



# 热变形表面的光干涉 ——23届亚洲物理奥赛实验第二题

韩道福<sup>1</sup> 宋 峰<sup>2</sup>

(1. 南昌大学物理国家级实验教学示范中心 330031;

2. 南开大学物理科学学院 300071)

第23届亚洲物理奥林匹克竞赛实验题有两道,其中第二道主要涉及热学、光学知识。以常用的亚克力板为实验对象,通过加热引起变形。为了测量微小的形变,采用光的干涉法。干涉可以测量到光波长量级的微小形变。

亚克力(PMMA)是一种用途广泛的有机材料,其强度是普通玻璃的5倍。亚克力的主要原料为液态甲基丙烯酸甲酯单体,液态密度低于固态。在液态单体中添加着色剂和硬化剂,通过热成型工艺制作而成,热成型的温度范围为160~190℃。亚克力为环保材料,不释放有害物质,因此常用于儿童玩具、餐具和设备框架等,且耐水性强。本实验研究亚克力表面激光热致形变反射引起的干涉现象。

## 1. 实验仪器介绍

实验器材如图1所示,包括:

- 1) 带电压调节工具的激光器
- 2) 带孔屏
- 3) 两台多用表(一台电流表,一台电压表)
- 4) 激光器与电源控制单元的连接线
- 5) 多用表连接线
- 6) 控制箱
- 7) 电源适配器
- 8) 带可调支架的亚克力(PMMA)靶材

实验装置由激光器(laser)、带孔屏(hole)、亚克力靶材(target)组成,如图2a所示,激光束穿过半透明屏上的孔,经亚克力靶材表面直接反射,在屏上



图1 实验器材

可观察反射光的干涉图样。实验装置中激光器装配在激光支架上,如图2b所示,图中的红色箭头,表明可调节螺钉,使得支架沿轴向(横轴与纵轴)移动,以调整光束方向。

## 2. 实验介绍

实验分为两部分:

第一部分:研究干涉条纹的角直径、条纹数量、相邻条纹角间距与激光功率的关系。

第二部分:研究产生干涉图案的孔径参数(直径、高度、形状)与激光功率的关系,并确定参考孔径的参数。

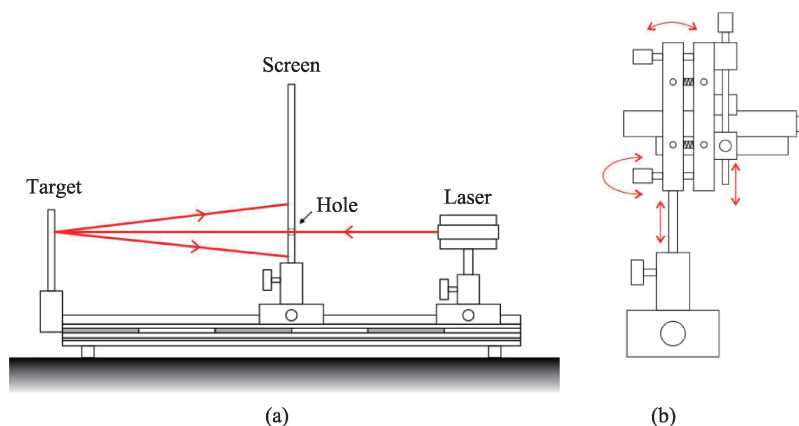


图2 (a)实验装置侧视图;(b)激光器支架侧视图

### 实验调节

1) 按图示将激光器、带孔屏和亚克力基座置于光学平台上,调整激光束,使得激光沿着平台的轴线水平通过屏上的小孔,确保光束近似垂直入射亚克力表面。

2) 用磁性支架固定亚克力板,将激光束聚焦于亚克力板表面上的贴纸并预判拍摄坐标。

注意事项1:逐步从低功率开始增加激光功率,避免强光直射眼睛。

注意事项2:确保亚克力板的表面清洁,使用提供的镜头清洁湿巾擦拭拍摄区域,勿用布料摩擦亚克力表面,以免静电吸附灰尘。

3) 将亚克力板面对激光束,移除亚克力板表面的贴纸并精确定位拍摄点,若表面脏污或光强过高,干涉条纹会畸变为椭圆形并出现额外条纹。

4) 将电源开关调至“ON”。

5) 通过调节激光二极管电压来提高光强。将万用表接入激光电路以测量直流电流和电压,量程从最高档逐步调低。电压最高可调至45V。

6) 激光束在亚克力板的非透光光滑表面反射。当光强增至某个值时,亚克力板的表面开始熔化,可通过肉眼观测熔斑。

7) 旋转激光器前端轴向螺钉以调节表面聚焦。

8) 反射光斑将呈现在激光后方的平板上,观察光斑形状和尺寸随光强变化的规律。

## 3. 实验

### A 部分 [0.8 分]

在特定功率阈值内,干涉图样会呈现出可逆性和收缩性。在激光功率低于导致材料表面烧毁的阈值条件下,其功率变化可使材料表面热形变量随之变化并具有可逆性,干涉图样呈现收缩性和可逆性,表明材料表面对激光的热响应具有弹性效果,请确定热弹性区的激光功率上限,即屈服强度对应的功率。

A.1 确定屈服强度对应的功率  $P_{max}$ 。(共0.3分)

A.2 当激光功率设定为与屈服强度对应的值时,确定最外圈亮条纹的直径。(共0.5分)

注:所谓屈服强度,是指激光功率即将烧毁材料表面时的临界光强。

### B 部分 [3.5 分]

B.1 测量最外亮纹直径及条纹数量与功率的关系,并将结果记录于答题表。(共1.5分)

B.2 绘制最外干涉亮纹直径与功率的关系图。(共1.0分)

B.3 绘制干涉条纹数量与功率的关系图。(共1.0分)

注:由于材料表面对激光的热弹性响应,本部分以干涉条纹为研究对象,通过调节激光功率,相

应地测出最外环干涉条纹直径及计数干涉条纹数量,获得数据后绘制功率-直径和功率-条纹数量关系曲线。

### C部分 [3.7分]

C.1 在恒定功率下,测量暗条纹的角宽度(第 $n$ 级与 $n+1$ 级条纹光线夹角)和可见角(第 $n$ 级条纹光线与 $x$ 轴夹角),将结果填入答题表。(共1.2分)

C.2 绘制可见角与条纹级数的线性关系图。(共1.0分)

C.3 求C.2中图线的斜率和截距。(共0.5分,评分标准:绘制线性回归曲线并计算斜率0.3分;计算截距值0.2分)

C.4 绘制角宽度与条纹级数的关系图。(共1.0分)

注:本部分以干涉条纹为研究对象。实验时,将激光功率值设为低于屈服强度的某值,测出屏幕与材料表面的距离 $L$ ,顺次测量屏幕上每个干涉暗纹的半径 $R$ ,用 $\tan(\alpha_m) = R/L$ 计算相邻暗纹的正切值,由此求出可见角 $\alpha_m$ 的值(分别用角度和微弧度),将相邻可见角求差值可得角宽度 $\Delta\alpha_m$ (分别用角度和微弧度)。

### D部分 [2.0分]

图3所示为屏上的干涉图样,利用图样可确定热变形参数。图4中蓝色曲线为形变的剖面图,红

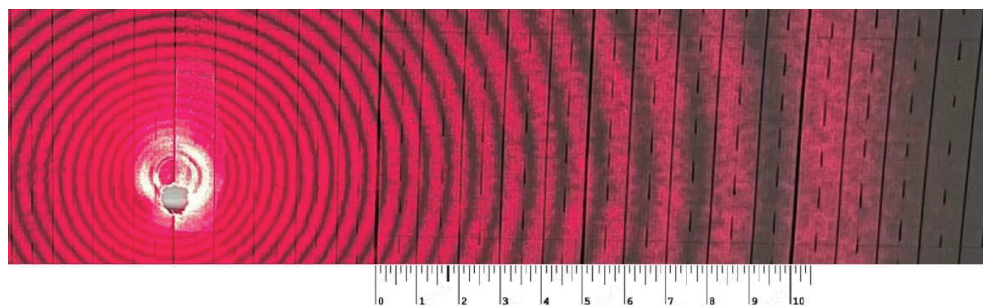


图3 屏幕上的干涉条纹图像

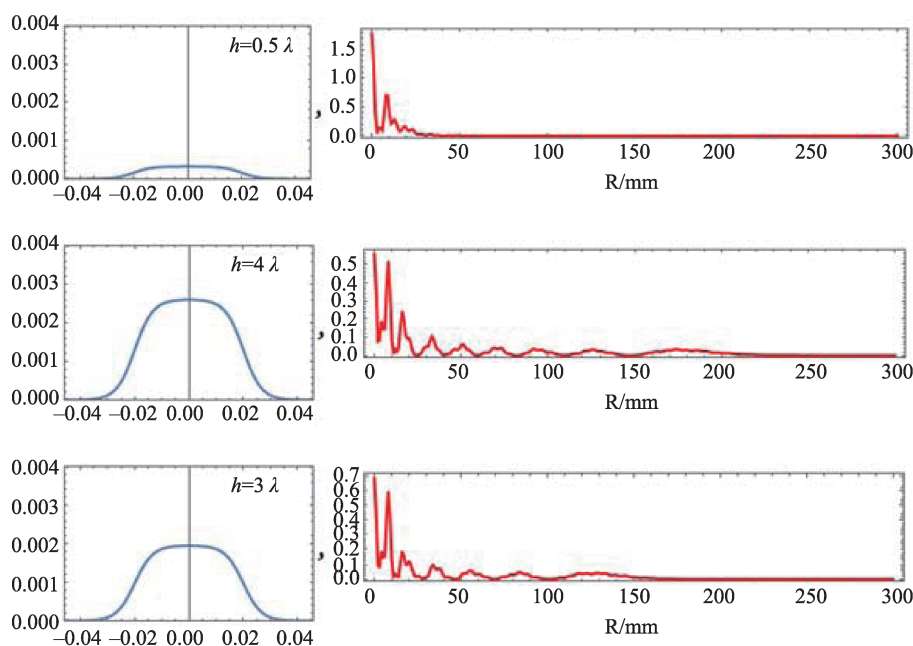


图4 不同热变形对应的干涉图案中心光强分布



色曲线干涉图样中心光强分布。光强增加时,形变高度与亮纹数量同步增加。形变高度与干涉条纹数量满足经验公式  $m=2h/\lambda$ 。

D.1 通过计数确定条纹的最高级数,确定热变形高度(以激光波长为单位)随激光功率变化的函数关系,并绘制形变高度随功率变化的图线(数据需覆盖 200 mW 至 400 mW)。(共 1.4 分)

D.2 计算以下激光功率对应的形变高度(以激光波长为单位): 200 mW, 300 mW, 400 mW。(共 0.6 分)

注:在激光功率确定的情况下,数出干涉条纹的数量  $m$ ,利用形变高度与干涉条纹数量的经验公式  $m=2h/\lambda$ ,可以计算出形变高度  $h$ (以激光波长为单位)。改变激光功率,获得每一激光功率对应的高度  $h$ ,可绘制形变高度随功率变化曲线。

## 背景知识

亚克力(PMMA)在激光热致形变中涉及热弹性效应,激光照射亚克力表面时,光能被吸收并转化为热能,导致局部温度升高,发生热膨胀,形成凸起或凹陷的微小热弹性形变。在热弹性区(可逆形变),形变高度与激光功率呈正相关;当功率超过屈服强度(临界值),材料进入塑性区(不可逆形变),甚至熔化。热形变表面相当于一个动态相位光栅,反射光因表面高度差产生光程差,导致光干涉现象。亮纹对应相长干涉,光程差为波长整数倍,暗纹对应相消干涉,光程差为半波长奇数倍。干涉条纹级数  $m$  与形变高度  $h$ 、激光波长  $\lambda$  满足经验公式  $m=2h/\lambda$ 。激光功率越大,输入能量越高,表面温度升高更显著,形变高度  $h$  随之增大,导致干涉条纹数量增多、最外圈直径扩大。在弹性范围内,  $h \propto P$ ,但在塑性区可能出现非线性响应(如热扩散效应主导)。

本实验围绕“现象观察、参数测量、规律总结、理论验证”,逐步深化学生对热力学、波动光学及实验方法的综合应用能力考察。A 部分通过调节激光功率观察干涉条纹的可逆性,要求学生理解材料

热弹性极限,确定临界功率  $P_{\max}$ ,考查学生的基础操作与临界状态判定;B、C 部分通过测量条纹直径、数量与功率的关系,绘制图表,考察数据可视化能力及对  $h \propto P$  的物理直觉;结合小角度近似,探究角宽度与条纹级数的线性关系( $\theta \propto m$ ),验证波动光学公式,考察数据采集与关系建模。D 部分利用经验公式  $m=2h/\lambda$  反推形变高度,结合功率变化建立  $h(P)$  函数,强化理论联系实际的能力,深化拓展应用能力。题目考核要点包括:激光功率调节、光学元件对准、干涉条纹观测与记录等实验操作技能及逐步增加功率、避免强光直射等安全操作意识;绘制关系曲线、线性回归分析的数据分析能力;结合热弹性理论解释功率阈值现象、用干涉公式推导形变高度,验证经验公式的适用性的理论应用能力;识别实验误差来源、正确处理有效数字与单位换算(如波长单位统一形变高度)的误差分析能力。

\* \* \* \* \*

欢迎读者朋友参与“物理奥赛”系列专题的有奖竞答活动,并在答案公布前将您的解答发送至 [aosai@ihep.ac.cn](mailto:aosai@ihep.ac.cn) 邮箱。对于参与并答对每期题目的前 20 名读者,编辑部将赠阅 1 年《现代物理知识》杂志。

