

碳纤维单丝径向高温热膨胀系数 激光衍射法测试解决方案

Solution of Measuring Thermal Expansion Coefficient of Carbon Fiber Monofilament At Radial High Temperature by Laser Diffraction Method

摘要：碳纤维单丝热膨胀系数是碳纤维复合材料设计、生产与可靠性和寿命评估的重要参数，本文针对单丝径向高温热膨胀系数测试这一难题提出了相应的解决方案。解决方案的核心内容是基于激光衍射法和高温辐射加热，并采用衍射轮廓拟合技术以及相应的校准、真空温度控制等技术，可实现几个纳米的测量分辨率。此解决方案不仅可以测量各种粗细单丝的直径及其热膨胀，还可以拓展应用于细丝的直径分布、截面形状和径向热膨胀测量。

1. 项目背景

随着碳纤维增强复合材料应用的扩大，其设计也变得越来越精密。温度变化引起的热应力是复合材料设计中需要考虑的重要因素之一，而碳纤维的热膨胀系数是控制热应力的基本物理性能值。另外，碳纤维的热膨胀系数不仅是复合材料设计中的重要参数，也是预测制造工艺、可靠性和寿命的重要参数。

由于碳纤维一般具有很强的方向性，其热膨胀系数主要包括轴向和径向热膨胀系数。本文将针对1~10微米直径的碳纤维单丝，提出径向热膨胀系数测试方法，特别是提出高温下径向热膨胀系数测试的解决方案。

2. 激光衍射法测量原理

在假设碳纤维单丝是直径均匀、截面积形状为圆形细丝的前提下，按照热膨胀系数的定义，碳纤维单丝高温热膨胀系数的测试可以归结为不同温度下单丝直径的测量问题，具体测试涉及到单丝温度和单丝直径的精确测量。

对于微小细丝直径的测量，只能选择非接触光学测量方法。可选择的测试方法主要有显微镜观测法、光学投影法和激光衍射法，但由于碳纤维测试需要涉及到高温和真空环境，显微镜直接观察方法很难实现较高温度，而投影法则是无法达到纳米量级的测量精度，因此本项目将选择激光衍射法，以实现纳米精度的单丝直径测量。

激光衍射测量原理如图1所示。单色激光垂直照射被测细丝后在焦平面上形成衍射图形，通过对图形参数等的测量，可准确测得细丝直径。

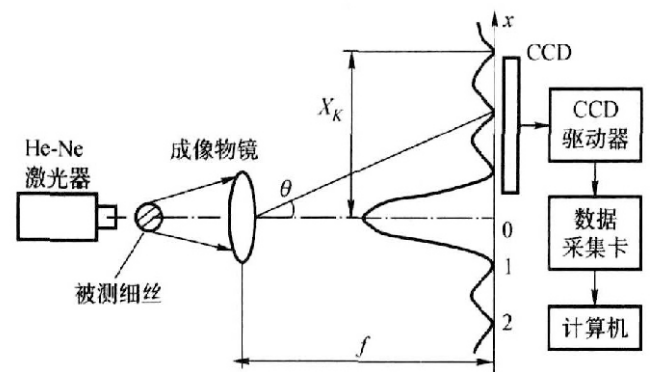


图1 激光衍射法细丝直径测量原理图

3. 细丝径向热膨胀测量装置

基于激光衍射法的细丝径向高温热膨胀系数测量装置结构如图2所示。整个测量装置包括水冷真空系统、样品装置、温控加热装置和激光衍射测量装置四部分。

(1) 水冷真空系统

真空系统由水冷真空腔体内、真空泵和真空度控制系统构成。在整个高温测试过程中，需要对真空腔体抽真空，以便在整个高温测试过程中形成真空环境避免碳纤维细丝样品的氧化或烧断。真空腔体壁内通循环冷却水以对内部高温形成热防护。同时还需对循环冷却水温度和腔体内部真空度进行精密恒定控制，使得腔体温度和内部真空度所引起的腔体变形和光学窗口倾斜始终保持恒定和可重复。

(2) 样品装置

采用悬空水平方式固定被测细丝碳纤维样品，细丝样品一端采用螺接压紧方式固定，另一端经过滑动装置采用砝码拉近，通过砝码重量提供的微小张力始终使细丝样品处于水平拉直状态。对于不同强度和粗细的碳纤维细丝，可通过更换砝码来提供不同的拉紧张力。

(3) 温控加热装置

采用细管加热炉对整个样品进行辐射加热，测试过程中的温度变化按照步进台阶式形式变化，在每个设定点温度恒定后再进行激光衍射测量。这种加热方式的优点是用加热炉内的温度代替被测样品温度，由此可避免对细丝样品温度进行直接测量的困难性。

(4) 激光衍射测量装置

激光衍射测量装置主要由激光源、衍射图像传感器和计算机图像分析系统组成。激光源和图像传感器分别水平布置在真空腔体的两侧，激光束垂直照射在被测细丝上，所形成的衍射图像由传感器接收。

4. 衍射轮廓的高精度测量

细丝直径测量中采用激光衍射装置和图像传感器获得的衍射轮廓如图3所示。纤维直径根据测量衍射轮廓的第一个暗条纹之间距离，并有衍射公式计算获得。但如果直接采用图像传感器的固有位置分辨率，则只能获得10nm左右的直径测量分辨率，这显然无法获得足够高的直径变化检测精度。

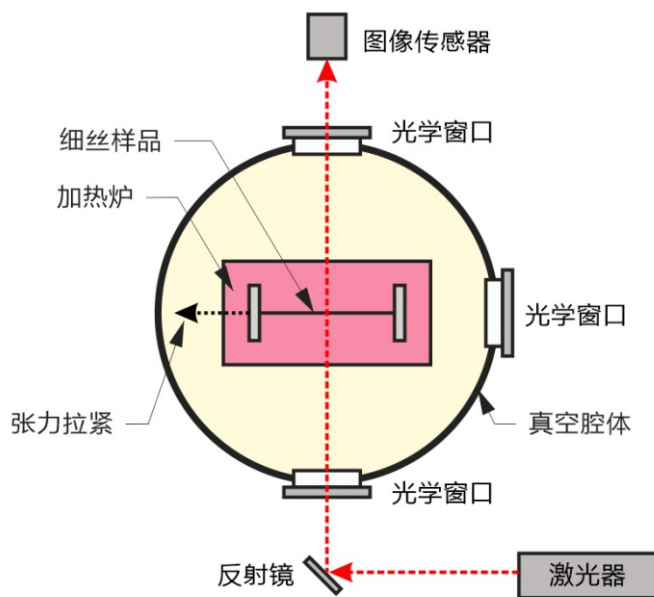


图2 单丝碳纤维高温径向热膨胀系数激光衍射法测量装置结构示意图

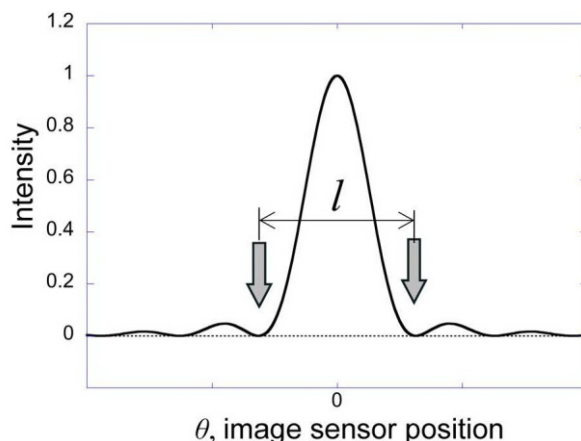


图3 图像传感器衍射轮廓示意图

为进一步提高细丝直径测量的分辨率，本文提出了以下几方面具体措施：

(1) 对图3所示的衍射轮廓进行细分，具体细分技术是对衍射轮廓曲线进行参数拟合，拟合中需考虑衍射光以及背景光强度，如光学元件和窗口的散射光以及样品在高温下发出的光。

(2) 采用已知直径的细丝对成像物镜的焦距进行高精度标定，减小系统误差。

(3) 在CCD前增加滤光片，在成像物镜前增加一平行于衍射方向的长条状光阑。

通过上述措施，可将激光衍射法细丝直径测量的分辨率提高到几个纳米范围内。

5. 总结

本文所述解决方案，除了可以实现1~10微米量级粗细的碳纤维单丝直径和热膨胀系数测试之外，还具备以下几方面的测试能力：

(1) 本文所述解决方案在设计的同时，还同时考虑了碳纤维轴向方向上热膨胀系数测试功能的实现，即采用激光干涉法测试细丝样品在轴向方向上收缩和膨胀过程中的位移变化。在真空腔体形状和空间尺寸上都考虑了激光干涉法位移测量装置的布置，采用相同的加热和测温装置也可提供碳纤维细丝轴向热膨胀所需的温度变化和测量。

(2) 由于具有几个纳米的超高分辨率，通过增加扫描装置，此解决方案可以用于碳纤维单丝外径分布和外径形状的测量。

(3) 为各种粗细的线状材料外径测量提供了一种高精度的激光衍射测量方法，非接触光学测试方法和高温加热能力，也可推广应用到低温范围内的测试应用。