

REBCO 涂层超导复合带材3D/2D混合维度 有限元建模与分析

高配峰

兰州大学土木工程与力学学院
西部灾害与环境力学教育部重点实验室

致谢：此工作是高配峰在CSC项目（No. 201506180066）期间就读于North Carolina State University，在Dr. Justin Schwartz（现 Pennsylvania State University）Dr. Wan-Kan Chan（North Carolina State University）指导下完成，并在此期间得到国内导师王省哲（兰州大学）教授的指导与帮助。

COMSOL 用户年会 2018 上海站
2018年11月
中国上海



内容提要

➤ 研究背景与动机

➤ 研究内容

1. 3D/2D混合维度模型一般思想
2. 内聚力模型在混合维度模型中的实现
3. 模型结果验证
4. 讨论与预测

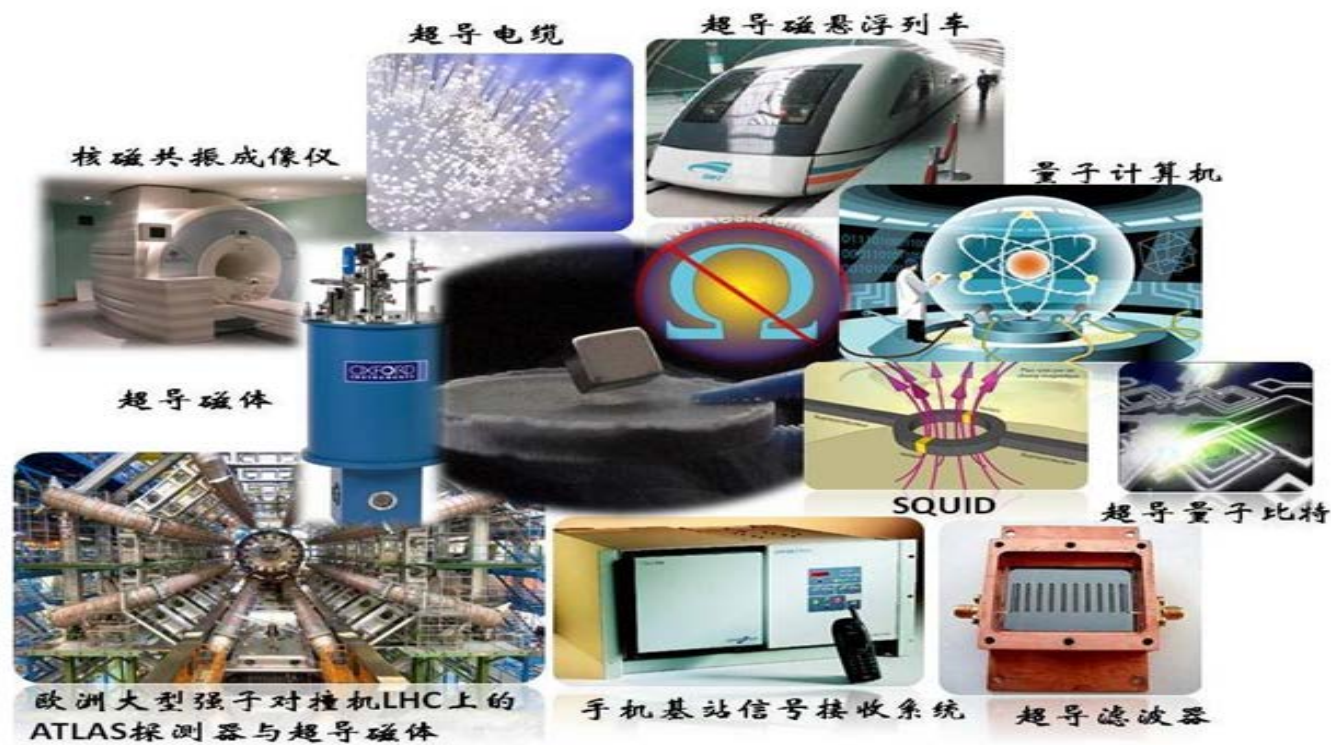
➤ 结论



研究背景与动机

研究背景

超导材料由于具有的**零电阻**、**迈斯纳效应**等优越特性，
在高新工程与技术领域表现出诱人的应用潜力。



<http://www.niubb.net/a/2015/05-20/498474.html>

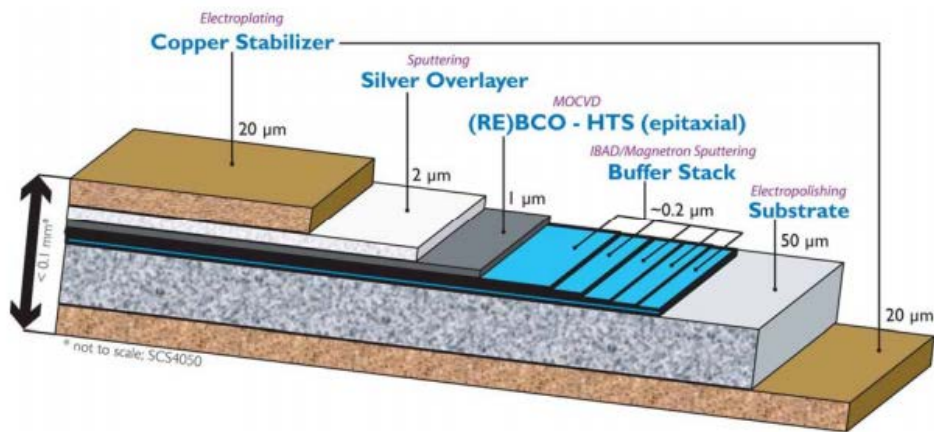


研究背景与现状

研究动机---高温超导带材结构特征与力学行为

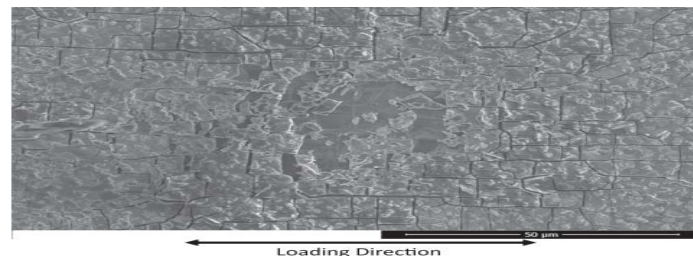
- 结构特性：多层、厚度差异大

REBCO涂层超导带材



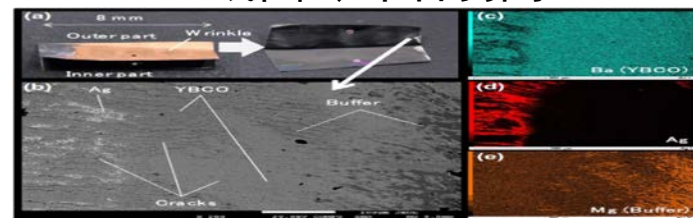
<http://www.superpower-inc.com>.

超导层微裂纹



Rogers S et al. 2016, *Supercond. Sci. Technol.*

线圈冷却后剥离



Takematsu T et al. 2010 *Physica C*

带材失超后剥离

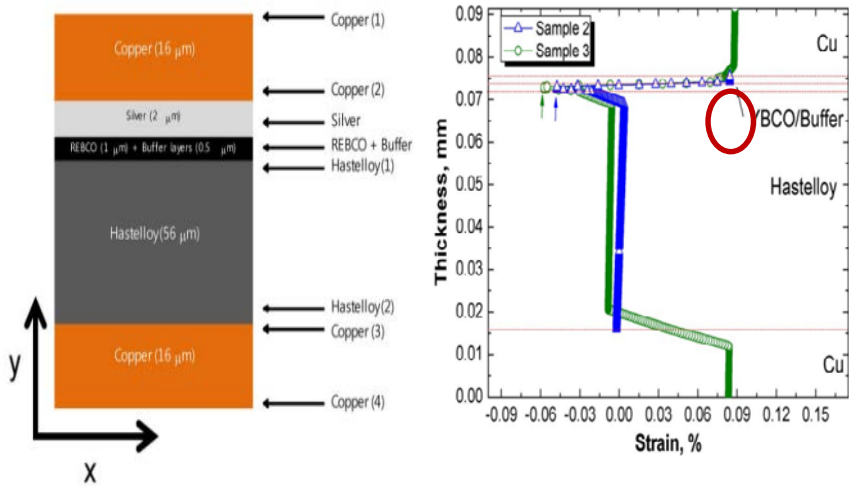


Gao et al 2018 *Supercond. Sci. Technol.* 31 074004

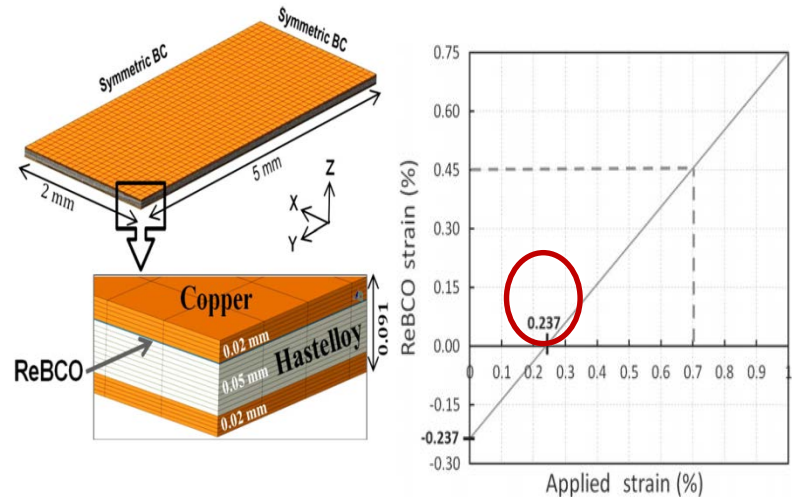
研究背景与现状

研究动机---数值研究的困难

存在宽厚比极大薄层（银层，超导层和缓冲层），在3D有限元分析中网格剖分数目大且单元奇异性增大，导致计算量极大。



Dizon J. et al, 2014, IEEE Trans. Appl. Supercond.



K Ilin et al. 2015 Supercond. Sci. Technol.

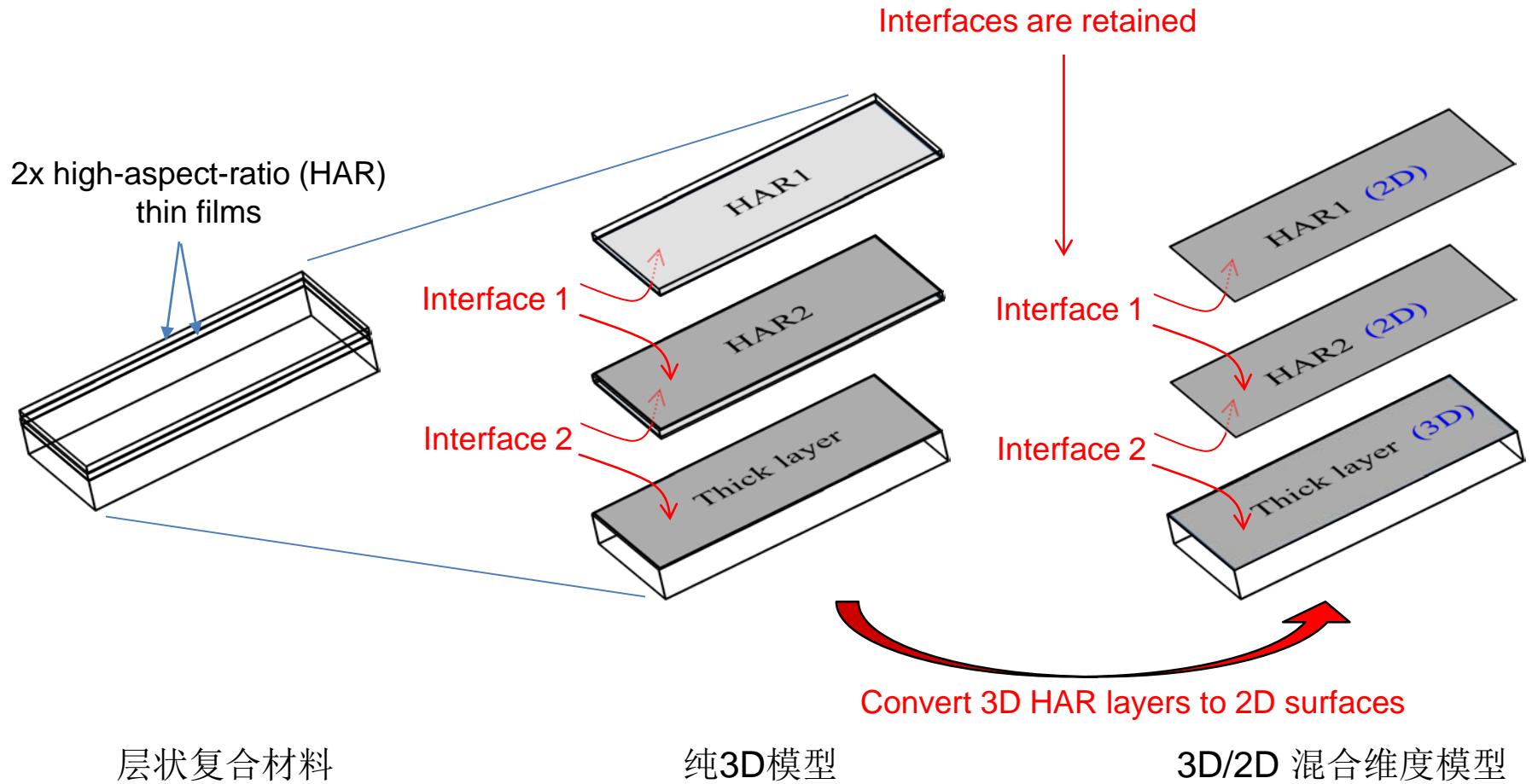
已有研究：

简化处理——将超导层与缓冲层等效为同一层、剔除银层和缓冲层
 ✗ 结果与实际不符，且计算效率未显著提高。



研究内容

3D/2D混合维度模型一般思想---几何方面



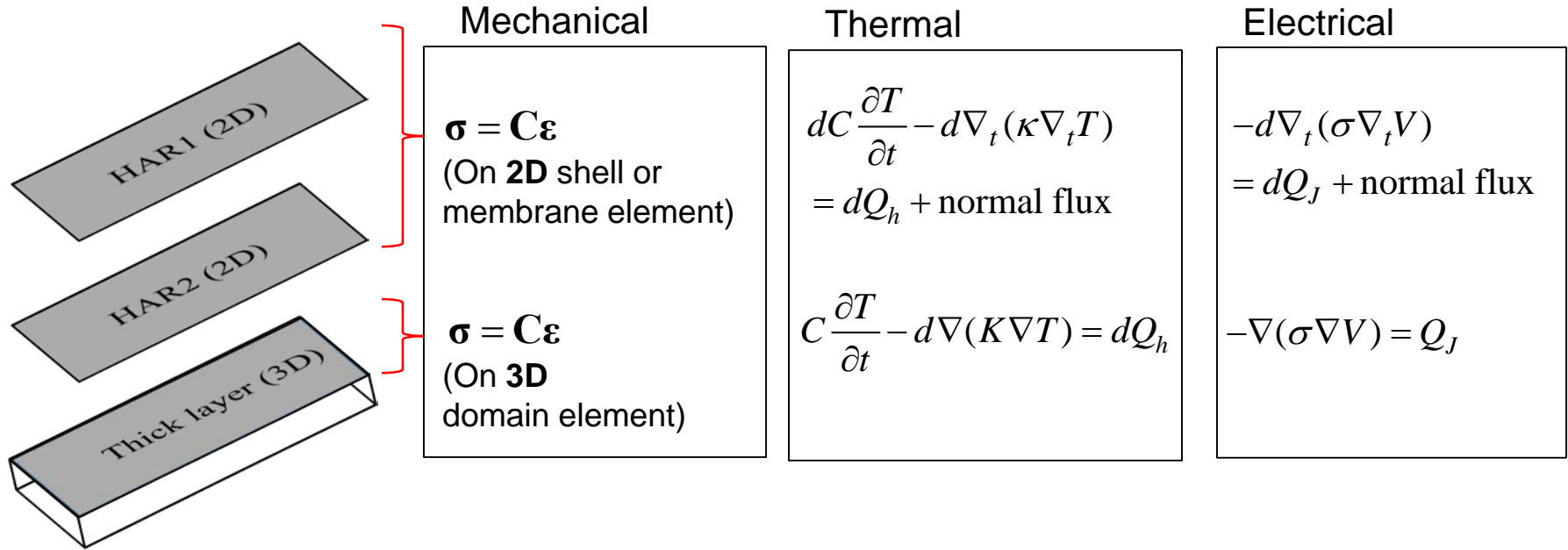
层状复合材料

纯3D模型

3D/2D 混合维度模型

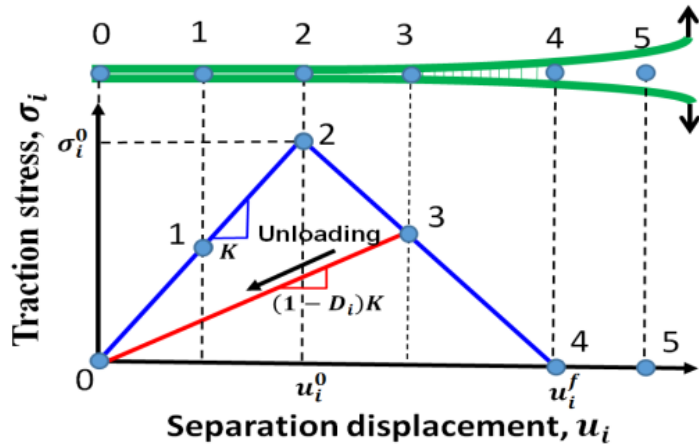
研究内容

3D/2D混合维度模型一般思想---物理方面



研究内容

内聚力模型在混合维度模型中的实现



本构方程

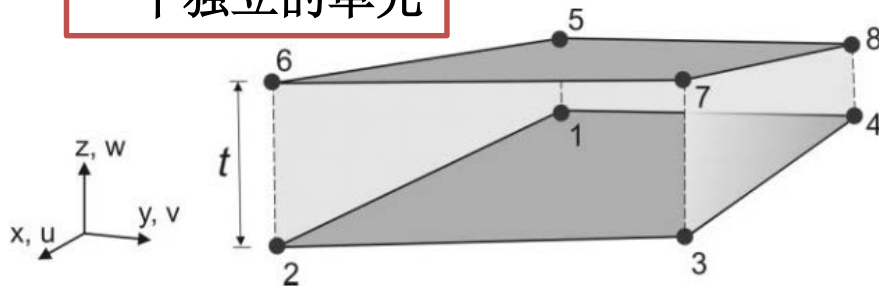
$$\sigma_i = K' u_i \quad i = n, s$$

刚度降阶系数

$$D_i = \begin{cases} 0 & u_i^{\max} \leq u_i^0 \\ \frac{u_i^f (u_i^{\max} - u_i^0)}{u_i^{\max} (u_i^f - u_i^0)} & u_i^f < u_i^{\max} < u_i^f \quad i = n, s \quad u_n > 0 \\ 1 & u_i^{\max} \geq u_i^f \end{cases}$$

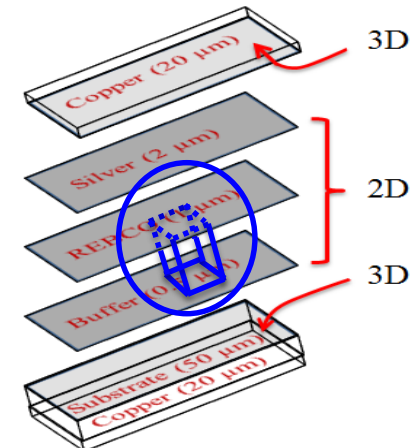
内聚力模型本构关系

一个独立的单元



内聚力单元示意图

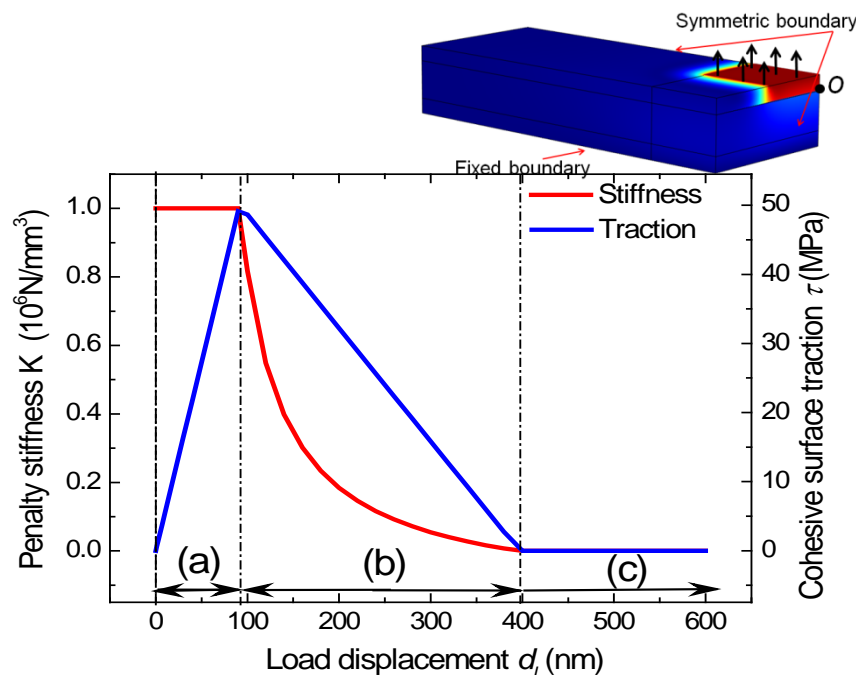
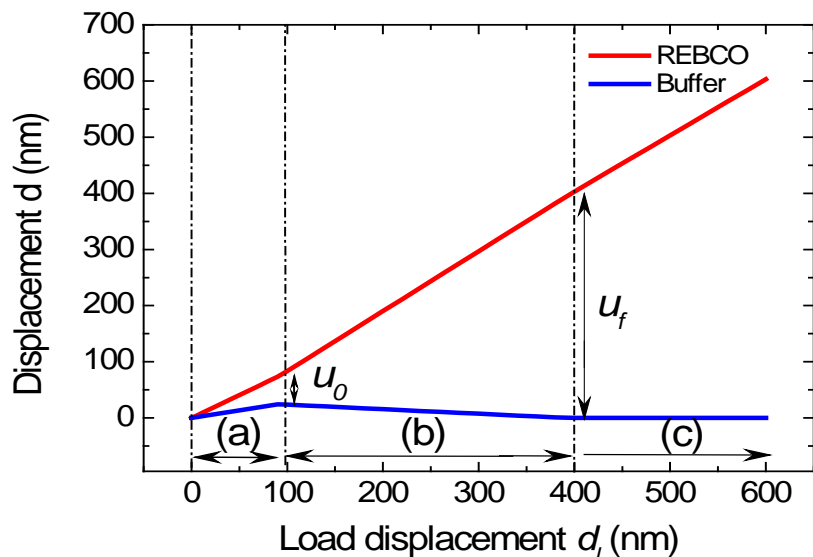
虚拟内聚力单元



混合维度模型示意图

研究内容

模型验证---内聚力模型检验

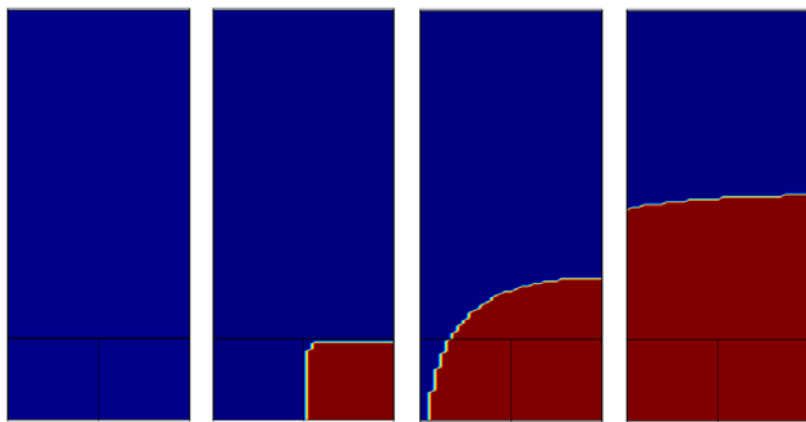
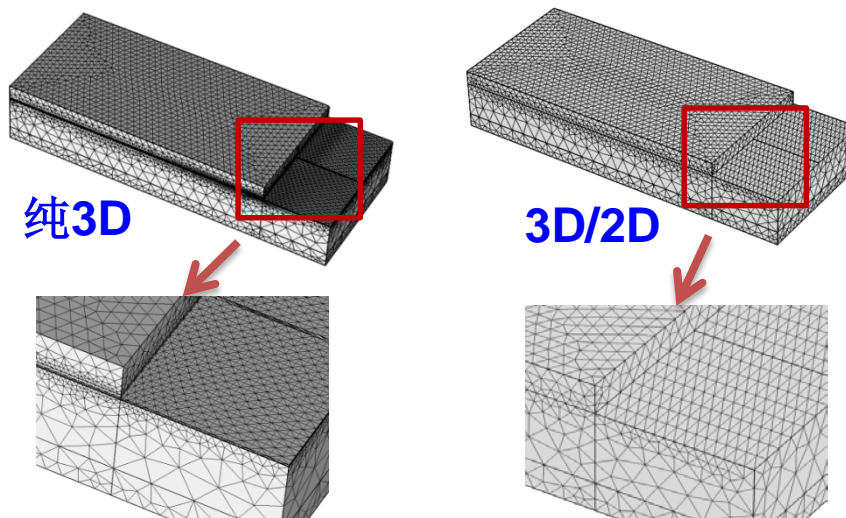
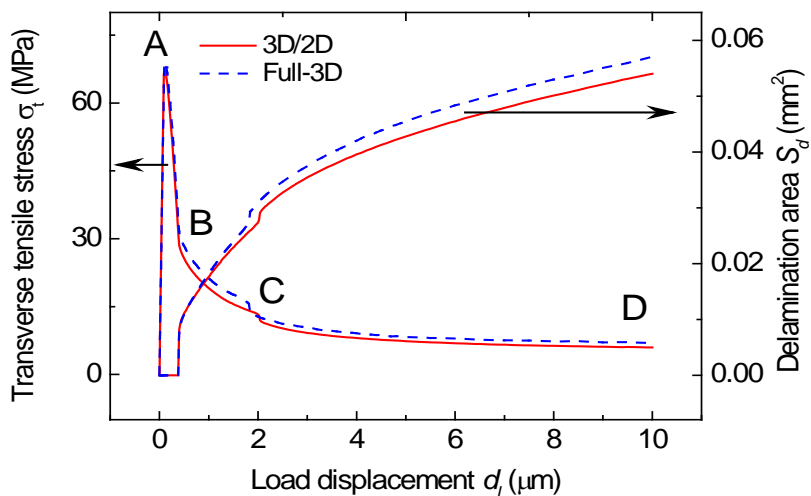


	超导层位移	缓冲层位移	界面相对位移	罚刚度	界面牵引力	界面状态
(a)	增大	增大	$< u_0$	不变	增大	紧密结合
(b)	增大	减小	$u_0 \leq u \leq u_f$	减小	减小	界面软化
(c)	增大	零	$> u_f$	零	零	脱粘剥离

✓ 3D/2D混合维度模型有效地实现了内聚力模型特征。

研究内容

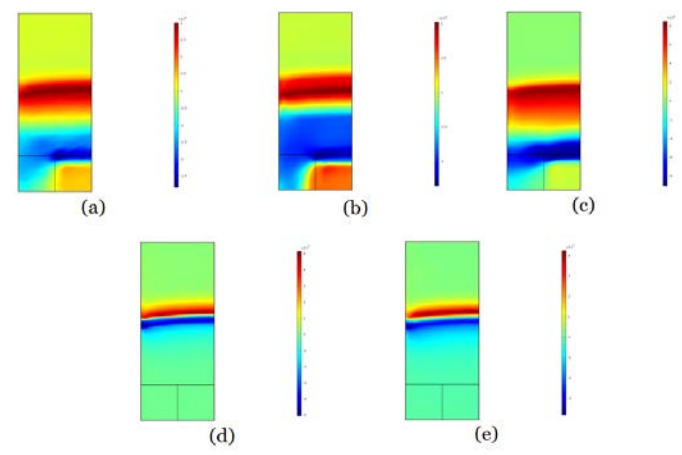
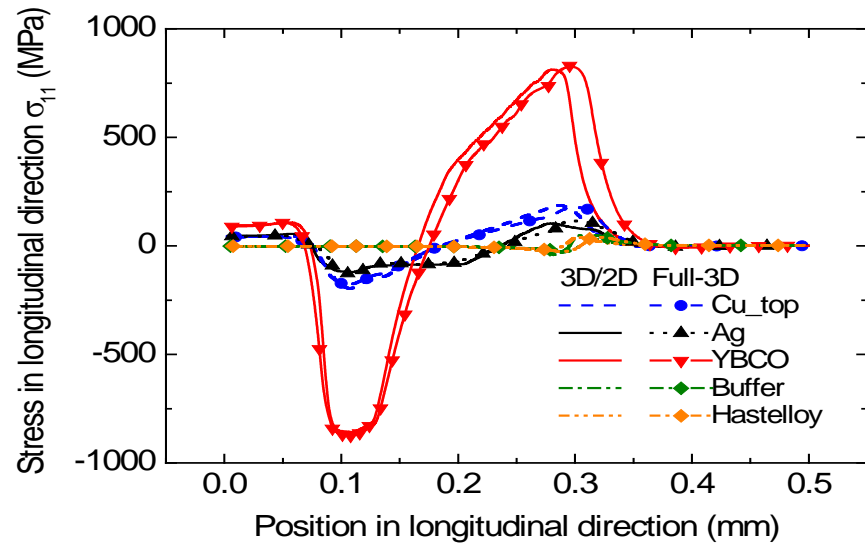
模型验证---纯3D模型对比-带材宏观角度



	3D	3D/2D
单元数	198871	36462
计算时间	22h56m	1h10m
计算精度	1	96.5%

研究内容

模型验证---纯3D模型对比-带材各材料层角度



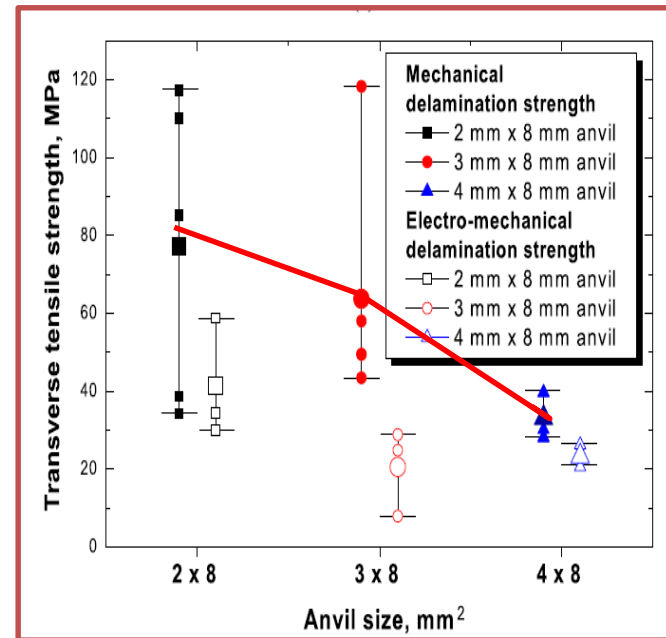
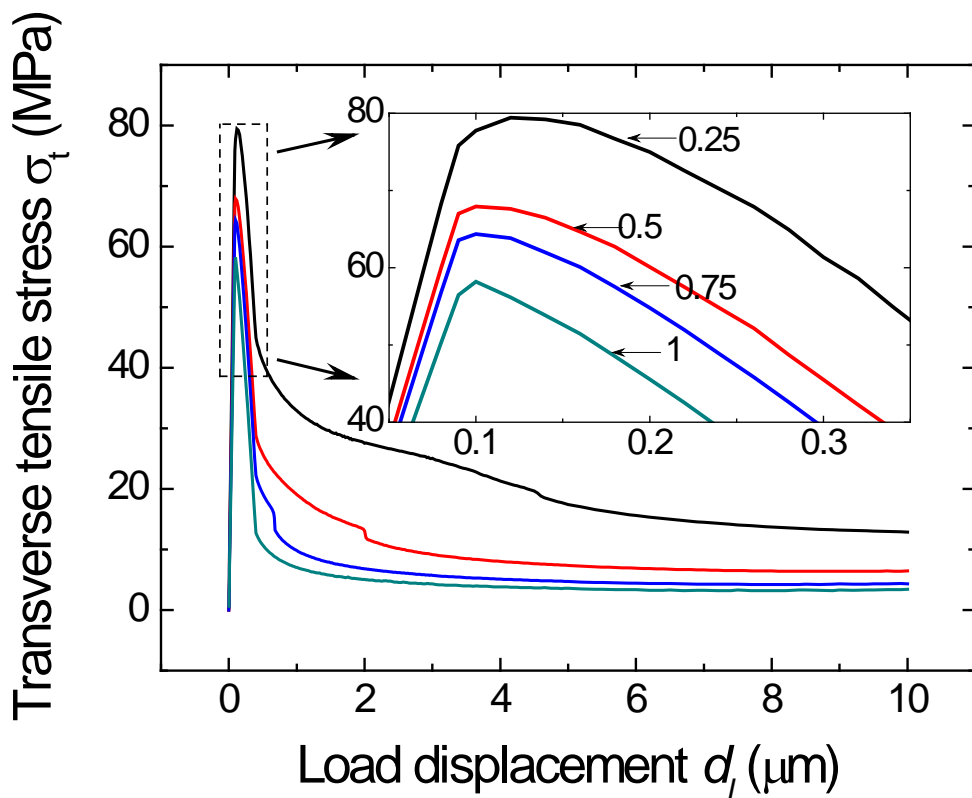
Evaluation item	Special layer	3D	3D/2D	Absolute error (MPa or mm)	Relative error (%)
Stress at crack front (MPa)	Cu_top	183	188	5	2.73
	Ag	115	103	-12	-10.43
	YBCO	830	811	-17	-2.05
	Buffer	47	46	-1	-2.13
	Hastelloy	39	40	1	2.5
Crack tip position (mm)		0.300	0.285	-0.015	-5.00

✓ 混合维度模型计算效率显著提高并且具有较好的计算精度。



研究内容

预测与讨论---加载宽度



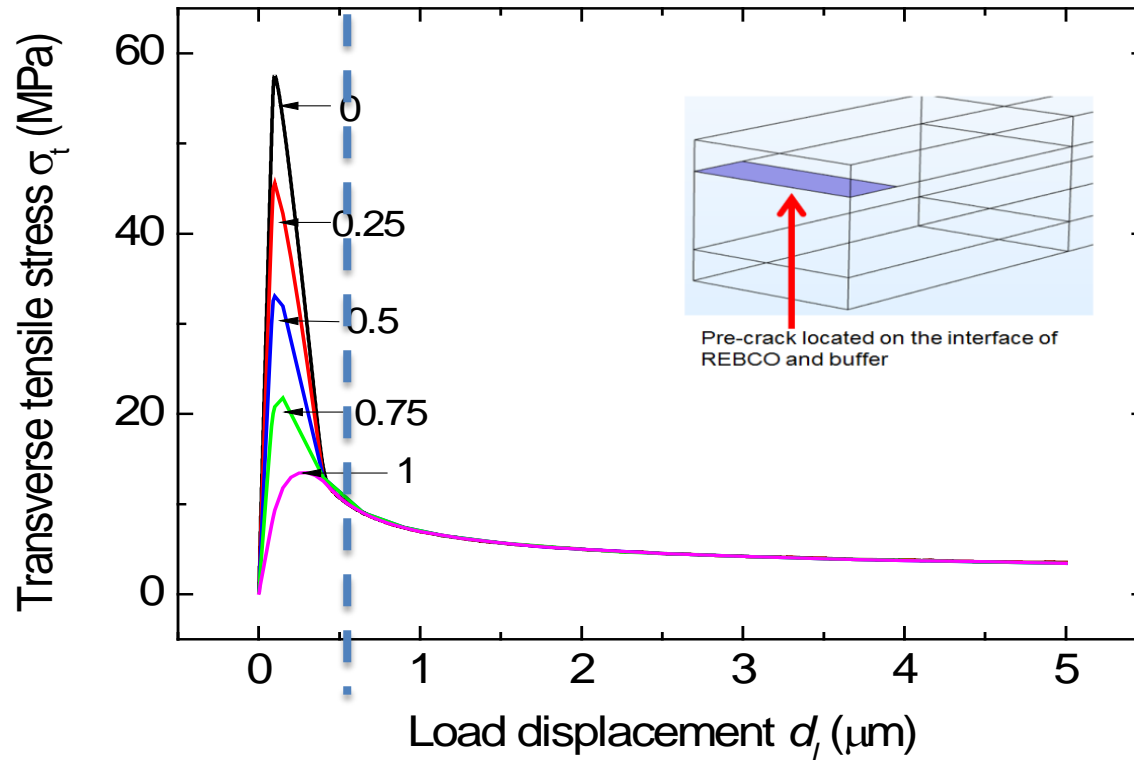
Shin H S et al. 2014, *Supercond. Sci. Technol.*

✓ 层间剥离强度随加载宽度的增加而降低，计算结果与实验现象吻合。



研究内容

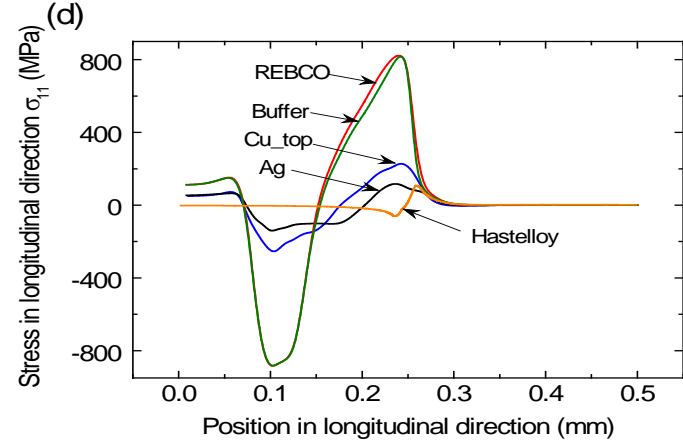
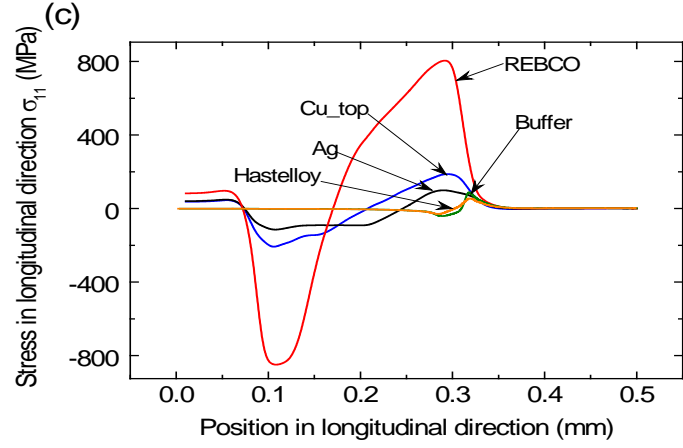
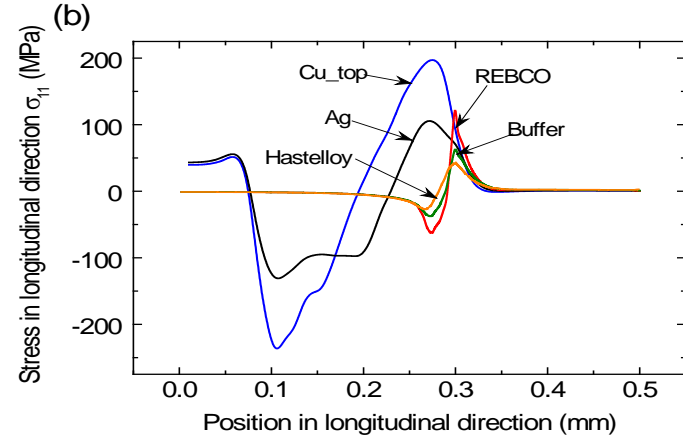
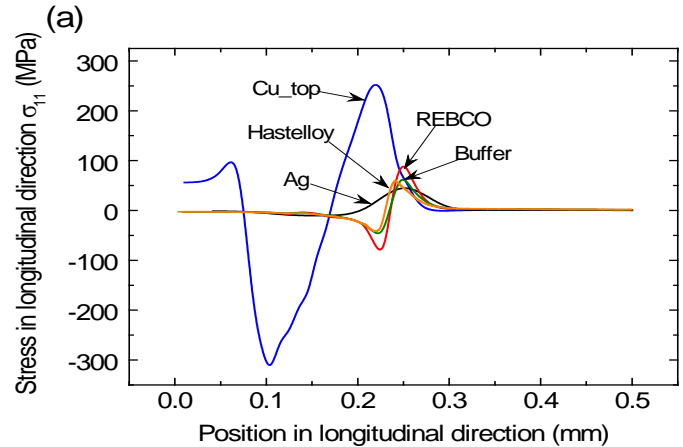
预测与讨论---初始缺陷



- ✓ 层间剥离的发生：预定义裂纹越大，剥离强度越小；
- ✓ 层间剥离稳定扩展：与初始预定义裂纹无关。

研究内容

预测与讨论---剥离所在界面



✓ 在分离面以上有两个应力集中区域（加载边界处、裂纹尖端）；
分离面以下部分只有一个应力集中区域（裂纹尖端）



结论

- 基于虚拟内聚力单元的3D/2D混合维度模型有效地实现了内聚力模型特征
- 相比纯3D模型混合维度模型计算效率显著提高并且，且具有较好的计算精度
- 模型可以有效解释实验现象，并对未知的结果做出合理预测



谢谢大家!

敬请各位批评指正!

