



# 2010年海峡两岸材料破坏/断裂学术会议 — “材料试验技术”技术座谈会

2010年9月24~25日 垦丁

## 纳米压入识别脆性材料 断裂韧度的新方法

冯义辉 张泰华 郇勇

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室)



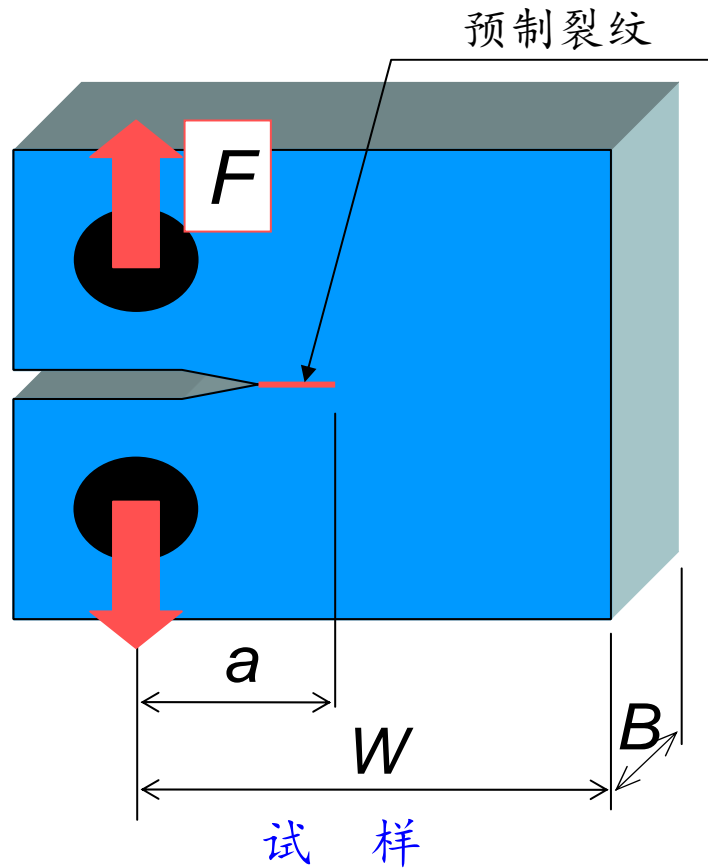
# 内 容

- ◆ 传统 $K_{IC}$ 测试的局限性
- ◆ 压入法 $K_{IC}$ 测试的现状
- ◆ 压入法 $K_{IC}$ 测试新方法
- ◆ 新方法应该注意的问题



# 传统的 $K_{IC}$ 测试方法

紧凑拉伸(CT)、三点弯(SENB)、双悬臂梁(DCB)...



(1) 计算公式

$$K_{IC} = \frac{F_q}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

(2) 样品尺寸

$$B \geq 2.5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$$

$$W = 2B$$

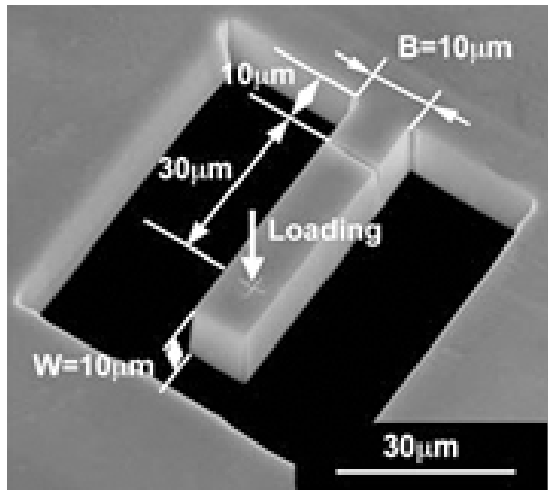
$$0.45W \leq a \leq 0.55W$$

紧凑拉伸 (CT) 试验

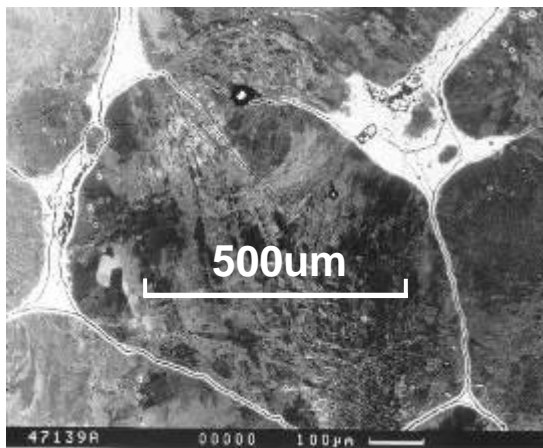
► 试样尺寸为厘米量级或更大



# 新的挑战

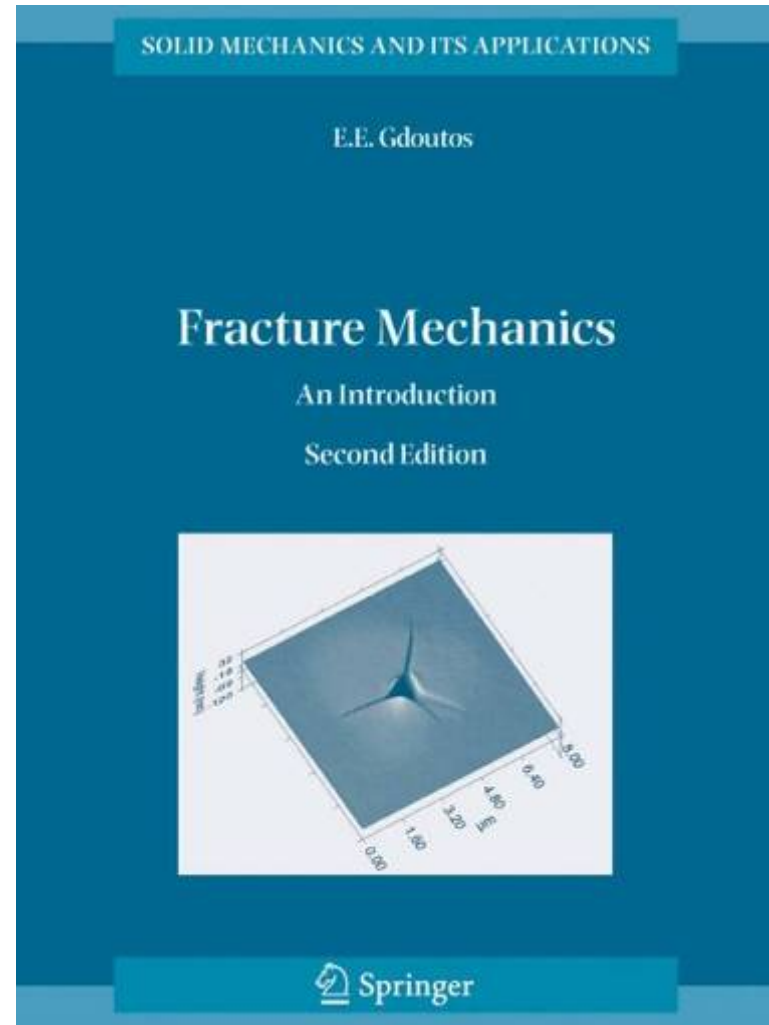


小样品



微区

➤ 小尺度下  $K_{IC}$  的测试?



《断裂力学导论》封面 (Springer, 2005)

➡ 压入法





# 内 容

- ◆ 传统 $K_{IC}$ 测试的局限性
- ◆ 压入法 $K_{IC}$ 测试的现状
- ◆ 压入法 $K_{IC}$ 测试新方法
- ◆ 新方法应该注意的问题

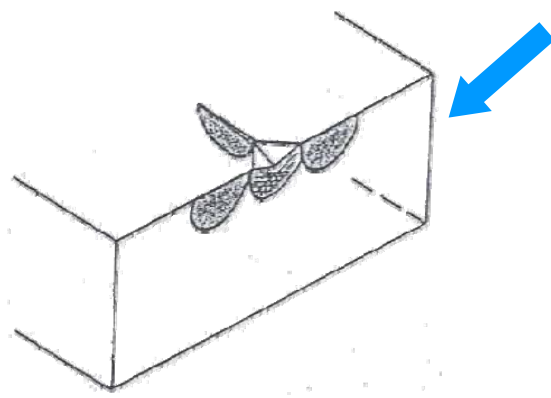
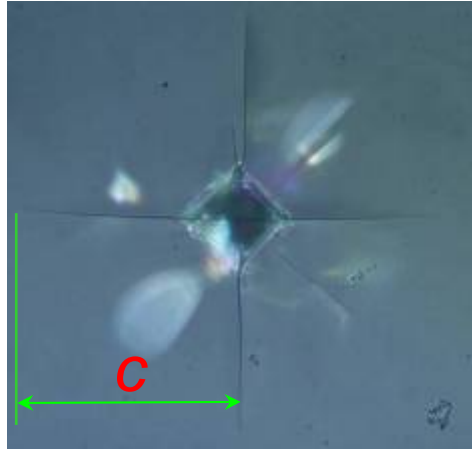


# 压入法 $K_{IC}$ 测试使用的压头

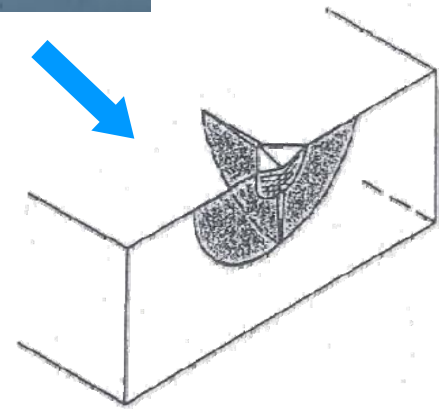
名称	Vickers	Berkovich	cube-corner
图 示			
等效 半锥 角	$70.3^\circ$	$70.3^\circ$	$42.3^\circ$



# 压入法对应的裂纹



径向裂纹体系



半硬币裂纹体系  
(径向裂纹+中位裂纹)

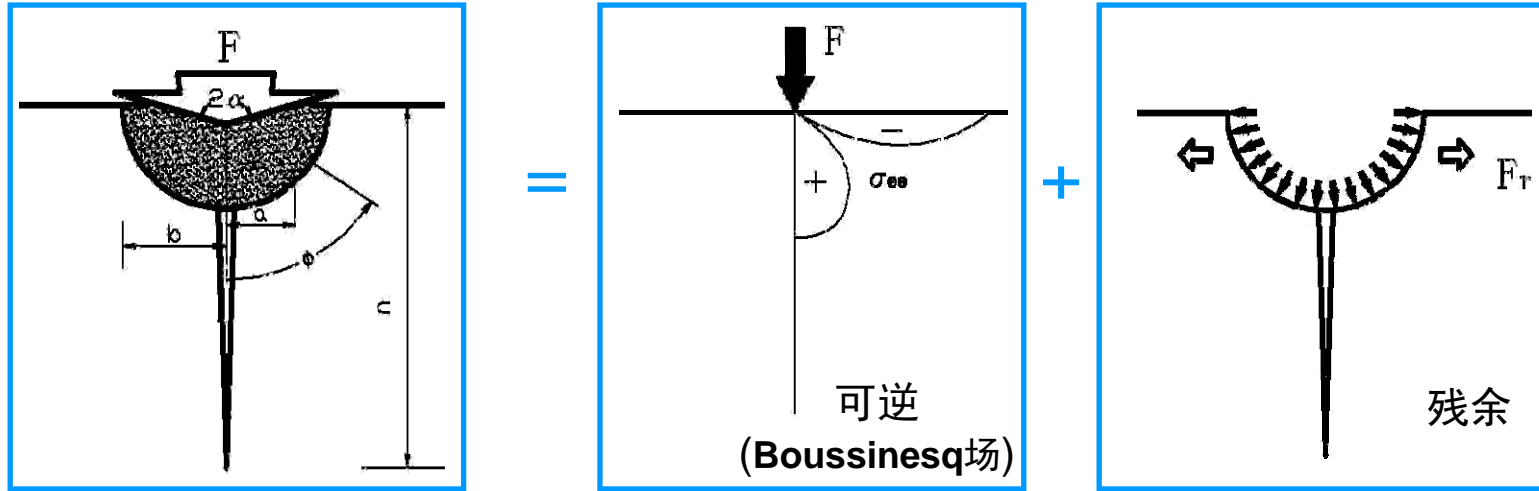
►特征尺寸：径向裂纹长度 $c$





# Lawn-Evans-Marshall压入破坏模型[1]

条件：裂纹径向扩展良好 ( $c/a > 2$ )



➤ 结论1：卸载加剧径向裂纹的扩展；

➤ 结论2：残余应力场简化为一对集中力  $F_r$ ：

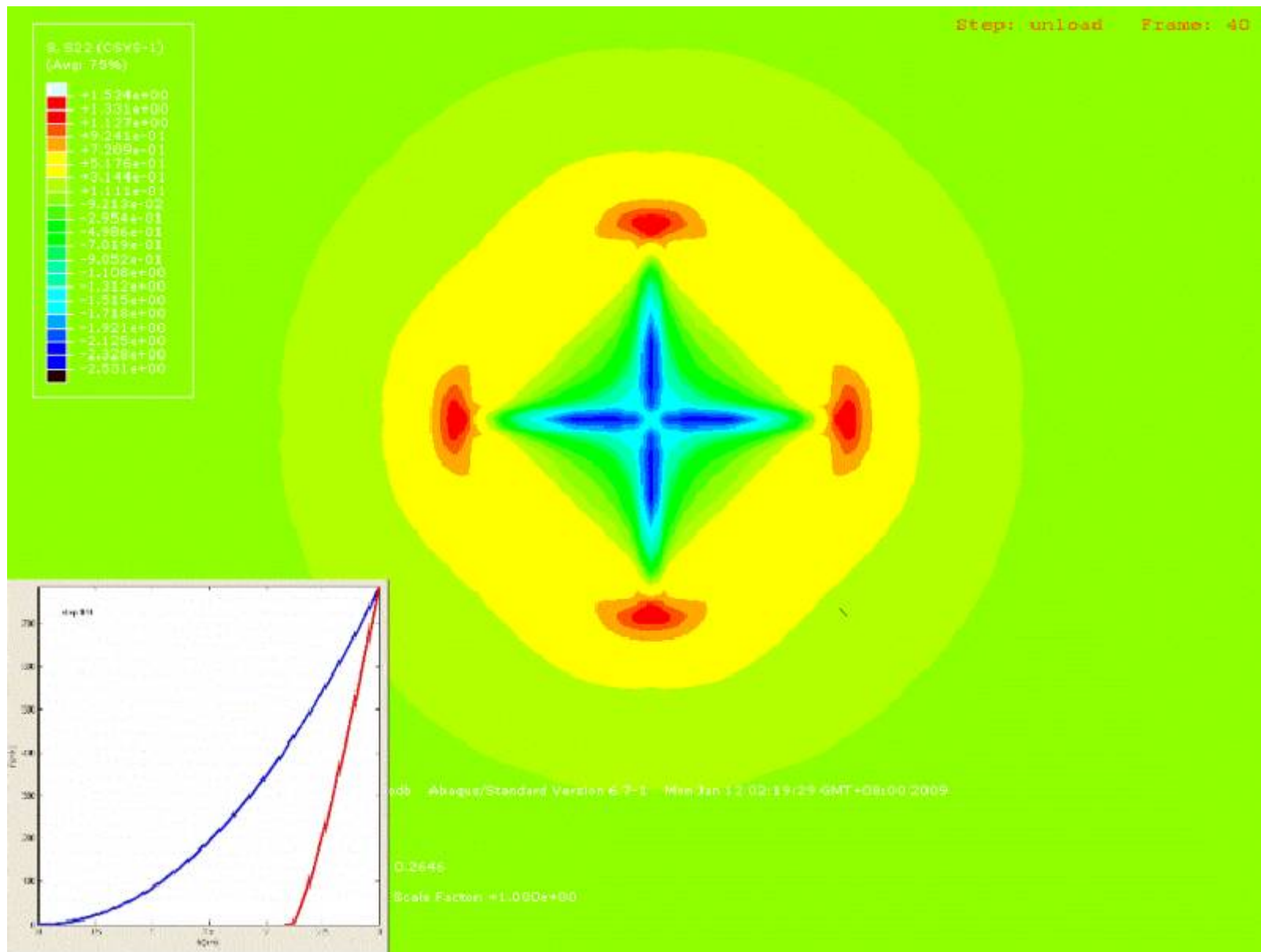
$$F_r \propto F_m \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} (\cot \alpha)^{3/2}$$

[1] Lawn B.R., Evans A.G., Marshall D.B., J. Am. Ceram. Soc., 1980, 63: 574~581





# FEM验证：卸载加剧径向裂纹的扩展





# 基于LEM模型的 $K_{IC}$ 测试方法

方 法	公 式	压 头	优、缺点
Lawn-Anstis法 <sup>[1,2]</sup>	$K_{IC} = 0.016 \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} \frac{F_m}{c^{3/2}}$	Vickers	对材料微观结构不敏感 临界载荷高、需另测E
Laugier法 <sup>[3]</sup>	$K_{IC} = 0.015 \left( \frac{a}{l} \right)^{1/2} \left( \frac{E}{H} \right)^{2/3} \frac{F_m}{c^{3/2}}$	Vickers	对材料微观结构不敏感 临界载荷高、需另测E 测量量多
Harding-Oliver-Pharr法 <sup>[4]</sup>	$K_{IC} = 0.036 \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} \frac{F_m}{c^{3/2}}$	cube-corner + Berkovich	临界试验载荷低 需更换压头测E, H

►缺点: 1) 另测E、H, 程序复杂; 2) 影响因素多(pile-up、模型近似性)

[2] G.R. Anstis, P Chantikul, B.R. Lawn and D.B. Marshall, J. Am. Ceram. Soc., 1981, 64: 533~538

[3] M.T. Laugier, J. Mater. Sci. Lett., 1987, 6: 355~356

[4] D.S. Harding, W.C. Oliver and G.M. Pharr, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1995, 356: 663~668



## cube-corner压头的优势一：载荷低<sup>[4]</sup>

材 料	cube-corner 临界载荷(mN)	Vickers 临界载荷(mN)
Soda-lime glass	0.5~1.5	250~500
Fused quartz	0.5~1.5	1000~1500
Pyrex glass	1.5~4.4	500~1000
Silicon(100)	0.5~1.5	20~50
Silicon(111)	0.5~1.5	50~100
Germanium(111)	1.5~1.5	<10
Sapphire(111)	4.4~13.3	50~100
Spinel(100)	4.4~13.3	100~150
Silicon nitride(NC132)	40~120	1000
Silicon carbide(SA)	4.4~13.3	100~150

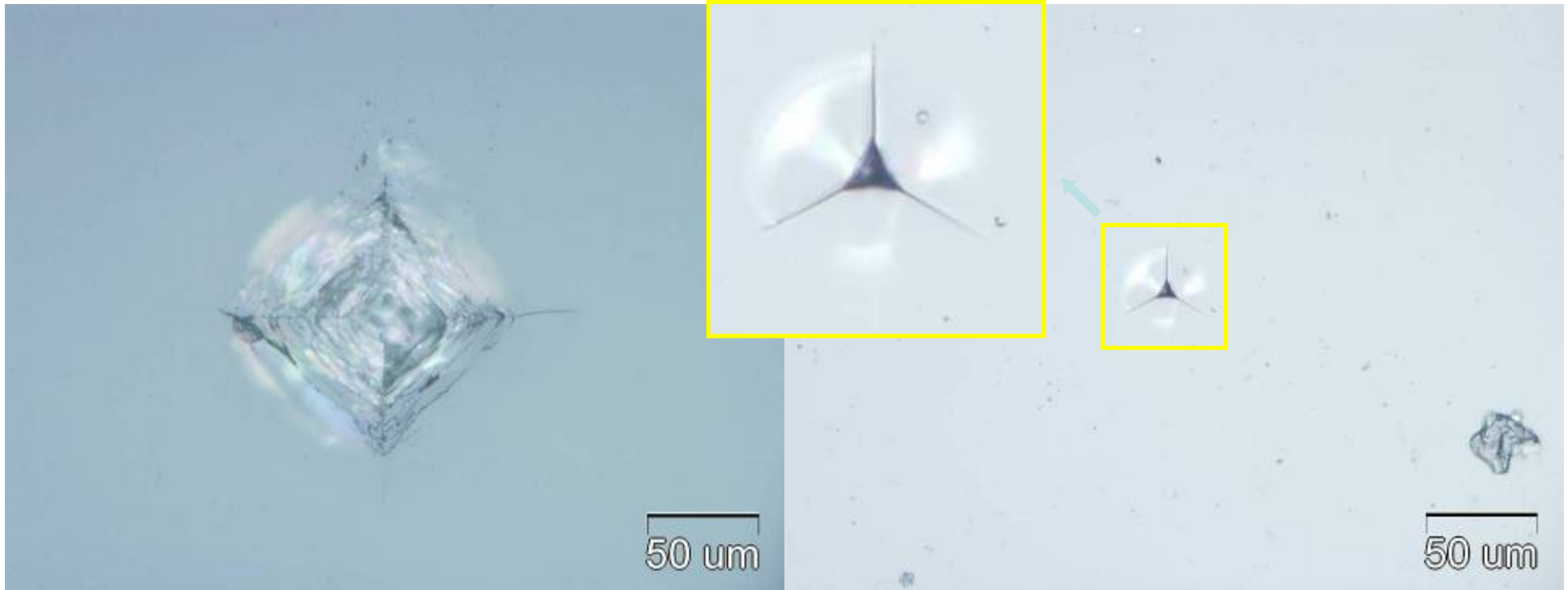
➤ 临界载荷：cube-corner 比 Vickers/Berkovich 低1~2个数量级



## cube-corner压头的优势二：径向开裂

Vickers, 40N

cube-corner, 0.5N



fused silica

► 开裂方式：cube-corner压头使材料更易在径向开裂



# 内 容

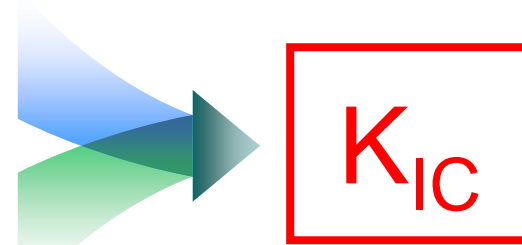
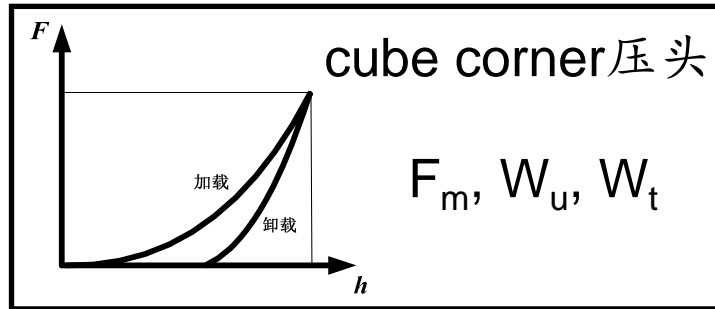
- ◆ 传统 $K_{IC}$ 测试的局限性
- ◆ 压入法 $K_{IC}$ 测试的现状
- ◆ 压入法 $K_{IC}$ 测试新方法
- ◆ 新方法应该注意的问题





# 新方法的目标和特点

## ● 目标

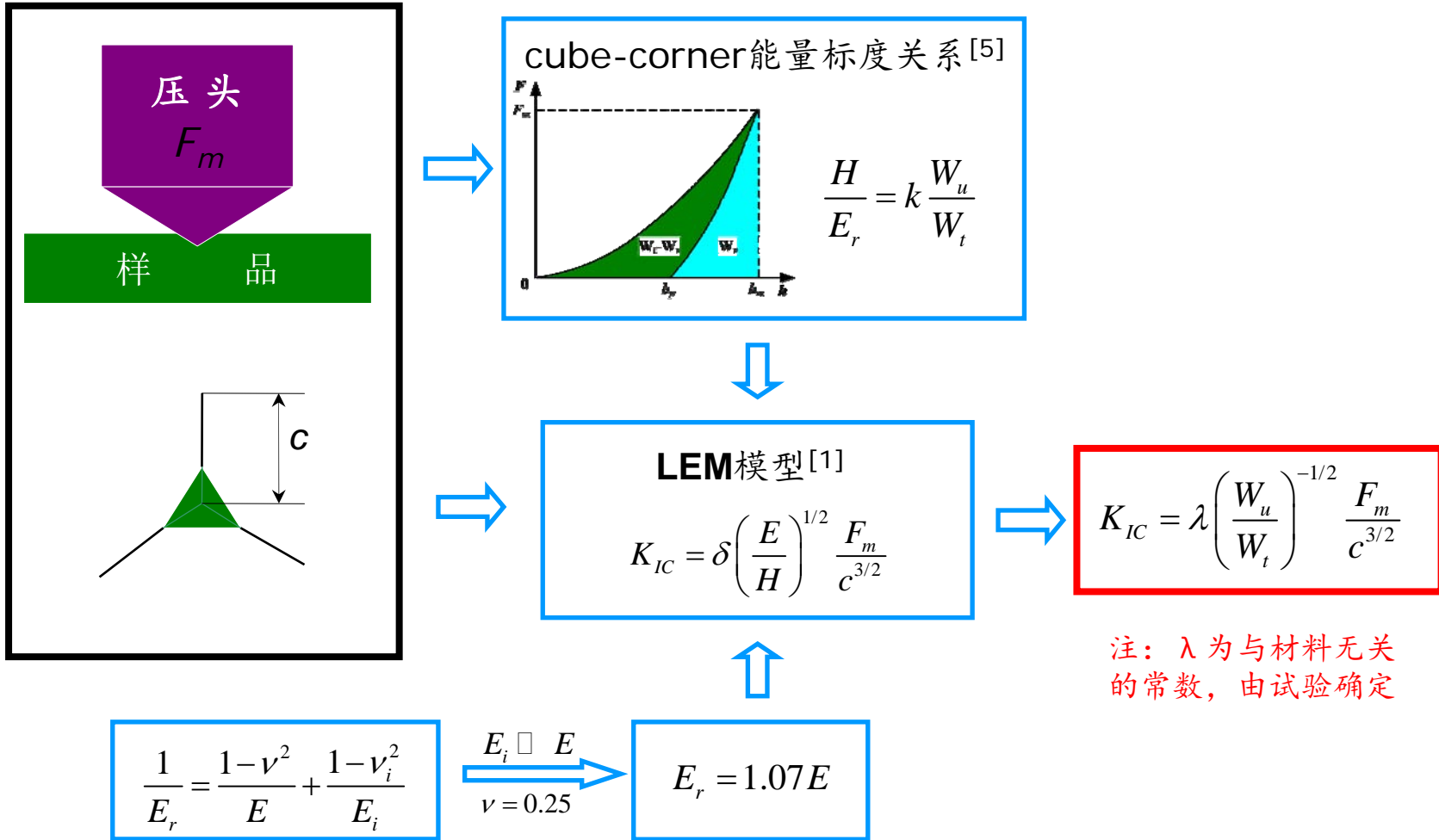


## ● 特点

- cube-corner压头，显著降低临界载荷，适于微区测试。
- 单次加卸载，避免更换Berkovich压头，简化测试程序。
- 选 $W_u/W_t$ 作为分析参量，易于精确测量，降低测试误差。



# 新方法的理论推导

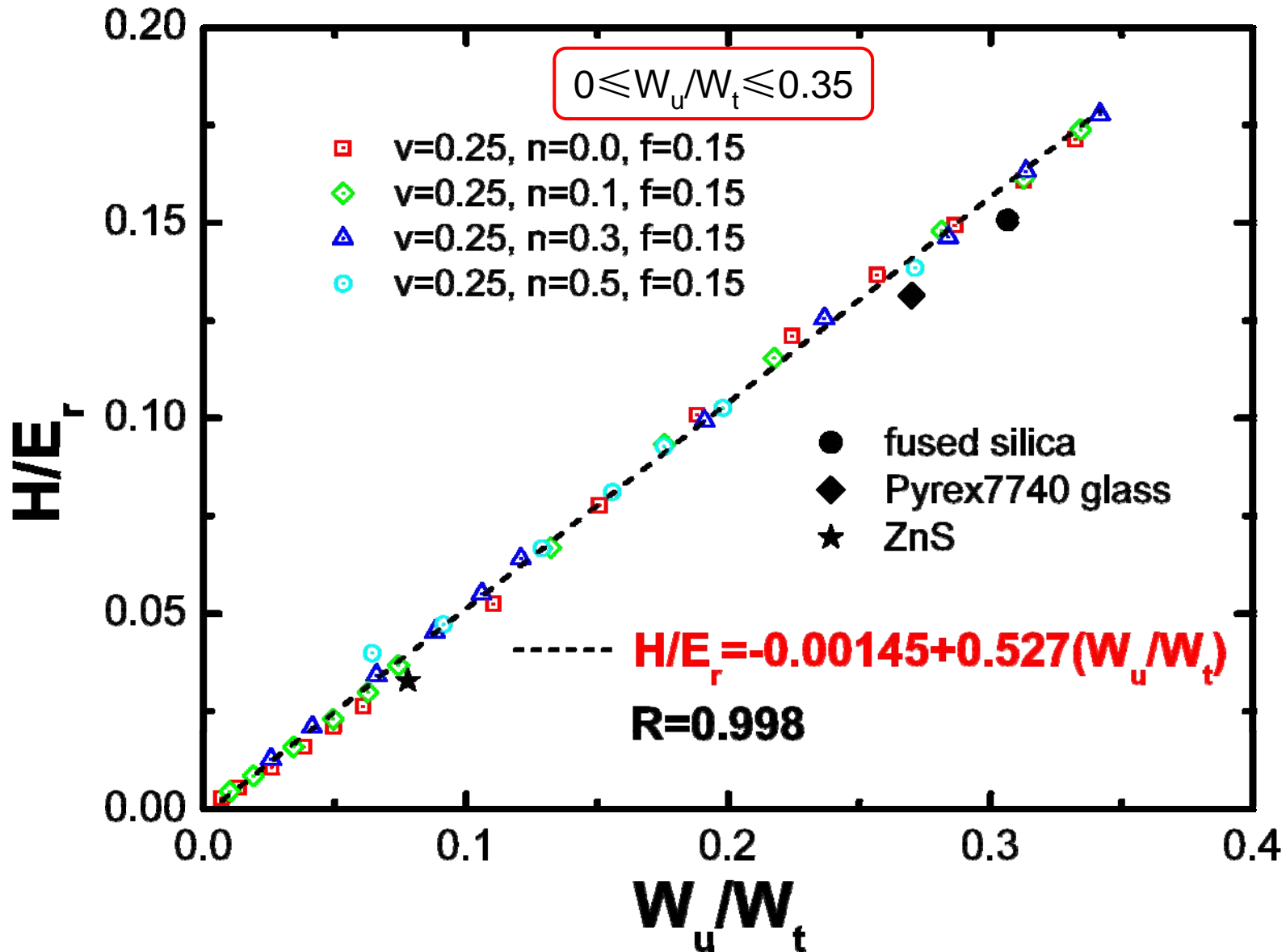


[5] Taihua Zhang, Yihui Feng, Rong Yang, and Peng Jiang. Scripta Mater., 2010, 62(4): 199~201





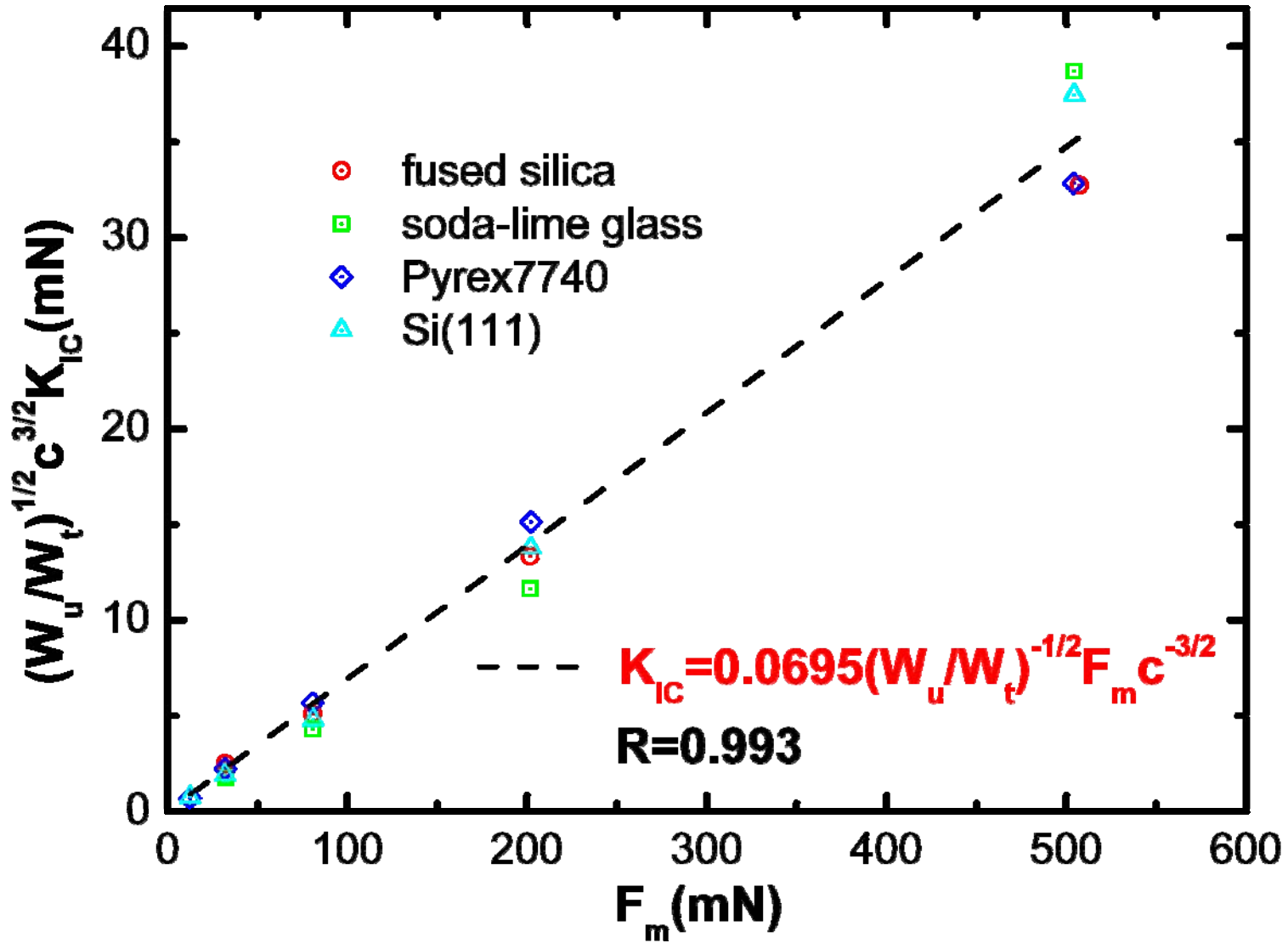
# cube-corner能量标度关系(FEM+实验)







# 新方法计算公式(实验拟合)



➤ 发表在: *Scripta Materialia*, 62(4): 199-201 Feb 2010.



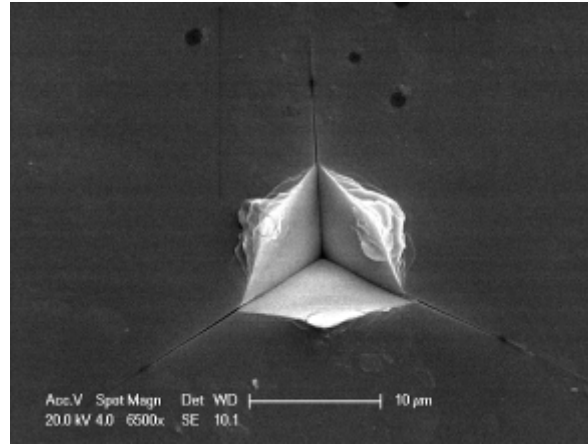
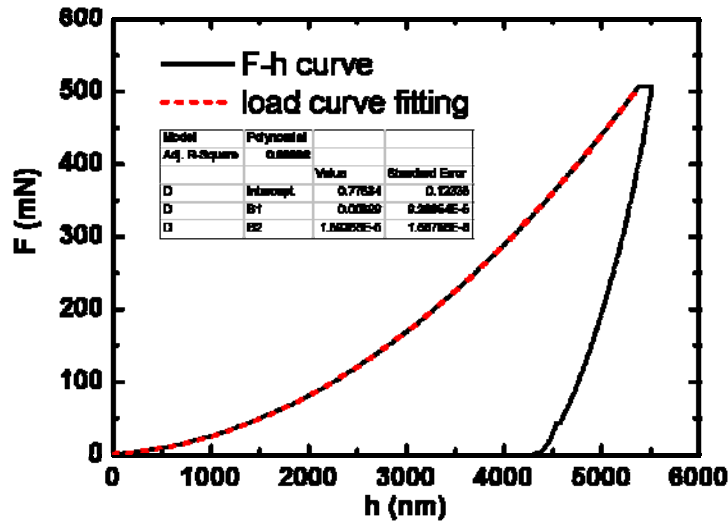


# 内 容

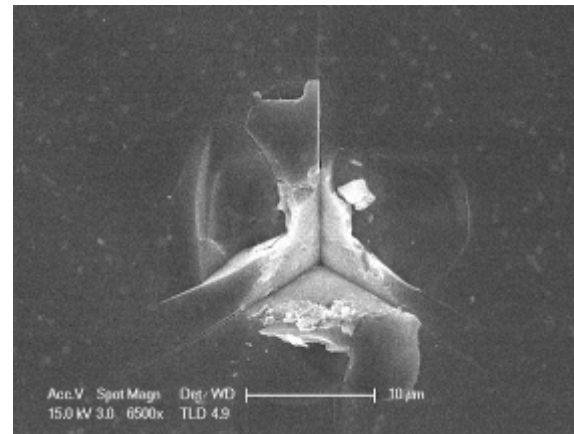
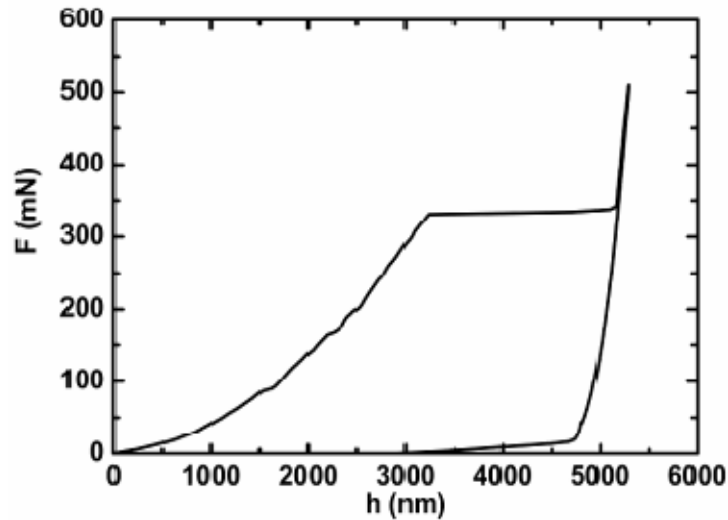
- ◆ 传统 $K_{IC}$ 测试的局限性
- ◆ 压入法 $K_{IC}$ 测试的现状
- ◆ 压入法 $K_{IC}$ 测试新方法
- ◆ 新方法应该注意的问题



# 裂纹对试验曲线(F-h)的影响



soda-lime glass  
cube-corner  
 $F_m=500\text{mN}$

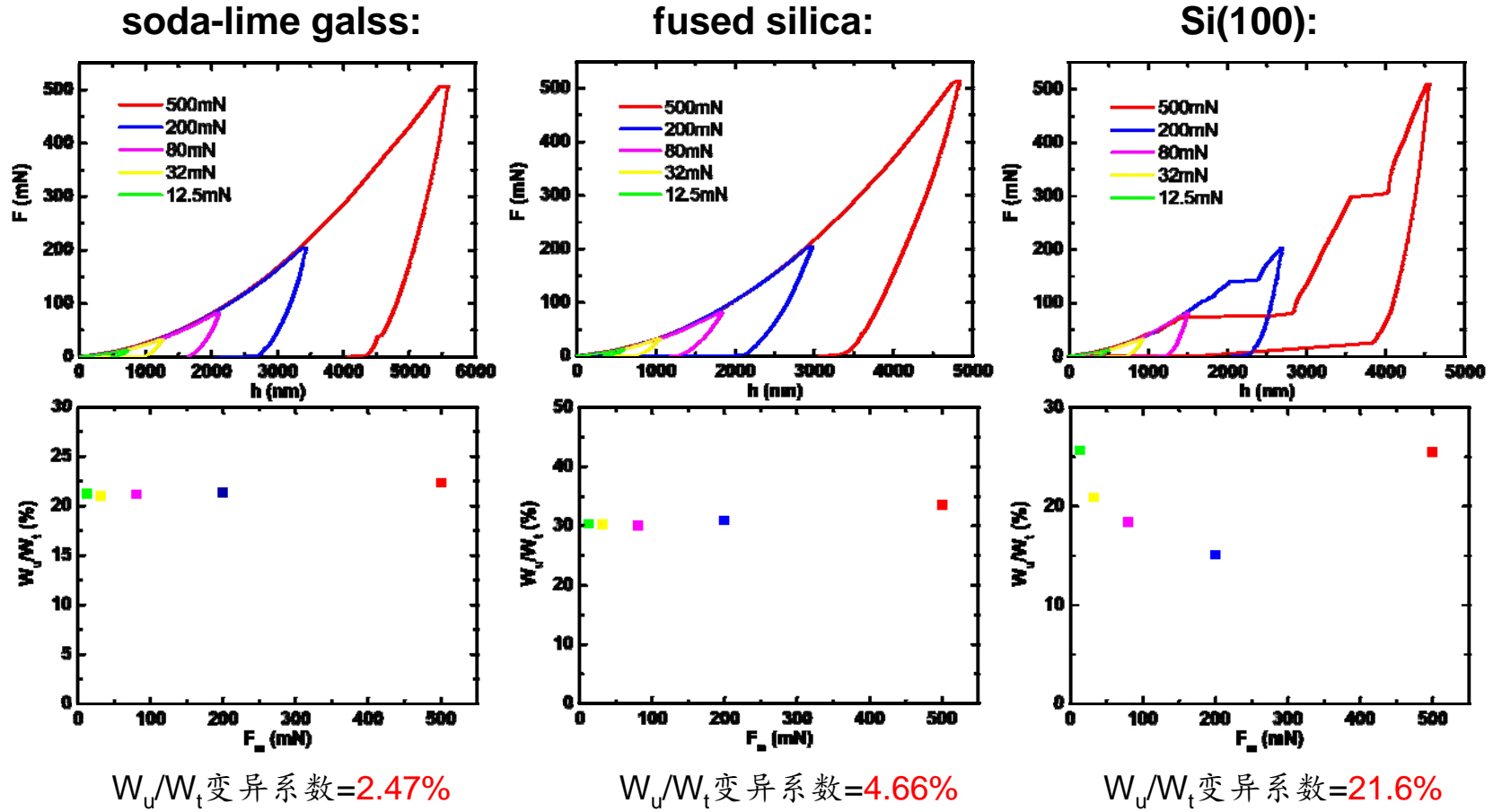


Si(100)  
cube-corner  
 $F_m=500\text{mN}$

- 径向裂纹不显著影响F-h曲线形状
- 表面材料剥落导致F-h曲线突变



# 裂纹对 $W_u/W_t$ 的影响



➤ 光滑的F-h曲线对应有效的 $W_u/W_t$





# 试验的有效性

---

## 有效性判据

- 1) 径向裂纹扩展良好( $c/a > 2$ )
- 2) 样品表面无明显材料剥落
- 3) 试验曲线基本光滑

谢谢您！

请指正