

砾粒掺入对黏土断裂韧度的影响

胡骏峰, 王俊杰

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心; 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要:以探究土体断裂韧度特性为目的,采用改进后的标准三点弯曲试验,消除了自重对试验结果的影响,在掺入不同含量和不同粒径大小的砾粒的情况下,制备相同含水率、干密度和初始裂缝的试样,测试其断裂韧度的变化以及观察裂缝扩展规律.结果表明:当掺入砂砾含量在0%~20%的时候,断裂韧度随着砂砾含量的增高而逐渐降低;当掺入砂砾的粒径在2~40 mm的时候,在相同砂砾含量情况下,其断裂韧度随着掺入粒径的增加而增加;当掺入砂砾的粒径在0.75~2 mm的时候,在相同砂砾含量情况下,其粒径大小对断裂韧度值没有明显影响;掺入颗粒的粒径大小会影响裂缝的扩展方向和发育数量,与掺入粗砾的试样相比较,掺入细砂的试样在裂缝区域更易于出现细小的网状裂纹,而掺入粗砾试样中的裂缝在扩展过程中更容易出现弯折现象.

关键词:掺砂黏土;断裂韧度;三点弯曲试验;水平加载;颗粒大小

中图分类号: TU47

文献标志码: A

在用传统理论分析方法分析开裂黏性土坡的稳定问题时,由于不能考虑裂缝的不连续性以及裂缝端部的应力奇异性,很难得到可靠的分析结果.在多数情况下,开裂黏性土坡的失稳破坏过程可以归因于裂缝的起裂及扩展.为了揭示开裂黏性土坡的失稳破坏机理,就需要从断裂力学的角度来研究黏性土的断裂破坏机理. Morris等^[1]、Lima和Grismer^[2]和Konrad等^[3-4]的研究表明,用线弹性断裂力学理论解释土体中裂缝扩展的机理是合适的. Palmer和Rice^[5]第一次应用断裂力学的方法预测了超固结土坡中垂直剪切带的产生和扩展机理,表明断裂力学方法用于研究脆性土体中的裂缝问题是可行的. Chandler^[6]在进行黏土和含砂黏土的三点弯曲断裂试验前,在试样底部裂缝两侧各安装了一个可上下伸缩的支撑,呈对称分布,用于平衡试样自重; Hallett和Newson^[7]在对湿黏性土试样进行三点弯曲断裂试验时,在试样底部安装了两块可以各自绕试样底部支座转动的玻璃板,玻璃板伸出试样两端,在伸出部分放置砝码以平衡土样自重.这两种改进方法尽管从理论上基本解决了试样自重对试验的影响,但实际操作不便,试验结果的可靠性难以保证.

1 试验原理

材料断裂韧度 K_{IC} 常规测定方法通常是使用标准三点弯曲试验,但直接利用标准三点弯曲试验测定土体断裂韧度,试样的自重作用不可忽视,且试样有可能只在自重作用下就会发生破坏.本次实验使用自主设计的I型土体断裂参数测试仪来进行试验,该试验方法采用水平加载,用装有万向轮的玻璃板平衡土体自重.一方面避免了土体自重对试验结果的影响,另一方面万向轮能向各个方向运动,能对土体的变形不产生任何约束.

根据三点弯曲计算断裂韧度的方法^[8],断裂韧度

$$K_{IC} = \frac{PS}{BW^{3/2}} f(x), \quad (1)$$

式中, P 为裂缝扩展过程中的临界荷载; W 为试样宽度; x 为预制裂缝深度与试样宽度的比值; B 为试样厚度;

收稿日期:2015-01-13;修回日期:2015-03-04.

基金项目:国家自然科学基金(51479012);重庆市研究生科研创新项目(CYS14166).

作者简介(通信作者):胡骏峰(1991—),男,四川成都人,重庆交通大学硕士研究生,主要从事岩土工程相关的研究,

E-mail: 531157315@qq.com.

S 为试样跨距,

$$f(x) = \frac{3x^{1/2}}{2(1+2x)(1-x)^{3/2}} \cdot [1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x) + 2.7x^2]. \quad (2)$$

2 试验仪器

整个试验仪器由 3 个部分组成.

1) 载荷与位移监测系统. 荷载传感器与位移传感器均选用小量程, 高精度的型号, 可以准确反映试验过程中试样的受力、变形情况.

2) 电导测试系统. 使用电导测试, 确定裂缝起裂点的位置和对应的临界荷载的正确性. 在测试中, 土体试样作为导体, 当土体试样的成分和温度固定时, 其导电率不变^[9]. 而当土体试样产生裂缝时, 有效接触面积减小, 导电率减小. 因此, 可以用电导测试系统反映试样内部裂缝的起裂点和扩展.

3) 制样装置. 用模具压制的试样尺寸为: $L \times W \times B = 0.24 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$, 其中 $S = 2W$, $B = 0.5W$. L, W, B 分别为试样的长度、宽度和厚度; S 为试样的跨距; a 为试样初始预制裂缝. 试样由水平加载, 并用装有万向轮的玻璃板平衡自重. 加载示意图见图 1. 此外, 为了避免击实过程中, 土料分层之间存在黏结软弱面而对实验结果造成影响, 此制样装置将加料方向与预制裂缝面平行(见图 2), 让可能存在的软弱面与试样的初始裂缝面垂直, 使得软弱面对试验结果无影响.

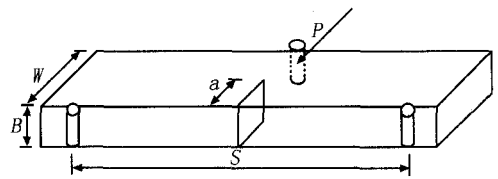


图1 水平加载下的试样

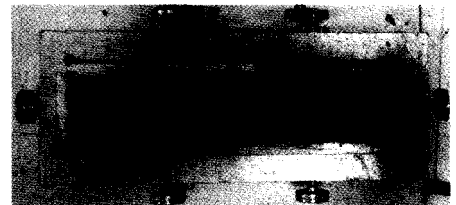


图2 击实试样与击实装置

3 试验方法

K_{IC} 表征土体的抗断裂的能力, 是影响开裂型土坡稳定的关键因素. 由于试样的干密度、含水率和固结围压大小等对 K_{IC} 都有影响, 因此, 在探讨含砂量和掺砂砾颗粒粗细对断裂韧度的影响时, 需在不同含砂量或者在掺入不同颗粒粒径砂砾的情况下, 统一配制试样含水率为 15.1%, 干密度为 1.73 g/cm^3 , 初始裂缝深度为 4 cm, 以及无固结围压作用下的试样进行试验, 在单个试验情况下进行 3 组重复试验. 在掺入不同砂砾的情况下, 试验中通过控制击实功在相同含水率的条件下来使得制取的试样干密度相同.

制样时, 先将土样平铺于盛土盘内, 按预定含水率用喷水设备往土样上均匀喷洒所需加水量拌匀并装入塑料袋内密封静置 24 h. 静置完后将土样均分 5 次装入制样装置中, 分层击实, 并在此过程中对击实后的每层表面进行刮毛; 将卡尺固定, 预制出指定的裂缝深度, 然后拧开制样模具的固定螺栓, 将试样取出, 用保鲜膜包裹试样, 在室温下静置 24 h 以上, 充分消除击实过程中产生的超静孔隙水(气)压力; 然后把试样横放在装有万向轮的玻璃板上, 保证加荷杆、裂缝、两块垫板的接触部位三者一条线上, 以避免产生偏心作用; 在试样两端插入电极, 并固定, 启动 I 型土体断裂测试程序, 在程序中输入土体导电有效面积和土体导电的有效长度; 启动推力装置, 加载速率为 3 mm/min , 施加水平推力直至试样沿裂缝破坏, 同时, 保存从试验开始到试样破坏后荷重传感器、位移传感器和电导率采集到的数据.

试验结束后, 对整个试样土体进行称重, 并取两组试样中心处的土体 30~50 g, 称量准确至 0.01 g, 平行测量其含水率, 保证其含水率差值不得超过 1%. 其试样土体干密度

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01 w}, \quad (3)$$

其中, ρ_d 为干密度; ρ 为湿密度; w 为试样含水率.

4 试验土料和试验方案

试样土料采用重庆地区侏罗系地层中的黏土岩风化形成的高塑限红黏土,其土体基本物理性质为:塑限 w_p 为 21.1%,液限 w_l 为 39.5%,塑性指数 I_p 为 18.4,颗粒级配曲线如图 3 所示。

在探究掺砂砾粒粗细对断裂韧度的影响试验组中,根据水利部—土工试验规程^[10]对土体颗粒粗细进行划分,并综合试样模具尺寸,试验方案中配制掺入不同砂砾见表 1。

表 1 土体颗粒粗细划分

序号	1	2	3	4	5	6
粒组	粗砾	中砾	细砾	粗砂	中砂	细砂
粒径组成/mm	(20,40]	(5,20]	(2,5]	(0.5,2]	(0.25,0.5]	(0.075,0.25]
(掺入的砂砾质量/总质量)/%	10	10	10	10	10	10
(掺入的砂砾质量/总质量)/%	20	20	20	20	20	20

5 试验结果及分析

5.1 试验结果

图 4 给出的是粗砾组试样在试验过程中的应力—应变曲线以及电导—位移曲线,可以由图中看出,在两种曲线中所对应的临界荷载都相同,说明的仪器设计的合理性与正确性。当荷载出现峰值时,电导出现了降低,并且随着位移的增加,呈现一定的线性变化,表明此时试样已经发生了破坏。另一方面,由图 4(a),可以得知,在试样所受的力在达到临界荷载之前与之后,都基本呈现出线性变化,反映了线弹性材料的断裂特点。所以,用线弹性断裂力学来分析本次试验是合理的。

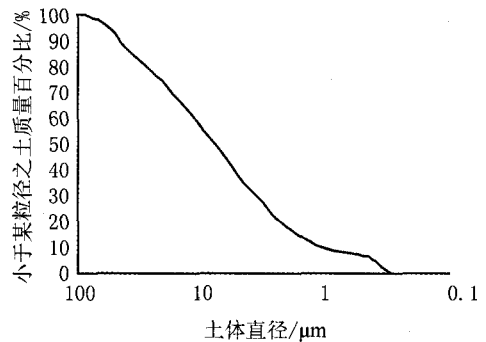


图3 试验土料颗粒级配曲线

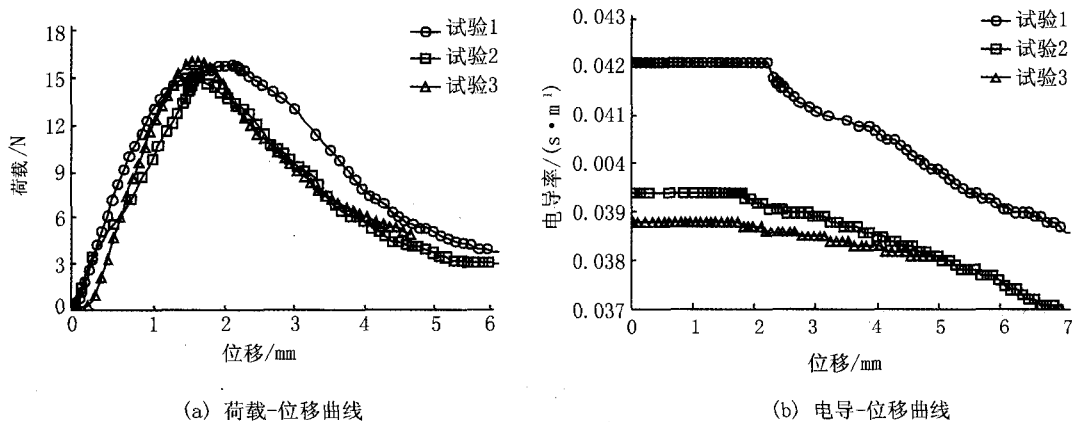


图4 粗砾组试验结果

5.2 试验结果分析

5.2.1 掺砾量对断裂韧度的影响

由图 5 可知,随着含砂量的增加,断裂韧度值都出现了降低的趋势。在三点弯曲试验中,试样抗拉性能主要来自黏性土体颗粒间的黏结力。由于砂砾不具备黏结力,当掺入到黏土中时,一方面降低了试样中黏粒的含量,降低了整体的抗拉强度,另一方面,由于黏性颗粒之间的黏结力大于黏性颗粒与砂砾的黏结力,因而在砂砾与黏性颗粒之间会形成黏结的软弱面,含砂量越高,软弱面也就越多,因而试样也更容易被破坏,所以断裂韧度值随着掺入砂砾含量的增加而呈现逐渐降低的趋势。

5.2.2 掺砂砾颗粒大小对断裂韧度的影响

从图6,可知随着掺入颗粒粒径的减小,断裂韧度值降低更加明显.当掺入的砂砾粒径从2 mm增加到40 mm时,在含砂量为10%和20%的情况下,断裂韧度平均值分别增加了63.3%和95.7%.而当掺入的砂砾粒径从0.75 mm增加到2 mm时,在含砂量为10%和20%的情况下断裂韧度平均值分别增加了3.3%和5.1%.说明掺入颗粒粒径越大,断裂韧度也越大,但是当颗粒粒径减小到一定程度时,相比于掺入大颗粒粒径的试样,其断裂韧度没有出现变化,如掺入粗砂、中砂和细砂的试验组.说明虽然掺入砂砾会降低土体的断裂韧度,但是颗粒的粗细不同,对断裂韧度的影响效果是不同的.相同含砂量下,颗粒越大,断裂韧度越高,有可能是由于粗颗粒相较于细颗粒而言,整体与土体的接触的面积较小,形成的软弱结构面较小,对土体颗粒之间的黏结力影响较小,从而使得掺入粗颗粒的试样中颗粒之间的结合效果比掺入细颗粒之间的效果好.也有可能是因为粗颗粒粒径比细颗粒粒径大,试样在受力而产生微小裂缝并扩展时,当裂缝遇到粗颗粒时,裂缝不能直接穿透粗颗粒,只能沿粗颗粒与黏性颗粒之间黏结软弱面进行扩展.如图7,裂缝在扩展中遇到粗颗粒时,绕过了粗砾石,形成的破坏面呈现出了隆起和下陷交错的不平整状;而掺入了细颗粒的试样,裂缝的扩展方向没有因为细颗粒的存在而改变,形成的破坏面较平整,无隆起等现象.由于在裂纹改变方向的过程中会出现应力的重分布和能量的释放,将会降低裂缝尖端的奇异程度,从而使得掺入粗颗粒的试样断裂韧度高于掺入细颗粒的试样断裂韧度.

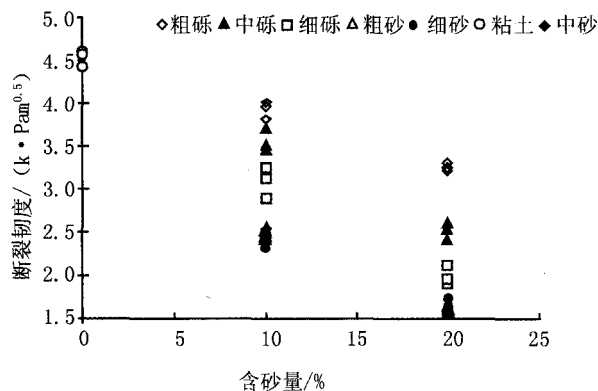


图5 含砂量与断裂韧度关系曲线

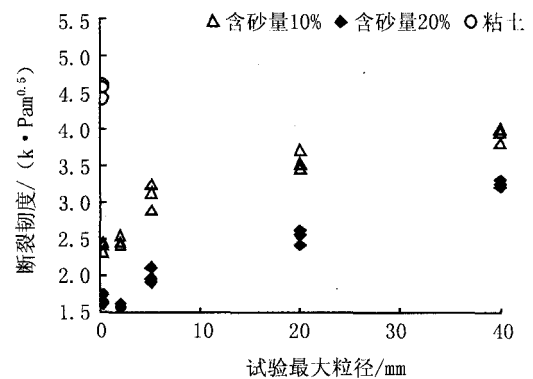
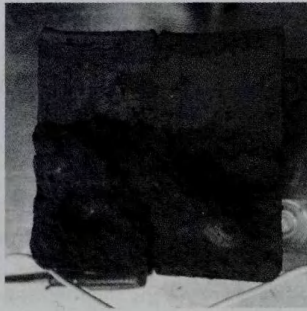


图6 掺入颗粒最大粒径与断裂韧度关系曲线

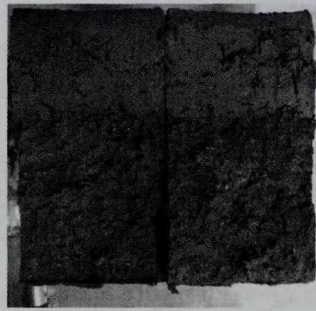
5.2.3 裂纹的扩展

在观察不同试样从试验开始出现微小裂纹到裂缝穿透整个试样的过程中,发现在裂纹的扩展初期,一般按照预制裂缝的方向呈直线展开;当裂纹扩展到一定距离时,将不再沿着原方向,而是出现一定程度的弯曲.裂缝扩展的弯曲程度与掺入颗粒的粒径大小存在明显相关性,即掺入颗粒粒径越大,裂缝扩展的弯曲程度越大;反之当掺入颗粒粒径越小时,裂缝弯曲程度越不明显.

掺入序号为1的粗砾试样(含砂量10%) (b) 掺入序号为6的细砂试样(含砂量10%)土体中裂缝扩展方向受掺入颗粒粒径大小的影响原因可能是因为受到了土体强度因素的影响.强度因素是指:土体是三相体,具有各向异性和非线性特征,颗粒与颗粒之间的强度都不同,裂纹扩展时,总是沿着土体的软弱面进行扩展,即按扩展阻力最小的路线扩展,因为按照该方向扩展需要较少的能量.当掺入粗颗粒时,裂缝不能穿过粗颗粒,裂缝必须改变改变方向,而相较于细颗粒,粒径较小,对裂缝的扩展方向没有明显影响,所以对掺入细颗粒的试样而言,弯折现象不明显.图8显示当掺入细颗粒时,裂缝扩展区域的周围明显出现了类似蜘蛛网的细小裂纹,而掺入粗颗粒的试样却没有出现明显的裂纹,同样是因为掺入粗颗粒改变了裂缝的扩展方向,使得应力发生重分布和能量释放,阻止了裂缝的进一步扩展,所以掺入粗颗粒能在一定程度上阻止裂纹的扩展.



(a) 掺入序号为1的粗砾试样破坏断面(含砂量10%)



(b) 掺入序号为5的中砂试样破坏断面(含砂量10%)

图7 粒径大小对裂纹的扩展的影响



(a) 掺入序号为1的粗砾试样(含砂量10%)



(b) 掺入序号为6的细砂试样(含砂量10%)

图8 裂纹的扩展情况

6 结 论

使用土体断裂韧度参数测试仪,通过掺入不同粒径大小的砂砾,观察断裂韧度的变化以及在试样破坏过程中裂缝的扩展情况,得到以下结论. 1) 随着试样中含砂量的增加,土体断裂韧度出现明显下降.但在掺入不同颗粒粒径的情况下,对断裂韧度值的影响是不同的,掺入大粒径的试样其断裂韧度值要高于掺入小粒径的试样. 2) 观察了裂缝在掺入不同粒径砂砾量下扩展的形式和方向,掺入粗颗粒的试样在裂缝扩展时,裂缝更容易出现弯折现象,在试样的破坏面,能发现土体出现明显的隆起现象.

参 考 文 献

- [1] Morris P H, Graham J, Williams D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 263-277.
- [2] Lima L A, Grismer M E. Application of fracture mechanics to cracking of salting soils[J]. Soil Science, 1994, 158(2): 86-96.
- [3] Konrad J M, Ayad R. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34: 477-488.
- [4] Konrad J M, Ayad R. Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34: 929-942.
- [5] Palmer A C, Rice J R. The growth of slip surface in the progressive failure of OC clay[C]. Proceedings of the Royal Society of London, A332: 527-548.
- [6] Chandler H W. The use of non-linear fracture mechanics to study the fracture properties of soils[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1984, 29: 321-327.
- [7] Hallett P D, Newson T A. A simple fracture mechanics approach for assessing ductile crack growth in soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(4): 1083-1088.
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. 金属材料平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法(GB/T4161-1984)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1984.

- [9] 王 辉, 顾利忠. 电导式液位变送器的设计[J]. 传感器技术, 2004, 23(6): 38-40.
 [10] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

The Influence of Gravel Mixed to Fracture Toughness of Clay

HU Junfeng^{1,2}, WANG Junjie^{1,2}

- (1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

Abstract: In order to explore the fracture toughness characteristic of soil, based on the improved standard three-point bending tests, affect of geostatic stress to the test results had been removed. Mixing soil with gravel of different content and different particle size to produce specimens which has the same moisture content, dry density and the initial crack, to study the variety of fracture toughness and propagation rules of crack. The result shows that while gravel content is between 0% and 20%, the fracture toughness decreases as the gravel content increases. When particle size is between 2mm and 40mm, with the same gravel content, fracture toughness decreases at a lower rate as the gravel particle size increases. When particle size is between 0.75 mm and 2 mm, the partial size of gravel had no significant effect on the fracture toughness. The result also proved that the particle size had impact on the directions and number of crack. Compared with coarse particle, specimens with fine particle will had more tiny reticulate crack at crack region. Specimens with coarse particle had bending phenomenon more easier in the developing process of crack.

Keywords: clay mixed gravel; fracture toughness; three-point bending beam test; horizontal loading; partial size

(上接第 44 页)

- [4] Yang H, Cao Y J, Yun G H. Point defect states of exchange spin waves in all-ferromagnetic two-dimensional magnonic crystals [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2012, 111(1): 013908-013913.
 [5] Yang H Yun G H, Cao Y J. Coupling characteristics of point defects modes in two-dimensional magnonic crystals [J]. *J Appl Phys*, 2012, 112(10): 103911. [6] Xing D S, Yang H, Cao Y J. Waveguide properties in two-dimensional magnonic crystals with line defects [J]. *J Magn Magn Mater*, 2015, 377(5): 286-290.
 [7] Kim S K, Lee K S, Han D S. A gigahertz-range spin-wave filter composed of width-modulated nanostrip magnonic-crystal waveguides [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(8): 082507.
 [8] Ma F S, Lim H S, Wang Z K. Micromagnetic study of spin wave propagation in bicomponent magnonic crystal waveguides [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(15): 153107.
 [9] Puzzkarski H, Krawczyk M. Magnonic crystals-the magnetic counterpart of photonic crystals [J]. *Solid State Phenom*, 2003, 94: 125-134.
 [10] Vasseur J O, Dobrzynski L, Djafari-Rouhani B, et al. Magnon band structure of periodic composites [J]. *Phys Rev B*, 1996, 54(2): 1043-1049.
 [11] Kruglyak V V, Kuchko A N. Effect of the modulation of magnetic viscosity on the damping of spin waves in multilayer magnetic systems [J]. *Phys Met Metall*, 2001, 92(3): 211-214.
 [12] 曹永军, 云国宏, 那日苏. 平面波展开法计算二维磁振子晶体带结构[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 077502.
 [13] Cao Y J, Yun G H, Liang X X, et al. Band structures of two-dimensional magnonic crystals with different shapes and arrangements of scatterers [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43(30): 305005-305009.

Properties of Defect States in Two-dimensional Magnonic Crystals with Bend Line Defects

SONG Na, SA Qier, YANG Hui, CAO Yongjun

(College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China)

Abstract: In this paper, bend line defects are introduced in two-dimensional magnonic crystals. Band structures and field distributions of magnetization are calculated by using the plane-wave expansion method with the supper-cell approximation, and then the properties of defect states of bend line defects in two-dimensional magnonic crystals are investigated.

Keywords: magnonic crystal; plane-wave expansion method; bend line defects