

# 激光与光电子学进展

## 基于多重双波混频干涉仪的 Lamb 波频散特性研究

周益\*, 李三星

无锡太湖学院物联网工程学院江苏省物联网应用技术重点实验室, 江苏 无锡 214064

**摘要** 开发了一种可同时对阵列内多点的超声波运动进行光学检测的多重双波混频干涉仪(MTWM)系统。该 MTWM 系统使用相位光栅形成射向样品的检测激光束检测阵列。该检测阵列可按需以多种方式射向被检物品。收集检测激光阵列的散射光并将其与单束参考光在光折变晶体中进行混合,实现多重双波混频。光折变晶体的每一路输出光束都落于光探测器阵列的其中一个光探测器上。该 MTWM 的优势在于能够同时对被检物品的多个点进行光学检测,且具有高空间分辨率和亚纳米级位移灵敏度。该 MTWM 系统可应用于裂缝成像检测和定量、材料特性分析以及其他无损检测应用。介绍了如何应用 MTWM 系统快速获取 Lamb 波频散曲线。该系统可获得不同光源与接收器距离下的频散时间-位置域 Lamb 波信号。基于 Alleyne 和 Cawley 算法,将这些时间-位置域信号通过二维傅里叶变换技术转换至频率-波数域。该应用显示 MTWM 系统能够快速确定 Lamb 波的频散特性。

**关键词** 非线性光学; 激光超声; Lamb 波; 频散曲线; 相控阵

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2319001

### Study of Lamb Wave Dispersion Characterization Using Multiplexed Two-Wave Mixing Interferometer

Zhou Yi\*, Li Sanxing

*Jiangsu Key Lab of IoT Application Technology, School of IoT Engineering, Wuxi Taihu University, Wuxi, Jiangsu 214064, China*

**Abstract** A multiplexed two-wave mixing interferometer (MTWM) system has been developed, which is able to perform optical detection of ultrasonic motion for multiple points in an array simultaneously. In this MTWM system, optical phase gratings are used to create an array of detection laser beams that are directed to the specimen. The detection array can be arranged in several ways on the test object as needed. The scattered optical beams from the detection laser array are collected and mixed with a single reference beam in a photorefractive crystal to form a multiplexed two-wave mixing. Each of the output beams from the photorefractive crystal is imaged on to one of the elements in the array of photodetectors. The MTWM system is capable of providing simultaneous optical detection at several points on a test object, with high spatial resolution and sub-nanometer displacement sensitivity. The applications of this MTWM system include the crack imaging detection and quantification, material characterization analysis, and other nondestructive detection. In this paper, how to realize fast acquirement of Lamb wave dispersion curves using the MTWM system is presented. The dispersive time-position domain Lamb wave signals at multiple source-to-receiver distances are obtained. Following the algorithms of Alleyne and Cawley, these time-position domain signals are transformed to the frequency-wavenumber domain using two-dimensional fast Fourier transformation technique. This application shows the MTWM system has the ability to rapidly characterize the dispersion characteristics of Lamb waves.

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-03-14; 录用日期: 2021-03-18

通信作者: \*zhouy5@wxu.edu.cn

**Key words** nonlinear optics; laser ultrasound; Lamb waves; frequency dispersion curve; phased array

**OCIS codes** 190.7070; 120.0120; 120.3180

## 1 引言

激光超声由于具有无需接触、高空间分辨率、亚纳米级灵敏度等优点且可用于复杂结构和恶劣环境,已成为无损检测领域的一种成熟技术<sup>[1-3]</sup>。无需耦合剂的激光超声系统是传统压电换能器系统的更好替代选择。激光超声系统已应用于裂缝成像检测、定量定位以及材料特定分析等领域。传统的激光超声系统使用点源激发和点源检测装置。在超声生成部分,由点光源照射样品激发弹性波。在检测部分,收集从样品照射点散射的光信号,然后使用干涉仪解调光检测光束的超声信号。在该方案中,为获得所需结果,需要一直扫描样品表面的目标区域,这可能会比较耗时。对于该问题,阵列技术是不错的解决方案。通过使用阵列技术,可同时对样品上的一系列点位进行检测。本文所开发的多重双波混频干涉仪(MTWM)系统正是这一思路的实现。本文系统建立在传统双波混频装置的基础上,但使用多束而非单束信号光可进行并行处理。该系统兼具激光超声系统和光学阵列技术的优势,即无需接触、空间分辨率高、灵敏度达到亚纳米级、可用于复杂结构、能够进行并行处理以及动态接收聚焦。

MTWM系统的应用包括基于表面声波和体波的相控阵成像检测<sup>[4]</sup>以及各向异性材料特性分析<sup>[5]</sup>。本文将结合MTWM干涉仪系统和二维快速傅里叶变换(FFT)快速确定铝板中Lamb波的频散曲线。目前已有很多研究使用激光超声技术、FFT或者结合两者来获取Lamb波的频散曲线。Alleyne和Cawley使用二维FFT技术获得了两种最低模式的Lamb波频散曲线<sup>[6-7]</sup>。但他们的研究使用接触式压电换能器,可能会引入频偏且颇为耗时。Costley等<sup>[8]</sup>使用激光超声技术生成Lamb波,并使用压电换能器进行有限频率范围内的检测,而后使用二维傅里叶变换得到Lamb波频散曲线。Schumacher等<sup>[9]</sup>使用完整的激光超声技术和FFT测量两个不同点的超声信号,以获得相速度。但两点相速度提取方法需要各模式彼此分离,仅能够识别三种模式。Costley等<sup>[10-11]</sup>则结合完整激光超声技术和二维FFT算法来获得Lamb波频散曲线。但他

们的系统仅使用点光源和点接收器配置,需不断通过扫描获得多个光源接收器的距离。要实现高分辨率和更大的波数域范围,需要数百组的数据,因此整个过程相当耗时。本文使用了完整的激光超声技术,包括生成宽波段Lamb波信号和真正的光学阵列检测。本文首先使用MTWM系统获得宽波段Lamb波场中一系列离散光源-接收器距离的时间轨迹信号。然后使用二维FFT将这些时间-距离域变换为频率-波数域。本文应用该系统获得了铝板中Lamb波的频散曲线。结果显示MTWM系统可快速确定Lamb波的频散特性。

## 2 多重双波混频干涉仪系统

多重双波混频干涉仪是一种基于零差方案的双波混频(TWM)装置,文献<sup>[12]</sup>对此已经有很好的描述。双波混频TWM在自适应干涉仪等先进光信息处理<sup>[13-15]</sup>中的应用研究备受人们关注。

如图1所示,在双波混频TWM装置中,利用信号光并通过相移编码超声波运动信号,编码信号在光折变晶体(PRC)中与参考光混合。通过双波混频TWM,部分参考光通过衍射转变至信号光方向传播,且该部分的波前结构与信号光相同。在该双波混频TWM设计中,可使用多束而非单束信号光,因为双波混频TWM装置中的信号光可为任意波前结构和有限空间域。所以可以将多束信号光当成任意波前结构和有限域的单束信号光。

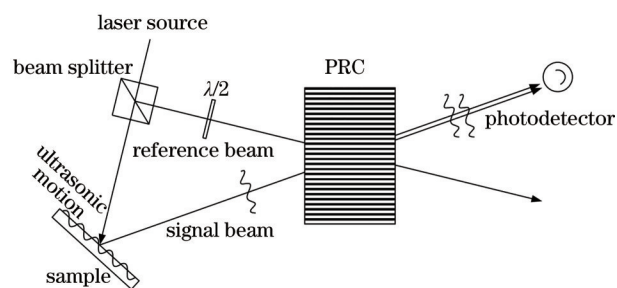


图1 双波混频装置

Fig. 1 Two-wave mixing device

图2展示了多重双波混频干涉仪系统。该系统与双波混频装置基本相同,不同之处在于其使用多束信号光。多束信号光由单束信号光经过相位光栅生成,单束信号光由514 nm波长连续氩离子激光

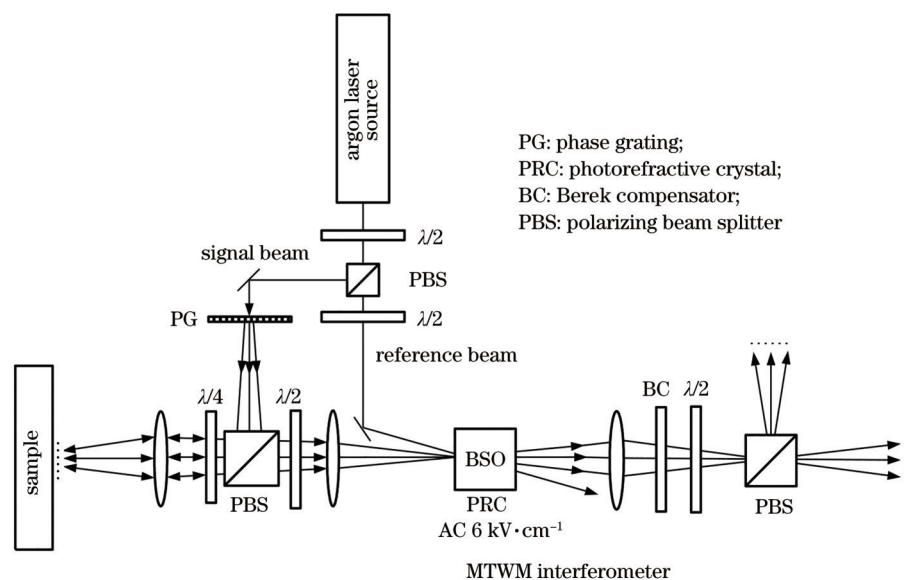


图 2 多重双波混频干涉仪系统配置

Fig. 2 System configuration of multiple two-wave mixing (MTWM) interferometer

源(厂家为Continuum)的光束通过可变分束器的其中一个分支得到。参考光由可变分束器的另一分支生成。本文使用可变分束器是为了能够更方便地控制参考光与信号光的配给。之后由透镜系统引导多束信号光照向样品表面。散射光被收集并通过半波片实现 $45^\circ$ 极化转换,并在BSO光折变晶体中与参考光混合。BSO晶体的大小为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 。调整BSO晶体方向,使光栅矢量沿 $[001]$ 晶轴,并应用频率为 $3.2\text{ kHz}$ 、幅度为 $6\text{ kV/cm}$ 的AC电场在BSO晶体的 $[001]$ 方向上增大双波混频增益。在BSO晶体输出端,使用补偿器使信号光束相对于参考光束产生相位延迟。这里引入相移是为了让参考光和信号光在正交时产生干涉,以最大化检测灵敏度。通过 $45^\circ$ 极化分束器将光束导向光电检测器阵列。使用 $45^\circ$ 极化分束器是为了将光束分成两束相同强度的光束阵列,实现平衡检测。该基于PRC的MTWM系统可用于光学粗糙表面检测,且该系统为自适应系统,无需进行主动稳定调节。

首先检查MTWM系统的串扰作用,以确保各阵列单元独立运行。创建阵列间隔 $d = 0.5\text{ mm}$ 的9单元阵列。使用热弹机制聚焦激光光源生成铝块上的表面波(SAW)。线光源与检测阵列正交,因此SAW抵达相邻元件的时间存在的延迟为 $vd$ (其中 $v$ 为SAW的速率)。总激光功率为 $400\text{ mW}$ ,使用可变分束器将功率分为信号光和参考光并调整分束比,同时保持激光总功率不变。使用较大分束比( $\sim 10$ )

时,观察到的串扰极小。图3显示了三个相邻单元检测到的信号,从中并未观测到可检测串扰。

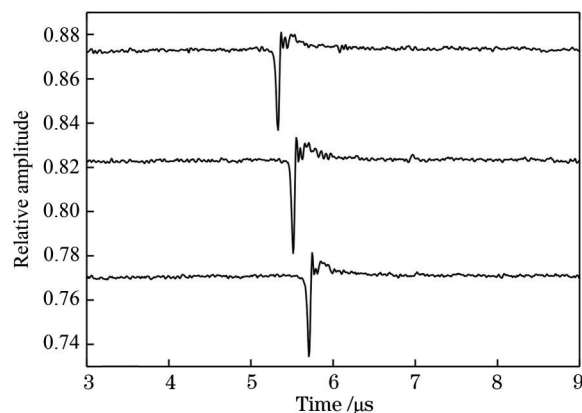


图 3 9 单元阵列中三个相邻单元接收到的信号

Fig. 3 Signals received by three adjacent elements in a nine-element array

### 3 使用二维 FFT 算法获得 Lamb 波频散曲线

图4显示了基于二维FFT技术的Lamb波频散曲线定性分析的实验装置。在该装置中,使用Q开关Nd:YAG激光器(厂家:Continuum)作为激光源,将激光聚焦于 $0.44\text{ mm}$ 厚铝板的一条线上,通过柱面透镜生成宽波段Lamb波。线激光源在热弹机制下运行,因此对样品表面无可见损害。铝板足够大,因此可视为无限大板。在检测端,使用间距为 $0.14\text{ mm}$ 的8单元阵列检测Lamb波信号。该阵列

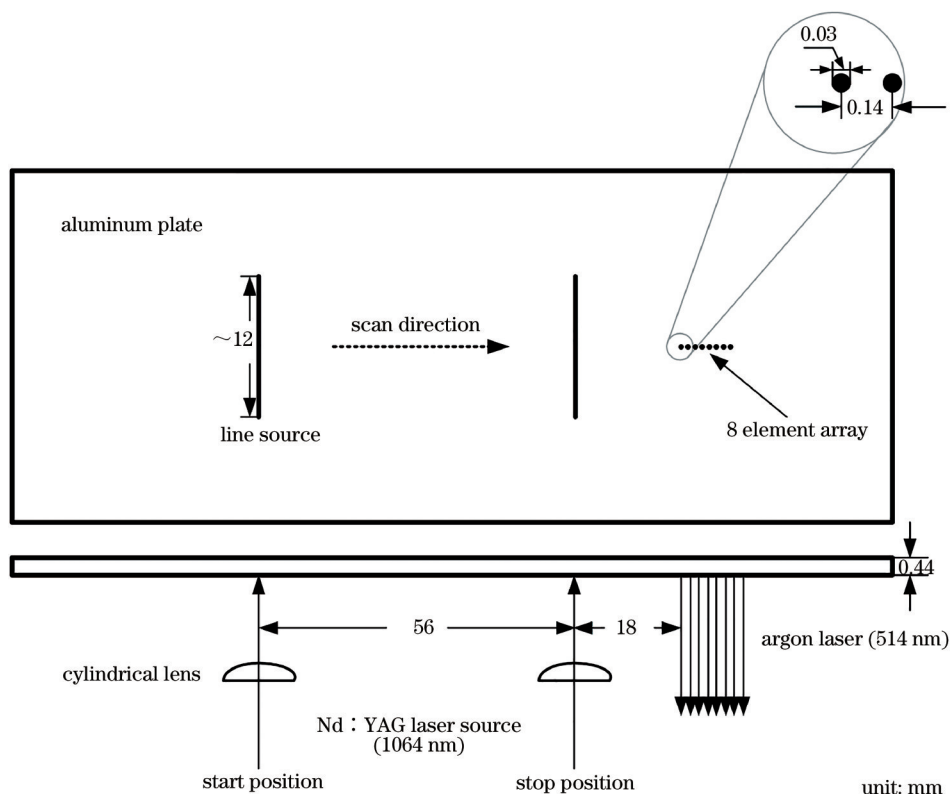


图 4 使用二维 FFT 技术进行频散曲线定性分析的实验装置

Fig. 4 Experimental setup for qualitative analysis of dispersion curve using two-dimensional FFT technique

检测器能够在 8 个不同的位置同时接收 Lamb 波信号。信号光的总功率为 500 mW, 总分束比约为 10。通过 MTWM 系统处理和解调 Lamb 波信号, 并用示波器进行记录, 然后通过 GPIB 接口传送到计算机, 以进行进一步的处理。实验中一共移动了线光源 50 次, 每次间隔 1.12 mm, 共在 400 个位置收集了 400 组 Lamb 波时间轨迹。由此可知, 通过使用 8 单元阵列, 节省了大量时间, 因为相比于单接收器装置, 线光源移动 400 次。

图 5 显示了 MTWM 检测到的间隔为 0.98 mm 时的典型 Lamb 波时间轨迹。由图可知, Lamb 波信号高度频散。之后 MTWM 检测得到间隔为 0.14 mm 的 400 个位置的 400 个 Lamb 波时间轨迹, 并通过二维傅里叶变换将时间-距离域转化为频率-波数域。则频率为  $f$ 、波数为  $k$  时的变换值为

$$H(k, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) \exp[-j(kx + \omega t)] dx dt, \quad (1)$$

式中:  $u(x, t)$  为时间为  $t$ 、距离为  $x$  时检测到的 Lamb 波信号。

使用二维快速傅里叶变换(2D-FFT)子程序变换时间-空间域数据集  $u(x, t)$ , 结果如图 6 所示。

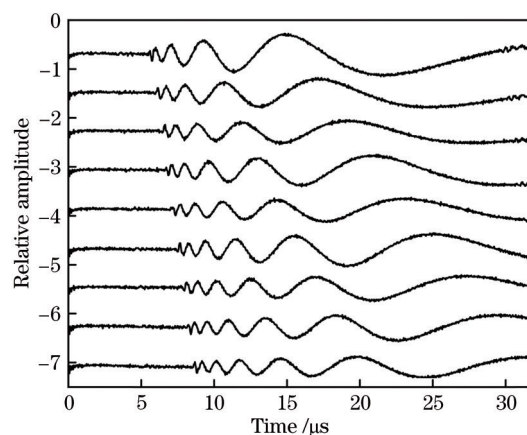


图 5 间隔为 0.98 mm 时检测到的 Lamb 波时间轨迹  
Fig. 5 Detected Lamb wave time traces with 0.98 mm spacing

图 6 中的  $x$  轴为频率-厚度积,  $y$  坐标是波数。从图 6 可知, 信号有 4 种模式, 最强的模式为  $a_0$  模式, 这与时间域轨迹中的 Lamb 波信号以该模式为主的事实相符。 $a_0$  模式之下为对称模式  $s_0$ 。 $s_0$  模式不连续, 这是因为在图 6 中频率范围内并不能有效地生成  $s_0$  模式。除了  $a_0$  和  $s_0$  模式, 还有更高阶的模式出现, 如  $a_1$  以及  $s_1$ 。图 7 中实验数据看起来与理论铝板 Lamb

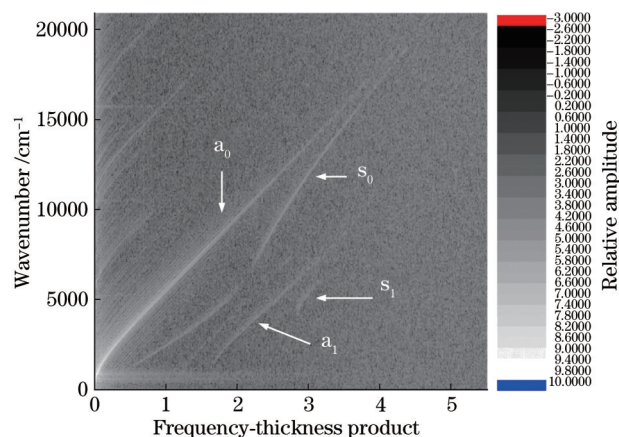


图 6 获得的铝板中 Lamb 波频散

Fig. 6 Recovered Lamb wave dispersion on an aluminum plate

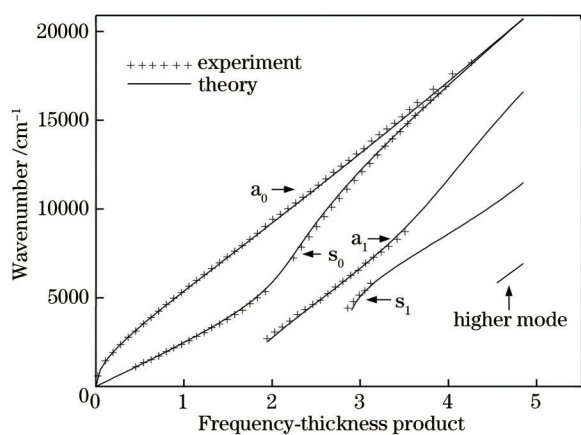


图 7 实验和理论计算得到的铝板中 Lamb 波频散曲线

Fig. 7 Dispersion curves of Lamb wave in aluminum plate obtained by experiment and theoretical calculation

波频散曲线相当符合。

## 4 结 论

介绍了一种新的 MTWM 系统,该系统可同时  
对样品表面一系列点的超声运动进行检测。介绍  
了该系统的一种应用,即使用二维快速傅里叶变换  
进行 Lamb 波频散特性分析。在该应用中,  
MTWM 系统用于同时检测多个不同光源-接收器  
距离的时间域 Lamb 波信号。将采集得到的数据  
集通过二维傅里叶变换从时间-距离域转换至频  
率-波数域。结果显示 MTWM 系统能够快速确定  
Lamb 波的频散特性。

## 参 考 文 献

[1] Scruby C B, Drain L E. Laser ultrasonics: techniques and applications[M]. New York: Adam Hilger, 1990.

[2] Hutchins D A. Ultrasonic generation by pulsed lasers [M]//Physical acoustics. Amsterdam: Elsevier, 1988, 18: 21-123.

[3] Davies S J, Edwards C, Taylor G S, et al. Laser-generated ultrasound: its properties, mechanisms and multifarious applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(3): 329-348.

[4] Murray T W, Yi Z, Krishnaswamy S. Adaptive optical phased array interferometer for acoustic wave detection [J]. AIP Conference Proceedings, 2001, 557: 236-243.

[5] Zhou Y, Murray T W, Krishnaswamy S. Photoacoustic imaging of surface acoustic wave slowness using multiplexed, two-wave mixing array interferometry [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2002, 49(8): 1118-1123.

[6] Alleyne D, Cawley P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(3): 1159-1168.

[7] Alleyne D N, Cawley P. The interaction of Lamb waves with defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(3): 381-397.

[8] Costley R D, Berthelot Y H, Jacobs L J. Laser-based technique to resolve mode propagation of lamb wave in plates[J]. Journal of Acoustic Emission, 1994, 12(1-2): 27-38.

[9] Schumacher N A, Burger C P, Gien P H. A laser-based investigation of higher-order modes in transient Lamb waves[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(5): 2981-2984.

[10] Costley R D, Jr, Berthelot Y H, Jr. Dispersion curve analysis of laser-generated Lamb waves[J]. Ultrasonics, 1994, 32(4): 249-253.

[11] Eisenhardt C, Jacobs L J, Qu J. Application of laser ultrasonics to develop dispersion curves for elastic plates[J]. Journal of Applied Mechanics, 1999, 66 (4): 1043-1045.

[12] Blouin A, Monchalain J P. Detection of ultrasonic motion of a scattering surface by two-wave mixing in a photorefractive GaAs crystal[J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(8): 932-934.

[13] Jiang X H, Tao C Y, Zhao Y, et al. Two-wave mixing gain characteristics of photorefractive InP: Fe under external DC electric field[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1219001.

江旭海,陶传义,赵琰,等.外加直流场下光折变半导体 InP: Fe 的双波混频增益特性[J]. 光学学报,

- 2021, 41(12): 1219001.
- [14] Liu B, Wang X P, Yang Y G, et al. Principles, devices, and applications of beam deflection based on quadratic electro-optic effect of potassium tantalate niobate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071609.  
刘冰, 王旭平, 杨玉国, 等. 基于钽铌酸钾二次电光效应的光束偏转原理、器件及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 071609.
- [15] Bai X Q, Wang Y H, Zhang J, et al. Soliton shedding from Airy-Gaussian beams in photorefractive media[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0805001.  
白小琴, 王宇浩, 张静, 等. 艾里-高斯光束在光折变介质中的孤子脱落[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0805001.