

# 球压试验压痕尺寸的测量技术现状及发展趋势

苏君平 张建寰

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 从球压试验压痕尺寸的传统测量方法、压痕尺寸测量的新技术两个方面对该领域的国内外研究进展进行了综述,总结了有代表性的研究成果并指出其未来的发展趋势。

**关键词:** 球压试验 压痕尺寸 测量 图像处理

**中图分类号:** TB9 **文献标识码:** A

## Present Situation and Developmental Tendency of ball-pressure test indentation size Measurement

SU Jun-ping ZHANG Jian-huan

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

**Abstract:** The present status of ball-pressure test indentation size measurement research is summarized through the following two aspects: the conventional ball-pressure test indentation size measuring method and new techniques of ball-pressure indentation size measuring. Finally, trend of development is pointed out.

**Key words:** Ball-pressure test; indentation size; measurement; image processing

### 引言

球压试验是许多产品安全标准中考核热塑材料的耐热特性的重要实验,也是进行实验室能力验证时常用的实验。国家强制性标准GB4706.1《家用和类似用途电器的安全 第一部分:通用要求》第30.1条规定“其恶化可能导致器具不符合标准要求的非金属材料制成的外部零件、用来支撑带电部件(包括连接)的绝缘材料零件以及提供附加绝缘或加强绝缘的热塑材料零件,应充分耐热”。因在高温条件下,非金属材料、绝缘材料的结构特性会发生本质的变化,如熔融或变软,使机械强度急速下降,直接影响电器产品质量及使用安全。产品安全性能主要由所使用的材料及器具结构所决定。耐热性能是材料其中的一个重要指标,通过对材料进行球压试验来检查其合格性,其结果的准确性直接影响判定产品是否符合安全要求。随着现代科技的发展,对球压试验压痕测量技术进一步研究有着十分重要的意义。下面就球压试验及其压痕尺寸测量技术的最新研究进展做一介绍。

### 1 球压试验概要

标准[1]要求,将球压试验装置(如图1)和样品支架一并放入加热箱。加热到标准规定的温度后将试验样品放置在样品支座上大约中心位置处,再将压力球放置在样品中心位置处并在规定时间内施加一个 $20\text{N} \pm 0.2\text{N}$ 的向下作用力,然后从样品上移去压力球,在10s内将试验样品浸入温度为 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 水中保持 $6\text{min} \pm 2\text{min}$ 时间,然后从水中取出试验样品,在之后的3min内去除水分并测量如图2、图3所示的压痕横跨最大尺寸 $d$ ,如果尺寸 $d$ 不超过 $2.0\text{mm}$ 则表示合格。

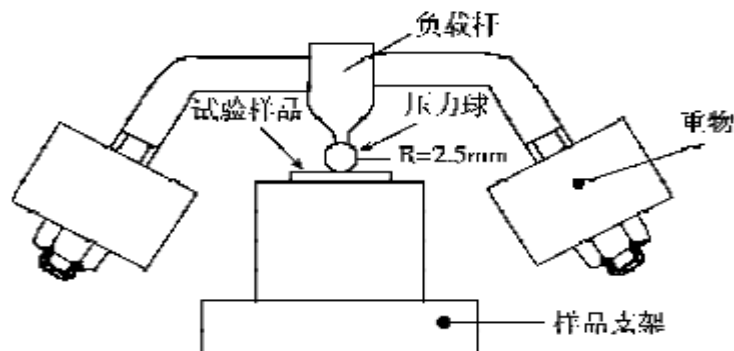
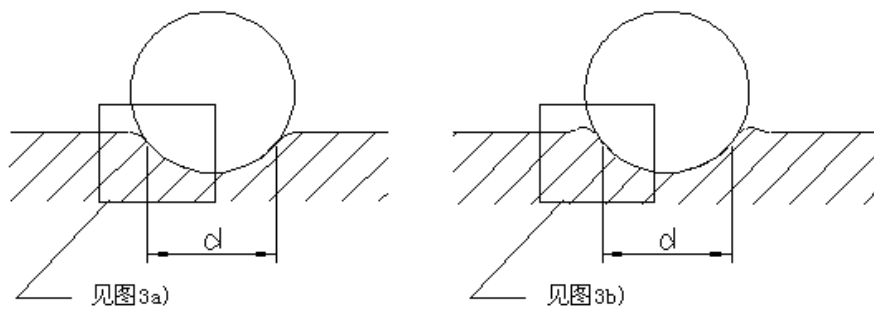


图1 球压试验装置



(a) 球压试验材料变形示例1

(b) 球压试验材料变形示例2

图2 圆形压痕图



图3 局部放大图

## 2 传统测量方法

球压试验中最重要也是最难的一步就是压痕测量<sup>[5]</sup>。理论上：压痕直径为两切点最大间距，切点是球压装置末端的球面于压痕凹面的几何相切，压痕直径的确定依赖于压痕边界的确定。几十年来，人们发明了许多传统测量方法，文献[2]提出了一种先测量压入深度再通过计算求得接触半径的测量方法：首先用外径千分尺测量钢球与样品的高度 $h_0$ ，按规定条件完成试验，取出样品冷却后，再测量钢球与样品

的高度 $h_1$ ，如图4所示。经计算压痕深度 $r_2=h_0-h_1$ ， $r_1=d/2-r_2$ ，进而求的压痕直径 $X=2\sqrt{(\frac{d}{2})^2-r_1^2}$ 。标准[3]

详细定义了球压试验的材料要求、步骤和考核条件，并且明确规定了压痕的考核是以钢球接触点为准。测量装置应具有10倍到20倍的光学放大倍率，并与经过校准的网络或十字叉丝线的测量台一起使用，但是标准中并没有就如何判定钢球接触点给出一个简单而又具体的操作方法。即使在后来的CTL391决议中，也没有就这个问题给出答案。文献[4]在对低压电器球压试验研究的基础上提出了两种确定压痕边界的方法：①用有色印油涂在压痕上，显出压痕边界或在样品压痕面蒙一层薄的白纸，用铅笔在纸上轻轻描出边缘痕迹，用读数显微镜测量最大值，最小值，然后取中间值作为测试结果。②从认证认可角度，采取最严酷的办法：取其最大压痕，作为最终结果（在目前的国际比对试验中，基本采用这种方法）。实际的压痕必然在这个最大值内。但从材料的耐热性能来说，这样测得的结果明显降低了其耐热性能<sup>[5]</sup>。文献[6]建立了球压试验数学模型、分析不确定度，得出了球压试验不确定度的评定过程，同时讨论了对球压试验结果影响较大的一些因素，分析了影响结果的主要因素和如何避免出现误差的方法。除此之外，也有文献提及可以用切割投影等方法来判定。

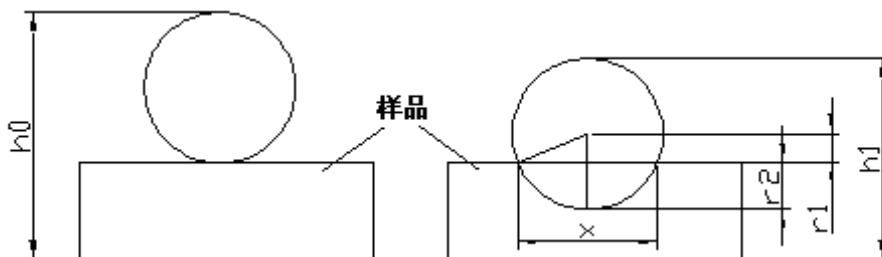


图4 传统测量方法示意图

### 3 压痕尺寸测量新技术

近二十余年来,激光技术、精密计量光栅制造技术、计算机技术以及图像获取和处理技术迅猛发展,并已经开始应用到高精度测量领域,形成了新的测量技术,这将为球压试验提供了更为有利的分析手段。下面重点介绍反射法和图像测量法。

#### 3.1 反射法

凹镜具有聚光的作用(图5),它能够将照射到它表面的平行光线汇聚到焦点。而球压试验中钢球是一个标准的球形,球压压痕和钢球接触的地方也是一个球面,可以看做是一个理想的凹镜,在强光的照射下,球压压痕能够呈现出聚光的特性来。鉴于压痕的这种特性,广州北德技术服务有限公司和中国赛宝(总部)实验室提出了一种测量压痕的新方法,如图6所示的下半部分是球压压痕在强光照射下,在读数显微镜中的景象。A区是钢球接触的地方,是理想的凹镜,表现出极好的聚光特性,和周围对比显得非常光亮。C区是材料未变形的区域,对光线只是普通的反射,呈现出材料本来的光泽。B区则是由于球压压痕导致变形的过渡区域,它并不是真正的压痕。B区由于是球面凹陷区和平面的过渡区域,其变形有可能形成一定的凹面或凸面,但是其反射特性是明显和A区不同的,呈现出光晕的情形。因此,光亮的A区(即真正的压痕)和光晕式的B区(即压痕导致的变形)的边界可以很清晰地区分开来。采用以上方法,可以用读数显微镜、卤素灯和荧光笔等这些成本低廉仪器设备准确地测量球压结果<sup>[7]</sup>。

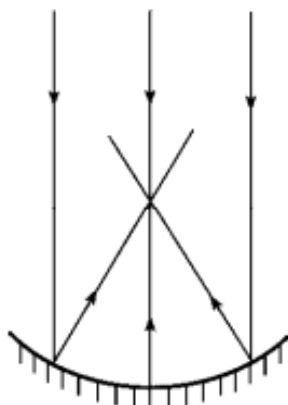


图5 凹镜反光示意图

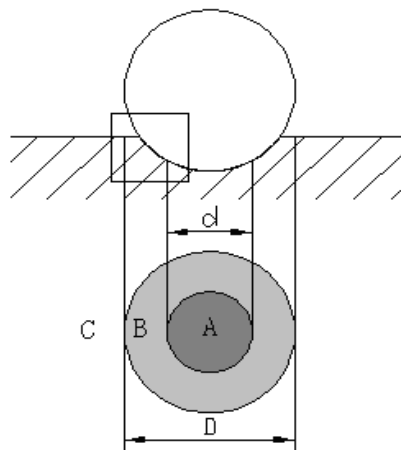


图6 压痕反射示意图

#### 3.2 图像测量法

所谓的图像测量<sup>[8]</sup>就是测量被测对象时,把图像当作检测和传递的手段或载体加以利用的测量方法,其目的是从图像中提取有用的信号。计算机技术的发展,使得利用CCD相机获取压痕图像,通过计算机自动测量压痕尺寸实现对压痕尺寸的精确测量成为可能。文献<sup>[9]</sup>采用顶部平行光源,固定焦距镜头和分辨率为 $768 \times 572$ 的通用面阵CCD相机通过控制光源强度,综合分析压痕图片特点,使用图像分割技术完成了对压痕圆直径的测量。测量系统的控制和处理软件选NI公司LabVIEW编写,Vision Development Module为压痕尺寸准确测量提供保障。文献<sup>[10]</sup>提出了一种采用基于计算机视觉的图像测量技术进行压痕尺寸测量的方法,它通过对试件压痕进行图像采集、特征提取、信息处理等过程来实现压痕尺寸的测量。测量过程通过软件系统来完成。德国联邦物理技术研究所开发了一种沿光轴方向的具有纳米分辨率的压痕成像系统。该系统基于层析全场显微术,即在常规光学显微镜的基础上引入结构光照明,应用移相方法得到样品的三维形貌。成像系统样机的测量结果表明,系统的纵向分辨率可达 $2\text{nm}$ ,可以高精度地实现压痕的三维形貌测量,并量化揭示纳米压痕测试中常见的“坟起(pile-up)”及“沉入(sink-in)”现象。该系统有助于进一步研究压痕计量方法并降低计量的不确定度<sup>[11]</sup>。中国一航北京长城计量测试技术研究所提出了基于数字图像处理的压痕直径测量方法。利用CCD相机获取压痕图像,通过图像分割、目标区域处理、压痕圆拟合等步骤完成图像处理,由此实现对压痕尺寸的自动精确测量。采用图像处理

技术计算压痕直径,使得压痕直径测量的自动化程度得到了明显的改善,提高了测量效率<sup>[12]</sup>。文献<sup>[13]</sup>将Matlab与VB结合起来进行混合编程,开发出一种复杂的、界面友好的人机交互压痕图像处理软件,测量时用CCD将采集系统采集的压痕图像放大,再通过图像处理方法对得到的图像进行处理,剔除无关部分和噪声点,并对图像进行阈值化,检测边缘,对边缘数据进行最小二乘拟合得到较为精确的直径数据。文献[14]提出了反射法和图像处理相结合的测量方法,并用实验验证了其可行性。但此方法要实际应用还需要做进一步研究,尤其对于浅色材料和透明材料的图像处理算法的改进问题。

#### 4 结语

球压试验看似简单,实则不然<sup>[15]</sup>,一般,产品安全标准中允许的压痕直径必须小于2mm<sup>[16]</sup>。对于如此小的样品尺寸,普通的切割很难在不破坏样品的情况下清晰地得到压痕的剖面。而采用投影或者三维数字显微镜等方法,在球压压痕数据的读取上,存在较大的人为误差,且步骤繁琐、测量的精度低、操作不方便、测量的自动化程度低等问题。在检测中,相当部分材料球压的压痕数值在临界值附近,这就对检测人员提出了更高的要求。近年出现的采用图像处理技术计算压痕直径的方法,使得压痕直径测量的精度和自动化程度得到了明显的改善,提高了测量效率,代表了球压试验测量方法的发展方向。球压试验压痕尺寸测量技术今后的发展重点体现在以下方面:

##### (1) 自动化

使用计算机进行自动图像分析代替传统的人工操作,整个测量过程无人工的干预,客观给出结论,可以针对压痕的形状自动判别:是否载荷偏、压痕边缘部分是有凸起还是光滑过渡逐渐远离球面。

##### (2) 集成化

以光学为基础、融入光电子学、计算机技术、激光技术、图像处理技术等现代科学技术,组成光、机、电、算和控制技术一体化的综合测量系统。图像采集、图像处理系统将与升温、加压、浸液冷却保温、光学信息变换等球压试验过程及检测工艺环节集成在一起,可以自动进行测量,得到测量结果,并根据结果生成检验报表。

##### (3) 高精度

CCD本身像元尺寸小,几何精度高,配以适当的光学成像系统可获得很高的空间分辨率,这是CCD在高精度图像测量系统中进行非接触在线检测、自动跟踪的最大特点<sup>[17]</sup>。这就使得基于数字图像处理的压痕测量方法能够精确的找到压痕的真正边缘。

总之,压痕测量技术在实现自动化,集成化,高精度化的同时也要求实现高速化和高效率化,因此,非接触测量和高效率测量也就必然成为今后压痕精密测量技术的重要发展方向。

#### 参考文献:

- [1] GB/T5169.21-2006, 电工电子着火危险试验 第21部分:非正常热 球压试验[S].
- [2] 柯远辉.谈GB4706.1的球压试验[J].标准测试,2000(7):62-63.
- [3] IEC 60695-10-2:1995+A1《Method for testing products made from non-metallic materials for resistance to heat using the ball pressure》[S].
- [4] 林永强,杨鹏.对低压电器球压试验的研究[J].制造与检测,2008(8):58-59.
- [5] 王忠义.球压试验[J].安全与电磁兼容,2005(1):75-76.
- [6] 武政,周学东,郭慧.球压试验测量不确定度评定[J].环境技术,2007,2(4):18-19.
- [7] 陈凌峰,刘群兴,罗宗敏.球压试验压痕判定方法[J].安全与电磁兼容,2006(6).
- [8] 冀芳.高精度图像测量技术[D].西安:西安电子科技大学,2007.
- [9] 王莹,廖俊必,季立江等.基于图像分割技术的压痕直径图像测量[J].自动测量与控制.2007,26(2):72-73.
- [10] 白福忠,高晓娟,包晓艳.布氏硬度图像测量法[J].激光与红外,2007,37(11):1230-1233.
- [11] LI Zhi,HERRMANN Konrad .A Post-Indent Imaging System with Nanometric Resolution for Micro-/Nano-Indentation Testing[J]. Nanotechnology and Precision Engineering.2008,6(4):237-241.
- [12] 张月平,左勇.基于数字图像处理的布氏硬度压痕直径测量方法[J].计测技术,2008,28(2):24-26.

- [13] 刘玉利,左勇,唐翠荣.基于Matlab与VB混合编程的压痕直径测量软件设计[J]. 计算机技术与应用, 2009, 29(2):39-41.
- [14] Lingfeng Chen, Xi Liu, Min Zhou. Digital-imaging-based Cost-efficient Ball-pressure Indentation Measurement. International Workshop on Imaging Systems and Techniques Shenzhen, China. 2009.
- [15] 刘功桂. 球压(耐热)试验的研究[J]. 电机电器技术, 2000(4): 25-26.
- [16] IEC 60695-10-2 -2003 Fire hazard testing-Part 10-2:Abnormal heat -Ball pressure test.
- [17] 卢开所. 几何形状图像测量[D]. 天津: 天津大学, 2004.

---

**作者简介:** 苏君平(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 光机电一体化。  
张建寰(1966-), 男, 厦门大学机工程系教授, 研究方向: 光学测量。

---

(上接第 44 页)

- [7] 冯淑霞. 飞机的维修性[J]. 国外试飞, 1995, 21(3):19-24.  
Feng Shu-xia. The Aircraft Maintainability [J]. Foreign Flight Test, 1995, 21(3):19-24.
- [8] GJB/Z 91-97, 维修性设计技术手册[S], 1997.  
GJB/Z 91-97, Maintainability Design Technique Manual [S], 1997.
- [9] 孙有朝, 邓华伟. 虚拟环境下民用飞机维修性评估与验证技术[J]. 交通运输工程学报, 2006, 01(06):94-112.  
SUN You-chao, DENG Hua-wei. Maintainability Assessment and Verification Technologies of Civil Aircraft in Virtual Environment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 01(06):94-112.
- [10] 周红, 甘茂治, 刘安清, 等. 基于并行工程的产品维修性设计[J]. 机械设计, 2003, 20(9): 3-5.  
ZHOU Hong, GAN Mao-zhi, LIU An-qing, ect. Maintainability Design of Product Based on Concurrent Engineering [J]. Journal of Machine Design, 2003, 20(9): 3-5.
- [11] Dassault Systemes. DELMIA V5R17 User's Documentation, 2006.

---

**作者简介:** 王占海(1975年-), 男, 硕士研究生, 助工, 研究方向: 飞机维修。