



基于声子晶体位错理论的二维超声塑料焊接系统

林基艳 林书玉

Two-dimensional ultrasonic plastic welding system based on phononic crystal dislocation theory

Lin Ji-Yan Lin Shu-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 184302 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200804

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200804>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

类声子晶体结构对超声塑料焊接工具横向振动的抑制

Suppression of lateral vibration in rectangular ultrasonic plastic welding tool based on phononic crystal structure

物理学报. 2018, 67(22): 224207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181150>

基于二维声子晶体的大尺寸夹心式换能器的优化设计

Optimal design of large-sized sandwich transducer based on two-dimensional phononic crystal

物理学报. 2019, 68(2): 024303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181955>

新型二维压电声子晶体板带隙可调性研究

Tunable bandgaps in novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal slab

物理学报. 2018, 67(21): 214208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180611>

新型二维三组元压电声子晶体板的缺陷态及振动能量回收

Defect states and vibration energy recovery of novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal plate

物理学报. 2019, 68(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190260>

二维声子晶体中简单旋转操作导致的拓扑相变

Topological phase transitions caused by a simple rotational operation in two-dimensional acoustic crystals

物理学报. 2017, 66(22): 224301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.224301>

基于声子晶体板的弹性波拓扑保护边界态

Topologically protected edge states of elastic waves in phononic crystal plates

物理学报. 2020, 69(15): 156201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200542>

基于声子晶体位错理论的二维超声塑料焊接系统*

林基艳¹⁾²⁾ 林书玉^{1)†}

1) (陕西师范大学, 陕西省超声学重点实验室, 西安 710119)

2) (榆林学院信息工程学院, 榆林 719000)

(2020年5月28日收到; 2020年6月9日收到修改稿)

为了有效改善二维工具头辐射面振幅分布不均匀的问题,对二维超声塑料焊接系统进行了优化设计研究:首先,利用横向位错在大尺寸长条形工具头上构造近周期声子晶体同质位错结,调节带隙的宽度和位置,使得二维超声塑料焊接系统的工作频率位于工具头的横向振动的带隙内,进而有效地控制工具头 X 方向的横向振动;其次,利用近周期声子晶体斜槽结构进一步优化辐射面的振幅分布均匀度,并分析了斜槽结构参数对超声塑料焊接系统纵向共振频率和振幅分布均匀度的影响规律.模拟仿真结果表明,近周期声子晶体同质位错结和斜槽结构能够实现对二维超声塑料焊接系统的优化,为横向振动抑制理论的进一步研究提供了基础.

关键词: 近周期声子晶体, 同质位错结, 斜槽结构, 振幅分布均匀性

PACS: 43.35.+d, 43.40.+s, 63.20.D-

DOI: 10.7498/aps.69.20200804

1 引言

超声塑料焊接工具头是超声塑料焊接系统中一个非常重要的部件,其设计的好坏直接影响到焊接的质量,工具头需要根据焊件进行专门的设计,常见的有长方体、圆柱体等^[1,2].当工具头的横向尺寸小于四分之一纵波波长时,可以忽略横向振动对振动工具头的影响,通常只考虑工具头的一维振动^[3];但是当工具头的横向尺寸接近或大于四分之一纵波波长时,工具头会产生严重的横向振动,横向振动和纵向振动相互耦合使得工具头辐射面的振幅分布不均匀,使得振动能量不能均匀的传递到焊件的表面,严重时甚至可以引起塑料产品漏焊或局部溢料,影响焊接质量.为了使大尺寸工具头纵

向振动时辐射面的振幅分布均匀,必须对工具头的横向振动进行抑制^[4-7].

针对上述问题,国内外学者都进行了相关研究. Adachi 和 Ueha^[8]利用附加振动器实现了工具头辐射面上均匀的振幅分布. Mori 等^[9]从工程应用的角度出发,提出了表观弹性法理论,应用该理论可以得到大尺寸振动工具头耦合振动的基频解; Lucas 和 Smith 等^[10]提出了利用电子散斑图案干涉法和激光多普勒测速法的工具头设计方法,可以通过对有限元模型的修改来成功完成垫铁的重新设计; Lee 等^[11]通过在变幅杆的两侧开槽的方法,一定程度上改善了振动系统的振幅均匀性; Nguyen 等^[12]提出了一种利用阶梯式宽叶片工具头来实现焊接面振幅均匀的方法; Kumar 等^[13]使用 MINITAB 软件分析了槽参数对振幅的影响,并

* 国家自然科学基金(批准号: 11674206, 11874253, 11964040)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sylin@snnu.edu.cn

确定了槽的最佳尺寸; Rani 等^[14]通过实验设计分析, 确定开槽对模态频率和振幅均匀性的影响, 从而得到使振幅分布更加均匀的变幅杆最佳设计参数. 国内, 林书玉等^[15]、周光平等^[16]、赵甜甜等^[17]、林基艳等^[18]都进行了抑制矩形工具头耦合振动的研究. 以上这些研究用到的主要方法是附加振动器、调整变幅杆的形状、或工具头上加工若干平行于工具头高度方向的垂直槽, 以减弱横向振动的干扰, 但抑制效果有时并不理想. 基于此, 本文提出了基于声子晶体位错理论的二维超声塑料焊接系统的研究, 运用近周期声子晶体同质位错结和斜槽结构有效控制工具头的横向振动, 进一步改善工具头辐射面的纵向振动位移分布的均匀度, 并分析了斜槽高度、宽度、倾斜角度与工具头纵向共振频率、振幅分布均匀度变化的关系, 为二维超声塑料焊接系统的优化设计提供更多的理论依据.

2 大尺寸二维工具头的耦合振动分析及近周期声子晶体位错理论

2.1 大尺寸二维工具头的耦合振动理论

设大尺寸二维长条形工具头沿 X , Y 及 Z 方向的长、宽、高分别为 l , w , h , 其辐射面为长条形的工具头, 即 $l, h \gg w$, l 与 h 接近. 根据弹性力学原理, 振动工具头内任意一点的轴向应力 σ_x , σ_y , σ_z 与轴向应变 ε_x , ε_y , ε_z 之间的关系为^[9]

$$\varepsilon_x = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]/E, \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]/E, \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]/E, \quad (3)$$

其中, E 表示材料的杨氏模量, 而 ν 则代表材料的泊松系数. 设 E_x , E_y , E_z 为工具头的表观弹性系数, λ_1 , λ_2 , λ_3 为工具头轴向间的耦合系数, 则 $E_x = \sigma_x/\varepsilon_x$, $E_y = \sigma_y/\varepsilon_y$, $E_z = \sigma_z/\varepsilon_z$, $\lambda_1 = \sigma_x/\sigma_y$, $\lambda_2 = \sigma_y/\sigma_z$, $\lambda_3 = \sigma_z/\sigma_x$. 由 (1)—(3) 式可得

$$E_x = E/[1 - \nu(\lambda_3 + 1/\lambda_1)], \quad (4)$$

$$E_y = E/[1 - \nu(\lambda_1 + 1/\lambda_2)], \quad (5)$$

$$E_z = E/[1 - \nu(\lambda_2 + 1/\lambda_3)], \quad (6)$$

$$\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1. \quad (7)$$

根据日本学者森荣司提出的表观弹性法理论^[9]和文献^[15], 在大尺寸工具头边界自由时, 其 3 个轴向的频率方程为

$$k_x l = i\pi \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (8)$$

$$k_y w = j\pi \quad (j = 1, 2, 3, \dots), \quad (9)$$

$$k_z h = m\pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (10)$$

式中, k_x , k_y , k_z 为工具头 3 个轴向的表观波数, $k_n = \omega/c_n$ ($n = x, y, z$), 其中 ω 为大尺寸工具头的振动圆频率, c_n 为声速, $c_n = (E_n/\rho)^{1/2}$ ($n = x, y, z$); ρ 为材料的密度; i, j, m 为不同的振动模式. 令 $i, j, m = 1$, 将 (4), (5), (6) 式和 k_n 的表达式代入 (8), (9), (10) 式, 并使 $c_n^2 \pi^2 / \omega^2 = A$, 经过代换, 可得大尺寸工具头的谐振频率方程:

$$\begin{aligned} & \frac{i^2 j^2 m^2}{l^2 w^2 h^2} A^3 - \left(\frac{i^2 j^2}{l^2 w^2} + \frac{j^2 m^2}{w^2 h^2} + \frac{i^2 m^2}{l^2 h^2} \right) A^2 \\ & + (1 - \nu^2) \left(\frac{i^2}{l^2} + \frac{j^2 m^2}{b^2 h^2} \right) A + 2\nu^3 \\ & + 3\nu^2 - 1 = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

从 (11) 式可以看出, 大尺寸工具头的频率方程是关于 A 的三次方程, 3 个解分别对应工具头 X , Y , Z 方向的谐振频率. 对于长条形矩形工具头, 两个横向尺寸 l 和 w 中有一个远小于其纵向尺寸 h , 但另一个却接近或超过其纵向尺寸. 由于 Y 方向的横向共振频率远高于系统的纵向共振频率, 而 X 方向的横向共振频率接近于系统的纵向共振频率, 因此, 在超声塑料焊接振动系统发生纵向共振时, X 方向的横向振动也基本上处于谐振状态, 对系统的纵向振动产生影响. 此时, 系统的振动为二维耦合振动, X 方向振动和 Z 方向的纵向振动相互耦合, 导致辐射面输出的振幅不均匀. 因此为了保证二维大尺寸长条形工具头辐射面的纵向位移均匀度, 必须对其长度 X 方向的横向振动进行抑制^[15].

2.2 近周期声子晶体位错理论

近周期声子晶体指的是为满足实际需求, 在完美周期结构上设计一些不完整结构, 比如, 缺陷态、近周期结构、失谐结构等^[19]. 弹性波在近周期结构中传播时, 同样会有禁带的产生, 且带隙内存在丰富的局域模式^[20-22].

位错是在晶体结构上的拓扑缺陷, 引入位错缺陷的声子晶体称为同、异质位错结^[23]. 同质位错结是一种拓扑缺陷, 根据不同的位错方向, 可以将同质位错结分成两类: 横向位错结和纵向位错结, 横

向位错结指的是将位错线左、右两边的全部散射子沿横向整体向左或向右移动一定距离;纵向位错结则指的是沿着位错线将左、右两边的散射子整体向上或者向下移动一定距离^[24]. 利用同质位错结,可以调节带隙的宽度和位置,产生传导模和局域模,可以更加灵活地调控弹性波的传播行为和频带特征^[25,26].

根据 2.1 节可知,二维大尺寸工具头 X 方向会产生严重的横向振动,导致工具头辐射面振幅分布不均匀,为了对 X 方向横向振动进行抑制,可以设计基于近周期声子晶体同质位错结的二维大尺寸工具头,将超声塑料焊接系统的工作频率设计在工具头的横向振动的带隙内,进而有效地控制工具头 X 方向的横向振动.

3 基于近周期声子晶体同质位错结的二维超声塑料焊接系统的优化设计

图 1 为二维超声塑料焊接系统,主要包括夹心式超声换能器、复合变幅杆和二维大尺寸工具头 3 个部分.

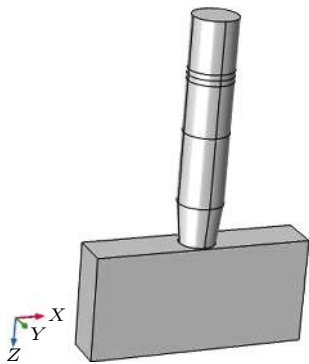


图 1 二维超声塑料焊接振动系统结构示意图

Fig. 1. Structural diagram of two-dimensional ultrasonic plastic welding vibration system.

将二维超声塑料焊接系统的工作频率设定在 20 kHz 附近,为了达到谐振,一般将换能器、变幅杆、工具头均设计为一个半波长结构. 二维超声塑料焊接系统选用纵向夹心式压电陶瓷复合换能器,压电陶瓷晶堆选择 Piezoelectric ceramic crystal stack-4 (PZT-4),半径设为 25 mm,厚度为 6 mm,2 片,前后盖板的高度均为 56 mm,等截面圆柱,半径与压电陶瓷片相同,即换能器的总高度为 124 mm. 为了得到较大的振幅增益,系统选择圆

柱和圆锥型复合型变幅杆. 其中,圆柱端高度为 77 mm,圆锥段高度为 45 mm,即复合变幅杆的总高度为 122 mm. 二维工具头的长度为 240 mm,宽度为 46 mm,高度为 115 mm. 除压电陶瓷晶堆外,其他模块均选择硬铝,换能器沿 Z 轴方向激励. 由于二维工具头的 $l, h \gg w, l$ 与 h 接近,由于泊松效应,工具头在 X 方向会产生严重的横向振动. 利用 Comsol Multiphysics 计算并绘制二维不开槽超声振动系统焊接面沿 X (长度) 方向的振幅分布图,图 2 给出了振动系统的振型图,图 3 给出了二维工具头沿辐射面 X 方向的纵向位移分布图.

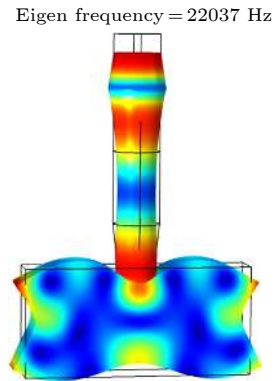


图 2 二维超声塑料焊接振动系统的振型图

Fig. 2. Modal diagram of two-dimensional ultrasonic plastic welding vibration system.

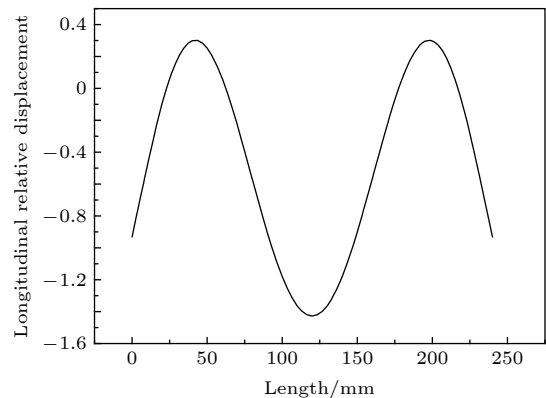


图 3 工具头辐射面 X 方向纵向相对位移分布

Fig. 3. X -direction longitudinal relative displacement distribution of radiating surface of tool head.

从图 2 和图 3 可以看出,未优化的二维大尺寸超声塑料焊接系统工具头表面的振幅分布非常不均匀,相对位移变化范围从 0.3 至 -1.5,振幅分布不均匀且振幅增益较小,为了对 X 方向的横向振动进行有效控制,使辐射面振幅分布更加均匀,提高振幅增益,本文对二维超声塑料焊接系统的工具头进行改进.

近年来,由周期性排列的孔构成的声子晶体受到了越来越多的关注[27,28].基于此,本设计沿二维工具头的 X 方向,加工4个均匀的周期性直孔槽,构造如图4所示的基于近周期声子晶体多槽结构的二维工具头和各部分的尺寸图以及工具头的原胞模型

型,其中, a 为晶格常数,槽的几何参数为 b, c, d .为了使二维超声振动工具头的辐射面位移分布更加均匀,可以将超声塑料焊接振动系统的纵向谐振频率设计在工具头的方向带隙内,以实现对其长度 X 方向振动的有效控制,使振动模态变得更加单一.

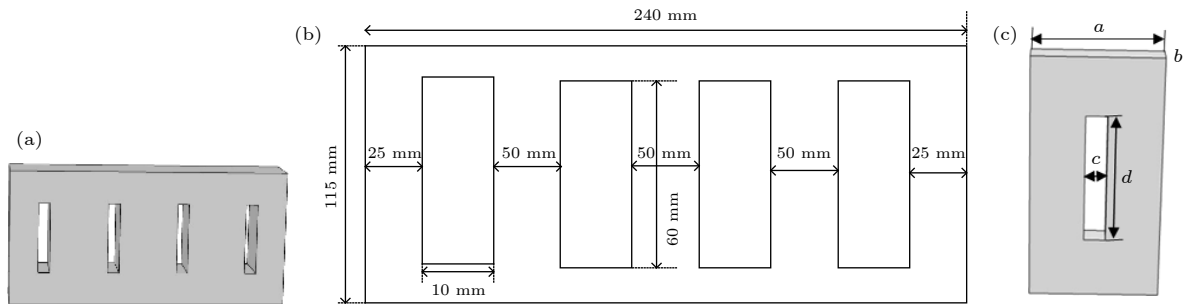


图4 基于近周期声子晶体多槽结构的二维工具头 (a) 结构; (b) 尺寸; (c) 原胞模型

Fig. 4. Two-dimensional tool head based on near-period phononic crystal multiple-grooves: (a) Structure; (b) dimensions; (c) cell model diagram.

图4所示的工具头的长度、宽度、高度尺寸均与未优化前保持相同,其中,工具头原胞的晶格常数 $a = 60\text{ mm}$,基体的高度为 115 mm ,宽度 $b = 11.5\text{ mm}$;槽的长度 $c = 10\text{ mm}$,宽度 $b = 11.5\text{ mm}$,高度 $d = 60\text{ mm}$.在COMSOL Multiphysics建立工具头的原胞模型,利用COMSOL结构力学和声学模块对原胞的加速度响应曲线进行求解,以确定模型的带隙范围,结果如图5所示,图中,加速度幅值小于1的频率范围即为所求解的模型在 X 方向的振动带隙[17].

隙,但是本文设计的焊接系统的纵向共振频率在 20 kHz 附近,为了使二维超声塑料焊接系统的工作频率位于工具头的横向振动带隙内,必须调整基于近周期声子晶体多槽结构的工具头的带隙位置或者带隙宽度.

由2.2节可知,利用同质位错结,可以改变声子晶体结构规则的晶格排列,起到控制带隙特性的作用.因此,本研究利用横向位错效应构造了基于近周期声子晶体同质位错结的二维工具头,以达到调整带隙位置和增大带隙宽度的目的,最终实现对工具头横向耦合振动的有效控制,优化工具头辐射面的振幅均匀度,提高振幅增益.

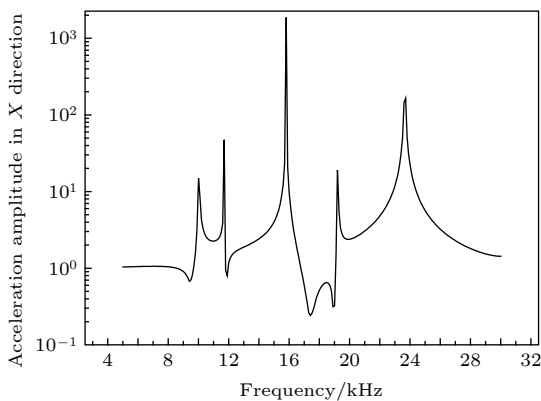


图5 原胞结构在 X 方向的加速度响应曲线

Fig. 5. Acceleration response curve of the cell structure in the X direction.

从图5可以看出,基于近周期声子晶体多槽结构的二维工具头在 $17\text{--}19\text{ kHz}$ 之间存在方向带

3.1 基于近周期声子晶体同质位错结的二维超声塑料振动系统

由2.2节可知,横向位错是指将位错线左(右)两边所有的散射子沿着横向整体向左(右)移动 $|\Delta x|/2$ 的距离,如图6所示.可知,同质位错结是一种非周期结构,不具备平移对称性,因此不能再将系统简化为单原胞计算,而要在位错线两边选取相同数量的原胞以构造超胞计算模型[19].图6中,使用虚线勾勒出的矩形便是一个工具头的超胞模型.

计算时,超胞数选为4(左右两边各选取2个原胞),原胞结构与图4相同,以 $\Delta x = 10\text{ mm}$ 为例,构建如图7所示的工具头超胞结构示意图,并

计算该超胞模型在 X 方向的加速度响应曲线, 结果如图 8 所示, 基于近周期声子晶体多槽结构和基于近周期声子晶体同质位错结构的对比结果如图 9 所示.

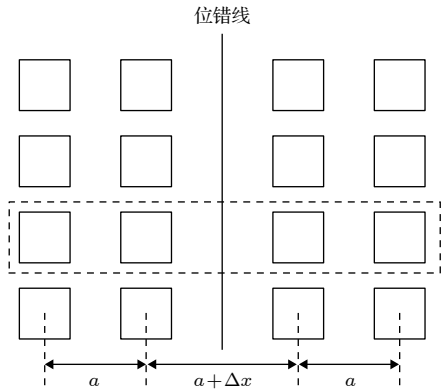


图 6 基于近周期声子晶体同质位错结的二维工具头的超胞模型

Fig. 6. Supercell model of a two-dimensional tool head based on near-period phononic crystal homogenous dislocation junction.

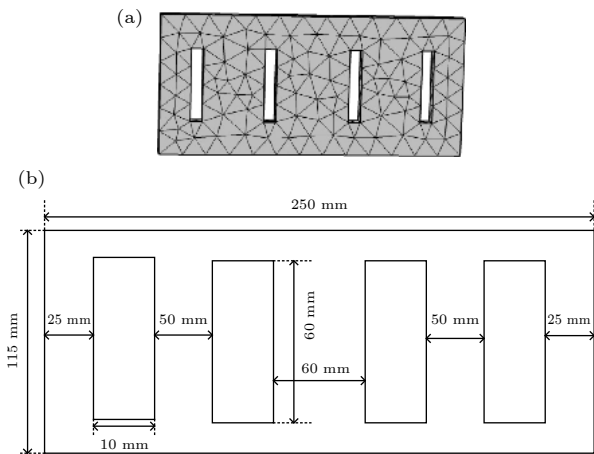


图 7 近周期声子晶体同质位错结的超胞示意图

Fig. 7. Schematic diagram of near-period phononic crystal supercell based on homogenous dislocation junction.

从图 9 可以看出, 通过同质位错结可以产生更丰富的局域模态, 并能有效地改变带隙的上、下限频率, 其中, 对下限频率的影响更为明显, 带隙宽度也因此得到了显著拓展, 比如近周期声子晶体多槽结构在 X 方向最宽的振动带隙为 16.8—19 kHz, 而近周期声子晶体同质位错结的结构在 X 方向最宽带隙为 17.2—21.8 kHz, 带隙宽度明显增大, 而且恰好在 20 kHz 附近, 因此, 可以利用此带隙, 实现对 X 方向振动的抑制, 有效改善工具头辐射面的纵向振动位移分布的均匀度.

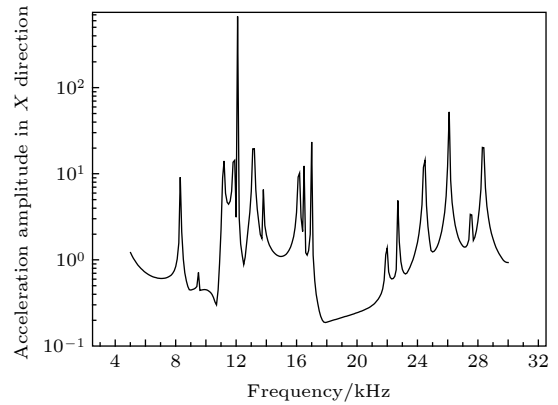


图 8 基于近周期声子晶体同质位错结的超胞结构在 X 方向的加速度响应曲线

Fig. 8. X -direction acceleration response curve of supercell structure based on near-period phononic crystal homogenous dislocation junction.

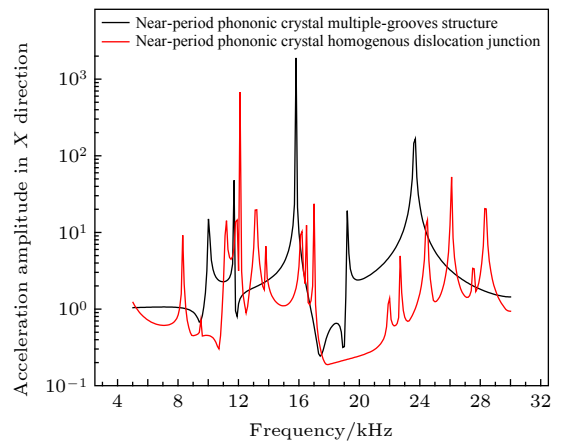


图 9 两种结构在 X 方向的加速度响应曲线对比图

Fig. 9. Comparison of acceleration response curves of the two structures in the X direction.

在 COMSOL Multiphysics 中建立基于近周期声子晶体同质位错结的二维超声塑料焊接振动系统模型, 计算模型的特征频率, 获得图 10 所示的系统振型图, 可以看出, 基于近周期声子晶体同质位错结的超声塑料焊接振动系统的纵向谐振频率为 20.674 kHz, 恰好位于工具头 X 方向的振动带隙内, 因而对系统 X 方向的横向振动进行有效的抑制, 改善了工具头辐射面的纵向振动位移分布的均匀程度. 图 11 给出了基于近周期声子晶体同质位错结结构的工具头辐射面位移分布及其与基于近周期声子晶体多槽结构的位移分布对比情况, 可以看出, 近周期声子晶体同质位错结能从一定程度上控制横向振动, 提高工具头辐射面振幅分布均匀度, 且振幅增益明显提高.

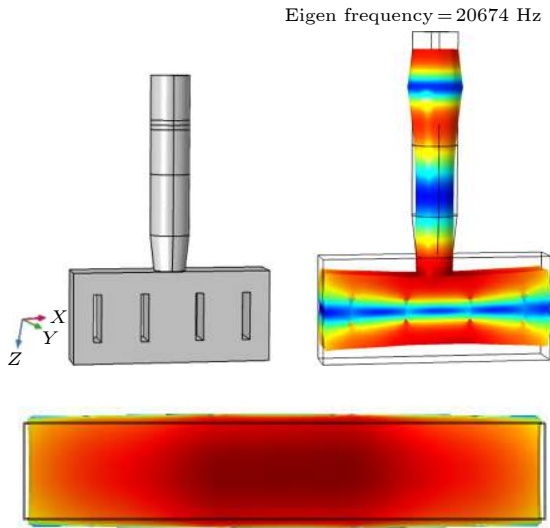


图 10 基于近周期声子晶体同质位错结的二维超声塑料焊接振动系统的结构图和振型图

Fig. 10. Structure diagram and modal diagram of two-dimensional ultrasonic plastic welding vibration system based on near-period phononic crystal homogenous dislocation junction.

但从图 11 中也能发现, 基于近周期声子晶体同质位错结系统的工具头辐射面振幅变化范围为 2.8—3.7, 仍然偏大, 因为横向位错效应可以使位于带隙频率范围内的声波沿着该位错通道传播, 而位错线通道位于工具头中部, 这就导致了工具头辐射面中间部分的位移较大, 而两边位移较小, 如图 10 和图 11 所示, 因此, 还需要进一步优化二维超声塑料焊接系统。

3.2 基于近周期声子晶体斜槽结构的二维工具头

为了进一步提高二维超声塑料焊接系统焊接面纵向位移的均匀度, 沿工具头的 X 方向加工了

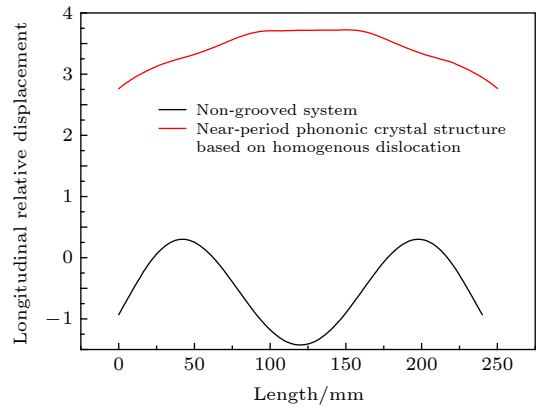


图 11 基于近周期声子晶体同质位错结系统的工具头辐射面位移分布图及与不开槽系统的位移分布对比图

Fig. 11. Displacement distribution diagram of tool head radiating surface of system based on near-period phononic crystal homogenous dislocation junction and its comparison with radiation surface displacement distribution with non-grooved system and system.

4 个斜槽 (换能器、复合变幅杆、工具头的长度、宽度、高度以及槽子的高度和宽度尺寸均保持不变), 构造基于近周期声子晶体斜槽结构的大尺寸二维工具头, 优化后的工具头结构和各部分尺寸如图 12 所示, 工具头长、宽、高均不变, 斜槽的宽度和高度也不改变, 仅把中间两个槽沿槽的中心法线倾斜 4°, 外侧两个槽沿槽的中心法线倾斜 5°。

同样利用 COMSOL Multiphysics 获得图 13 所示的系统振型图和图 14 所示的位移分布图. 为了更清晰地看到近周期斜槽结构对工具头辐射面振幅分布均匀度的优化, 图 14 给出了两种结构的纵向位移分布对比图. 从图 14 可以看出, 相比近周期声子晶体同质位错结结构, 近周期声子晶体斜槽结构能更好地控制横向振动, 有效地提高辐射面振幅分布均匀度。

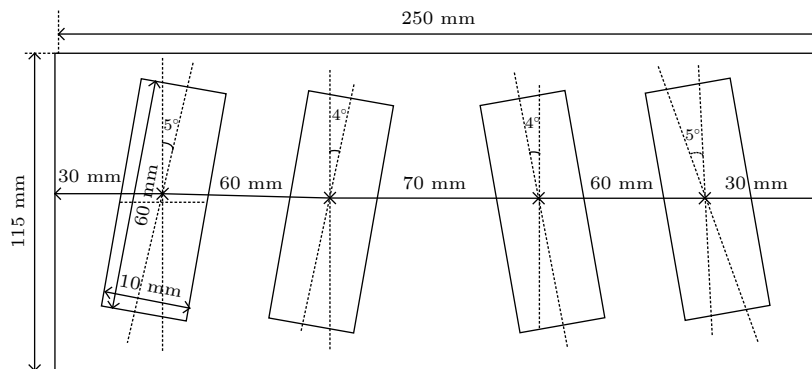


图 12 基于近周期声子晶体斜槽结构的工具头的结构尺寸图

Fig. 12. Dimensional diagram of tool head based on near-period phononic crystal inclined groove structure.

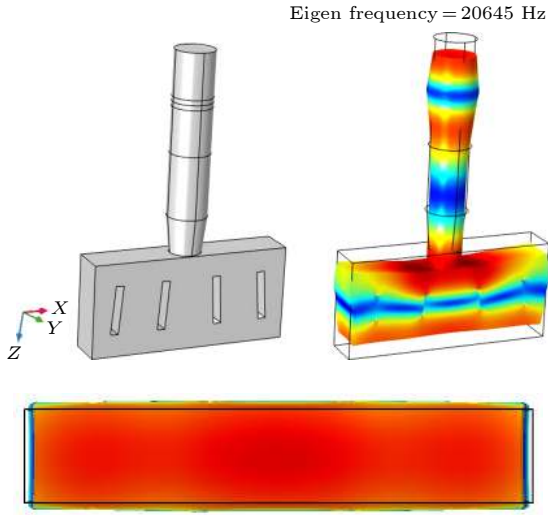


图 13 基于近周期声子晶体斜槽结构的二维超声塑料焊接振动系统的结构图和振型图

Fig. 13. Structural diagram and modal diagram of two-dimensional ultrasonic plastic welding vibration system based on a near-period phononic crystal inclined groove structure.

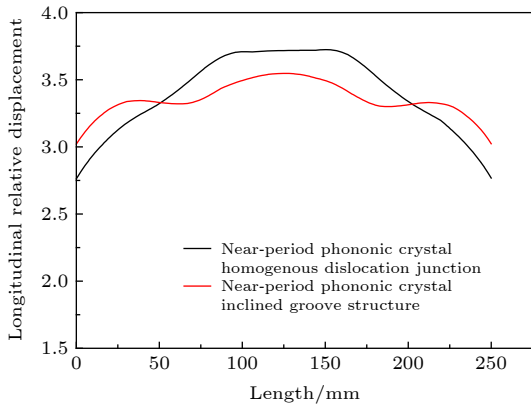


图 14 基于近周期声子晶体斜槽结构的工具头辐射面位移分布及其同近周期声子晶体同质位错工具头辐射面位移分布对比图

Fig. 14. Displacement distribution diagram of tool head radiating surface of system based on near-period phononic crystal inclined groove structure and its comparison with the displacement distribution of radiating surface of tool head with homogenous dislocation in near-period phononic crystal.

3.3 斜槽结构参数对基于近周期声子晶体斜槽结构的超声塑料焊接振动系统纵向谐振频率和纵向相对位移分布的影响

由 3.2 节可知, 斜槽的引入使得系统工具头辐射面的振幅分布更加均匀, 即斜槽的结构参数是决定振幅均匀度的一个重要因素, 为了找到最佳的斜槽结构参数, 方便设计, 本研究利用 COMSOL Multiphysics 仿真分析了斜槽结构参数对基于近

周期声子晶体斜槽结构的超声塑料焊接振动系统纵向谐振频率和振幅分布的影响规律, 这里的斜槽结构参数主要包括斜槽高度、斜槽宽度和斜槽倾角, 仿真结果如图 15 和图 16 所示. 图 16 中的 dr 表示振幅变化范围, 即辐射面纵向位移最大值减去辐射面纵向位移最小值, 即 dr 越大, 辐射面纵向位移的变化范围越大, 振幅分布越不均匀, dr 越小, 辐射面纵向位移的变化范围越小, 振幅分布越均匀; 图中的 θ_1 是外侧斜槽倾斜角度, θ_2 是内侧斜槽倾斜角.

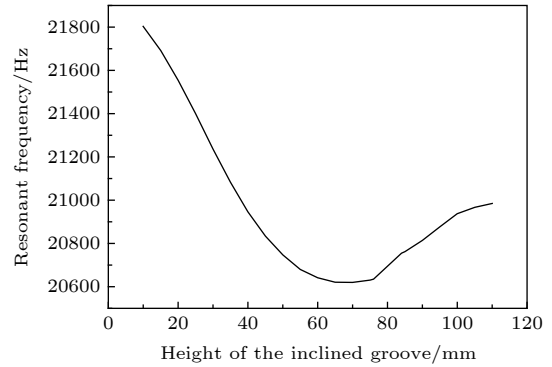


图 15 斜槽高度对系统谐振频率的影响

Fig. 15. Influence of the height of the inclined grooves on the resonance frequency of the system.

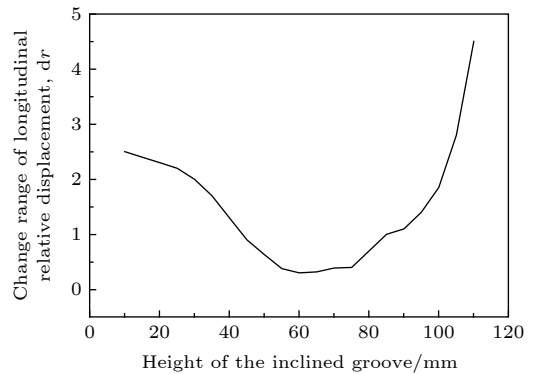


图 16 斜槽高度对振幅变化范围的影响

Fig. 16. Influence of the height of the inclined grooves on the range of amplitude variation.

图 15 和图 16 分别反映了系统谐振频率和振幅变化范围 dr 与斜槽高度的关系. 从图 15 可以看出, 当其他参数不变时 (斜槽宽度、外侧斜槽倾角和内侧斜槽倾角固定, 斜槽宽度固定为 10 mm, 斜槽外侧倾角为 5° , 内侧倾角为 3°), 随着斜槽高度的增大, 二维超声塑料焊接系统的谐振频率先减小, 然后再逐渐增大. 从图 16 可以看出, dr 随着斜

槽高度的增大先减小,再增大,即辐射面的振幅分布均匀度随斜槽高度的增加先越来越均匀,而后越来越不均匀,由此可以看出,斜槽高度的取值要在合适的范围内,高度太小或者太大,都会导致系统的振幅分布不均匀,在此系统中,斜槽的高度在60—75 mm 之间时,振幅均匀度最佳.

从图 17 可以看出,当其他参数不变时(斜槽高度、外侧斜槽倾角和内侧斜槽倾角固定,斜槽高度固定为 60 mm,斜槽外侧倾角为 5°,内侧倾角为 3°),随着斜槽宽度的增大,二维超声塑料焊接系统的谐振频率逐步减小.从图 18 可知,当其他参数不变时, dr 随着斜槽宽度的增大先减小,再增大,即系统的振幅分布均匀度随斜槽宽度的增加先越来越均匀,而后越来越不均匀,由此可以推出,斜槽宽度的取值也要在合适的范围内,宽度太小或者太大,都会导致系统的振幅分布不均匀,在此系统中,斜槽的宽度在 10—12 mm 之间时,振幅均匀度最佳.

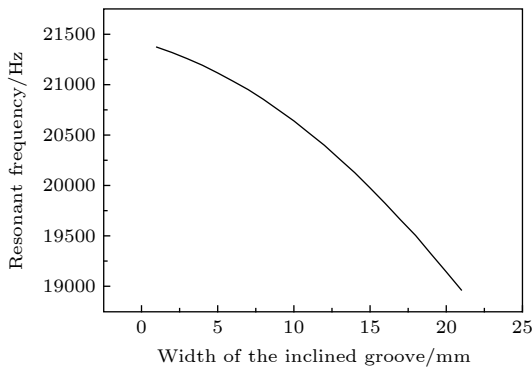


图 17 斜槽宽度对系统谐振频率的影响

Fig. 17. Influence of the width of the inclined grooves on the resonance frequency of the system.

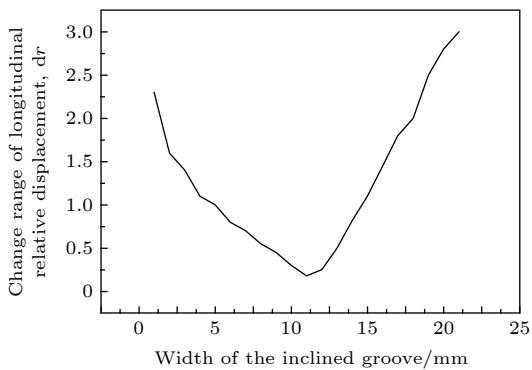


图 18 斜槽宽度对振幅变化范围的影响

Fig. 18. Influence of the width of the inclined grooves on the range of amplitude variation.

图 19 是系统谐振频率随两个变量—— θ_1 外侧斜槽倾斜角度以及 θ_2 内侧斜槽倾斜角的变化关系.当 $\theta_2 = 1^\circ$ 时, θ_1 从 1° 变化到 20° 的过程中,系统谐振频率与两者的关系可以用图 19 中的黑色线条表示;同理, $\theta_2 = 2^\circ$ 时, θ_1 从 1° 变化到 20° 的过程中,系统谐振频率与两者的关系可以用图 19 中的红色线条表示,以此类推.图 20 是辐射面的振幅变化范围随两个变量 θ_1, θ_2 的变化关系,其中,上图反映了 dr 和 θ_1 随 θ_2 的变化曲线,由于点过多,将上图分成了图 20(a) 和图 20(b) 两部分,图 (a) 显示了 θ_2 从 1° 变化到 5° 时, dr 和 θ_1 随 θ_2 的变化曲线,同理,图 (b) 显示了 θ_2 从 6° 变化到 10° 时, dr 和 θ_1 随 θ_2 的变化曲线;下图反映了 dr 和 θ_2 随 θ_1 的变化曲线,图 (c) 显示了 θ_1 从 1° 变化到 5° 时, dr 和 θ_2 随 θ_1 的变化曲线,图 (d) 显示了 θ_1 从 6° 变化到 10° 时, dr 和 θ_2 随 θ_1 的变化曲线.

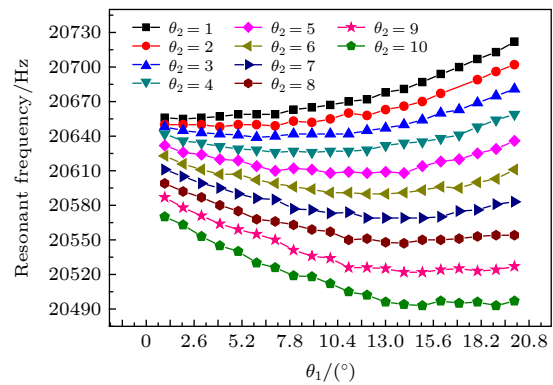


图 19 斜槽角度对系统谐振频率的影响

Fig. 19. Influence of the angle of the inclined grooves on the resonance frequency of the system.

从图 19 可以看出,当其他参数不变时,随着斜槽倾斜角度的增大,二维超声塑料焊接系统的谐振频率整体呈先减小后增大的趋势.从图 20 可知,当其他参数不变时,二维超声塑料焊接系统的 dr 取值随着斜槽倾斜角度的增大先减小,再增大,即系统的振幅分布均匀度随斜槽倾角的增加先越来越均匀,而后越来越不均匀,且:

1) 外侧和内侧斜槽倾角均不宜过大,外侧和内侧斜槽倾角越大, dr 值越大,系统振幅分布均匀度越差.从图 20 可以看出,本系统内、外侧斜槽倾角最佳范围为 3° — 6° .

2) 外侧和内侧斜槽倾角二者角度相差也不宜过大,外侧和内侧斜槽倾角相差越大,系统振幅分

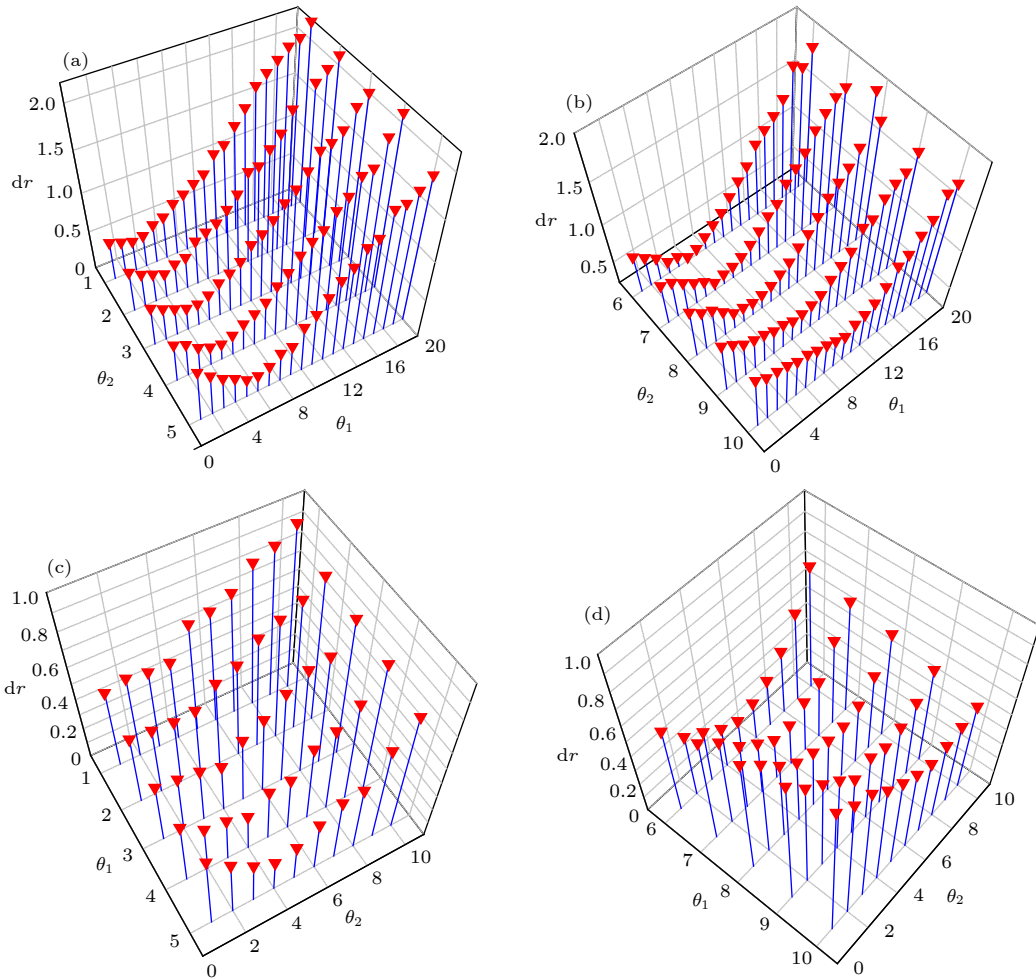


图 20 斜槽角度对振幅变化范围的影响

Fig. 20. Influence of the angle of the inclined grooves on the range of amplitude variation.

布越不均匀, 图 21 给出 dr 较小时对应的内外倾角. 从图 20 和图 21 可以看出, 本系统内、外侧斜槽倾角角度相差 $0^\circ-2^\circ$ 为最佳.

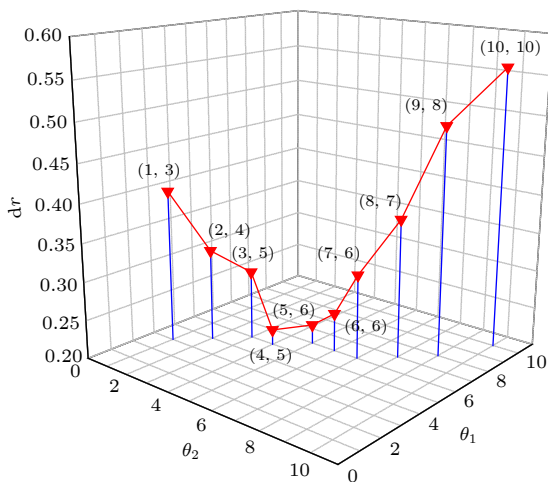


图 21 dr 和内外侧斜槽角度差值的关系

Fig. 21. Relationship between dr and the angle difference of outer and inner inclined grooves.

从以上结论可以得出, 开槽后, 系统的频率会降低, 合适的槽子高度、宽度会改善辐射面的纵向位移分布, 而不合理的开槽却会使得系统的纵向位移分布更不均匀; 斜槽比直槽能更好地改善振幅分布均匀度, 但内外斜槽倾斜角度不宜过大, 内外斜槽倾斜角度的差值也不宜过大.

4 结论

振幅分布均匀度是影响超声塑料焊接系统焊接质量的一个关键因素, 本文对二维超声塑料焊接系统进行了优化设计, 通过近周期声子晶体同质位错结和斜槽结构, 有效地抑制了二维长条形工具头 X 方向的横向耦合振动, 并分析了斜槽高度、斜槽宽度和斜槽角度对焊接面振幅分布的影响规律; 仿真结果表明, 利用近周期声子晶体同质位错结、带隙理论, 同时结合耦合振动理论, 可以实现二维超声塑料焊接系统的优化设计.

参考文献

- [1] Rani M R, Rudramoorthy R 2012 *Ultrasonics* **53** 763772
- [2] Wells, Peter J 1991 *Asse. Auto.* **11** 1014
- [3] Shu-Chu R 1982 *Chin. Jour. Acous.* **1** 138151
- [4] Shu-Chu R 1983 *Acta Acus.* **1** 152161
- [5] Shu K M, Wang Y J, Chi C W 2014 *Appl. Mecha. & Mater.* **28** 329332
- [6] Hung J C, Tsai Y P, Hung C H 2012 *Appl. Mecha. & Mater.* **14** 98
- [7] Cardoni A, Lucas M 2002 *Ultrasonics* **40** 365369
- [8] Adachi K, Ueha S 1990 *Jour. Acous. Soci. Ame.* **87** 208214
- [9] Mori E, Itoh K, Imamura A 1995 *Jour. acou. Soci. Japan* **51** 455462
- [10] Lucas M, Smith A C 1997 *Jour. Vibr. Acous.* **119** 410413
- [11] Lee Y J, Shahid M B, Park D S 2019 *MATEC Web Conf* **257** 02009
- [12] Nguyen T H, Quang Q T, Tran C L, Nguyen H L 2017 *5th Asia Conference on Mechanical and Materials Engineering Tokyo, Japan, June 9–11, 2017* p012023
- [13] Kumar R D, Rani M R, Elangovan S 2014 *Appl. Mecha. & Mater.* **592** 859863
- [14] Rani M R, Prakasan K, Rudramoorthy R 2014 *Int. J. Desi. Engi.* **5** 344357
- [15] Lin S Y, Zhang F C 1992 *Acou. Tech.* **4** 2428 (in Chinese) [林书玉, 张福成 1992 声学技术 **4** 2428]
- [16] Liang Z F, Zhou G P, Mo X P, Li Z Z 2009 *Engi. Desi. Jour.* **Acc.** **16** 200204 (in Chinese) [梁召峰, 周光平, 莫喜平, 李正中 2009 工程设计学报 **16** 200204]
- [17] Zhao T T, Lin S Y, Duan Y L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 224207 (in Chinese) [赵甜甜, 林书玉, 段祎林 2018 物理学报 **67** 224207]
- [18] Lin J Y, Lin S Y 2020 *Crystals* **10** 116
- [19] Guo D F 2015 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [郭凤丹 2015 博士学位论文 (北京: 北京交通大学)]
- [20] Wang G, Wen X S, Wen J H, Liu Y Z 2006 *Jour. Appl. Mech. Tran. ASME* **73** 167170
- [21] Chen A, Wang Y, Yu G, et al. 2008 *Acta Mech. Soli.Sini.* **21** 4051
- [22] Steurer W, Sutter-Widmer D 2007 *Jour. Phy. D Appl. Phys.* **40** R229
- [23] Zhao F, Yuan L B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 517 (in Chinese) [赵芳, 苑立波 2006 物理学报 **55** 517]
- [24] Zhao Y C, Zhao F, Yuan L B 2006 *Jour. Harbin Engi.Uni.* **4** 145148 (in Chinese) [赵言诚, 赵芳, 苑立波 2006 哈尔滨工程大学学报 **4** 145148]
- [25] Khelif A, Choujaa A, Djafari-Rouhani B, et al. 2003 *Phys. Rev. B* **68** 214301
- [26] Vasseur J, Deymier P, Djafari-Rouhani B, et al. 2008 *Phys. Rev. B* **77** 85415
- [27] Soliman Y M, Su M F, Leseman Z C, et al. 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 081907
- [28] Liu Y, Su J Y, Xu Y L, et al. 2009 *Ultrasonics* **49** 276280

Two-dimensional ultrasonic plastic welding system based on phononic crystal dislocation theory*

Lin Ji-Yan¹⁾²⁾ Lin Shu-Yu^{1)†}

1) (*Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

2) (*School of Information Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China*)

(Received 28 May 2020; revised manuscript received 9 June 2020)

Abstract

When the lateral dimension of the tool head is close to or greater than a quarter of the longitudinal wave length, the tool head will produce severe lateral vibration. The coupling of the lateral vibration and the longitudinal vibration makes the amplitude distribution of the tool head's radiation surface uneven, which seriously affects the welding quality. To solve the problem of uneven amplitude distribution of the two-dimensional tool head's radiating surface, in the paper we conduct an optimized design study on a two-dimensional ultrasonic plastic welding system. First, using the theory of phononic crystal dislocations, we construct a nearly periodic phononic crystal homogenous dislocation junction on a large-sized long strip tool head, and use the homogenous dislocation junction to change the regular lattice arrangement of the phononic crystal structure to adjust the position of the band gap and increase the width of the band gap, so that the operating frequency of the two-dimensional ultrasonic plastic welding system can be located in the band gap of the lateral vibration of the tool head, and the effective control of the lateral coupling vibration of the tool head can be achieved, thus optimizing the amplitude uniformity of the radiating surface of the tool head and increasing the amplitude gain. Although the homogenous dislocation junction structure improves the amplitude uniformity of the radiating surface of the tool head, the lateral dislocation effect of the homogenous dislocation junction causes the sound waves in the band gap frequency range to propagate along the dislocation channel, while the dislocation line channel is located in the middle of the tool head, which results in a larger displacement of the middle part of the tool head's radiating surface, and a smaller displacement on both sides. Therefore, the further optimizing of the two-dimensional tool head is required. In this study, the nearly periodic phononic crystal inclined groove structure is used to better optimize the amplitude distribution uniformity of the radiating surface, and the influence of the inclined groove structure parameters on the longitudinal resonance frequency and amplitude distribution uniformity of the ultrasonic plastic welding system are analyzed, that is, the inclined groove can better improve the uniformity of the amplitude distribution than the straight groove, but the angle of inclination of neither the inner nor outer inclined grooves should be too large: the optimal range is $3^\circ - 6^\circ$. In addition, the difference in inclination angle between the inner inclined groove and the outer inclined groove should not be too large, and the angle difference from 0° to 2° is best. The simulation results show that the nearly periodic phononic crystal homogenous dislocation junction and inclined groove structure can optimize the two-dimensional ultrasonic plastic welding system, which provides a basis for further research on the theory of lateral vibration suppression.

Keywords: near-period phononic crystal, homogeneous dislocation junction, inclined groove structure, amplitude distribution uniformity

PACS: 43.35.+d, 43.40.+s, 63.20.D-

DOI: 10.7498/aps.69.20200804

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674206, 11874253, 11964040).

† Corresponding author. E-mail: sylin@snnu.edu.cn