/W^2$ が短い場合、長い場合を示している。加熱量や帯板幅が大きいと、き裂進展に必要な無次元応力拡大係数 $K_{Ic} \lambda / \alpha E Q_L W^{3/2}$ は減少し、き裂進展開始までの無次元加熱時間は短くなる。この場合、図4(a)のように $K_{I\max}$ の発生する位置が端面に近く、さらに $K_{I\max}/K_{IL}$ が大きくなっているため、長さ c_0 の微小なき裂の応力拡大係数 K_{IS} が破壊じん性値 K_{Ic} に達すると実線矢印で示すように瞬時に c_1 まで進展した後、時間経過とともに応力拡大係数が増加することにより滑らかに進展を続けるようになる。(安定割断)

一方、加熱量や帯板幅が小さい場合、き裂進展までに長い無次元加熱時間が必要となり、図4(b)に破線矢印で示すように長さ c_0 の微小なき裂の応力拡大係数 K_{IS} が K_{Ic} に達すると瞬時に終端面近傍の c_2 まで進展することになる。(不安定割断)

したがって、微小なき裂の応力拡大係数 K_{IS} が $K_{IS}=K_{Ic}$ を満たす加熱時間のとき、同一加熱条件での K_{IL} と比較して、

$$K_{IL} \leq K_{IS} = K_{Ic} \quad (\text{安定割断}) \quad (3)$$

$$K_{IL} > K_{IS} = K_{Ic} \quad (\text{不安定割断}) \quad (4)$$

となる。

不安定割断の際、主き裂のみが進展していくとすれば、き裂進展中の応力拡大係数は K_{Ic} を大きく上回ることになり、これが割断面の平滑性をそこう原因と考えられる。

ところで、き裂が端面から離れ、応力拡大係数が c/L に依存しない領域では端部に純曲げを受ける二重片持ちはりとして取り扱うことができ、 K_{IL} は

$$K_{IL} = \frac{\alpha E Q_L W^{3/2}}{\lambda} f(S) \quad (5)$$

Fig.5 Time dependence of the stress intensity factor for a long crack

Fig.6 Time dependence of the stress intensity factor for a short crack

で近似される³⁾。ここで、 $f(S)$ は次式で与えられる。

$$f(S) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{32\sqrt{3}}{\omega_n^2} (1 - e^{-\omega_n^2 S/16}) \cos \frac{\omega_n}{2} \left\{ \frac{1}{4\omega_n} \sin \frac{\omega_n}{2} + \frac{1}{\omega_n^2} (\cos \frac{\omega_n}{2} - 1) \right\} \quad (6)$$

このようにして計算した応力拡大係数 K_{II} の時間的変化を図5に示す。横軸は時間を代表する無次元時間、縦軸は K_{II} を加熱量 Q_L 等で無次元化した $f(S)$ である。

一方、き裂長 c が非常に短い場合の応力拡大係数 K_{IS} は、 y 方向に垂直応力 σ_{y0} を一様に受けている縁き裂で近似すれば、

$$K_{IS} = 1.1215 \sigma_{y0} \sqrt{\pi c} \quad (7)$$

と表される。また、 σ_{y0} は $L/W \geq 4$ の場合、式(1)の温度場を持つ無限帯板中の $(x, y) = (0, W)$ 点の σ_x を逆符号とした

$$\sigma_{y0} = -\sigma_x^0(W, t) \quad (8)$$

と近似される⁹⁾。したがって、式(2)、式(8)から式(7)は

$$K_{IS} = \frac{\alpha E Q_L W \sqrt{c}}{\lambda} g(S) \quad (9)$$

のように表される。ここで、 $g(S)$ は次式で与えられる。

$$g(S) = 1.1215 \sqrt{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\omega_n^2} (1 - e^{-\omega_n^2 S/16}) \cos^2 \frac{\omega_n}{2} \quad (10)$$

このようにして計算した応力拡大係数 K_{IS} の時間的変化を図6に示す。横軸は時間を代表する無次元時間、縦軸は K_{IS} を加熱量 Q_L 等で無次元化した $g(S)$ である。図5および図6から K_{IS} は K_{II} より立ち上がり早いことがわかる。

Fig.7 Comparison of stress intensity factors from the approximate formulae and body force method

 Fig.8 Stable and unstable cleaving regions in a c_0/W versus heating time plane

体積力法および式(5)、式(9)から求めた c/W と応力拡大係数の関係を図7に比較した。この図から $4 \kappa t / W^2 = 0.1$ 、 $L/W \geq 4$ の条件では、式(5)は端面近傍を除く広い範囲で、帯板に発生する応力拡大係数を精度良く近似していることがわかる。また、式(9)は $c/W \leq 0.006$ の範囲で応力拡大係数を5%未満の誤差で近似している。

そこで、 $c_0/W \leq 0.006$ の初期き裂を有する帯板が安定割断するか不安定割断するかの判定を式(5)、式(9)を使って表すと、

$$\frac{K_{II}}{K_{IS}} = \sqrt{\frac{W}{c_0}} \frac{f(S)}{g(S)} \leq 1 \quad (\text{安定割断}) \quad (11)$$

$$\frac{K_{II}}{K_{IS}} = \sqrt{\frac{W}{c_0}} \frac{f(S)}{g(S)} > 1 \quad (\text{不安定割断}) \quad (12)$$

となり、初期き裂寸法 c_0/W と加熱時間 S のみで判定できることになる。図8に示すように、 c_0/W —無次元加熱時間平面を、 $K_{II} = K_{IS}$ の曲線が安定割断と不安定割断の領域に分割している。図8から、短時間で加工するほど短いき裂寸法でも安定割断されやすくなることがわかる。

4. ガラス割断への適用

ガラスの物性値を用いて種々の帯板幅における K_{IS} および K_{II} を計算し、各値が K_{IC} に達するまでの加熱時間を求めた。

 (a) $Q_L = 20 \text{ kW/m}^2$

 (b) $Q_L = 50 \text{ kW/m}^2$

Fig.9 Stable and unstable cleaving depending on a glass width

Table 1 Thermo-mechanical properties of used glass

κ m ² /s	λ W/(m·K)	α K ⁻¹	E GPa	K_{IC} MPa·m ^{1/2}
5.0×10^{-7}	1.03	8.3×10^{-6}	69.2	0.73

計算結果を図 9 に示す。ただし、 K_{IS} を求める際の微小き裂長さは 0.1mm とし、ガラスの物性値は表 1 の値を使用した。ある帯板幅に対して、加熱開始時は横軸上の一点で表され、縦軸が加熱時間の経過を表している。 K_{IS} が先に K_{IC} に達すると安定割断となり、 K_{IL} が先に K_{IC} に達すると不安定割断となる。

線熱源による割断では、き裂先端が端面から十分離れている場合、き裂進展までに必要な加熱時間は帯板幅の増加にしたがい長くなり、端面きずからのき裂進展までに必要な加熱時間は、帯板幅による差があまり見られないという実験結果が報告されている³⁾が、図 9 より $K_{IL} = K_{IC}$ となる加熱時間は帯板幅の増加にしたがい長くなるのに対し、 $K_{IS} = K_{IC}$ となる加熱時間は帯板幅に依存せずほぼ一定であり、実験結果が良く説明できる。

さらに図 9 から、加熱量を大きくすると、狭い板幅のものまで安定割断できることがわかる。したがって、帯板幅の狭いものは熱損傷が現れない範囲で加熱量を上昇させ、短時間で割断することが安定割断する上で重要である。また、同図から帯板幅が大きくなると、図 8 の縦軸の値は W に反比例して小さくなるが、無次元加熱時間が W^2 に反比例してさらに小さくなるためである。

Fig.10 Minimum cleaving width as a function of heating power

Fig.11 Experimental setup

K_{IS} および K_{IL} を Q_L 等で無次元化した $f(S)$, $g(S)$ は $S \rightarrow \infty$ で定常値を持つため、き裂進展可能な最小の帯板幅が存在し加熱量により決まってくる。式(6)、式(10)より

$$f(\infty) = 7.21687 \times 10^{-2} \quad (13)$$

$$g(\infty) = 0.331254 \quad (14)$$

と計算され、上記の値と表 1 に示すガラスの物性値を式(5)および式(9)に代入すると、各加熱量でのき裂進展可能な最小帯板幅を計算することができる。き裂が長く、先端が端面から離れた位置にある場合および微小き裂 ($c = 0.1 \text{ mm}$) の場合のき裂進展可能な帯板幅を図 10 に示す。

5. 実験装置および方法

加熱量の増加にともない割断モードが不安定割断から安定割断に変化することを確認するために割断実験を行った。図 11 に実験装置を示す。線熱源に用いるニクロム線は発熱時の膨張を吸収するためスライドと引張りばねにより常に約 500 N の張力が与えられている。ニクロム線の直径は 0.5 mm、長さは 300 mm である。試料には、幅 45 mm、長さ 135 mm、厚さ 2.8 mm のソーダガラスを用いた。ガラス置台は試料であるソーダガラスをセットするとその下面がニクロム線に軽く接触するように調整されている。

割断加工はソーダガラスの一端面に図 3 に示したような端面きずをダイヤモンドペンにより導入し、端面きずがニクロム線に来るように位置決めした後、ニクロム線に通電して行った。通電条件は (6 V, 3.3 A) ~ (13 V, 6.6 A) の範囲で変化させ、各通電条件における、き裂進展までの加熱時間の測定と割断モードの観察を行った。

Fig. 12 Heating time required for crack extension from a scratch and cleaving mode versus heating power

6. 実験結果および考察

加熱量の変化に対するき裂進展までの加熱時間とそのときの割断モードを図 12 に示す。ここで、横軸の Q_L はニクロム線に供給したエネルギーとガラスのエネルギー吸収率の積をニクロム線長とガラス厚で割って求めた。なお、ニクロム線に供給したエネルギーと赤外線熱画像装置により測定したガラスの温度上昇から換算した吸収エネルギーとの比からガラスのエネルギー吸収率を 75% と仮定した。

図 12 から加熱量を大きくすると安定割断が起こり、加熱量を小さくすると加熱時間が長くなり不安定割断が起こることがわかる。したがって、安定割断を行うためには加熱量を大きくし短時間で割断することが有効であると実験結果からも確認できる。また、30～55 kW/m² の加熱条件では 2 種類の割断モードが現れるが、これは端面きずによる初期き裂長のばらつきが原因である。き裂長が微小な場合、式(7)に示したように、応力拡大係数 K_{IS} はき裂長の平方根に比例するため、初期き裂長のばらつきによりき裂進展までの加熱時間もばらつき、短めの時間でき裂進展するときには安定割断となり、長めの時間でき裂進展するときには不安定割断となり 2 種類の割断モードが現れる。

また、同図から加熱量が大きいほど、き裂進展までの加熱時間のばらつきが小さくなっていくことがわかる。この原因も初期き裂長のばらつきと考えられる。たとえば、初期き裂長が 0.1 mm の場合、 $K_{IS}=K_{IC}=0.73 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を満たすためには式(7)から、 $\sigma_{y0}=36.7 \text{ MPa}$ と求められる。しかし、初期き裂長が 0.07 mm の場合には $\sigma_{y0}=43.9 \text{ MPa}$ となる必要がある。図 13 に幅 45 mm のガラスにおける 3 種類の加熱量に対する σ_{y0} の時間的変化を示す。初期き裂長が 0.1 mm の場合のき裂進展までの加熱時間を実線で、0.07 mm の場合を破線で表している。この図から加熱量が大きいほど、初期き裂長の変化に対し、き裂進展までの加熱時間のばらつきが小さくなることが理解できる。

Fig. 13 σ_{y0} variation with the heating time for different heating power

図 12 の $Q_L=30 \text{ kW/m}^2$ の実験データではき裂進展に必要な加熱時間は 35.5～91.3 s となっている。これをもとに式(9)から初期き裂長を推定すると 0.062～0.127 mm と求められる。

7. 結 論

線熱源により帯板に発生する熱応力と応力拡大係数の解析を行い、安定割断、不安定割断の現れる条件を明確にした。また、ガラスのき裂進展挙動について考察し、板ガラスを用いた実験結果と比較した。その結果つぎの結論を得た。

- (1) 微小なき裂および充分長いき裂を有する帯板に発生する無次元応力拡大係数の近似解を求め、両者の比をとることにより割断モードの判定式を示した。
- (2) 加熱量を大きくすると、狭い板幅のものまで安定割断できる。したがって、板幅の狭いものは熱損傷が現れない範囲で加熱量を上昇させることが安定割断する上で重要である。
- (3) 不安定割断時、主き裂のみが進展しているとすれば、き裂進展中の応力拡大係数は K_{IC} を大きく上回ることであり、これが割断面の平滑性をそこなう原因と考えられる。
- (4) 線熱源により発生する応力拡大係数は定常値を持つためき裂進展可能な最小の帯板幅が存在し、その幅は加熱量により決まってくる。
- (5) 初期き裂長の変化に対し、加熱量が大きいほど、き裂進展に必要な加熱時間のばらつきが小さくなる。

参 考 文 献

- 1) 佐藤和郎, 綿住輝博, 佐伯邦男: 熱応力によるガラス板の新切断法, 塑性と加工, **18**, 201 (1977) 821.
- 2) 佐藤和郎: 切断の魔術, 装華房, (1993) 88.
- 3) 沢田博司, 今井康文, 才本明秀: 線熱源による帯板の熱応力割断, 精密工学会誌, **64**, 2 (1998) 302.
- 4) 甲藤好郎: 熱伝導論, 共立出版, (1964) 63.
- 5) 才本明秀, 沢田博司, 今井康文: ぜい性薄板の熱線割断と寸法効果, 材料, **47**, 8 (1998) 813.
- 6) J. P. Den Hartog: Temperature Stress in Flat Rectangular Plates and in Thin Cylindrical Tubes, J. Franklin Institute, **222** (1936) 149.