

Propriedades Térmicas de
Materiais Cerâmicos
Resistência ao Choque Térmico

Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira
Departamento de Engenharia de
Materiais – EESC/USP

Suposições para estimar ΔT_c

1. material com N defeitos de Griffith por volume, idênticos e uniformemente distribuídos
2. defeitos (trincas) circulares com raio c_i
3. resfriamento uniforme, gerando um estado triaxial de tração bem definido, dado por

$$\sigma_{ther} = - \frac{\alpha Y \Delta T}{(1 - 2\nu)}$$

4. todas as N trincas se propagam simultaneamente, e não há interação entre elas

Parâmetros que afetam a resistência ao choque térmico

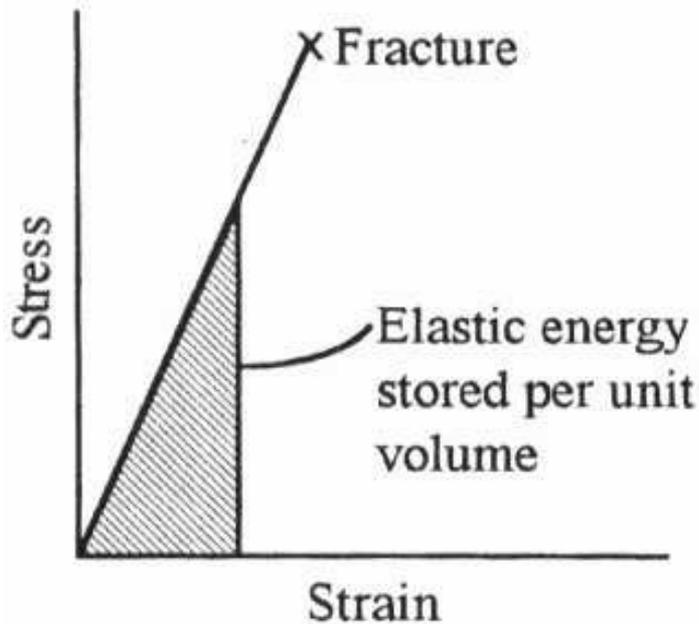
- A energia total do sistema é

$$U_{tot} = U_0 - U_{strain} + U_{surf}$$

- U_0 = energia do sólido sem deformação devido ao estado de tensões e sem trincas, de volume V_0
- U_{strain} = energia de deformação
- U_{surf} = energia de superfície
- Lembrando que os campos de tensão não interagem, na presença de N trincas, a energia do sistema é alterada da seguinte forma

$$U_{tot} = U_0 + \frac{V_0 \sigma_{ther}^2}{2Y} - \frac{\left(N \frac{4\pi c_i^3}{3} \right) \sigma_{ther}^2}{2Y} + N G_c \pi c_i^2$$

Energia elástica armazenada



(a)

- Lei de Hooke
$$\sigma = Y\varepsilon$$
- A energia armazenada no regime elástico é a área embaixo da curva tensão vs deformação. No caso, a deformação elástica é causada pela variação abrupta da temperatura, e as tensões geradas são tensões térmicas

- $$U_{elas} = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma_{ther} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{ther}^2}{Y}$$

Parâmetros que afetam a resistência ao choque térmico

- A energia total do sistema é

$$U_{tot} = U_0 - U_{strain} + U_{surf}$$

- U_0 = energia do sólido sem deformação devido ao estado de tensões e sem trincas, de volume V_0
- U_{strain} = energia de deformação
- U_{surf} = energia de superfície
- Lembrando que os campos de tensão não interagem, na presença de N trincas, a energia do sistema é alterada da seguinte forma

$$U_{tot} = U_0 + \frac{V_0 \sigma_{ther}^2}{2Y} - \frac{\left(N \frac{4\pi c_i^3}{3} \right) \sigma_{ther}^2}{2Y} + NG_c \pi c_i^2$$

energia elástica relaxada pela presença da trinca

energia de superfície pela presença da trinca, onde $G_c = 2\gamma$ é a tenacidade.

Parâmetros que afetam a resistência ao choque térmico

- Diferenciando e igualando a expressão anterior a zero, para encontrar o tamanho máximo de trinca que faz os defeitos propagarem:

$$\frac{dU_{tot}}{dc_i} = -\frac{(N4\pi c_i^2)\sigma_{ther}^2}{2Y} + 2NG_c\pi c_i = 0$$

- Considerando $\sigma_{ther} = -\frac{\alpha Y \Delta T}{(1-2\nu)}$ e rearranjando, o choque térmico $\Delta T = (T_{max} - T_{ambi}) \geq \Delta T_c$:

$$\Delta T_c \geq \sqrt{\frac{G_c(1-2\nu)^2}{\alpha^2 Y c_i}}$$

Resistência ao choque térmico

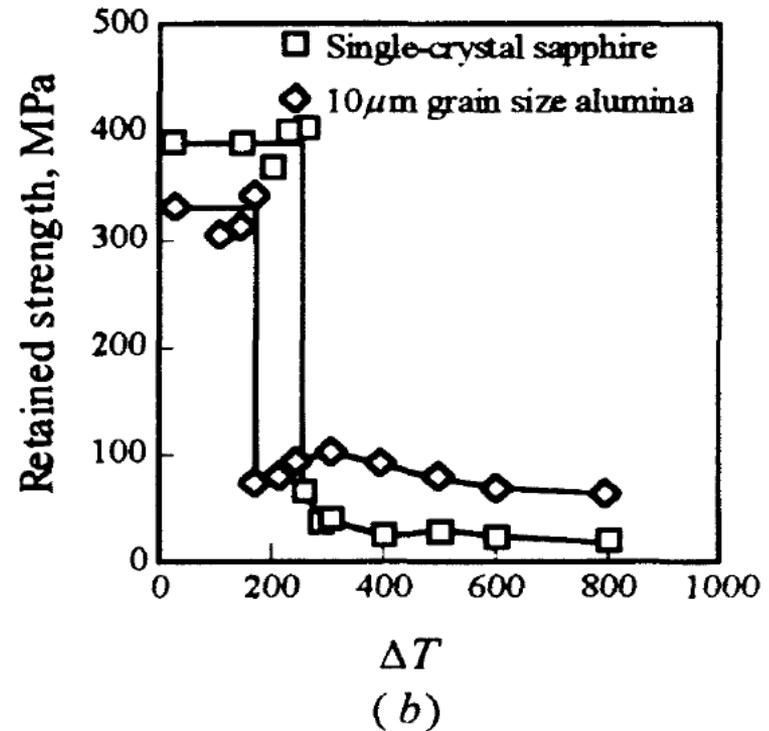
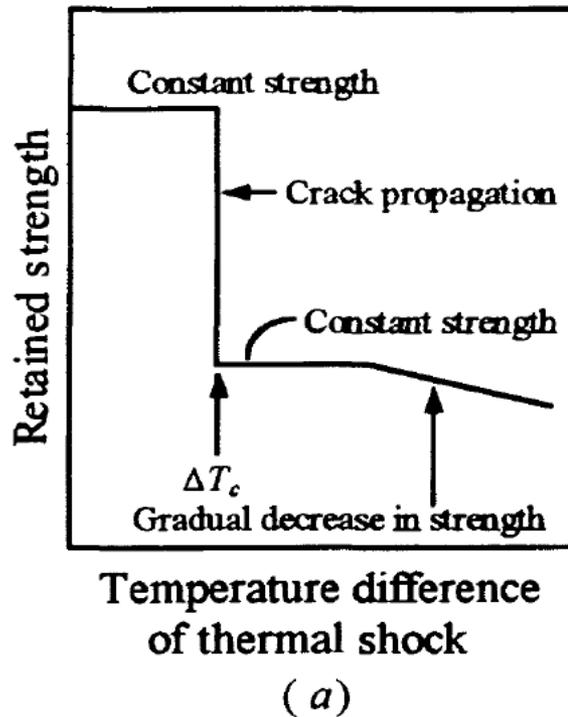


Figure 13.3 (a) Schematic of strength behavior as a function of severity of quench ΔT . (b) Actual data for single-crystal and polycrystalline alumina²³⁵ (error bars were omitted for the sake of clarity).

Comprimento final de trinca, c_i , por choque térmico

- A força motriz para propagação de trinca por choque térmico é finita, e o tamanho de trinca alcança um valor final, c_i .
- Igualando a energia elástica disponível ao aumento da energia de superfície:

$$\Delta U_{surf} = U_{elas}$$

$$NG_c\pi(c_f^2 - c_i^2) = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{ther}^2}{Y} = \frac{1}{2} \frac{\left(-\frac{\alpha Y \Delta T_c}{(1-2\nu)}\right)^2}{Y}$$

$$\Delta T_c = \sqrt{\frac{G_c(1-2\nu)^2}{\alpha^2 Y c_i}}$$

- para $c_f \gg c_i$

$$c_f \cong \sqrt{\frac{1}{\pi N 2 c_i}}$$

- (a equação 13.13 do Barsoum não tem 2 no denominador... Checar)
- c_f não depende das propriedades do material!!!
- Esse modelo é simplificado.

Teoria de choque térmico de Hasselman (mais exata)

$$\Delta T_c = \sqrt{\frac{\pi G_c (1 - 2\nu)^2}{\alpha^2 Y (1 - \nu^2) c_i} \left[1 + \frac{16 N c_i^3 (1 - \nu)^2}{9 (1 - 2\nu)} \right]}$$

$$c_f = \sqrt{\frac{3(1 - 2\nu)}{8(1 - \nu^2) N c_i}}$$

Para baixa densidade de trincas (N pequeno) e trincas muito finas (pequenas), esse termo é próximo de 1, e a expressão fica parecida com a anterior.

Tolerância ao choque térmico

- Se as trincas forem pequenas e em pouco número, seu comprimento final será grande e a degradação por choque térmico será grande!
- Se o número de pequenas trincas for grande, cada uma vai propagar apenas um pouco, e a degradação do material será menos severa. Nesse caso, se diz que o material é tolerante ao choque térmico.
- Essa é a estratégia usada para fabricar tijolos para fornos que precisam resistir a choque térmico – em geral são muito porosos.

Fator de seleção para resistência a choque térmico

$$R_H = \textit{constante} \cdot \Delta T_c =$$
$$\textit{constante} \sqrt{\frac{G_c}{\alpha^2 Y}} = \frac{K_{Ic}}{\alpha Y}$$

- Kingery's

$$R_{TS} = \textit{constante} \cdot \Delta T_c =$$
$$\textit{constante} \frac{(1 - 2\nu)\sigma_t}{\alpha Y}$$

Resistência ao choque térmico

Table 13.1 Comparison of thermal shock parameters for a number of ceramics. Poisson's ratio was taken to be 0.25 for all materials

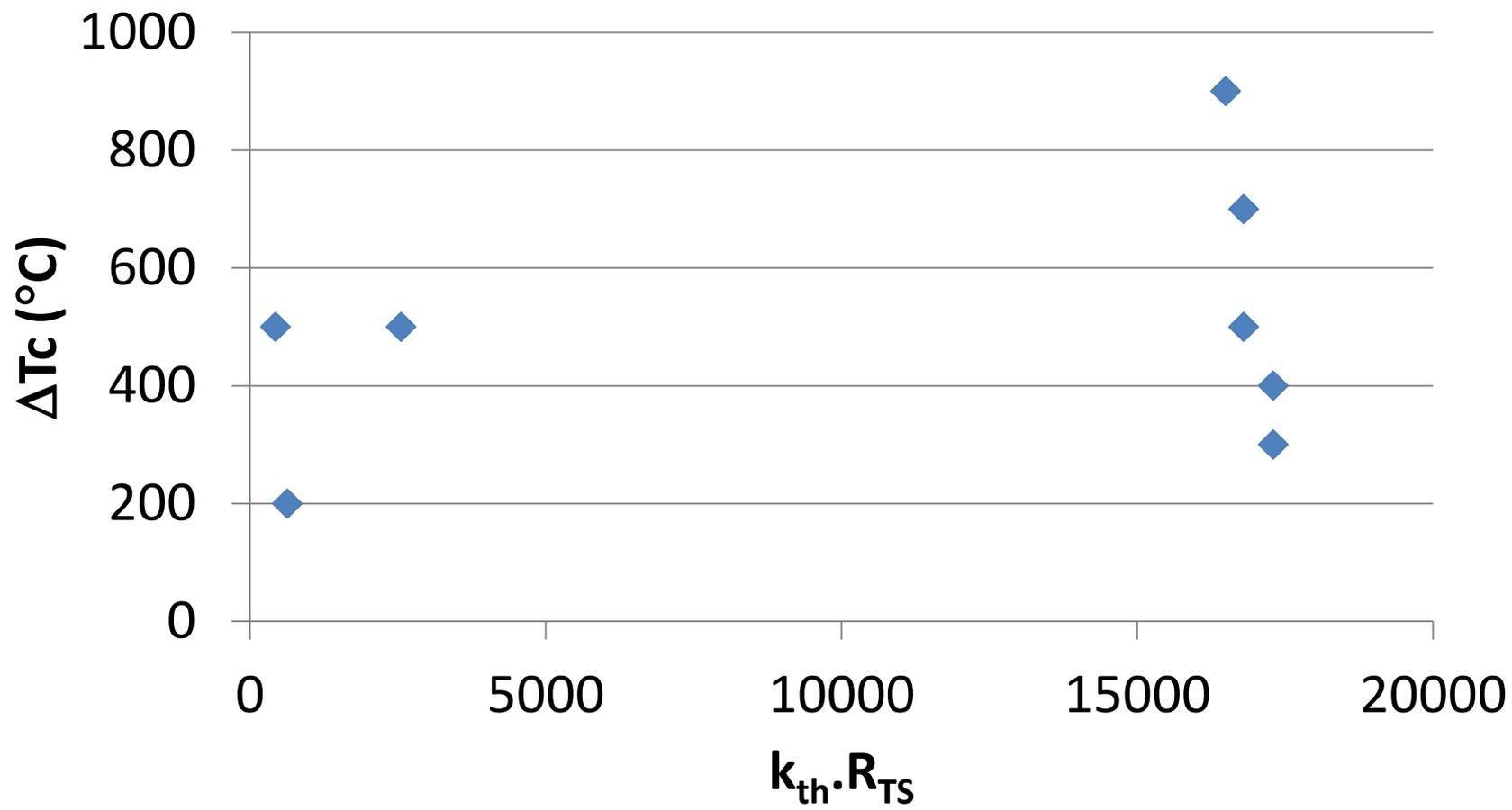
Material	MOR, MPa	Y , GPa	α , 10^6 K^{-1}	k_{th} , W/(m·K)	K_{Ic} , MPa·m ^{1/2}	$k_{th}R_{TS}$, W/m	$R_H k_{th}$, W/m ²	ΔT_c , exper.
SiAlON	945	300	3.0	21	7.7	16,500	180	900
HP [†] -Si ₃ N ₄	890	310	3.2	15-25	5.0	16,800	126	500-700
RB [‡] -Si ₃ N ₄	240	220	3.2	8-12	2.0	2,557	28	≈500
SiC (sintered)	483	410	4.3	84	3.0	17,300	143	300-400
HP [†] -Al ₂ O ₃	380	400	9.0	6-8	3.9	633	8	200
HP [†] -BeO	200	400	8.5	63		2,800		
PSZ	610	200	10.6	2	≈10.0	435	9	500
Ti ₃ SiC ₂	300	320	9.1	43	≈10.0		149	>1400

[†] Hot-pressed

[‡] Reaction-bonded

§ Partially stabilized zirconia

Resistência ao choque térmico



Resistência ao choque térmico

