

压电材料中螺型位错与含裂纹非理想界面 圆形夹杂的干涉效应

方棋洪^{1,2}, 陈健美¹, 刘又文²

(1. 湖南涉外经济学院 机械工程学部, 湖南 长沙 410205; 2. 湖南大学 力学与航空航天学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 研究了在无穷远反平面剪切和面内电场的共同作用下一个压电螺型位错与含裂纹非理想圆形界面夹杂的电弹耦合干涉作用; 运用复变函数方法, 获得了该问题的封闭形式解, 给出了基体和夹杂区域的广义应力场和位移场; 利用 Peach-Koehler 公式, 计算了作用在位错上像力的解析表达式; 讨论了裂纹的几何尺寸、非理想界面、以及材料常数对位错力(像力)的影响规律。研究表明: 裂纹和界面非理想性对位错力以及位错平衡位置的扰动效应较大。

关键词: 压电材料; 非理想界面; 裂纹; 螺型位错; 像力

中图分类号: O346.1; O343.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2009)01-0071-05

Interaction between Screw Dislocation and Circular Imperfect Interface with Crack in Piezoelectric Materials

Fang Qihong^{1,2}, Chen Jianmei¹, Liu Youwen²

(1. Department of Mechanical Engineering, Hunan International Economics University, Changsha 410205, China;
2. School of Mechanics and Aerospace, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The interaction effect between circular imperfect interface with cracks and piezoelectric screw dislocation located inside matrix under antiplane shear and plane electric fields in infinity is investigated. Using Riemann-Schwarz's symmetry principle integrated with the analysis singularity of complex functions, the closed form solutions for complex potentials of this problem is presented. The generalized stress fields and displacement fields in matrix and inhomogeneity regions are also given out. By using the Peach-Koehler formula, the image force acting on the screw dislocation is calculated. The influence of the cracks, imperfect interface and the materials constants on the image force are discussed. The results indicate the influence of the crack and the imperfect interface on the image force and the equilibrium position of the dislocation near the inhomogeneity are significant.

Key words: piezoelectric material; imperfect interface; cracks; screw dislocation; image force

0 引言

压电材料是一种能实现机械能和电能之间相互转化的机敏材料。因其良好的电弹耦合性能, 而广泛应用于传感器, 制动器和微定位等机敏结构中。由于这

些结构中不可避免地存在各种缺陷(例如孔洞、裂纹、位错等), 因而会不同程度地影响压电材料的电弹耦合性能。近年来, 许多学者研究了压电复合材料中夹杂和位错的电弹耦合干涉效应^[1-7], 其中大多是针对界面无缺陷的理想夹杂情形。然而, 压电复合材料在制

收稿日期: 2009-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50801025, 10872065), 国家博士后基金资助项目(20080430151)

作者简介: 方棋洪(1977-), 男, 浙江淳安人, 湖南大学副教授, 博士, 主要研究方向为材料力学性能, E-mail: fangqh1327@tom.com

造和使用过程中, 夹杂和基体之间的界面较容易产生缺陷。因此, 研究位错与具有界面缺陷夹杂的相互作用具有重要的应用价值, 不仅有助于全面理解压电材料的电弹耦合性能, 而且能为建立复合材料的断裂破坏准则提供科学依据。

最近, Jin 和 Fang^[8]研究了反平面剪切和平面内电场作用下压电材料中螺型位错与含非理想界面圆形夹杂之间的电弹性耦合干涉作用。文献[8]考虑界面粘结的非理想性, 在弹簧层模型基础上, 类似地引入一个界面电势分量的跳跃与界面电位移分量之间的线性关系^[9]。除了界面非理想性外, 界面裂纹也是一种很重要的界面缺陷^[10]。本文在文献[8]的基础上, 进一步研究压电材料中螺型位错与含裂纹非理想界面圆形夹杂的压电弹性干涉问题。运用复变函数方法, 求出了该问题的一般解答。作为特例, 导出了界面只含 1 条裂纹时应力复势函数的封闭形式解, 以及作用在位错上像力(位错力)的表达式, 并由此讨论了非理想界面和界面裂纹对位错力的影响规律。

1 问题描述和解答

如图 1 所示, 对于极化方向沿 z 轴的无限大横观各向同性压电介质, 设 xoy 平面为各向同性面, 压电介质 I 占有圆内区域 S^+ , 压电介质 II 占有圆外区域 S^- 。在 S^+ 内任一点 z_0 有一压电螺型位错 $\mathbf{b} = \{b_x, b_y\}^T$, 其中 b_x 和 b_y 分别表示该点的位移和电势间断。在无穷远处作用反平面力场 (τ_{rz}^{∞} 和 $\tau_{\theta z}^{\infty}$) 和平面电场 (D_x^{∞} 和 D_y^{∞})。在 2 种压电材料的交界面上有 1 条裂纹 L , 且裂纹面上无外载和电荷作用, 剩余部分为非理想界面用 L' 表示。

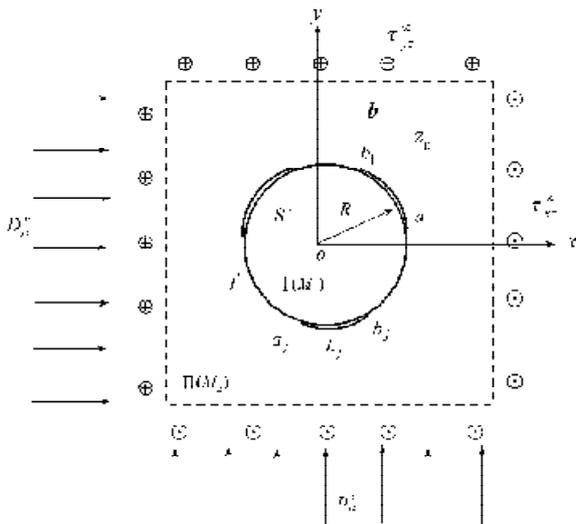


图 1 压电螺型位错和含裂纹非理想界面圆夹杂的干涉模型

Fig.1 A piezoelectric screw dislocation interacting with a circular imperfect interface with cracks

该问题为反平面问题, 设沿 z 轴方向的位移为 w ,

应变分量为 γ_{xz} 和 γ_{yz} , 应力分量为 τ_{xz} 和 τ_{yz} , 电势为 (φ) , 电场分量为 E_x 和 E_y , 电位移分量为 D_x 和 D_y 。 C_{44} 、 e_{15} 、 d_{11} 分别表示压电材料的剪切模量、压电系数和介电常数。广义应力和应变矢量为:

$$\Sigma_x = \begin{Bmatrix} \tau_{xz} \\ D_x \end{Bmatrix}, \quad \Sigma_y = \begin{Bmatrix} \tau_{yz} \\ D_y \end{Bmatrix},$$

$$Y_x = \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ -E_x \end{Bmatrix}, \quad Y_y = \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ -E_y \end{Bmatrix}.$$

引入广义位移矢量 $U = \begin{Bmatrix} w \\ \varphi \end{Bmatrix}$, U 可以用广义解析函数 $f(z) = \begin{Bmatrix} f_r(z) \\ f_s(z) \end{Bmatrix}$ 表示, 其中 $z = x + iy$ 。

$$U = \text{Re} f'(z), \tag{1}$$

$$\text{有 } \Sigma_x - i \Sigma_y = M F'(z), \tag{2}$$

其中: $M = \begin{bmatrix} C_{44} & e_{15} \\ e_{15} & -d_{11} \end{bmatrix}$; $\bar{F}(z) = \overline{f'(z)}$, 在极坐标中可以

$$\text{表示为 } \Sigma_x - i \Sigma_y = e^{i\theta} M F'(z). \tag{3}$$

设夹杂圆心在复平面 $z = x + iy$ 的坐标原点, 在界面 $|z| = R$ 上的点 z 用 $t = R e^{i\theta}$ 表示。界面的连接条件可以表示为: $\Sigma_{r,1}(t) - \Sigma_{r,2}(t) = 0, t \in L;$

$$\Sigma_{\theta,1}(t) - \Sigma_{\theta,2}(t), t \in L'; \tag{4}$$

$$k [U_{z,1}^+(t) - U_{z,1}^-(t)] = M_2 \frac{\partial U_2}{\partial n}, t \in L'. \tag{5}$$

式 (4) ~ (6) 中: $k = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$ 表示非理想界面系数;

下标 “1” 和 “2” 分别表示区域 S^+ 和 S^- 中的量; 上标 “+” 和 “-” 表示函数从 S^+ 和 S^- 趋向界面时所取的边界值。

$$\text{设螺型位错在 } S^- \text{ 内, 则有} \tag{6}$$

$$U_2 = \text{Re} f_2(z), \tag{7}$$

$$F_2(z) = \frac{1}{2\pi i} \mathbf{b} \frac{1}{z - z_0} + I' - F_{20}(z), z \in S^-. \tag{8}$$

式中: $F_{20}(z)$ 在 S^- 内全纯, 且对充分大的值 $|z|$ 有

$$F_{20}(z) = O\left(\frac{1}{z^2}\right);$$

Γ 由无穷远加载条件决定,

$$\Gamma = M_2^{-1} (\Sigma_x^{\infty} - \Sigma_y^{\infty}) - M_2^{-1} \begin{bmatrix} \tau_{xz}^{\infty} - i\tau_{yz}^{\infty} \\ D_x^{\infty} - iD_y^{\infty} \end{bmatrix}, \tag{9}$$

其中 $M_2 = \begin{bmatrix} C_{44}^{(2)} & e_{15}^{(2)} \\ e_{15}^{(2)} & -d_{11}^{(2)} \end{bmatrix}$ 。

根据 Schwarz 对称原理, 并注意在 $|z| = R$ 上, $it = R^2$, 将 $F_2(z)$ 通过裂纹面 L 开拓至圆内区域 S^+ ,

$$F_2(z) = -\frac{R^2}{z^2} F_1\left(\frac{R^2}{z}\right), \quad z \in S^-, \quad (10)$$

于是得到 $F_2(z) =$

$$\frac{1}{2\pi i} b \left(\frac{1}{z-z_0} - \frac{1}{z-z_0^*} + \frac{1}{z} \right) + \Gamma - \frac{R^2}{z^2} \Gamma + F_{2c}(z), \quad (11)$$

式中: $z^* = \frac{R^2}{\bar{z}_0}$;

$F_{2c}(z)$ 在沿 L' 割开的全平面全纯。

广义解析函数 $F_1(z)$ 在区域 S^+ 内全纯, 且在 0 点的

$$\begin{aligned} F_1(z) = & -\frac{1}{2}(z-a)^{-\frac{1}{2}}(z-b)^{-\frac{1}{2}} \left\{ N_1 \frac{R}{z} + N_2 \left(\frac{2B}{z} - \frac{2R^2}{z^2} \bar{\Gamma} + \frac{2R\cos\theta}{z} \bar{\Gamma} \right) + N_3 \left(\frac{R^2}{z} \cos\theta \bar{\Gamma} - \frac{R^3}{z^2} \bar{\Gamma} \right) - N_1 + \right. \\ & N_2 \left(\frac{2z}{R} \bar{\Gamma} - 2\Gamma \cos\theta \right) + N_3 (\Gamma z - \Gamma R \cos\theta) - N_1 \frac{\sqrt{(z_0-a)(z_0-b)}}{z-z_0} - \frac{2N_2 B}{R} \left[\frac{\sqrt{(z_0-a)(z_0-b)}}{(z-z_0)^2} - \right. \\ & \left. \frac{\sqrt{(z_0-a)(z_0-b)}}{z-z_0} \right] - N_1 \frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{z-z^*} + \frac{2N_2 B}{R} \left[\frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{(z-z^*)^2} - \frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{z-z^*} \right] \left. \right\} + \\ & \frac{1}{2} \left[N_1 G(z) - N_2 A(z) + N_3 \left(\Gamma - \frac{R^2}{z^2} \bar{\Gamma} \right) \right], \quad (14) \end{aligned}$$

$$F_2(z) = -[M_2]^{-1} M_1 F_1(z) + BG(z) + \left(\Gamma - \frac{R^2}{z^2} \bar{\Gamma} \right), \quad (15)$$

式中: $G(z) = \frac{1}{z-z_0} - \frac{1}{z-z_0^*} + \frac{1}{z}$;

$$B = \frac{1}{2\pi i} b;$$

a 和 b 表示裂纹的端点。

把式 (14)、(15) 代入式 (1)、(2) 中可以求得夹

$$\text{邻域有 } F(z) = D + O\left(\frac{1}{z}\right), \quad (12)$$

式中 D 是待定的二维常数矢量。

同理, 把 $F(z)$ 沿着 L 从 S^+ 解析延拓到 S^- , 对于取无穷大值时有

$$F(z) = -\frac{R^2}{z^2} \bar{D} + O\left(\frac{1}{z^3}\right). \quad (13)$$

根据边界条件式 (4) ~ (6) 和复变函数方法^[11], 可以求得夹杂和基体区域复势函数的解析表达式:

杂和基体区域的位移场、电势、应力场和电位移场。

2 位错力

求出基体区域的应力和电位移场 Σ_{x_2} 和 Σ_{y_2} 后, 减去相应压电螺型位错在无限大均匀压电材料中产生的应力场和电位移场, 并将该应力场和电位移场对 $z > z_0$ 取极限值, 得到该位错点的扰动应力和电位移场 $\Sigma_{x_2}^0$ 和 $\Sigma_{y_2}^0$ 。

$$\begin{aligned} \Sigma_{x_2}^0 - i\Sigma_{y_2}^0 = & \frac{M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_1 b}{2\pi i \sqrt{(z_0-a)(z_0-b)}} \left(\frac{R}{z_0} + 1 - \frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{z_0 - z^*} \right) - \frac{M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_1 k^{-1} M_1}{2\sqrt{(z_0-a)(z_0-b)}} \left[-\frac{2R^2}{z_0^2} \bar{\Gamma} + \frac{2R\cos\theta}{z_0} \bar{\Gamma} + \right. \\ & \left. \frac{2z_0}{R} \bar{\Gamma} - 2\Gamma \cos\theta + \frac{2B}{R} \left(\frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{(z_0 - z^*)^2} - \frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{z_0 - z^*} \right) \right] + \frac{M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_1}{\sqrt{(z_0-a)(z_0-b)}} \left(\frac{R^2}{z_0} \cos\theta \bar{\Gamma} - \frac{R^3}{z_0^2} \bar{\Gamma} + \right. \\ & \left. \Gamma z_0 - \Gamma R \cos\theta \right) + \frac{M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_1 k^{-1} M_2 b}{4\pi R i} \left[-\frac{2}{z_0 - z^*} + \frac{z_0}{(z_0 - z^*)^2} - \frac{(z^*)^2}{z_0(z_0 - z^*)^2} + \frac{2}{R} \bar{\Gamma} - \frac{2R}{z_0^2} \bar{\Gamma} \right], \\ & \frac{M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_2 b}{2\pi i} \left(\frac{1}{z_0 - z^*} + \frac{1}{z_0} \right) + M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_2 \left(\Gamma - \frac{R^2}{z_0^2} \bar{\Gamma} \right) - \frac{M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_1 b}{4\pi i} \left(\frac{1}{z_0 - a} + \frac{1}{z_0 - b} \right). \quad (16) \end{aligned}$$

描述位错和夹杂相互作用机理的重要参量是作用于螺型位错的像力, 也称为位错力。根据推广的 Peach-

Koehler 公式^[12], 得到位错力为

$$\begin{aligned} F_x - iF_y = & \frac{b^T M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_1 b}{2\pi \sqrt{(z_0-a)(z_0-b)}} \left(\frac{R}{z_0} + 1 - \frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{z_0 - z^*} \right) - \frac{ib^T M_2(M_1 + M_2)^{-1} M_1 k^{-1} M_1}{2} - \frac{2R^2}{z_0^2} \bar{\Gamma} + \\ & \frac{2R\cos\theta}{z_0} \bar{\Gamma} + \frac{2z_0}{R} \bar{\Gamma} - 2\Gamma \cos\theta + \frac{b}{\pi R i \sqrt{(z_0-a)(z_0-b)}} \left(\frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{(z_0 - z^*)^2} - \frac{\sqrt{(z^*-a)(z^*-b)}}{z_0 - z^*} \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{ib^T M_2 (M_1 + M_2)^{-1} M_1}{\sqrt{(z_0 - a)(z_0 - b)}} \left(\frac{R^2}{z_0} \cos \theta \bar{F} - \frac{R^3}{z_0^2} \bar{F} + \bar{F} z_0 - \bar{F} R \cos \theta \right) + \frac{b^T M_2 (M_1 + M_2)^{-1} M_1 k^{-1} M_2 b}{4\pi R} \left[-\frac{2}{z_0 - z^*} + \right. \\
 & \left. \frac{z}{(z_0 - z^*)^2} - \frac{z^2}{z_0(z_0 - z^*)^2} + \frac{2}{R} \bar{F} - \frac{2R}{z_0^2} \bar{F} \right] + \frac{b^T M_2 (M_1 + M_2)^{-1} M_2 b}{2\pi} \left(-\frac{1}{z_0 - z^*} + \frac{1}{z_0} \right) + \\
 & ib^T M_2 (M_1 + M_2)^{-1} M_2 \left(\bar{F} - \frac{R^2}{z_0^2} \bar{F} \right) - \frac{b^T M_2 (M_1 + M_2)^{-1} M_1 b}{4\pi} \left(\frac{1}{z_0 - a} + \frac{1}{z_0 - b} \right). \tag{17}
 \end{aligned}$$

3 数值计算和讨论

根据位错力公式 (17)，可以探讨各种参数对位错力的影响规律。为了便于与以往的结果对照，此处假

设电势位错 b_0 和无穷远机电载荷为 0，并且位错在 x 轴上 ($z_0 = x_0$)；同时，设在圆形界面 $|z|=R$ 上有 1 条关于 x 轴对称的圆弧形裂纹，其端点为 $a = Re^{-i\theta}$ 和 $b = Re^{i\theta}$ 。此时，式 (17) 为

$$\begin{aligned}
 F_y = & \frac{b^T M_2 (M_1 + M_2)^{-1} M_1 b}{2\pi \sqrt{(z_0 - a)(z_0 - b)}} \left(\frac{R}{z_0} \left[1 - \frac{\sqrt{(z^* - a)(z^* - b)}}{z_0 - z^*} \right] - \frac{b^T M_2 (M_1 + M_2)^{-1} M k^{-1} M_2 b}{2\pi \sqrt{(z_0 - a)(z_0 - b)}} \left[\frac{1}{R} \left(\frac{\sqrt{(z^* - a)(z^* - b)}}{(z_0 - z^*)^2} - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{\sqrt{(z^* - a)(z^* - b)}}{z_0 - z^*} \right) \right] + \frac{b^T M_2 (M_1 - M_2)^{-1} M k^{-1} M_2 b}{4\pi R} \left[-\frac{2}{z_0 - z^*} + \frac{z}{(z_0 - z^*)^2} - \frac{(z^*)^2}{z_1(z_0 - z^*)^2} \right] + \\
 & \frac{b^T M_2 (M_1 - M_2)^{-1} M_2 b}{2\pi} \left(-\frac{1}{z_0 - z^*} + \frac{1}{z_0} \right) - \frac{b^T M_2 (M_1 + M_2)^{-1} M_1 b}{4\pi} \left(\frac{1}{z_0 - a} + \frac{1}{z_0 - b} \right). \tag{18}
 \end{aligned}$$

取无量纲位错力 $F_{x0} = \frac{2\pi R}{C_{44}^{(2)} b_x} F_x$ ，引入 $\alpha = \frac{C_{41}^{(1)}}{C_{44}^{(2)}}$ ， $\beta = \frac{e_{15}^{(1)}}{e_{15}^{(2)}}$ 和 $\lambda = \frac{R}{x_0}$ ，设基体为 PZT-5H 压电陶瓷，材料常数为： $C_{44}^{(2)} = 3.53 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ， $e_{15}^{(2)} = 17 \text{ C/m}^2$ ， $d_{11}^{(2)} = 1.51 \times 10^{-8} \text{ C/Vm}$ ，并设 $\frac{d_{11}^{(1)}}{d_{11}^{(2)}} = 1$ 以及 $R=1$ 。为方便比较 F_x 中各分量对它的影响，设 $K = k_1 = k_2 = k \times 10^9$ 。

假设 $\theta = 15^\circ$ ， $\beta = 0.8$ ， $K = 0.5$ ，图 2 说明了 α 取不同值时，无量纲化位错力 F_{x0} 随 λ 的变化规律。

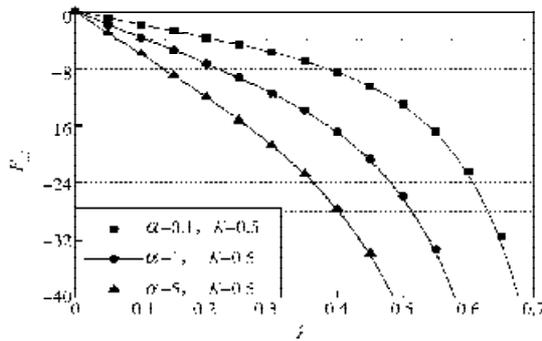


图 2 $\theta = 15^\circ$ ， $\beta = 0.8$ ， $K = 0.5$ 时 α 取不同值， $F_{x0} - \lambda$ 曲线
Fig. 2 F_{x0} versus λ with different values when α ($\theta = 15^\circ$ ， $\beta = 0.8$ ， $K = 0.5$)

从图 2 中可以看出，随着 λ 的增大，位错逐渐靠近夹杂，位错力始终为负，且越来越大。这说明在 K 取值较小的时候，无论软夹杂 ($\alpha < 1$) 还是硬夹杂 ($\alpha > 1$) 下，含裂纹非理想圆形界面始终吸引位错，并且随着位错逐渐靠近夹杂，这种吸引越来越强。当压电螺型

位错位置一定时， α 的值越大，含裂纹非理想圆形界面对位错的吸引越大，这与理想界面下软夹杂对位错的吸引大于硬夹杂对位错的吸引是不同的。

在图 3 中， $\theta = 15^\circ$ ， $\beta = 0.8$ 一定，取值 $K = 100$ ，可以看到：含裂纹非理想圆形界面先排斥位错，随着 λ 的增大，位错逐渐靠近夹杂，排斥的位错力逐渐变小，直至吸引位错。在含裂纹非理想界面排斥位错的阶段可以看到：此时软夹杂对位错的排斥作用小于硬夹杂对位错的排斥作用，这与理想界面下含裂纹圆形夹杂的情况是一致的。这表明：当 K 值增大到某一值后，非理想界面对位错的影响减弱，这时，含裂纹非理想圆形界面和压电螺型位错的干涉可以类比理想界面时的情况。

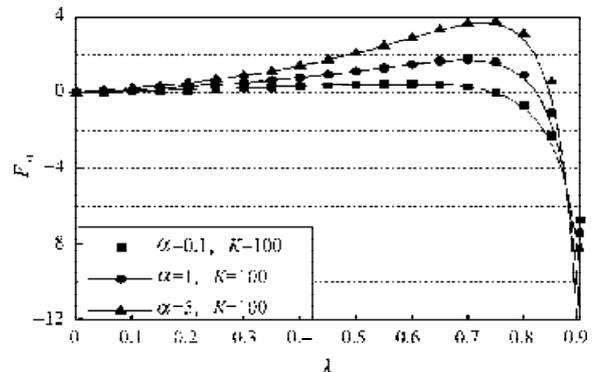


图 3 $\theta = 15^\circ$ ， $\beta = 0.8$ ， $K = 100$ 时， α 取不同值， $F_{x0} - \lambda$ 曲线
Fig. 3 F_{x0} versus λ with different values when α ($\theta = 15^\circ$ ， $\beta = 0.8$ ， $K = 100$)

图 4 表明，当 $\alpha = 2$ ， $\beta = 1$ ， K 值较小时，非理想界面和夹杂一直吸引位错。硬夹杂对位错的排斥作用被

非理想界面屏蔽。 K 值较大时, 非理想界面和夹杂先排斥位错后吸引位错, 在夹杂附近螺形位错存在一个平衡点。

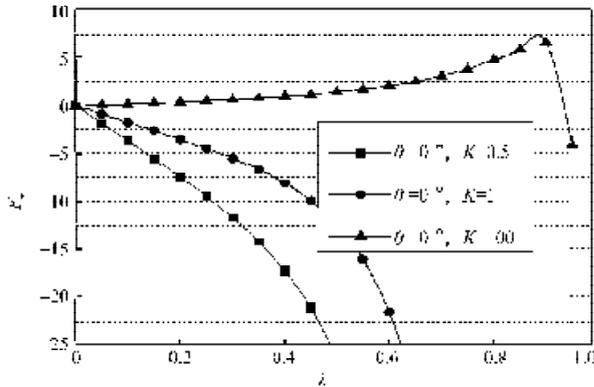


图4 $\alpha=2, \beta=1, \theta=0^\circ$ 时, K 取不同值, $F_{x0}-\lambda$ 曲线
Fig. 4 F_{x0} versus λ with different K ($\alpha=2, \beta=1, \theta=0^\circ$)

图5表明, $\alpha=2, \beta=1, K$ 值较小时, 非理想界面、夹杂和裂纹一直吸引位错, 在界面附近位错没有平衡点。随着裂纹角度的增加, 位错力对位错的吸引作用增强。 K 值比较大时, 非理想界面、夹杂和裂纹亦先排斥位错, 后吸引位错, 在夹杂附近螺形位错存在一个平衡点, 但是, 作用在位错上的排斥力要比没有裂纹时小。

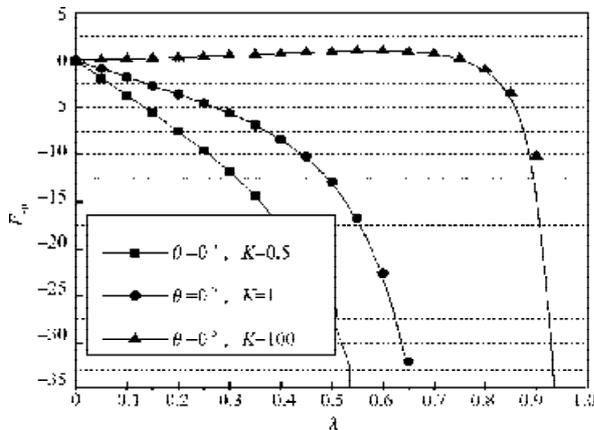


图5 $\alpha=2, \beta=1$ 时, K 取不同值, $F_{x0}-\lambda$ 曲线
Fig. 5 F_{x0} versus λ with different K and θ ($\alpha=2, \beta=1$)

4 结论

本文运用复变函数方法, 研究了无穷远纵向剪切和面内点场作用下基体中压电螺型位错和含裂纹非理想界面的圆形夹杂的电弹耦合干涉效应, 求得了基体和夹杂区域的复势函数封闭形式的解答, 以及位错力的解析表达式, 讨论了裂纹几何条件, 材料常数和非理想界面对位错运动和平衡位置的影响规律。研究结果对于理解压电复合材料的缺陷干涉机理以及该类材

料断裂破坏效应有较重要的科学价值。另外, 本文的解析解可以作为格林函数研究含裂纹非理想界面的圆形夹杂与基体中任意形状裂纹的干涉问题。

参考文献:

- [1] Kattis M A, Providas E, Kalamkarov A L. Two-Phase Potentials in the Analysis of Smart Composites Having Piezoelectric Components[J]. Composites Part B, 1998, 29 (1): 9-14.
- [2] Deng W, Meguid S A. Analysis of a Screw Dislocation Inside an Elliptical Inhomogeneity in Piezoelectric Solids[J]. International Journal Solids and Structures, 1999, 36(10): 1449-1469.
- [3] Huang Z Y, Kuang Z B. Dislocation Inside a Piezoelectric Media with an Elliptical Inhomogeneity[J]. International Journal Solids and Structures, 2001, 38(46-47): 8459-8480.
- [4] Liu Y W, Fang Q H, Jiang C P. A Piezoelectric Screw Dislocation Interacting with an Interphase Layer between a Circular Inclusion and the Matrix[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41 (11-12): 3255-3274.
- [5] Liu Y W, Fang Q H. Analysis of a Piezoelectric Screw Dislocation in Interphase Layer between a Circular Inclusion and the Matrix[J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 98(1): 14-26.
- [6] Shen M H, Chen S N, Chen F M. A Piezoelectric Screw Dislocation Interacting with a Nonuniformly Coated Circular Inclusion[J]. International Journal of Engineering Science, 2006, 44(1-2): 1-13.
- [7] Fang Q H, Liu Y W. A Piezoelectric Screw Dislocation Interacting with an Elliptical Inclusion Containing Electrically Conductive Interfacial Rigid Lines[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008, 50(4): 683-693.
- [8] Jin B, Fang Q H. Piezoelectric Screw Dislocations Interacting with an Inhomogeneity with Imperfect Interface[J]. Archive of Applied Mechanics, 2008, 78(2): 105-116.
- [9] Fan H, Sze K Y. An Micro-Mechanics Model for Imperfect Interface in Dielectric Materials[J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(2): 363-370.
- [10] Chen J B, Xiao Z M, Liew K M. A Screw Dislocation Interacting with a Finite Crack in a Piezoelectric Medium[J]. International Journal of Engineering Sciences, 2004, 42: 1325-1345.
- [11] Muskhelishvili N L. Some Basic Problems of Mathematical Theory of Elasticity[M]. Leyden: Noordhoff, 1975.
- [12] Hirth J P, Lothe J. Theory of Dislocations 2nd Edn[M]. New York: John-Wiley, 1982.

(责任编辑: 张亦静)