

1992)^[26,27]; Ciarletta and Scalia (1993)^[28]; 王旭,王子昆(1993)^[29]; Chen (1994)^[30,31]; Dascalu and Maugin (1994)^[32]; 杜善义等 (Du et al. 1994)^[33]; Dunn (1994)^[34]; Dunn and Taya (1994)^[35]; 郝天护等 (Hao and Shen, 1994)^[36]; 王晓明, 沈亚鹏 (1994)^[37]; 王子昆 (Wang, 1994)^[38]; Chung and Ting (1995)^[39]; Khutoryansky and Sosa (1995)^[40]; 梁军等 (Liang, Han and Du, 1995)^[41]; Park and Sun (1995)^[42]; 申胜平等 (1995)^[43]; 王子昆等 (Wang and Huang, 1995)^[44]; 王子昆, 郑百林 (1995)^[45,46]; Chung and Ting (1996)^[47]; 郝天护等 (Hao, Gong and Suo, 1996)^[48]; 侯密山 (1996)^[49]; Liang and Hwu (1996)^[50]; 秦庆华和余寿文 (Qin and Yu, 1996)^[51]; 余寿文和秦庆华 (Yu and Qin, 1996)^[52,53]; 尚福林等 (Shang, Wang and Li, 1996)^[54]; Shindo, Katsura and Yan (1996)^[55]; Shindo, Narita and Tanaka (1996)^[56]; Sosa and Khutoryansky (1996)^[57]; Zhang and Tong (1996)^[58]; 高华建等 (Gao, Zhang and Tong, 1997)^[59]; 侯密山 (1997)^[60]; Kumar and Singh (1997)^[61]; Shi (1997)^[62]; Shindo, Tanaka and Narita (1997)^[63]; Zhao et al. (1997)^[64,65]; 仲政和 Meguid (Zhong and Meguid, 1997)^[66]等。

2 压电介质的损伤、断裂分析的现状和基本方法

2.1 裂纹面电边界条件

Parton (1976)^[14]最早分析了压电介质中的裂纹问题。他认为由于裂纹厚度很小，裂纹面的电边界条件应上下连续，即上下表面电势和法向电位移分量相等。这种边界条件通常称作可导通边界条件 (Permeable Boundary Condition)，即

$$\phi(x, 0^+) = \phi(x, 0^-), \quad D_y(x, 0^+) = D_y(x, 0^-); \quad -a < x < a \quad (1)$$

压电介质破坏力学分析最系统的工作始于 Deeg (1980)^[15]。在他的博士论文中，Deeg 系统地分析了压电介质中的位错、裂纹和夹杂问题。使用了电学真空边界条件，即认为裂纹不导通电流，裂纹面电位移法向分量为零，即

$$D_y(x, 0^+) = D_y(x, 0^-) = 0, \quad -a < x < a \quad (2)$$

式中， D_y 为 y 方向的电位移分量， a 为裂纹半长。这一边界条件首先被 Pak (1990)^[19]引入压电介质反平面断裂分析中。目前一般称此种边界条件为 D-P 边界条件。

Suo 等 (1992)^[25]详细分析了压电介质中几类裂纹问题的边界条件，包括可导通边界条件、D-P 边界条件。进一步的研究指出，在裂纹极扁的情形下，D-P 边界条件是不适用的。一般地，可引入参数 $m = (f/m)(a/b)$ ，其中 f, m 分别为裂纹及基体材料的电导率， a/b 为裂纹长高比 (如图 1 所示)。

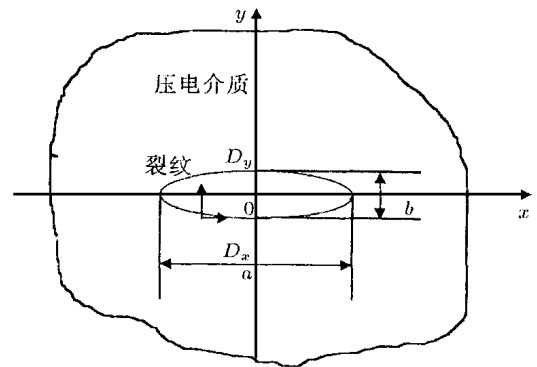


图 1 压电介质中的裂纹面边界条件

对一般的裂纹问题，虽然 f/m 非常小，但 a/b 可以很大，因此往往 m 的值并非很小，也就是说 D-P 边界条件通常是有问题的。但由于此边界条件大大简化了边值问题的求解，所以仍然得到广泛的应用。通常，当 m 较小时，D-P 边界条件是可靠的。当 m 较大时，需采用可导通边界条件。

郝天护等(Hao and Shen, 1994)^[36]提出了一个考虑裂纹腔内空气介质电导率的裂纹面电边界条件,并以此分析了压电介质的断裂力学平面问题,得到了问题的精确解和一些有用的数值结果.发现由此边界条件给出的电位移强度因子 k^D 小于由 D-P 边界条件得到的结果.

Shindo, Katsura and Yan (1996)^[55]引入了真空电导率的概念,假定裂纹为真空腔,则得到裂纹面法向电位移连续、切向电场强度分量连续,即

$$D_y(x, 0^\pm) = D_y^c(x, 0), \quad E_x(x, 0^\pm) = E_x^c(x, 0); \quad |x| < a \quad (3)$$

式中 E_x 为电场强度的 x 方向分量,带上标“ c ”的量为裂纹空腔中的值. Shindo 等人以此研究了横观各向同性压电长条中的有限裂纹在纵向剪切下的奇异应力及电场,采用 Fourier 积分变换将问题转化为求解对偶积分方程,其解由第二类 Fredholm 积分方程表示.

关于压电介质断裂力学的电边界条件的讨论还可见郝天护等(Hao and Shen, 1994)^[36];申胜平等(1995)^[43];Dunn and Wienecke(1996)^[67];Shindo, Narita and Tanaka (1996)^[56];Shindo, Tanaka and Narita (1997)^[63];侯密山(1997)^[60]等的论文.

2.2 静力学问题

2.2.1 宏观分析

Pak (1990)^[18,19]采用 D-P 边界条件,研究了无限大压电介质中的中心反平面裂纹问题.给出了以路径无关积分形式表示的 I 型断裂的线性压电介质的能量释放率.对固定机械载荷条件下,电载荷对裂纹扩展起促进作用还是阻滞作用,取决于电载荷的大小、方向和作用方式.同时还发现,对电载荷与机械载荷呈某一比例时,裂纹止裂.此外, Pak (1992)^[22]推广了线弹性断裂力学的概念并以此研究压电效应,考察电场对压电介质断裂特性的影响.采用分布位错和电耦极子方法,计算了在力电耦合作用下带有有限大裂纹的无限大压电体的电弹性场和能量释放率.由能量释放率表达式显示电场通常阻滞裂纹扩展. Pak 据此解释了强电场作用下的裂纹偏折的实验现象. Pak (1992)^[23]还研究了无限大压电介质中的圆柱形压电夹杂问题.对远场反平面机械载荷及平面电载荷作用的情形,给出了问题的封闭解.结果显示,在描述孔洞时,只要压电夹杂具有较高的电导率和较强的电弹性耦合性质, D-P 边界条件是一个很好的近似.结果还表明,当夹杂和基体极化方向相反时,在远场机械载荷作用下,压电夹杂中将产生极强的电场. Sosa (1992)^[24]利用复势方法,分析了二维线性压电体的断裂性质,给出了裂纹尖端的力电耦合场的渐近解.此外,还分析了电场对裂纹的止裂和偏折效应. Suo et al. (1992)^[25]以虚功原理和复变函数方法,得到了压电介质界面裂纹的基本解.详细分析了界面裂纹尖端的振荡奇异性.王彪(Wang, 1992)^[26]首先用 Green 函数方法和本征应变理论分析了压电基体中椭球夹杂的三维问题,得到了以积分表示的问题的解析解.当椭球为高为零的空腔时,结果将退化为椭圆片状裂纹(Wang, 1992)^[27].退化结果表明,此时应力及电位移在裂纹前缘仍具有 $r^{-1/2}$ 的奇异性. Ciarletta and Scalia (1993)^[28]讨论了应用熵不等式导出的本构方程的局限性,在温度率相关热力学框架下,导出了孔洞压电材料的线性理论的基本方程并建立了可逆性和唯一性定理.王旭,王子昆(1993)^[29]研究了压电介质反平面应变状态下的椭圆夹杂与界面裂纹问题.利用复变函数解析延拓技术,得到了问题的封闭解.在远场均布载荷下,夹杂内的应力及电位移场为常数,而界面裂纹尖端处仍具有 $r^{-1/2}$ 奇异性.类似的工作还有侯密山(1996, 1997)^[49,60]对压电夹杂中圆弧裂纹问题的研究, Shi (1997)^[62]对压电基体中的刚性导电夹杂在反平面变形和平面电场作用下的问题的研究, Sosa and Pak (1990)^[20]采用本征函数展开法对横观各向同性压电介质中的半无限裂纹进行的三维分析.此外, Sosa (1991)^[21]研究了横观各向同性含缺陷压电体的二维电弹性性质,以复势形式给出了问题的一般解.重点

讨论了圆夹杂的反平面应变问题；仲政和 Meguid (Zhong and Meguid, 1997)^[66]对在反平面剪切和平面电场作用下的压电介质与压电夹杂界面脱粘问题，采用复变函数方法进行了分析。作者 (Chen, Yu and Karihaloo, 1997)^[68]采用 B-P 边界条件，利用积分变换技术求解了不同压电介质界面裂纹的反平面问题，给出了裂纹面撕开位移

$$w(x, 0^{\pm}) = \left[\frac{1}{\mu^{(1)}} + \frac{1}{\mu^{(2)}} \right] K \sqrt{\rho r} + \left[\frac{e_{15}^{(1)}}{\mu^{(1)} \epsilon_{11}^{(1)}} + \frac{e_{15}^{(2)}}{\mu^{(2)} \epsilon_{11}^{(2)}} \right] K^D \sqrt{\rho r} \quad (4)$$

其中 $\mu^{(i)} = c_{44}^{(i)} + e_{15}^{(i)2} / \epsilon_{11}^{(i)}$ 为压电介质的广义剪切模量， c_{44} ， e_{15} ， ϵ_{11} 分别为压电介质的弹性模量、压电系数和介电常数， $i = 1, 2$ 表示上下两种不同的压电材料。由 (4) 式可见，裂纹张开位移由两部分组成，其一为首项，与一般弹性介质中的结果一致；另一部分反映压电性质的贡献。

王子昆 (Wang, 1994)^[38]通过成功引入势函数，将横观各向同性压电介质空间轴对称问题的位移、电势函数用一个满足六阶偏微分方程的势函数来表示。对一般三维问题则得到以 4 个准调和函数表示的通解形式。此外，还分析了横观各向同性压电介质中圆币形裂纹在轴对称拉伸载荷下的力电耦合行为，导出了裂尖应力场和电位移场。结果显示，裂尖应力及电位移分量仍具有 $r^{-1/2}$ 奇异性。王的工作被推广到压电介质中圆币裂纹的拉、弯联合作用分析 (王子昆, 郑百林, 1995)^[45]、横向剪切 (王子昆, 郑百林, 1995)^[46]、稳定热流作用 (Shang, Wang and Li, 1996)^[54]、椭圆形裂纹问题 (Wang and Huang, 1995)^[44]。这方面的最新结果见 Zhao et al. (1997)^[64, 65]。

2.2.2 微观分析

线性压电介质仍然属于一类各向异性介质，这可以由其本构方程清晰地看出，因而，处理各向异性问题的方法对压电介质依然有效。Chen (1994)^[30]把 Mori-Tanaka 方法用于压电介质，得到夹杂问题的一类精确解：包括椭球夹杂外的平均场、广义 Eshelby 张量 S 和其对应偶张量 T 的精确的几何无关系。Dascalu and Maugin (1994)^[32]利用 Griffith 能量法，导出了电弹性材料的准静态裂纹扩展的能量释放率。对特定的力电场条件，把能量释放率表示成路径无关积分，最后对反平面问题给出该积分与电场和应力强度因子的关系。杜善义等 (Du et al. 1994)^[33]采用 Stroh 方法，对无限大各向异性压电介质中的椭圆夹杂问题得到了一般解。给出了夹杂内部及夹杂与基体界面的耦合电弹性场。Dunn and Taya (1994)^[35]以等效夹杂理论开展了相似的工作。此外，Dunn (1994)^[34]给出了横观各向同性压电介质的电弹性耦合 Green 函数的精确公式，介绍了用电弹性耦合 Green 函数分析压电夹杂和非均匀相问题的方法，得到了与弹性夹杂问题的 Eshelby 张量类似的 4 个张量。这些结果可以方便地用于压电介质细观力学的许多问题，如缺陷、断裂力学与复合材料等。

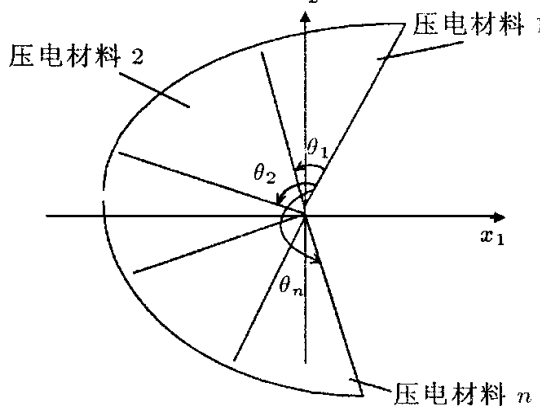


图 2 压电复合材料尖劈 (Chung and Ting, 1995)^[39]

Chung 和 Ting (1995)^[39]研究了二维各向异性压电复合材料尖劈或空间问题。采用 Stroh 方法，对特定尖劈 (图 2) 给出了以任意两个矢

量表示的基本解. 然后分别针对线力、线电荷作用在尖劈上, 给出问题的精确解; 他们还给出了一个压电复合材料半空间中央作用线力、线电荷、线位错和电偶极子时的分析解. 结果表明, 对压电复合材料尖劈, 任意等角面上的法向应力及电位移分量均为零. 而对压电复合材料半空间, 虽然这些量不为零, 但对不同的角度, 其值不变.

Park and Sun (1995)^[42]用 Stroh 方法对无限大压电介质中的中心裂纹在机械-电载荷共同作用下的三种断裂方式问题进行了分析, 得到了问题的封闭解. 给出了裂纹尖端机械和电场的解析表达式. 再由裂纹尖端闭合回路积分得到应变能释放率和总的能量释放率, 讨论了应力强度因子、总能量释放率和应变能释放率作为断裂准则的差异, 他们的结论是: (1) 以传统方式定义的应力及电位移强度因子不适用于裂纹在机电联合作用下的失稳扩展. 若单独以应力强度因子作为断裂准则, 则电加载对压电材料的断裂将不起任何作用, 这无法解释现有的实验结果. (2) 机械应变能释放率与电位移线性相关, 这表明应变能释放率将随电加载方向的不同增加或减小, 这与已有的实验结果定性相符. 相反, 总能量释放率总是随着电加载强度的增加而减小, 不管电加载方向是正是负. 这说明总的能量释放率不能直接用于压电材料的断裂准则.

用 Stroh 方法分析压电夹杂断裂问题的其它工作还有 Chung and Ting (1996)^[47]、梁军等 (Ling, Han and Du, 1995)^[41]、Liang and Hwu(1996)^[50]、申胜平等 (1995)^[43]、秦庆华和余寿文 (Qin and Yu, 1996)^[51]、余寿文和秦庆华 (Yu and Qin, 1996)^[52,53]等.

到目前为止, 压电介质的破坏分析大都针对线性压电材料进行. 最近, 高华建等 (Gao, Zhang and Tong, 1997)^[59]仿效弹性断裂分析中的 Dugdale 模型, 提出了压电介质裂纹尖端的电饱和区(屈服区)模型. 他把压电陶瓷模型化为机械脆性而电韧性固体(图 3(a)), 作为考虑电屈服的第一步, 提出了一个条状饱和区模型. 如图 3(b) 所示, 考虑无限大极化压电陶瓷中含有一个有限长裂纹, 平行或垂直于极化轴. 在裂纹前缘一个条状区域, 电极化达到饱和极限, 这种模型可以看成是裂纹尖端塑性屈服的经典 Dugdale 模型的推广. 通过一些简化的电弹性公式分析了该模型的相关性质, 由此导出两种能量释放率. 其一称为总体能量释放率, 由计算包围电屈服带和裂尖的闭合回路 Γ_g 上的 J 积分得到. 在小范围屈服条件下, 该能量释放率与无电屈服的线性压电裂纹体的结果相等. 另一个称为局部能量释放率, 通过围绕裂尖无穷小闭合回路 Γ_1 上的 J 积分得到. 局部能量释放率给出的结果与实验观察更符合. 此外还发现, 局部能量释放率与电屈服强度和屈服区尺寸无关. 这一新模型可望在压电陶瓷的断裂准则研究等方面带来突破性进展.

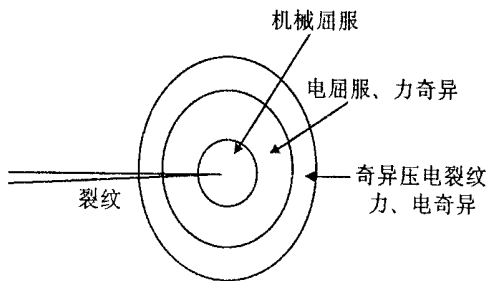


图 3 (a) 压电体中裂纹尖端的分区控制模型
(Gao et al., 1997)^[59]

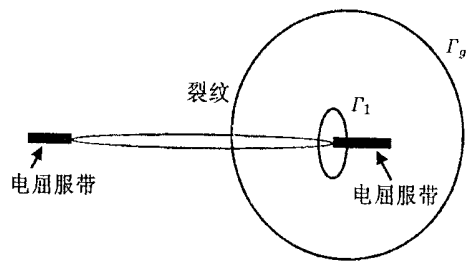


图 3 (b) 裂纹尖端的电屈服带模型
(Gao, et al., 1997)^[59]

郝天护等 (Hao, Gong and Suo, 1996)^[48]研究了多层陶瓷致动器设计中的断裂力学问题. 他们考虑力-电非线性交互作用, 提出了一个裂纹形核模型, 并将其用于压电和铁电问题. 主要考虑小范围的电饱和. 假设主动电势很小, 除了围绕电极端部的一个小的柱状区外, 陶瓷膨胀满足线性介电性质. 在该柱状区内, 由于电致伸缩引起大应变(图4). 他们还给出了开裂的

一组控制参数。不管附加在任何结构上，只要多层致动器的厚度小于一个临界值，其内部的电极端部都不会发生开裂。

2.3 动力学问题

压电介质动态断裂分析是新近兴起的研究领域。Norris (1994)^[69]最先研究了热压电介质中的动态 Green 函数。Khutoryansky and Sosa (1995)^[40]采用广义互逆定理和平面波变换方法率先给出了压电介质瞬态问题的控制方程的表示公式和基本解。Shinde, Katsura and Yan (1996)^[55]用积分变换方法研究了均匀电场作用下无限大电介质中有限长裂纹对垂直入射的瞬态纵波的散射。对反平面问题，动力学控制方程可化成

$$\nabla^2 w = c_2^{-2} \partial^2 w / \partial t^2 \quad (5)$$

$$\nabla^2 \left[w - \frac{11}{e_{15}} \phi \right] = 0 \quad (6)$$

其中 w , ϕ 分别为反平面位移及电势, $c_2 = \sqrt{\mu/\rho}$, 为材料密度, μ 由前面所定义。压电介质的反平面断裂动力学问题就化成为波动方程 (5) 和 Laplace 方程 (6) 在给定力-电边界条件下的初边值问题。这时, 传统的断裂动力学方法可以方便地使用。

Li and Mataga (1996)^[70,71]研究了压电介质中半无限长扩展裂纹的反平面瞬态响应, 分别研究了裂纹面的两类电边界条件下的结果: (a) 可导同通边界条件; (b) 真空边界条件。利用积分变换技术和 Wiener-Hopf 方法及 Cagniard-de Hoop 反演围道技术, 对问题进行求解。对第一种边界条件, 得到了裂纹以常速扩展时的问题的闭合解。对第二种边界条件, 得到了裂纹亚音速扩展时的裂纹尖端的动应力及电位移强度因子。他们的重要发现是, 当裂纹速度达到压电介质表面波速 (Bleustein-Gulyaev 波速) 时, 能量释放率将为零。

本文作者 (Chen and Yu, 1997)^[72]研究了压电介质的型动态断裂问题, 得到了反平面机械冲击和平面电位移冲击下的裂纹尖端场。结果显示此时应力及电位移在裂尖也具有 $r^{-1/2}$ 奇异性。此外, 我们 (Chen and Yu, 1997)^[73]还研究了压电介质中半无限裂纹对机械冲击的动态响应, 得到了与材料压电性质相关的动应力强度因子, 结果表明由于压电性质的存在, 动应力强度因子增大 (图 5)。图中横坐标为 $(e_{15}^2/\epsilon_{11})/c_{44}$, 纵坐标为无量纲动应力强度因子。

最近我们 (Chen and Yu, 1997, Chen, Karihaloo and Yu, 1997)^[74,75]分别考虑了均匀压电介质中的 Yoffe 裂纹问题和不同压电介质界面上的 Yoffe 裂纹问题。前者与纯弹性介质结果形式完全一致, 裂纹运动速度对应力强度因子和电位移强度因子无任何影响, 而除去裂纹所在平面外, 应力及电位移场均与裂纹运动速度相关; 后者则表现出应力及电位移强度因子对裂纹运动速

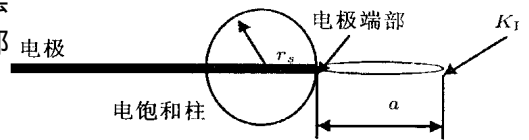


图 4 致动器中电极端部裂纹形核模型 (Hao, Gong and Suo, 1996)^[48]

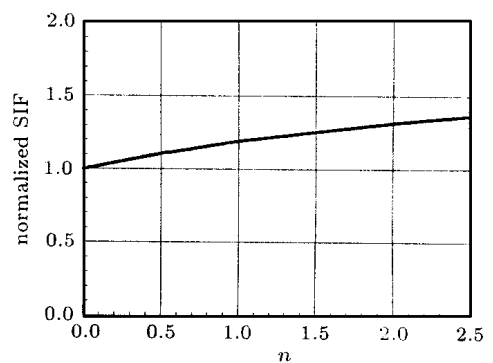


图 5 压电性质对动应力强度因子的影响 (Chen and Yu, 1997b)^[73]

度的依赖性.对于有限宽的压电介质的板条在机械与电冲击作用下的瞬态响应,作者们在文[76~78]中,得到了一些新的结果.文[79]研究了压电层状介质中的 Love 波的散射,茹重庆(Ru C Q,1998)^[80]讨论了电极化饱和对压电陶瓷应力强度因子的影响.秦庆华和余寿文(Qin and Yu,1998)^[81]和 Hori and Nemet-Nasser (1998)^[82]分别研究了含微孔洞和一般损伤情形下压电介质的等效模量的确定与估计.目前,关于压电介质的动态断裂分析还正在起步.由于这方面的工作在诸如超声检测、声纳、微电子和通讯领域有明确的工程背景,压电介质动态破坏力学将逐渐成为人们关注的一个焦点.

压电介质的机电耦合效应使分析解仅能对简单问题给出.而对一般情况,寻找解析的结果十分困难,特别是考虑惯性的动态破坏问题.要研究复杂工况下的压电介质的破坏力学,有限元方法是十分有效的. Kumar and Singh (1997)^[61]采用 ABAQUS 有限元程序,计算了电场作用下压电陶瓷的裂尖应力分布.结果表明,在负电场作用下,裂纹面应力自由(traction free)作为应力边界条件是不对的.相信随着研究的逐步深入,越来越多的问题将依靠数值方法解决.

3 结束语

尽管压电介质的损伤、断裂分析已取得了大量的研究成果,但仍然处于发韧阶段,许多问题至今仍不清楚.与信息材料科学与微电子工程的要求相比,力学工作者还有许多工作要做.我们认为今后应在以下几个方面多做努力:

- 11 Ding H J, Chen W Q, Guo Y M, Yang Q D. Free vibrations of piezoelectric cylindrical shells filled with compressible fluid. *Int J Solids Struct*, 1997, 34(16) : 2025 ~ 2034
- 12 余寿文. 固体力学与材料科学交缘的几个新课题. *力学进展*, 1994, 24(1) : 24 ~ 36
- 13 王晓明, 沈亚鹏, 尹林. 机敏材料和机敏结构的力学分析. *力学进展*, 1995, 25(2) : 209 ~ 222
- 14 Parton V Z. Fracture mechanics of piezoelectric materials. *Acta Astro*, 1976, 3: 671 ~ 683
- 15 Deeg W F. The analysis of dislocation, crack and inclusion problems in piezoelectric solids. Ph D Thesis, Stanford University, 1980
- 16 Pak Y E, Herrmann G. Conservation laws and the material momentum tensor for the elastic dielectric. *Int J Engng Sci*, 1986, 24(8) : 1365 ~ 1374
- 17 Pak Y E, Herrmann G. Crack extension force in a dielectric medium. *Int J Engng Sci*, 1986, 24(8) : 1375 ~ 1388
- 18 Pak Y E. Force on a piezoelectric screw dislocation. *Trans ASME, J Appl Mech*, 1990, 57: 863 ~ 869
- 19 Pak Y E. Crack extension force in a piezoelectric material. *Trans ASME, J Appl Mech*, 1990, 57: 647 ~ 653
- 20 Sosa H A, Pak Y E. Three dimensional eigenfunction analysis of a crack in a piezoelectric material. *Int J Solids Struct*, 1990, 26(1) : 1 ~ 15
- 21 Sosa H. Plane problems in piezoelectric media with defects. *Int J Solids Struct*, 1991, 28(4) : 491 ~ 505
- 22 Pak Y E. Circular inclusion problem in antiplane piezoelectricity. *Int J Solids Struct*, 1992, 29(19) : 2403 ~ 2419
- 23 Pak Y E. Linear electro-elastic fracture mechanics of piezoelectric materials. *Int J Fracture*, 1992, 54: 79 ~ 100
- 24 Sosa H. On the fracture mechanics of piezoelectric solids. *Int J Solids Struct*, 1992, 29(21) : 2613 ~ 2622
- 25 Suo Z, Kuo C-M, Barnett D M, Willis J R. Fracture mechanics for piezoelectric ceramics. *J Mech Phys Solids*, 1992, 40(4) : 739 ~ 765
- 26 Wang B. Three dimensional analysis of an ellipsoidal inclusion in a piezoelectric material. *Int J Solids Struct*, 1992, 29(3) : 293 ~ 308
- 27 Wang B. Three dimensional analysis of a flat elliptical crack in a piezoelectric material. *Int J Engng Sci*, 1992, 30(6) : 781 ~ 791
- 28 Carletta M, Scalia A. Thermodynamics theory for porous piezoelectric materials. *Meccanica*, 1993, 28: 303 ~ 308
- 29 王旭, 王子昆. 压电材料反平面应变状态的椭圆夹杂及界面裂纹问题. *上海力学*, 1993, 14(4) : 26 ~ 33
- 30 Chen T. Micromechanical estimates of the overall thermoelastoelectric moduli of multiphase fibrous composite. *Int J Solids Struct*, 1994, 31(22) : 3099 ~ 3111
- 31 Chen T. Some exact relations of inclusions in piezoelectric media. *Int J Engng Sci*, 1994, 32(3) : 553 ~ 556
- 32 Dascalu C and Maugin G A. Energy release rates and path independent integrals in electroelastic crack propagation. *Int J Engng Sci*, 1994, 32(5) : 755 ~ 765
- 33 Du S, Liang J, Han J, Wang B. General coupled solution of anisotropic piezoelectric materials with an elliptic inclusion. *Acta Mech Sinica*, 1994, 10(3) : 273 ~ 281
- 34 Dunn M L. Electroelastic Green's functions for transversely isotropic piezoelectric media and their application to the solution of inclusion and inhomogeneity problems. *Int J Engng Sci*, 1994, 32(1) : 119 ~ 131
- 35 Dunn M L, Taya M. Electroelastic field concentrations in and around inhomogeneities in piezoelectric solids. *Trans ASME J Appl Mech*, 1994, 61: 474 ~ 475
- 36 Hao T-H, Shen Z-Y. A new electric boundary condition of electric fracture mechanics and its applications. *Engng Fracture Mech*, 1994, 47(6) : 793 ~ 802
- 37 王晓明, 沈亚鹏. 电磁热弹性介质的一些基本理论 — 、 . *应用力学学报*, 1994, 11: 3 ~ 12
- 38 Wang Zikun. Penny-shaped crack in transversely isotropic piezoelectric materials. *Acta Mech Sinica*, 1994, 10(1) : 49 ~ 60
- 39 Chung M Y, Ting T C T. Line force, charge and dislocation in anisotropic piezoelectric composite wedges and spaces. *ASME, J Appl Mech*, 1995, 62: 423 ~ 428
- 40 Khutoryansky N M, Sosa H. Dynamic representation formulas and fundamental solutions for piezoelectricity. *Int J Solids Struct*, 1995, 32(22) : 3307 ~ 3325
- 41 Liang J, Han J, Du S. Rigid line inclusions and cracks in anisotropic piezoelectric solids. *Mech Res Comm*, 1995, 22(1) : 43 ~ 49
- 42 Park S B, Sun C T. Effect of electric field on fracture of piezoelectric ceramics. *Int J Fracture*, 1995, 70: 203 ~ 216
- 43 申胜平, 王旭, 匡震邦. 热释电材料问题的通解与界面裂纹. *固体力学学报*, 1995, 16(4) : 283 ~ 293
- 44 Wang Z K, Huang S-H. Fields near elliptical crack in piezoelectric ceramics. *Engng Fract Mech*, 1995, 51(3) : 447 ~ 456
- 45 王子昆, 郑百林. 压电介质中受拉伸与弯曲联合作用的圆币形裂纹问题. *应用力学学报*, 1995, 12(4) : 30 ~ 38
- 46 王子昆, 郑百林. 压电陶瓷中圆币形裂纹在横向剪力下的机-电耦合行为. *力学学报*, 1995, 27(3) : 304 ~ 315
- 47 Chung M Y, Ting T C T. Piezoelectric solid with an elliptic inclusion or hole. *Int J Solids Struct*, 1996, 33(23) : 3343 ~ 3361
- 48 Hao T H, Gong X, Suo Z. Fracture mechanics for the design of ceramic multilayer actuators. *J Mech Phys*

- Solids*, 1996, 44(1) :23 ~ 48
- 49 侯密山. 含圆弧裂纹系的压电材料反平面应变问题. *上海力学*, 1996, 17(3) : 239 ~ 244
 - 50 Liang Y C, Hwu C. Electromechanical analysis of defects in piezoelectric materials. *Smart Mater Struct*, 1996 5 : 314 ~ 320
 - 51 Qin Q H, Yu S W. On the plane piezoelectric problem of a loaded crack terminating at a material interfaces. *Acta Mech Solid Sinica*, 1996, 9 : 151 ~ 158
 - 52 Yu S W, Qin Q H. Damage analysis of thermopiezoelectric properties: Part I: Crack tip singularities. *Theor Appl Fract Mech*, 1996, 25 : 263 ~ 277
 - 53 Yu S W, Qin Q H. Damage analysis of thermopiezoelectric properties: Part II: Effective crack model. *Theor Appl Fract Mech*, 1996, 25 : 279 ~ 288
 - 54 Shang F, Wang Z, Li Z. Thermal stresses analysis of a three-dimensional crack in a thermopiezoelectric solid. *Engng Fract Mech*, 1996, 55(5) : 737 ~ 750
 - 55 Shindo Y, Katsura H, Yan W. Dynamic stress intensity factor of a cracked dielectric medium in a uniform electric field. *Acta Mech*, 1996, 117 : 1 ~ 10
 - 56 Shindo Y, Narita F, Tanaka K. Electroelastic intensification on near antiplane shear crack in orthotropic piezoelectric ceramic strip. *Theor Appl Fract Mech*, 1996, 25 : 65 ~ 71
 - 57 Sosa H, Khutoryansky N. New developments concerning piezoelectric materials with defects. *Int J Solids Struct*, 1996, 33(23) :3399 ~ 3414
 - 58 Zhang T-Y, Tong P. Fracture mechanics for a mode III crack in a piezoelectric material. *Int J Solids Struct*, 1996, 33(3) :343 ~ 359
 - 59 Gao H, Zhang T Y, Tong P. Local and global energy release rates for an electrically yielded crack in a piezoelectric ceramic. *J Mech Phys Solids*, 1997, 45(4) : 491 ~ 510
 - 60 侯密山. 压电材料平面应力状态的直线裂纹问题的一般解. *力学学报*, 1997, 29(5) : 595 ~ 599
 - 61 Kumar S, Singh R N. Influence of applied electric field and mechanical boundary condition on the stress distribution at the crack tip in piezoelectric materials. *Mater Sci Engng*, 1997, A231 : 1 ~ 9
 - 62 Shi W. Rigid line inclusions under antiplane deformation and inplane electric field in piezoelectric materials. *Engng Fract Mech*, 1997, 56(2) : 265 ~ 274
 - 63 Shindo Y, Tanaka K, Narita F. Singular stress and electric fields of a piezoelectric ceramic strip with a finite crack under longitudinal shear. *Acta Mech*, 1997, 120 : 31 ~ 45
 - 64 Zhao M H, Shen Y P, Liu Y J, Liu G N. Isolated crack in three dimensional piezoelectric solid: Part I: Solution by Hankel transform. *Theor Appl Fract Mech*, 1997, 26 : 118 ~ 127
 - 65 Zhao M H, Shen Y P, Liu Y J, Liu G N. Isolated crack in three dimensional piezoelectric solid: Part II: Stress intensity factors for circular crack. *Theor Appl Fract Mech*, 1997, 26:129 ~ 139
 - 66 Zhong Z and Meguid S A. Interfacial debonding of a circular inhomogeneity in piezoelectric materials. *Int J Solids Struct*, 1997, 34(16) : 1965 ~ 1984
 - 67 Dunn M L, Wienecke H A. Green's functions for transversely isotropic piezoelectric solids. *Int J Solids Struct*, 1996, 33(30) : 4571 ~ 4581
 - 68 Chen Z T, Yu S W, Karihaloo B L. Antiplane shear problem for a crack between two dissimilar piezoelectric materials. *Int J Fracture*, 1997, 86(1-2) : L9 ~ L12
 - 69 Norris A N. Dynamic Green's functions in anisotropic piezoelectric, thermalelastic and poroelastic solids. *Proc Roy Soc Lond*, 1994, A447 : 175 ~ 188
 - 70 Li S, Mataga P A. Dynamic crack propagation in piezoelectric materials Part I: Electrode solution. *J Mech Phys Solids*, 1996, 44(11) : 1799 ~ 1830
 - 71 Li S, Mataga P A. Dynamic crack propagation in piezoelectric materials Part II: Vacuum solution. *J Mech Phys Solids*, 1996, 44(11) : 1831 ~ 1866
 - 72 Chen Z T (陈增涛), Yu S W (余寿文). Crack tip fields of piezoelectric materials under antiplane impact. *Chin Sci Bull*, 1997, 42(19) : 1615 ~ 1619
 - 73 Chen Z T and Yu S W. A semi-infinite crack in a piezoelectric material under antiplane mechanical impact. *Int J Fracture*, 1999, 91(2) : 197 ~ 213
 - 74 Chen Z T, Yu S W. Antiplane Yoffe crack problem in piezoelectric materials. *Int J Fracture*, 1997, 84(3) :L41 ~ L45
 - 75 Chen Z T, Karihaloo B L, Yu S W. A Griffith crack moving along the interface of dissimilar piezoelectric materials. *Int J Fracture*, 1999, in Press
 - 76 Chen Z T, Yu S W. Transient response of a cracked piezoelectric strip under arbitrary electro-mechanical impact. *Acta Mechanica Sinica*, 1998, 14(3) : 248 ~ 256
 - 77 Yu S W, Chen Z T. Transient response of a cracked infinite piezoelectric strip under antiplane impact. *Fatigue and Fracture of Eng Mat and Structures*, 1998, 21 : 1381 ~ 1388
 - 78 Chen Z, Yu S. A semi-infinite crack under antiplane mechanical impact in piezoelectric materials. *Int J Fracture*, 1998, 88 :L53 ~ L56

- 79 Narita F, Sindo Y. Scattering of Love waves by a surface-breaking crack in piezoelectric layered medium. *JSM E Int J*, 1998, 41: 40 ~ 48
- 80 Ru C Q. Effect of the electrical polarization saturation of stress intensity factor in piezoelectric ceramics. *Int J Solids and Structures*, 1998, 36(6): 869 ~ 876
- 81 Qin Q H, Yu S W. Effective moduli of piezoelectric material with microcavities. *Int J Solids and Structures*, 1998, 35(36): 5085 ~ 5095
- 81 Hori M, Nemat-Nasser S. Universal bounds for effective piezoelectric moduli. *Mech of Materials*, 1998, 30(1): 1 ~ 9

CURRENT RESEARCH ON THE DAMAGE AND FRACTURE MECHANICS OF PIEZOELECTRIC MATERIALS

Chen Zengtao Yu Shouwen

Department of Engineering Mechanics of the piezoelectric medium, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract Damage and fracture mechanics of the piezoelectric medium is a very important branch of solid mechanics. First, the current research on the damage and fracture mechanics of piezoelectric materials is reviewed. Three topics are addressed: (1) different formulation of the electric boundary of defect and its effect on the mechanical behaviour of the damage and fracture of the piezoelectric medium; (2) static analysis for the fracture by using the continuum mechanics and mesomechanics approach; (3) some new results of the fracture dynamics for piezoelectric medium. Some potential subjects to be concerned with in the future are proposed.

Key words piezoelectric materials, fracture, damage, fracture mechanics