第 48 卷第 12 期
2020 年 12 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 12
December，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200405

基于应变诱导控制陶瓷预制裂纹的方法及断裂韧性评价

魏永金[1,2]，万德田[1,2,3]，李 恺[3]，包亦望[1,2,3]，田 远[1,2]，李月明[3]

(1. 中国建筑材料科学研究总院有限公司，绿色建筑材料国家重点实验室，北京 100024；
2. 中国建材检验认证集团股份有限公司，北京 100024；3. 景德镇陶瓷大学，江西 景德镇 333403)

摘 要：提出了一种简单通用的陶瓷预制裂纹新技术，在陶瓷样品上预先切出一个斜切口作为裂纹诱导源，将陶瓷与匡字型的金属梁紧密粘结在一起后进行三点弯曲加载，使样品受到下拉上压的弯曲载荷，利用金属变形对陶瓷裂纹扩展的应变约束，调整陶瓷受拉区高度可获得含不同裂纹长度的样品。对典型陶瓷 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 进行了预制裂纹试验，利用声发射技术(AE)监测陶瓷中裂纹的扩展过程，采用单边预裂纹梁法(SEPB)测量其断裂韧性。结果表明：该方法操作简便，预制裂纹成功率达到 80%以上，测得的 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 断裂韧性分别为 4.45±0.41 MPa·m$^{1/2}$、3.45±0.34 MPa·m$^{1/2}$ 和 5.23±0.49 MPa·m$^{1/2}$。

关键词：陶瓷；断裂韧性；预制裂纹；声发射技术；单边预裂纹梁法
中图分类号：TQ174　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)12–1914–06
网络出版时间：2020–10–13



Precracking Method Based on Strain Induced Controlling of Ceramics and Fracture Toughness Evaluation

WEI Yongjin[1,2], *WAN Detian*[1,2,3], *LI Kai*[3], *BAO Yiwang*[1,2,3], *TIAN Yuan*[1,2], *LI Yueming*[3]
(1. China Building Materials Academy, State Key Laboratory for Green Building Materials, Beijing 100024, China;
2. China Building Material Test and Certification Group Co., Ltd, Beijing 100024, China;
3. Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China)

Abstract: A simple and feasible precracking method based on the strain government of ceramics to crack propagation was proposed. Three-point bending loading was carried out to prefabricate cracks in Al_2O_3, SiC and Si_3N_4 ceramic specimens by bonding the specimens with a triangular notch (crack initiation) on a metal beam to form a ductile-brittle composite beam. The specimens with different crack lengths can be controlled by adjusting the tensile zone height of ceramics. The fracture toughness of these three ceramics was measured by a single edge precracked beam method. The crack propagation process in the ceramic specimens was monitored by acoustic emission technology. The result show that this technology is easy to operate and the success rate of pre-cracking is >80%. The fracture toughness of Al_2O_3, SiC and Si_3N_4 measured is 4.45±0.41, 3.45±0.34 MPa·m$^{1/2}$ and 5.23±0.49 MPa·m$^{1/2}$, respectively.

Keywords: ceramic; fracture toughness; pre-cracking; acoustic emission technique; single edge pre-cracked beam

断裂韧性(K_{IC})是应力强度因子使裂纹尖端失稳扩展导致断裂的临界值，为陶瓷材料的重要基本力学性能之一，准确评价和提高陶瓷材料的断裂韧性对其工程材料设计和安全服役具有十分重要的指导意义[1–3]。陶瓷断裂韧性测试方法多种多样，主要有压痕法(IM)[4]、单边预裂纹梁法(SEPB)[5]和单边切口梁法(SENB)[6]，以及由 SENB 法发展过来的山形切口梁法(CNB)[7]、单边斜切口梁法(SGNB)[8]、单边 V 型切口梁法(SEVNB)[9]等。IM 法是在测维氏硬度同时测量压痕四角的裂纹长度和压痕尺寸，通过经验公式进行计算断裂韧性，该方法操作简单，对样品要求不高，但有些陶瓷难以产生压痕裂纹，且陶瓷

收稿日期：2020–06–09。　修订日期：2020–07–07。
基金项目：国家重点研发计划(2017YFB0310400)资助。
第一作者：魏永金(1995—)，男，硕士研究生。
通信作者：万德田(1978—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–06–09.　**Revised date:** 2020–07–07.
First author: WEI Yongjin (1995–), male, Master candidate.
E-mail: civil_wyj@163.com
Correspondent author: WAN Detian (1978–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: dtwan@ctc.ac.cn

材料表面压痕存在残余应力，不同经验公式计算出来的结果差别很大，准确性不高。SENB 法是最普遍使用且样品制备和试验过程较为简单的方法，通常用切割机在样品受拉一面加工出 0.2~0.3 mm 宽度的 *U* 型切口，*U* 型切口的根部尖端半径远大于陶瓷材料的晶粒尺寸，使得测得的断裂韧性值偏大[10–11]。为了获得更加尖锐的切口用来模拟真实裂纹，在 SENB 法的基础上发展出了 SEVNB 法，传统采用涂有金刚石抛光膏的超薄刀片在 *U* 型切口底部进行加工出比 U 型切口更尖锐的 *V* 型切口，但这种方法费时费力又难以获得足够尖锐的 *V* 型切口[12–13]；后采用激光加工出切口尖端半径可达几微米的 *V* 型切口用于断裂韧性测试[14–16]，但采用激光加工存在加工成本昂贵，仪器受限等问题。

预先在陶瓷样品中制备出一条主裂纹，然后对预裂纹样品进行 SEPB 法断裂韧性测试。采用带有自然裂纹的陶瓷样品可用来评价陶瓷抵抗真实裂纹的能力，由此可见，SEPB 法测得的断裂韧性最接近于样品真实的断裂韧性，预制适当长度的原生裂纹是准确评价陶瓷断裂韧性的关键。由于陶瓷的本征脆性和高弹性模量，包括桥压法、疲劳法在内的多种预制裂纹方法存在载荷过大，预制裂纹成功率极低，难以操作且成本高等缺点[17–21]。对于大多数脆性陶瓷，由于其极限应变小，在静载荷作用下一旦出现宏观裂纹，裂纹扩展速度极快，易发生突发性断裂。

提出了一种简单通用的陶瓷预制裂纹新技术，将匡字梁形状的韧性金属材料与脆性材料紧密粘结进行加载，在弯曲应力的作用下，金属材料与脆性材料界面处发生着应力重分布，应力沿试样厚度和宽度方向变化[22]，陶瓷裂纹尖端是先受拉后受压，且拉应力在应力重分布的作用下始终在变化，不像单质陶瓷梁的裂纹扩展过程裂纹尖端始终受拉应力而开裂即断，金属梁弯曲应力在预制裂纹过程中可以有效抑制相同变形的陶瓷样品主裂纹的起始和扩展，充分发挥金属材料抗拉应力作用的特点。基于金属对陶瓷材料的界面约束和裂纹扩展的应变敏感性，对 3 种典型的脆性陶瓷 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 进行了预制裂纹试验，分析了该技术预制裂纹的可行性和初始裂纹长度可控性；对预裂纹样品进行 SEPB 法断裂韧性测试，并与 SENB 法实验结果相比较，研究预裂纹样品用于断裂韧性测试的准确性和可靠性，为陶瓷断裂韧性评价提供一种简单方便的裂纹预制方法。

1　实验

1.1　材料及基本力学性能

氧化铝(刚玉，Al_2O_3)、碳化硅(SiC)、氮化硅(Si_3N_4) 3 种无压烧结制备而成的商用陶瓷材料(北京人工晶体研究所，北京，中国)，其基本物理和力学性能如表 1 所示。按 SEPB 法测量陶瓷断裂韧性的要求[21]，将陶瓷材料形状加工成 2 mm×4 mm×24 mm 的三点弯曲样品，经研磨抛光倒角后，粗糙度 R_a<0.2 μm。

表 1　Al_2O_3，SiC 和 Si_3N_4 陶瓷的基本物理和力学性能

Table 1　Basic physical and mechanical properties of Al_2O_3, SiC and Si_3N_4 ceramics

Materials	Grain size/μm	Strength/MPa	Modulus/GPa	H_V/GPa	Density/(g·cm^{-3})
Al_2O_3	6~10	315±16	305±3	19.8±1.1	3.55±0.12
SiC	1~4	371±42	410±4	20.1±0.3	3.11±0.21
Si_3N_4	3~5	438±56	278±2	15.9±0.6	3.26±0.13

1.2　SEPB 预制裂纹

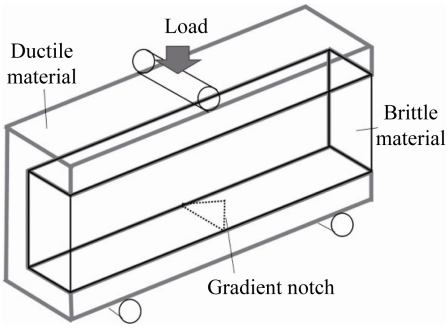
选择不同上下翼缘厚度的黄铜匡字梁，加热松香石蜡至融化，涂抹在黄铜梁凹槽中，放置已加工好斜切口的陶瓷梁样品，斜切口作为裂纹引发诱导源，可利用厚度为 0.2 mm 的外圆切割机刀片在梁样品中央加工而成，在 4 mm×24 mm 面一边能看得到深度约为 1.2 mm 的切口，另一侧切口深度约为 0.1 mm，裂纹扩展面朝里，从缺口深度较小的侧面观察裂纹，冷却后可得到界面紧密粘结的金属陶瓷复合梁构件，采用三点弯曲试验对复合梁构件进行加载，加载方式为位移加载，加载速率为 0.05 mm/min，预制裂纹示意图如图 1 所示，调整黄铜匡字梁上下翼缘厚度关系可获得不同的陶瓷受拉区高度Δ。

利用全信息声发射信号分析仪(型号：DS2–8A，中国)采集加载过程中的声发射信号监控裂纹扩展过程，设置在预制裂纹加载过程中声发射信号采集幅度门槛值为 100 mV。当采集到主裂纹形成的声信号时(门槛值大于 5 000 mV)停止加载，取出陶瓷样品后用酒精反复擦拭陶瓷表面的石蜡，然后在光学显微镜(型号：VHX–600K，日本)下进行观察利用染料渗透后的裂纹，测量预裂纹长度。

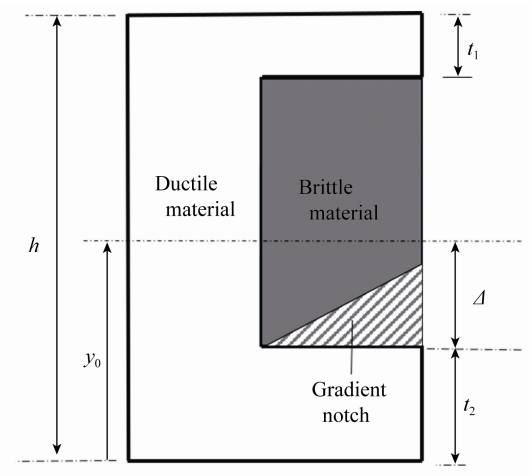
1.3　SENB 实验

SENB 和 SEPB 法试验的区别仅仅是切口宽度不同。为了便于比较，两种方法都用于本实验。利用

厚度为 0.2 mm 的外圆切割机刀片在梁样品 2 mm×24 mm 面中心进行切割，*U* 型槽切口深度 *a* 与试样高度 *W* 比值控制在 0.35~0.60。SENB 法的 *U* 型切口如图 2 所示，测得 *U* 型切口宽度约为 280 μm。



(a) Loading diagram



(b) Schematic diagram of cross section of composite beam

t_1,t_2—Thickness top and bottom flange; Δ—Height of ceramic tensile zone; *h*: height of *brass* beam; y_0—Distance from the neutral axis to the lower surface.

图 1　预制裂纹示意图

Fig. 1　Schematic diagram of pre–cracking

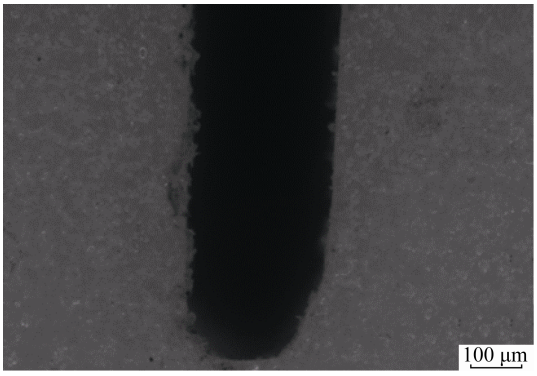


图 2　SENB 法 *U* 型切口形貌

Fig. 2　Micrograph of *U*-groove notch of SENB method

1.4　断裂韧性表征

在预裂纹试验后，从预裂纹试样中挑选裂纹长度 *L* 与试样高度 *W* 比值在 0.35~0.60 的试样，在万能试验机(型号：CMT 5105，精度为 0.5%，中国)进行三点弯曲实验，跨距 *S* 为 16 mm，加载速率为 0.5 mm/min，变形传感器的分辨率为 0.1 μm。每组试验至少测量 6 个样品，取平均值。作为对比试验，SENB 法也用来测试陶瓷的断裂韧性。两种方法的断裂韧性计算公式[23]为：

$$K_{\mathrm{IC}}=\frac{3PS}{2BW^2}\cdot\sqrt{L}\cdot Y \tag{1}$$

$$Y=1.93-3.07\frac{L}{W}+14.53\left(\frac{L}{W}\right)^2-25.07\left(\frac{L}{W}\right)^3+25.8\left(\frac{L}{W}\right)^4 \tag{2}$$

式中：*P* 为断裂时的临界载荷(N)；*S* 为跨距(mm)，*L* 为裂纹的长度或切口的深度 *a* (mm)；*B* 为样品宽度(mm)；*W* 为样品高度(mm)；*Y* 为无量纲的形状因子。

2　结果与讨论

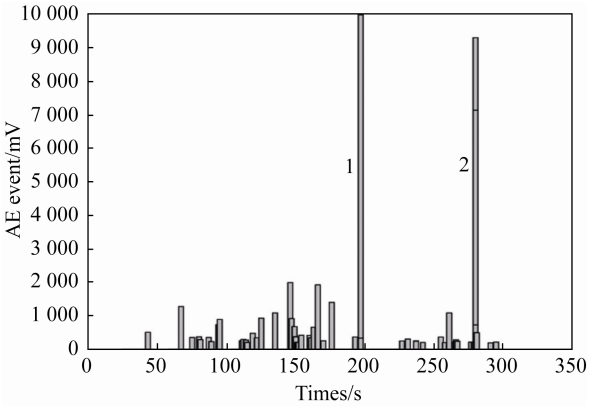
2.1　声发射监控裂纹扩展过程

利用声发射技术监控到的 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 陶瓷断裂过程中的声发射信号中发现在断裂前的加载过程中声发射信号比较微弱，仅采集到一个幅度极高的声发射信号，此时样品断裂。对该声发射信号进行放大分析发现其包含着多个幅度依次降低的声信号，幅度最高的代表着断裂产生，后面的几个声信号代表着由于断裂而导致的振动信号，在振动过程中幅度依次降低。表明陶瓷材料在断裂过程中大多是突发、无征兆的，具有明显的脆性断裂特性。

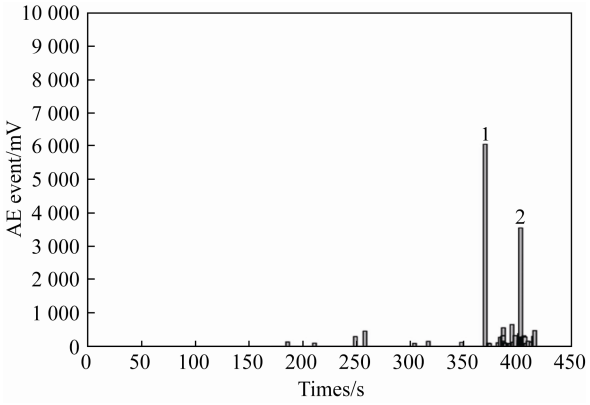
图 3 为利用声发射技术监控到的 3 种陶瓷分别与黄铜材料组合一起进行加载过程中的声发射信号情况。由图 3 可以看出，3 种陶瓷在加载过程中有 2 个幅度较高的声发射信号，按触发时间前后命名为声发射信号 1 和信号 2。在信号 1、信号 2 形成之前，各自有不同数量幅值较小的声发射信号产生，分别在信号 1 和信号 2 产生时停止加载，并取出陶瓷样品进行观察，在信号 1 产生时停止加载的陶瓷样品表面有裂纹产生，而信号 2 产生时停止加载的陶瓷样品均断裂。

复合梁构件中的陶瓷断裂是由于在加载过程中，陶瓷内部微裂纹从萌发、扩展到逐渐演变形成一条主裂纹，当主裂纹形成后，陶瓷材料对于外部载荷极其

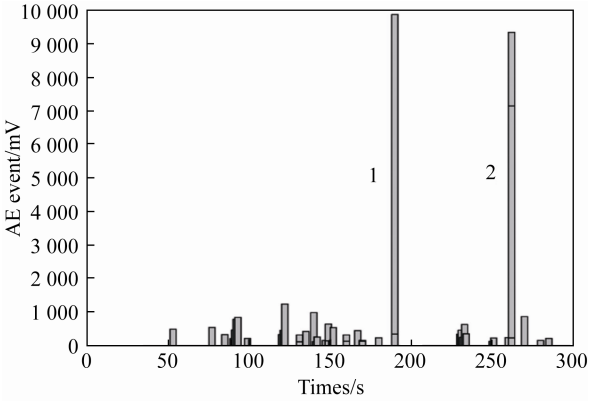
敏感，继续加载主裂纹会快速扩展，样品断裂。故当采集到幅度大于 5 000 mV 的声信号时停止加载，主裂纹形成，此时可获得带有预裂纹的陶瓷试样。这 3 种陶瓷主裂纹形成时的载荷均不超过 500 N，远小于桥压法制备预裂纹的载荷(多达几千牛顿)。



(a) Al_2O_3



(b) SiC



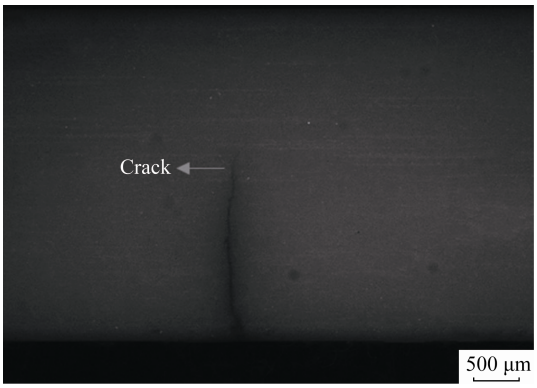
(c) Si_3N_4

图 3　3 种陶瓷预制裂纹至断裂过程中的声发射信号情况

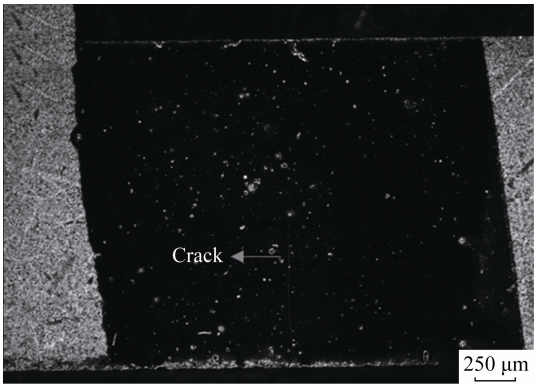
Fig. 3　Acoustic emission (AE) event in the process from pre–cracking to fracture of three ceramics

2.2　裂纹形貌与长度分析

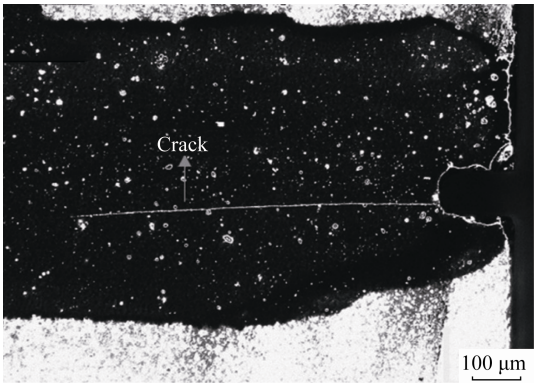
图 4 为 3 种陶瓷的预裂纹经染料渗透后的显微形貌。由图 4 可以看到，3 种陶瓷均成功的预制出了一条清晰可见的笔直裂纹。



(a) Al_2O_3



(b) SiC



(c) Si_3N_4

图 4　3 种陶瓷的预裂纹光学显微形貌

Fig. 4　Optical micrograph of pre–cracks of three ceramics

图 5 为陶瓷受拉区高度Δ对 3 种陶瓷预裂纹长度 L 的影响曲线。3 种陶瓷的主裂纹长度均与Δ密切相关：当Δ=2 mm(陶瓷样品高度的一半，即 0.5W)时，裂纹的长度在 2.8 mm~3.2 mm，远大于Δ；当Δ>2 mm 时，裂纹长度基本都大于 3 mm，且在试验过程中容易存在失败案例较多；当Δ<2 mm 时，裂纹

长度随着Δ的减少而减小，容易获得裂纹长度在1.4~2.4 mm (*L*/*W*=0.35~0.60)的陶瓷预裂纹试样，分别对 3 种陶瓷进行了预裂纹试样，每种陶瓷试样数量为 30 根，制得的预裂纹试样裂纹长度情况如表 2 所示，Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 3 种陶瓷的预制裂纹成功率分别为 93.3%、83.3%、86.6%。相比较用传统桥压法预制裂纹的成功率有很大的提升，通过调整该复合梁结构下陶瓷不同的受拉区高度可以预制不同长度的裂纹。

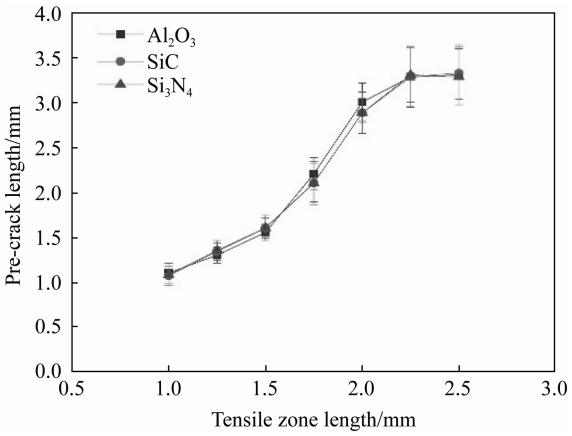


图 5 陶瓷受拉区高度对预制裂纹长度的影响

Fig. 5 Effect of tensile zone length on pre–cracks length of ceramic

表 2 Δ<2 mm 时 3 种陶瓷的预裂纹长度情况

Table 2 Pre–cracks length of three ceramics when Δ<2 mm

Material	Pre-crack length		
	<1.4 mm	1.4~2.4 mm	>2.4 mm
Al_2O_3	2	23	3
SiC	3	19	3
Si_3N_4	4	20	2

2.3 断裂韧性测试结果

利用 SEPB 法和 SENB 法测试 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 陶瓷的断裂韧性如图 6 所示。采用 SEPB 法测得的 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 断裂韧性分别为 4.45±0.41，3.45±0.34 MPa·m$^{1/2}$，5.23±0.49 MPa·m$^{1/2}$。其中 Al_2O_3 的实验结果与商用刚玉材料采用传统桥压法预制裂纹用于 SEPB 法测试断裂韧性结果较为接近[24]，说明该技术准确可靠。此外，采用应变诱导预制裂纹所需要的载荷仅为 200~500 N，远低于桥压法预制裂纹时施加的载荷(大多在 5~20 KN)，表明该技术操作简便，易于控制，可降低实验成本。从图 6 还可以看出，与 SEPB 法相比较，SENB 法测得的断裂韧性值偏高且离散性较大，其原因是 U 型切口存在钝化效应[8]，使得切口尖端的裂纹萌发所需要的应力强度因子较大，同时裂纹在 U 型切口底部随机产生造成了较大的离散性。SEPB 法采用含真实裂纹的陶瓷样品，为材料真实的断裂韧性值，能够真实的表示陶瓷抵抗裂纹扩展的能力。

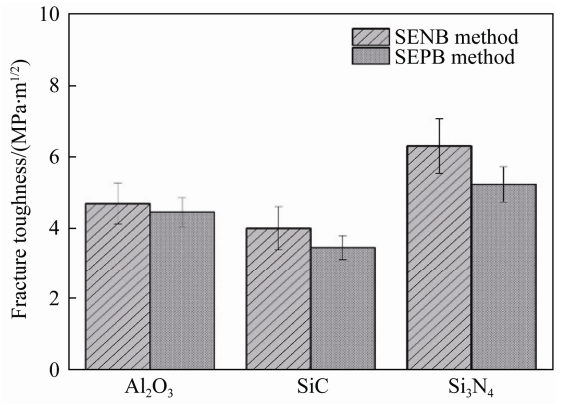


图 6 采用 SEPB 法和 SENB 法测得 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 陶瓷的断裂韧性

Fig. 6 Fracture toughness of the Al_2O_3, SiC and Si_3N_4 ceramics by SEPB and SENB methods

2.4 适用性讨论

与传统桥压法相比，基于应变诱导控制的陶瓷预制裂纹技术采用的陶瓷试样在切口形状上与桥压法相近，不同的在于采用的如图 1 所示的新夹具和新的预制裂纹思路，该方法具有以下几个优点：

1) 该方法预制陶瓷裂纹的成功率高，试验所得的 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 3 种陶瓷的成功率分别为 93.3%、83.3%、86.6%，远大于桥压法的成功率；

2) 预制裂纹极为简便，采用普通试验机便可预制裂纹，所需的载荷仅需几十或几百牛顿，远低于桥压法所需要施加的载荷值；

3) 裂纹长度受到陶瓷受拉区高度和应变约束的影响，利用复合构件调整陶瓷受拉区高度可以进而获得不同长度的裂纹，相比较桥压法中利用桥宽控制裂纹长度，能更方便的实现了脆性陶瓷预制的裂纹长度可调控；

同时也存在以下问题：

1) 采用松香石蜡粘接黄铜材料和氧化锆陶瓷进行预制裂纹时，松香石蜡预先破坏，界面脱胶导致金属梁弯曲应力无法很好的控制裂纹的起始和扩展而导致预制裂纹失败；

2) 采用高强度黏接剂进行氧化锆陶瓷的预裂纹试验时，如氰基丙烯酸乙酯这一类的黏接剂，利用声发射技术可捕捉到裂纹产生的瞬间，由于界面的粘接强度过高，在取下样品的过程中容易引入外

力导致预制裂纹失败；

3) 松香石蜡容易通过加热取下，但是粘结强度不高，目前适用于 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 这类的低强度陶瓷，对于高强度陶瓷需要进一步探索来寻求最佳黏结剂。

3 结论

陶瓷裂纹扩展受垂直于裂纹方向的应变控制，在金属与陶瓷复合样品弯曲裂纹扩展中裂纹尖端应变由受拉转为受压，则裂纹扩展可以得到抑制。裂纹源可采用斜切口或者边缘处压痕，通过应变诱导控制预制裂纹技术可以实现裂纹稳定可控、提高预制裂纹的成功率、降低试样制备成本，为准确评价和测试工程陶瓷的断裂韧性提供了一种简易而方便的手段，也为评价陶瓷阻力曲线和断裂特性带来了方便。

利用该技术制得的预裂纹试样，采用 SEPB 法测得的 Al_2O_3、SiC 和 Si_3N_4 陶瓷的断裂韧性分别是 4.45±0.41，3.45±0.34 MPa·m$^{1/2}$ 和 5.23±0.49 MPa·m$^{1/2}$。总之，斜切口应变诱导预制裂纹是一种简便有效的陶瓷断裂韧性 SEPB 样品制备方法。

参考文献:

[1] CHEN P C, JING S Y, CHU Y H, et al. Improved fracture toughness of CNTs/SiC composites by HF treatment[J]. J Alloys Compd, 2018(5): 42–46.

[2] TANG S F, DENG J Y, WANG S J, et al. Fabrication and characterization of an ultrahigh temperature carbon fiber reinforced ZrB_2–SiC matrix composite[J]. J Am Ceram Soc, 2014, 28(3): 1365–1374.

[3] TIAN W B, KAN Y M, ZHANG G J, et al. Effect of carbon nanotubes on the properties of ZrB_2–SiC ceramics[J]. Mater Sci Eng A, 2008, 487(1–2): 568–573.

[4] EVANS A G, CHARLES E A. Fracture toughness determinations by indentation[J]. J Am Ceram Soc, 1976, 59(7–8): 371–372.

[5] NOSE T, FUJII T. Evaluation of fracture toughness for ceramic materials by a single edge precracked beam method[J]. J Am Ceram Soc, 1988, 71(5): 328–333.

[6] ASTM E399–12. Standard test method for linear elastic plane strain fracture toughness K_{IC} of metallic materials, 2012.

[7] MUNZ D G, SHANNON J L, BUBSEY R T. Fracture toughness calculation from maximum load in four point bend tests of chevron notch specimen[J]. Int J Fract, 1980, 16(3): 137–141.

[8] WAN D T, BAO Y W, PENG J Z, et al. Fracture toughness determination of $Ti_3Si(Al)C_2$ and Al_2O_3 using a single gradient notched beam (SGNB) method[J]. J Eur Ceram Soc, 2009, 29(4): 763–771.

[9] 胡一文, 司文捷, 龚江宏. SEVNB 法测试陶瓷材料断裂韧性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(s1): 155–158.
HU Yiwen, SI Wenjie, GONG Jianghong. Rare Met Mater Eng (in Chinese), 2011, 40(s1): 155–158.

[10] FISCHER H, WAINDICH A, TELLE R. Influence of preparation of ceramic SEVNB specimens on fracture toughness testing results[J]. Dent Mater, 2008, 24(5): 618–622.

[11] 张幸红, 王安哲, 谢茂松等. 激光切口法测量 ZrB_2–SiC–Graphite 陶瓷的断裂韧性[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(12): 1707–1711.
ZHANG Xinghong, WANG Anze, XIE Maosong, et al. J Chin Ceram Soc (in Chinese), 2018, 46(12): 1707–1711.

[12] FETT T. Influence of a finite notch root radius on fracture toughness[J]. J Eur Ceram Soc, 2005, 25(5): 543–547.

[13] NISHIDA T, HANAKI Y, PEZZOTTI G. Effect of notch–root radius on the fracture toughness of a fine-grained alumina[J]. J Am Ceram Soc, 1994, 77(2): 606–608.

[14] 王健全, 田欣利, 张保国, 等. 基于激光切割的 Si_3N_4 陶瓷断裂韧性测试方法[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(1): 103–107.
WANG Jianquan, TIAN Qinli, ZHANG Baoguo, et al. B Chin Ceram Soc (in Chinese), 2013, 32(1): 103–107.

[15] ZHAO W, RAO P G, LING Z Y. A new method for the preparation of ultra–sharp V–notches to measure fracture toughness in ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2014, 34(15): 4059–4062.

[16] WANG A Z, DU B, HU P, et al. Accurate evaluation of critical flaw size in structural ceramics via femtosecond laser[J]. Ceram Int, 2017, 37(13): 4207–4212.

[17] QUINN G D, SWAB J J, MOTYKA M J. Fracture Toughness of a Toughened Silicon Nitride by ASTM C 1421[J]. J Am Ceram Soc, 2003, 86(6): 1043–1045.

[18] GRENDAHL S, BERT R, CHO K, et al. Effects of residual stress and loading geometry on single edge precracked beam (SEPB) fracture-toughness test results[J]. J Am Ceram Soc, 2000, 83(10): 2625–2627.

[19] CONZONE S D, BLUMENTHAL W R, VAINER J R. Fracture toughness of TiB_2 and B_4C using the single–edge precracked beam, indentation strength, chevron notched beam, and indentation strength methods[J]. J Am Ceram Soc, 1995, 78(8): 2187–2192.

[20] BAI–ON I, BEALS J T, LEATHERMAN G L, et al. Fracture toughness of ceramic precracked bend bars[J]. J Am Ceram Soc, 1990, 73(8): 2519–2522.

[21] BAO Y W, Zhou Y C. A new method for precracking beam for fracture toughness experiments[J]. J Am Ceram Soc, 2006, 89(3): 1118–1121.

[22] BAO Y W, ZHOU Y C. Anisotropic deformation and damage behavior of brittle–ductile laminated composites in bending at high temperature[J]. J Compos Mater, 2005, 39(2): 147–162.

[23] 万德田, 魏永金, 包亦望, 等. 陶瓷断裂韧性测试方法准确性和简便性比较分析[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8): 1080–1088.
WAN Detian, WEI Yongjin, BAO Yiwang, et al. J Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 47(8):1080–1088.

[24] 来亭荣, 凌健荣, 陆正兰, 等. 高性能陶瓷断裂韧性的 SEPB 评价技术[J]. 无机材料学报, 1993, 8(3): 347–354.
LAI Tingrong, LIN Jianrong, LU Zhenglan, et al. J Inorg Mater (in Chinese), 1993, 8(3): 347–354.