

航空轮胎激光无损检测技术

曾启林¹, 盛保信¹, 孙旭², 王志成³, 黄伟彬⁴

(1. 曙光橡胶工业研究设计院, 广西 桂林 541004; 2. 北京瀛海联合科技有限公司, 北京 100044; 3. 中原工学院, 河南 郑州 450007; 4. 广州华工百川自控科技有限公司, 广东 广州 510640)

摘要:介绍两种主要的航空轮胎激光无损检测技术——激光全息轮胎无损检测技术和激光数字错位散斑轮胎无损检测技术的工作原理、检测设备、检测方法和缺陷判定, 以及采用这两种检测技术制造的检测设备及其应用情况。

轮胎激光无损检测技术主要用于航空轮胎和高速度级轮胎内部脱层和气泡的检测。

关键词:航空轮胎; 激光全息; 错位散斑; 无损检测; 内部缺陷

中图分类号: V226+.8; TM930.12+6 文献标识码: B 文章编号: 1006-8171(2005)02-0112-05

1 航空轮胎激光无损检测的重要性和必要性

飞机在起飞和降落时, 轮胎运行速度高, 负载大, 如果其内部有缺陷存在, 很容易因剪切应变、屈挠生热而产生应力集中, 使缺陷不断扩大。若缺陷存在于胎面胶中, 很容易发生甩胎面; 若缺陷存在于胎体中, 很容易发生爆胎, 这两种情况均可能导致飞机发生灾难性事故。

美国航空航天局规定, 民用航空轮胎必须经无损检测后才能出厂, 每次翻新前亦要对胎体进行无损检测^[1]。我国针对航空轮胎和翻新航空轮胎分别制定了航空轮胎标准(GB 9745—1988)和翻新航空轮胎标准(GB 13651—1998)以及军用航空轮胎标准(GJB 108B—1998), 其中均规定无损检测为必检项目。因为无损检测是避免存在内部缺陷的轮胎出厂的重要方法, 也是保证航空轮胎质量最有效的手段之一。

航空轮胎的内部缺陷主要是脱层和气泡, 这也是航空轮胎致命的内部缺陷。脱层和气泡是在轮胎制造及使用过程中产生的。在轮胎制造过程的压延和成型等工序中, 如果胶与胶、帘布与胶之间夹杂油污或污垢, 或者帘布与胶之间的气体没有完全排出, 就会导致轮胎内部产生脱层和气泡。新轮胎使用一段时间后, 胎体内部粘合不牢处也会在剪切应力的作用下脱开, 形成新的脱层。脱层和气泡通过常规检测手段几乎无法检测出来,

只有采用激光无损检测技术才行^[2]。

航空轮胎激光无损检测技术包括激光全息轮胎无损检测技术和激光数字错位散斑轮胎无损检测技术。激光全息技术较早应用于航空轮胎无损检测, 之后才发展到激光数字错位散斑技术。本文将对这两种技术进行介绍并加以对比。

2 激光全息轮胎无损检测技术

激光全息轮胎无损检测技术是采用激光对轮胎进行检测的一种激光全息干涉计量技术。它是一种非接触和非破坏性的检测技术, 通过适当的加载手段测量物体微小位移及应变。其检测方法是选定一个相干的 He-Ne 激光器作光源, 如图 1 所示进行光路布置, 通过该装置可以得到被检部位的全息干涉图像。

在真空加载使轮胎形变前后进行两次曝光, 使轮胎加载后的相位和光强记录在全息干板上形

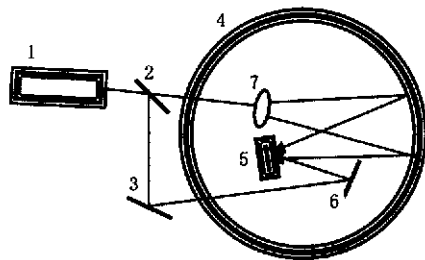


图1 激光全息干涉原理

1—激光器; 2—分光器; 3—反射镜; 4—轮胎;

5—干涉仪像机; 6—反射镜; 7—扩束镜。

作者简介:曾启林(1964-), 男(壮族), 广西桂林人, 曙光橡胶工业研究设计院高级工程师, 在读硕士研究生, 主要从事轮胎激光无损检测技术的研究与开发。

成全息干涉图(见图2)。全息干板经过显影、定影、水洗、风干后在激光再现系统下再现,就可观察到轮胎形变后的干涉条纹。条纹密表示轮胎形变大,条纹疏表示轮胎形变小,条纹平滑均匀排布表示轮胎形变正常^[3]。依据缺陷理论和经验可知,缺陷的干涉条纹必然是独立存在的,其圆形外缘与正常干涉条纹有界线,圆环中条纹的疏密程度表示形变大小^[4]。同时,缺陷离表面的深浅程度与圆环中条纹的粗细有关,条纹粗的缺陷离表面远,条纹细的缺陷离表面近。通过全息干涉图的再现图像可以很容易地判读出轮胎内部缺陷的位置和大小。缺陷的形变大小与干涉条纹的关系如图3所示。

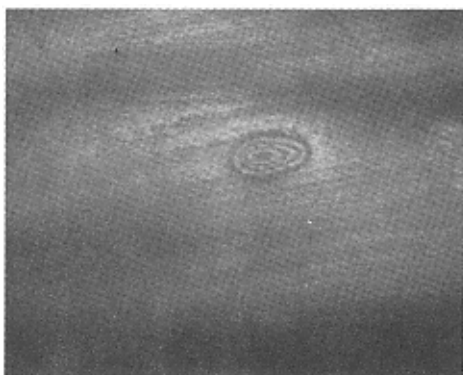


图2 轮胎内部缺陷全息图像

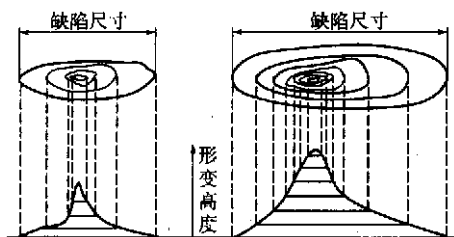


图3 缺陷的形变大小与干涉条纹的关系

我国自行研制生产的首台激光全息轮胎无损检测仪出自曙光橡胶工业研究设计院。它主要用于检测航空轮胎内部的气泡和脱层缺陷,也可以用于检测各种汽车轮胎。该检测仪有 S-JQL-1500 和 S-JQL-800 两个型号。

S-JQL-1500 型激光全息轮胎无损检测仪(外形见图4)适用于外直径小于 1 500 mm、内直径大于 300 mm 的轮胎,可检测轮胎上胎肩到下胎肩的部分,可用于波音系列飞机用轮胎的检测,灵敏度为 $\phi 1$ mm,检测速度可达每小时 5 条。该检

测仪由激光干涉仪、真空系统、防震系统、升降系统和电气控制系统构成,采用全息干板作为记录介质,操作简便,检测灵敏度高。对检测轮胎内部的分层、脱粘和气泡等缺陷特别有效。该检测仪可根据不同的轮胎规格采用不同的加载压差,并应用不同压差来判别不同深度的缺陷。一次检测面积可达 600 mm $\times$ 600 mm,标准配置时只需 5 次即可检测完整条波音 737 主轮胎。S-JQL-1500 型激光全息轮胎无损检测仪也可用于汽车轮胎和工程机械轮胎的检测。

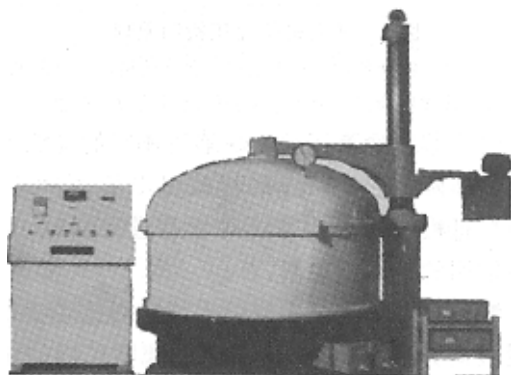


图4 S-JQL-1500 型激光全息轮胎无损检测仪

S-JQL-800 型激光全息轮胎无损检测仪适用于外直径小于 800 mm、内直径大于 100 mm 的轮胎,可检测轮胎上胎肩到下胎肩的部分,灵敏度为 $\phi 1$ mm,检测速度可达每小时 10 条。该检测仪由激光干涉仪、真空系统、防震系统、机械系统和电气控制系统构成,操作简便,检测灵敏度高,对检测轮胎内部的分层、脱粘和气泡等缺陷特别有效。S-JQL-800 型激光全息轮胎无损检测仪主要用于直升飞机轮胎、军用飞机轮胎和高速度级轿车轮胎内部缺陷的检测。

3 激光数字错位散斑轮胎无损检测技术

激光数字错位散斑技术是基于散斑原理,利用轮胎变形前后空间散斑分布的变化来描述轮胎形变的^[5]。与全息干涉检测不同的是,错位散斑技术所测量的是轮胎形变的一阶导数,对刚体运动不敏感,同时大大降低了对测试环境,尤其是防震性的要求,从而使这项检测技术脱离了实验室,进入到工业环境的实际应用当中,并可广泛应用于轮胎生产的在线检测。其检测原理如图5所示。

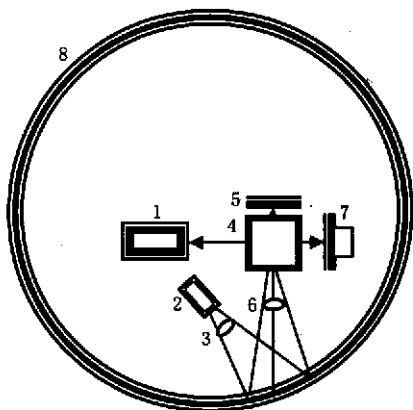


图5 激光错位散斑检测原理

①CD; 2—激光器; 3—扩束镜; 4—分光棱镜; 5—反射镜;
6—成像物镜; 7—带压电陶瓷的反射镜; 8—轮胎。

错位散斑检测技术对缺陷所进行的检测是基于对物体两个形变状态的比较得出的, 它可以采用与全息检测相同的方式对轮胎进行加载, 目前较为常用的是真空加载。

激光数字错位散斑轮胎无损检测技术在检测中通过高分辨率的 CCD 摄像系统和精确的相移技术以及相位同步算法, 将轮胎受力变化过程中的应变信息以相位图的形式实时记录下来, 再应用光电转换技术将光信号转换为数字信号, 然后通过图像处理软件和图像分析软件进行计算和分析, 从而得到描述轮胎形变一阶导数的相位图, 通过自动计算这些畸变部位的面积并实时显示, 使得轮胎内部缺陷被准确地检测出来并清晰地显示在屏幕上^[6]。图6和7所示分别为轮胎胎冠和胎侧部位的检测图像。由图6和7可以清晰地看到缺陷所在的部位及其分布。

电子错位散斑技术采用了诸多数字技术, 如将原有的感光干板变为高分辨率的 CCD 像机和采用电子文档的方式保存等, 改变了原来既费时(底片显影、定影等化学处理)又费钱(购置感光干板、化学药品、显影定影冲洗、保存设备、环保处理费), 而且保存和检索记录繁琐的光学记录方式, 同时很好地解决了检测识别滞后问题, 使检测变为一个实时过程, 为实现在工业化环境中的广泛应用铺平了道路。

在检测结果分析和处理方面, 由于采用了相移技术, 因此得到的相位图不同于传统的全息图, 它能够精确地给出图像中每一点的相位值。

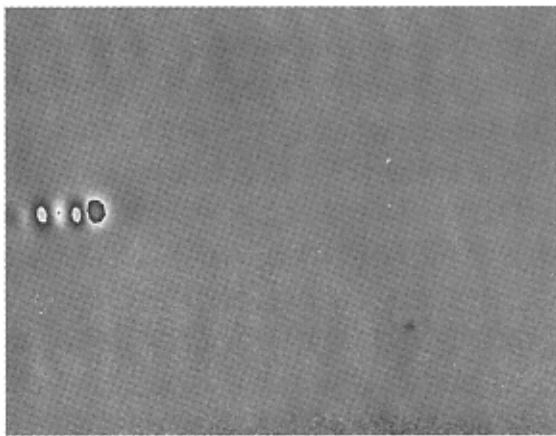


图6 激光错位散斑检测到的胎冠缺陷图像



图7 激光错位散斑检测到的胎侧缺陷图像

错位散斑缺陷图与全息缺陷条纹图有所不同。全息缺陷条纹平滑细致, 全息照片的干涉图样具有非常精细的结构, 分辨率一般较高, 但容易受外界影响。错位散斑缺陷图检测的是被测表面形变的一阶导数, 干涉图样呈典型的蝴蝶状条纹(见图8), 且不易受外界的影响。虽然这两种检测图像有很多的不同, 但是也有相同之处, 在出现缺陷的地方, 其干涉条纹必然都是独立存在的, 其圆形外缘与正常干涉条纹有界线。圆环中条纹的疏密程度表示形变大小, 条纹密的形变大, 反之, 形变就小。同时, 缺陷与表面的距离与圆环中条纹的粗细有关, 条纹粗的缺陷距表面远, 条纹细的缺陷距表面近。通过计算机图像分析软件很容易将轮胎的缺陷位置及大小计算出来。

国外的激光数字错位散斑轮胎无损检测技术已非常成熟, 轮胎行业应用该检测技术已进入普

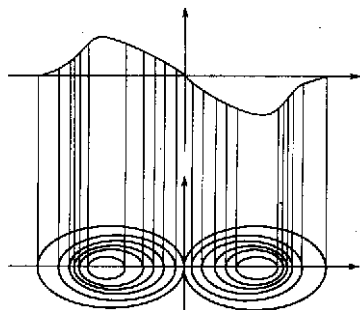


图8 错位散斑的蝴蝶状条纹

及阶段,德国和美国是研发设计和推广应用该技术的先驱。图9所示为德国 Steinbichler 公司专为轮胎行业设计生产的全场快速非接触非破坏实时显示激光数字错位散斑轮胎无损检测仪。该检测仪采用自动装卸胎系统、轮胎自动识别和定位系统。其检测系统由高分辨率的 CCD、剪切元器件、大功率半导体激光器及图像处理与分析软件构成,电气控制系统由 PLC、各种传感器及控制软件构成。该系列的检测仪有多种规格型号,其中针对航空轮胎检测所开发的是 Intact 1600-AC 型。它可对整条轮胎进行检测,一个扫描周期的检测可在 2 min 内完成,缺陷分辨率为 1 mm,并可自动识别缺陷位置和大小,检测轮胎最大外直径为 1 600 mm,最大断面宽度为 600 mm。由于该检测仪采用单检测头,检测头水平移动距离可达 1 400 mm,对于内直径小于 200 mm 的直升飞机轮胎,可采用外拍的方式,因此 Intact 1600-AC 型适用于外直径小于 1 600 mm 的任何航空轮胎的检测,对波音系列飞机用轮胎尤为适合。主机系统完全自动化,单检测头可对轮胎规格进行内拍和外拍,检测头可做 4 个自由度的运动(垂直、水平、旋转和倾斜);软件具有图像处理和析功能,检测结果实时显示,也可以以电子文档形式保存或进行打印。该检测仪具有轮胎中心自动定位和轮胎自动识别功能,检测结果能将轮胎缺陷自动识别和定位,设备能进行故障报警和自动诊断。

Intact 1200 型激光错位散斑轮胎无损检测仪适用于外直径小于 1 250 mm 的轮胎检测,由于该检测仪采用双检测头,因此可以将检测速度提高 1 倍。对于要求全检的航空翻新轮胎,该检测仪比较适用,检测速度可达每小时 50 条。



图9 轮胎错位散斑轮胎无损检测系统

4 激光全息技术与激光散斑技术的比较

激光全息轮胎无损检测技术与激光数字错位散斑轮胎无损检测技术都属于激光技术在轮胎无损检测方面的最新应用。

激光全息轮胎无损检测技术在轮胎检测理论、技术、全息记录介质、图像再现、缺陷判定等方面都有很大发展,并成熟地应用于生产检测之中。航空轮胎全息照相检测方法国家标准也于 1993 年开始实施。激光全息轮胎无损检测技术主要应用于航空轮胎、航空翻新轮胎的检测,是其它常规无损检测手段无法比拟和替代的。由于采用严格的防震措施和全息记录介质,使干涉条纹的分辨率可达 $3\,000\text{ mm}^{-1}$,分辨率达到 $1/2$ 激光波长,对轮胎缺陷的检测灵敏度极高。

激光数字错位散斑轮胎无损检测技术是一种对轮胎表面进行无损全场检测的新型技术,是集现代激光技术、散斑干涉技术、图像采集及处理技术、计算机技术、精密测试技术于一体的计量检测技术。它具有实时、全场非接触无损、机构简单、无需防震装置等优点,被广泛应用于轮胎生产检测线上。由于采用相移技术,检测结果不受轮胎刚体运动的影响,因此检测仪无需防震装置,为应用于生产检测线提供了技术基础。同时,半导体激光技术的飞速发展使激光器体积越来越小,检测头小型化成为可能,检测头集激光器、扩束镜、CCD、相移器和成像物镜于一体,使检测头运动自如,可对轮胎任何部位进行检测。计算机图像处理及分析系统使轮胎缺陷可直接显示在屏幕上,

并且能够计算出缺陷大小,直观快速^[7]。
激光全息与激光散斑检测仪比较如表 1 所示。

表 1 激光全息技术与激光散斑技术的检测比较

项 目	激光全息检测仪	激光散斑检测仪
检测原理	激光全息干涉技术	激光错位散斑技术
缺陷	脱层、气泡	脱层、气泡
测量分辨率	1/2 激光波长	1/10 激光波长
缺陷分辨率/mm	1	1
检测范围	上胎肩到下胎肩	整条轮胎
记录介质	全息干板	CCD
扫描周期/min	5	2
价格	低	高
耗材	有	无
日常费用	高	低

5 国内外应用激光轮胎无损检测技术的情况

国外航空轮胎生产厂家已普遍将激光无损检测仪用于航空轮胎和航空翻新轮胎的检测。米其林和固特异等大型轮胎企业是应用该种检测仪的大户。一般国外航空翻新企业均配备两台激光无损检测仪,一台用于翻新前检测,淘汰内部缺陷较严重的轮胎;另一台用于翻新后检测,保证到达客户手中的轮胎是合格品。

在国内,银川橡胶厂(现银川佳通轮胎有限公

司)1992 年率先引进美国生产的激光全息轮胎无损检测仪。到 2004 年,已有沈阳三橡轮胎有限公司、上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司和曙光橡胶工业研究设计院分别引进了德国生产的激光错位散斑轮胎无损检测仪。

曙光橡胶工业研究设计院具有生产激光全息无损检测仪的技术力量。自行研制的检测仪应用于航空轮胎产品质量检测已有 15 年的历史。

参考文献:

[1] 高孝恒. 翻新轮胎的无损检验技术进展[J]. 橡胶技术与装备,2002(9):9-12.
[2] 曾启林,熊显名,陈金球. 激光全息无损检测仪的发展前景[J]. 中国橡胶,1999,15(6):11.
[3] 陈积懋,张 颖. 复合材料及其构件的新型综合无损检测技术[J]. 无损检测,2002,24(6):253-271.
[4] 刘怀喜,张 恒,马润香. 复合材料无损检测方法[J]. 无损检测,2002,24(12):631-634.
[5] 于 光,王树国. 数字散斑干涉技术及应用[J]. 激光技术,2002,26(3):237-240.
[6] 耿荣生,郑 勇. 航空无损检测技术发展动态及面临的挑战[J]. 无损检测,2002,24(1):1-5.
[7] 秦玉文,戴嘉彬,陈金龙. 电子散斑方法的进展[J]. 实验力学,1996,11(4):410-416.

第 13 届全国轮胎技术研讨会论文

Non-destructive laser inspection of airplane tire

ZENG Qi-lin¹, SHENG Bao-xin¹, SUN Xu², WANG Zhi-cheng³, HUANG Wei-bin⁴

(1. Shuguang Research and Design Institute of Rubber Industry, Guilin 541004, China; 2. Beijing Yinghai United Technology Co., Ltd, Beijing 100044, China; 3. Zhongyuan Institute of Technology, Zhengzhou 450007, China; 4. Guangzhou Huagong Baichuan Automatic Control Technology Co., Ltd, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Two non-destructive laser inspection techniques of airplane tire——non-destructive laser holography inspection and laser digital stagger scatter spot inspection are described in terms of the work principle, inspection equipment, inspection method and the defect judgement. The non-destructive laser inspection is mainly used to detect the seperation and blister in airplane tire and high speed tire.

Keywords: airplane tire; laser holography; stagger scatter spot; non-destructive inspection; interior defect

启事 第 10,11,13 届全国轮胎技术研讨会论文集以及第 1,2 届全国橡胶工业用织物和骨架材料技术研讨会论文集尚有部分剩余,每本售价 100 元。如有需要者,请与本刊编辑部乔晓霞女士联系。电话:(010)68156717