

# 热弹性红外图像安全检测系统\*

黄毅

(金属研究所 沈阳 110016)

**摘要** 国家科学仪器重点攻关项目“热弹性红外图像安全检测系统”于2002年11月29日在北京通过技术鉴定,专家一致认为是原创型,具有国际领先水平。主要介绍其研究内容、研究方法和取得的成果,热斑迹的发现及其探测方法在无损检测界引起的反响。

**关键词** 热弹性,红外热像,无损检测,安全评估,热斑迹,疲劳损伤,压力容器

## 1 前言

压力容器在工业及航空航天领域都有着广泛的应用,其工作的安全性、使用寿命和使用一段时间后被损伤和出现缺陷的程度一直是人们关注的主要问题。长期以来,一些常规的无损探伤和检验方法虽然能够对压力容器进行探伤和缺陷检测,但是这些方法一般是在非工作状态下进行静态检验,检测到的结果也只能在有缺陷或损伤时才能反映和说明问题。对于压力容器在工作状态下的实际应力分布情况以及早期预测潜在的缺陷,这些方法就无能为力了。

我国著名材料科学家师昌绪院士早在1965年曾提示作者能否采用新技术来研究金属受力过程中的电子发射行径。

金属研究所红外课题组于1979年就开展用红外技术来研究金属材料在受力过程中的红外发射行为<sup>[1-2]</sup>。1981年采用红外热图技术,直观地证实了金属中存在热弹性效应,并定名为红外冷发射(IRCE)相对应于弹性拉伸载荷和红外热发射(IRHE)相对应于弹性压缩载荷<sup>[3-5]</sup>。在国家基金的多次支持下,通过实验证明这种效应的强度和图案与应力集中和缺陷形貌有关,提出热弹性应力集中系数(Thermoelastic Stress Concentration Coefficient, TESCC)的概念。这个方法是经过20余年的努力,从基础研究发展起来的新型检测技术。其核心技术于2001年5月由国家知识产权局正式授权为发明专利(专利号:ZL97101246.6)。在国际上,英国

Stanly 和美国 Johnson 等尝试性地研究过热弹性效应,但至今还局限于实验。该技术在国际上的领先之点是定义了弹性应力条件下金属材料的红外冷发射(IRCE)和红外热发射(IRHE)。提出 TESCC 以及金属压力容器疲劳损伤产生热斑迹(Heating Scar)等概念。首次提出热弹性红外热图安全检测技术。

采用 TESCC 无损检测系统对压力容器在工作状态下的应力分布进行检测有以下特点:

- (1) 可以真实地反映出压力容器在工况下的应力分布;
- (2) 某些缺陷在萌发期就能早期预测;
- (3) 完全非接触、无伤害地检测;
- (4) 操作简便、效率高,可进行大范围监测;
- (5) 可开发成便携式系统进行在线检测。

TESCC 技术首先用于我国航天载人飞船的生保用压力容器的安全评估,取得很好的结果。为确保 TESCC 技术在工业用压力容器、管道等构件的安全评估上的应用,特在河北省石家庄建设热弹性红外图像试验基地,对大型压力容器进行人造裂纹的探测实验,对炼油厂和液化气站的大型压力容器进行实地检测,也取得令人满意的结果。它将为制定国家标准草案和工业应用起到催化剂的作用。近期,在高压碳纤维铝胆复合气瓶上成功地获取了疲劳损伤所产生的热斑迹图案。

参加该项目的专家和科技人员有30余人,取得成果4项:第一是热弹性红外安全检测系统;第

二是热弹性红外安全检测技术 ;第三是热弹性红外安全检测软件开发系统 ;第四是承压设备热弹性红外图像检测方法 (标准草案) 。其中获得国家发明专利 1 项 ,提交研究报告论文集 (18 篇论文) 1 册。签定成果转让合同 1 份 ,成果转让的成交额 110 万元。

## 2 理论依据

(1)原理和基本物理现象。早在 1830 年 Lord Kelvin 就讨论过固体材料的热弹性效应 ,后来被 Biot 用公式进行了描述 ,即在绝热条件下 :

$$\Delta T_e = -KT\Delta\sigma_e$$

式中  $\Delta T_e$  是在温度  $T$  时的热弹性温度变化  $K$  为常数 ,而  $\sigma_e$  是弹性应力。按照此表达式 ,可以得出弹性拉伸载荷引起降温 ,而弹性压缩载荷则引起升温。

由于这种效应在温度变化上很小。100 多年来没有人从实验上证实此效应的存在 ,当然也就不可能问及此效应的用途。1981 年 ,我们采用红外热图技术 ,直观地证实了金属中存在此效应 ,定名为 IRCE 效应 (相对应于弹性拉伸载荷)和 IRHE 效应 (相对应于弹压缩载荷) 。作者应意大利著名物理学家 G· Cagloti 教授邀请 ,于 1984 年到米兰核工程研究所讲学 ,听众兴奋地说是第一次让他们 “看”到了热弹性效应。

金属压力容器在工况应力的疲劳打压过程中 ,由于 IRCE 和 IRHE 的效应 ,在其应力集中区有明显的红外发射能量变化。经过一定周期后 ,其疲劳损伤区将产生不可逆的温度增升 ( $>1^\circ\text{C}$ ) 。在每一次的循环周期内表示压力容器的疲劳损伤区的红外热发射始终保持在该区域内 ,作者将它命名为疲劳损伤的热斑迹 (Heating Scar) ,并给出一支 12L 蓄能器的热斑迹实例<sup>[6]</sup>。2001 年 ,与法国巴黎国立高等工程技术学校 Vincenc J1 博士合作 ,采用磁记忆和 X 射线衍射分析技术对热斑迹区域的损伤机理进行首次研究 ,发现在热斑迹内部 ,其残余应力和 X 射线衍射积分宽的变化与容器的其它区域有明显差异。

(2)金属压力容器失去正常功能、泄漏甚至于爆炸的基本原因 ,是由应力腐蚀减薄、疲劳裂纹、材质疏松等引起。通过一系列的实验研究证明 ,金属

材料的 IRCE 和 IRHE 的强度和图案是与应力集中和缺陷形貌有关<sup>[7]</sup>。

根据热弹性效应 ,我们定义沿器壁切向各部位的 TESCC 为 :

$$\alpha_e = \frac{\text{通过热弹性效应测得的实际应力 } \Delta\sigma_e}{\text{沿容器壁的切向应力差值 } \sigma_t}$$

如果构件材料的  $K$  值可以测得 ,那么容器壁的切向应力差值可以根据设计时的安全应力得出  $\alpha_e$  就可以表示出实际应力与理论要求的安全应力的差别 ,能够表示压力容器器壁的应力集中情况。因此 ,可作为对压力容器安全评估的判据。

## 3 TESCC 方法的典型检测实例

### 3.1 宇航薄壁压力容器的安全评估

热弹性红外图像检测技术 1996 年开始用于我国航天生保用高压氧气压力容器的整体评估。经过批量的测试评估 ,金属研究所于 1997 年制定了我国 (也是国际上) 唯一的企业标准 (Q/KJ.J06.04-1997) ,“高强度钢薄壁压力容器热图检验质量控制规范” ,正式提出 TESCC 的计算模式 ,规定了使用范围等要求<sup>[8]</sup>。

对几百支宇航用薄壁压力容器在打压考核过程中进行了热弹性红外图像安全评估。

按工艺标准要求对考核全部合格的 4.2L 柱状气瓶和 20L 球型气瓶经过热弹性红外图像检测评估后 ,其 TESCC 的结果按照我们的暂行  $\alpha_e$  质量判据进行排队。此项安全评估工作坚定了有关部门将高强钢压力容器用于航天飞船的信心 ,评价意见是 “金属所黄毅等同志在压力容器的热图无损检测应用课题上已取得实质性的突破 ,提供了一项新的压力容器无损检测方法 ,……” 神舟 1、2、3、4 号飞船的发射成功证明了采用 TESCC 技术的可信度。

1994—1996 年 ,美国 Amoco 石油公司出资对此项技术进行可行性研究 ,我们做了大量不同尺寸、不同厚度压力容器的爆破和全寿命疲劳试验 ,特别从断口分析中进一步证实了金属疲劳损伤产生热斑迹的结论。

### 3.2 工业现场检测研究和应用

完成 “热弹性红外热图像安全检测系统” 的研制后 ,课题组于 2001 年 9 月在大连理工大学气瓶

试验室对高压碳纤维复合气瓶进行了疲劳试验的热弹性红外成像检测研究,2001年10—12月在河北省锅炉压力容器监督检测所槽车钢瓶检验站对数只液化石油气钢瓶和1台10m<sup>3</sup>液化石油气储罐进行了焊接裂纹扩展过程的热弹性红外成像检测研究,2002年3—11月在齐鲁石化塑料厂、天津石化自备电厂、石家庄炼油厂、石家庄台眷液化气站、保定钞票纸厂液化气站对40多台在用压力容器和数条管道进行了热弹性红外成像检测应用,下面分别给出一些典型研究和应用案例。

(1) 高压碳纤维复合气瓶疲劳损伤的热斑迹。三只工业用高压碳纤维复合气瓶在疲劳打压全寿命的考核过程中,采用红外热像仪进行实时监测。发现了由于疲劳损伤而产生的热斑迹。它自始至终保持在整个疲劳打压过程中,红外热图像表明,这种热斑迹主要集中在瓶体的过渡带和瓶身的若干部位,三只气瓶的疲劳泄漏位置也正是早期预测的热斑迹位置。试验结果证明,在当前国内外尚未找到比较可行的无损检测方法的前提下,TESCC技术无疑十分适合于这类复合材料压力容器早期疲劳损伤的快速检测和评估。

(2) 12m<sup>3</sup>液化石油气储罐的热斑迹。此次检验在役的12m<sup>3</sup>石油液化气储罐为图所示的3号罐。容器在加载前的状态为空罐,其残压为0.3MPa,当加载至0.73MPa时,发现在储罐的一个封头上的两处焊缝存在明显的热斑迹。结果表明,在役的金属压力容器在加载过程中,在高应力集中区会产生热斑迹,由此揭示出热弹性红外技术将是适合于压力容器的在线检测和评估。

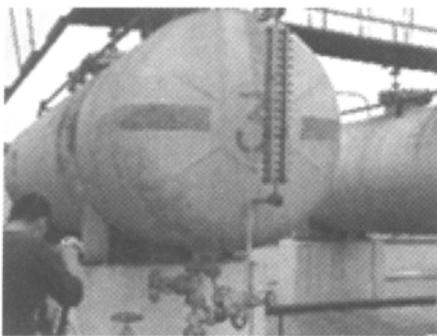


图 12m<sup>3</sup>液化石油气储罐

(3) 聚丙烯反应釜热弹性红外成像检测。聚丙烯反应釜是石家庄炼油厂聚丙烯装置的核心设备,共

5台。该釜从填料到反应结束泄料大约需要4个小时,压力从0—3.8MPa,温度从室温到78℃范围内变化,工作时有搅拌器进行搅拌,转速为50转/分。该设备平均每天可反应5釜,日产值达80万以上,该设备罐体壁厚30mm,材质为16MnR,直径2000mm,长度4000mm。它是一种典型的经历压力、温度、腐蚀等的疲劳装置。经实测发现,在进料口弯管和反应釜人孔角头焊缝上均存在明显的疲劳损伤热斑迹。

#### 4 推广与应用

热弹性红外图像安全检测系统硬件部分由FLIR595红外热像仪和C-2000L数码相机组成双景图像采集器,采集的红外与可见光图像送入双景图像处理计算机进行运算处理,为便于工业现场使用,附属配有防静电、防火花的可移动式车载实验室,压力自动控制系统和红外定位标记带。

软件系统主要包括公共操作、图像处理和报表三个部分。公共操作由文件、窗口、视图和帮助组成。它类似于普通Windows软件功能,图像处理由调色板选择、图像操作、TESCC和HS操作、参数设置等部分组成。报表是软件系统中的一个重要组成内容,它是TESCC或HS操作结果的汇总和显示。报表的内容包括:设备名称、材质、压力、温度、红外热图、可见光照片、TESCC或HS图片等用于评价压力容器等级的相关内容。

正如师昌绪院士所言,第一代无损检测是X光、超声、磁粉等常规方法,20世纪80年代发展的声发射、CT等技术是第二代,TESCC技术和热斑迹的发现必将引起第三代在线无损检测技术的发展。TESCC技术在国内的应用前景非常广阔,可用于航天航空领域里各种类装液压力容器;在石化、冶金等工业市场中,作为一项自有知识产权的高新技术,国家出台了标准(草案)后,必将为其应用、推广打开国内、国际市场。

具体措施是:

(1) 在该项成果的基础上,制定我国首例国家正式标准。

(2) 建议中国无损检测学会正式设立红外技术专业委员会,组织我国科研、大学、工厂和产品供应

(3) 每年在锅检中心举办培训班、颁发 I、II、III 级红外工程师证书。

(4) 通过网络等建立我国重要压力容器和装置的 TESCC 计算机管理中心。

热弹性红外图像安全检测系统的研制成功, 仅是该项技术应用的起步。它还不能对压力容器的使用寿命、缺陷的性质做定性和定量的判定。其结果还需要其它常规的无损检测技术、断裂力学和时效分析来验证, 真正的 TESCC 专家系统尚需组织国内多“兵种”协同作战, 耗费相当的资金和人力才能得以实现。

#### 主要参考文献

- 1 Y Huang, J Xu, C H Shih. Application of infrared technique to research on tensile test. *Materials Evaluation*, 1980, 38(12): 77-79.
- 2 Y Huang, S X Li, S E Lin et al. Using the method of infrared sensing for monitoring fatigue process of metals. *Materials Evaluation*, 1984, 42(8): 1 020-1 024.

- 3 Huang Y, C H Shih. Application of infrared techniques to research on mechanical properties. *Metallurgical Science and Technology*, 1986 (Italy), 4(1): 3-7.
- 4 Huang Y. The thermographic investigation on the thermoelastic effect in metals. *Chin. J. Met. Sci. Technol.*, 1987, 3(3):151-155.
- 5 Huang Y, G H Hicho, R J Fields. Infrared measurements of heating and cooling emissions in aluminum and steel during tensile and cyclic loading. *Chin.J. Met. Sci. Technol.*, 1990, 6(2):106-110.
- 6 Huang Y, Lin X R, Xu J. Thermographic aspect on loading a thin-wall pressure vessel steel. *ACTA Metallurgical Sinica*, 1990, 3(4B):277-283.
- 7 黄毅, 林雪荣, 徐军等. 高强度钢压力容器疲劳锻炼的热图研究. *金属学报*, 1994, 30(5): A225-A231.
- 8 Y. Huang, Xu Cong, Lin Xuerong et al. Thermo graphic NDE of pressure vessel. *China Boiler and Pressure Vessel Safety*. 1997, 4(1): 40-49.

## Thermoelastic Infrared Image Safe Testing System

Huang Yi

(Institute of Metal Research, CAS, Shenyang 110016)

Thermoelastic Infrared Image Safe Testing System is a key item of the national science instrument, and passed technique identify in Dec. 29, 2002. The experts uninfected that is an original creativity technique and international precedence level. The research contents, research method and achieved results have been introduced in this paper. The discovery of Heating Scar and it detected method were provided with important industrial value and have been attracted in Nondestructive Testing region.

**Key words** thermo elastic, Nondestructive testing, safe evaluation, thermograph, heating scar, fatigue damage, pressure vessel

黄毅男, 金属研究所研究员, 无损检测室主任, 辽宁省无损检测学会副理事长。1962年毕业于云南大学物理系。1984—1987年, 作为访问学者在意大利国际理论物理中心、德国马·普金属研究所和美国NBS工作, 并获美国NBS优秀客座教授荣誉。从事高温合金、物理性能、力学性能、自动化、红外技术和无损检测等研究, 主持国家科技部重大科技攻关项目研究。主要研究工作: (1) 在国内开辟了红外技术在材料科学和工程中的应用研究新领域; (2) 取得多孔叶片、C/C复合材料热裂纹无损检测, 红外热像研究金属变形、红外光导智测温仪、焊管计算机管理系统和热图无损检测等多项成果; (3) 取得国家专利多项, 获国家、省、中国科学院等科技进步奖、自然科学奖多项; (4) 在国内外主要刊物和国际会议上发表论文60余篇。