

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.11.028

红外热成像技术在复合材料无损检测中的应用现状

张剑^{1,2}, 齐暑华²

(1. 西北工业大学第365研究所, 西安 710065; 2. 西北工业大学理学院应用化学系, 西安 710072)

摘要: 红外热成像技术是一类通过外加激励得到零件外表温度场排列, 并从热成像图中获取零件内部质量信息的无损检测技术, 它具有快速、非接触等优点, 应用和研究前途广阔。从C/SiC陶瓷基复合材料、夹心复合材料与层合板复合材料三个方面分类综述了红外热成像技术在复合材料无损检测中的发展近况和实际应用, 并列举了该技术的生产应用实例, 提出了红外热成像技术今后的发展方向。

关键词: 红外热成像; 无损检测; 复合材料

中图分类号: TB332, TH878 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)11-0122-05

Application of Infrared Thermography in Nondestructive Testing of Composites

Zhang Jian^{1,2}, Qi Shuhua²

(1. 365 Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China;

2. Department of Applied Chemistry, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Infrared thermography is a kind of non-destructive testing technology where surface temperature field distribution of parts are obtained through the extrinsic stimulation, and the damage information of parts are extracted from thermography. It is fast, real-time detection and no contact etc. The research and application prospect are extensive. The development status and application examples of infrared thermography in non-destructive testing were reviewed through three kinds of common composite material: C/SiC Composites, honeycomb sandwich structure and laminated board composites. Application examples of this technology were listed. The future development direction of infrared thermal imaging technology was put forward.

Keywords: infrared thermography; non-destructive testing; composite

近年来,多种新型复合材料的优异性能已得到了验证与普遍认可,并得到了广泛的应用,但也给无损检测工作带来了巨大的挑战^[1-2]。在复合材料结构的成型过程中,许多不确定的影响因素的产生,使复合材料结构中的缺陷不可避免。随着复合材料层状结构的使用,缺陷尺寸也会逐渐增大,从而导致构件性能显著下降。采用无损检测技术对复合材料构件进行检测及质量评价,在复合材料成型中占有很重要的作用,无损检测可以确保复合材料结构的完整性,是制造及服务环节的重要内容。

1 复合材料损伤分类与无损检测应用范围

1.1 复合材料损伤分类

先进复合材料的损伤类型一般包括如下^[3]: 夹杂、孔隙、疏松、裂纹、纤维与基体界面开裂、纤维分层与断裂、富胶或贫胶、纤维卷曲、缺层、铺层或纤维方向误差、厚度偏离、纤维体积百分比超差、铺层搭接过多、磨损、划伤等,其中孔隙、分层与夹杂是最主要的缺陷。复合材料中的制造损伤有可能只是其中一种,但在大部分时候是好几种缺陷同时并存。

1.2 复合材料无损检测的应用

复合材料无损检测技术主要在这几个方面得到应用^[4]:

材料无损检测、结构无损检测、服役无损检测。材料检测主要用于解决材料在最初研究时面临的难题,可以进行类似于材料性能测试、材料内部损伤表征、材料无损检测时物理数学模型的建成、损伤基本判据的建立等研究,这期间的检测对象主要是材料试样、试件。结构无损检测主要用于解决结构件制造过程中、工艺制订中所面临的产品结构问题,例如对各种特有类型结构件进行无损检测时所需仪器设备等检测方法的建立、无损检测标准的建立与其完善、缺陷判别标准的建立、检测时检测信号处理技术等,检测对象主要是装机的工程应用结构件。服役检测主要着力于已装机的结构件在产品使用服役过程的无损检测手段、方法等,包括提供相关结构件损伤扩展状态、产品剩余强度、制件残余寿命等信息的分析评估,检测对象是装机后的各种在服役状态的各种类型应用结构件。

2 复合材料的红外热像检测原理

任何物体,包括复合材料,只要其温度高于绝对零度,

联系人: 张剑,高级工程师,主要从事复合材料的制备及加工研究

收稿日期: 2015-08-29

都从表面发出与温度有关的热辐射能^[5-7]。红外热波无损检测是在检测过程中,通过对物体表面施加可控的温度场扰动,引起物体温度的变化,而产生热波。由于物体具有自身材料特性、物理结构特性或化学结构特性的差异,热波在物体内部传输时,会受到这些差异的影响,而发生不同的散射或反射,并反映在物体表面的温场变化上。这种差异被红外探测仪检测,即可得到被检测物体相应的材料均匀性及自身的物理特性信息,达到检测和探伤的目的。

3 不同类型复合材料红外无损检测

3.1 C/SiC 陶瓷基复合材料的红外热波检测

C/SiC 陶瓷基复合材料作为航空领域的重要新材料^[8-9],具有耐高温、低密度、高比强、高比模、抗氧化和抗烧蚀等优异性能,国内外对这种材料的研发和应用投入越来越大。发展适用于 C/SiC 陶瓷基复合材料的无损检测技术,对其内部缺陷进行检测势在必行。

陈曦等^[10]利用红外热波技术分别对二维(2D) C/SiC 复合材料的有 SiC 涂层盲孔试样和无 SiC 涂层的弯曲强度试件的氧化缺陷进行无损探伤。检测结果表明:通过该技术,2D C/SiC 复合材料的氧化损伤可以被直观的反映出来。2D C/SiC 复合材料氧化后的弯曲强度与热扩散系数的减小相比,呈抛物线降低,其密度与热扩散系数的减小相比呈对数降低。由此可知,热扩散系数可以用来衡量陶瓷基复合材料的氧化损伤程度,而红外热波成像技术可以有效地对陶瓷基复合材料氧化损伤进行无损探伤。

邓晓东等^[11]在 C/SiC 复合材料制件板上制作深度和直径各不同的盲孔,以此来对材料表面下的孔洞缺陷进行模拟。红外热波检测技术可以定量检测出 C/SiC 缺陷试样盲孔缺陷的深度和孔径,并将检测结果 CT 检测及 X 射线照相结果相比较。结果表明: C/SiC 复合材料内部缺陷的检测更适合于使用红外热波检测,该技术可定量检测出 C/SiC 复合材料中缺陷的深度和大小,并能与 CT 检测及 X 射线照相相互弥补。

李斌等^[12]在对 2D C/SiC 复合材料陶瓷带孔试板进行无损检测时,采用声发射技术和红外热像技术,分别对试板的拉-拉疲劳损伤实时同步监视测量,在疲劳损伤过程中,发现试样表面温度、声发射信号和模量均发生变化。结果表明:声发射信号与红外热像技术能够较好与这些变化相吻合,表明这种结构材料的疲劳损伤过程可以通过这些无损检测手段实时同步监测。

3.2 夹心复合材料的红外热波检测

夹心结构复合材料具有密度小^[13-14]、强度高、刚度大等优点,在航空航天领域得到了广泛的应用,如雷达罩、夹芯壁板、夹芯墙、储油箱、安定面、蜂窝舵面等部位。但是,制备工

艺、结构特点、设计要求、应用环境等复杂因素均会使复合材料蜂窝夹层结构在制造和服役过程中形成缺陷,会严重降低其最终的承载能力。利用红外热像技术检测蜂窝夹层复合材料,不仅有助于改进蜂窝夹层结构件的生产工艺,而且有利于日后对该构件进行外场原位检测,能够快速、准确地判断出缺陷区域。

王焰等^[15]深入讨论了红外热波无损检测技术的基本原理和应用技术,制作了几种玻璃纤维试件,采用红外热波技术对试件的分层缺陷进行了检测试验。通过试验研究可以看出,此技术能够在原有检测基础上下快速、高效、直观地检测出试件的分层缺陷,找出缺陷所在位置,并能定量地对缺陷的尺寸、深度等参数进行分析,通过这些分析,能够尽量地避免这些缺陷在实际应用中带来更大的问题。王焰等所做的研究在确认了红外热波无损检测技术应用的同时,为后期对发动机喷管制件、记忆壳体的红外热波检测打下了扎实的基础。

马泽孟^[16]对在役飞机用雷达罩进水原因进行了分析,并利用现行的 3 种无损检测方法,分别对雷达罩进行进水检测,与其他检测手段相比,红外热成像技术的最大优势是在外场应用。由于飞机在高空飞行,环境温度低,导致水分结冰,返回地面后,雷达罩板件中蜂窝内进水。进水后的雷达罩,进水部分与原有的飞机结构有着不同的比热容,因而也有着不一样的升温与降温速度,从而在进水部分,能够产生与周围飞机蜂窝结构的温差,从而可以得知确定水分的所在。美国波音公司已经在飞机维护手册中,将该方法列为检测复合材料蜂窝结构进水的主要方法。

黄松岭等^[17]使用红外热像方法检测了铝蜂窝铝蒙皮复合材料,对铝蜂窝铝蒙皮复合材料成型时较易出现的胶接缺陷进行了分析。结果表明,红外热像方法能有效地检测出复合材料胶接缺陷,对于铝蜂窝铝蒙皮结构复合材料蒙皮的各种脱粘缺陷,检测速度都高于每分钟两屏。在无损检测飞速发展的今天,红外无损检测也面临着挑战与机遇。

陈桂才等^[18]对铝蜂窝夹芯结构复合材料的胶接界面脱粘损伤进行了红外热波无损检测,同时对泡沫夹芯结构复合材料的胶接界面脱粘损伤进行了红外热波无损检测,并对两种材料的检测结果进行了对比分析。通过检测,损伤的位置与大致尺寸能够得到确定,这为今后在航空飞行器的夹心复合材料的无损检测做好了准备。

内外蒙皮与夹心蜂窝之间的脱粘缺陷的产生,会大大降低铝蜂窝夹心复合板的强度指标,也将严重降低金属蜂窝相应胶接产品的应用性能,因此必须对铝蜂窝夹心复合材料进行严格的无损检测。蒋淑芳等^[19]制作出不同厚度的铝蜂窝夹心复合材料制件,使用红外热波技术检测不同厚度铝蜂

窝夹层胶接结构,检测结果反映良好,该技术可有效直观地对试件胶接内部质量和蜂窝内部质量作出检测。当然,超声法也可检测出蒙皮与蜂窝脱粘缺陷、铝蜂窝内部缺陷等,但是检测效率非常低。在考虑X射线无损检测时,因为铝蜂窝窝夹心复合材料中本体和缺陷结构性能相似,对于射线的吸收有着太小的差异,因而X射线法基本不能检测该制件中的设计缺陷。

刘颖韬等^[20]研究了树脂堆积的红外热像检测问题,为了便于研究,他们进行了一维模型建模分析,并对蜂窝夹层结构样件进行试验验证,再进行解剖分析。发现在脉冲加热的原始热图中,会出现大量的“暗斑”或“暗区”,分析这些区域的出现应为树脂堆积区域。通过这种监测方法,可以判断出树脂堆积区域的形状、面积和位置,将有助于促进生产工艺改进,尽量避免这些树脂堆积区域的出现,通过对这些区域的记录、识别和存档,可以为蜂窝积水问题检测提供有力的评定依据,将在今后的工作中降低蜂窝进水的情况。

余轶等^[21]使用红外检测对含有预制缺陷的夹层结构进行了检测验证,对红外热波检测技术适用范围、检测效果、精度等因素进行了分析。对于近界面缺陷,红外热图像能较好地分辨出缺陷的大小,缺陷的深度位置也可以根据热图像上颜色的深浅来大致判断。但是对于深度缺陷,红外热波法无法检测出来,这是今后的努力方向。

刘文霞等^[22]利用超声C扫描系统及红外热成像系统分别对玻璃钢纸蜂窝材料的胶结质量及蒙皮质量进行了检测。超声C扫描可检测所有脱粘缺陷,而且纸蜂窝结构清晰,但是只能检测出部分分层的缺陷。而红外热成像检测过程短,效率很高,分层缺陷与脱粘缺陷均可以检测到。红外热成像技术的突出优点在于通过对热图进行处理分析,获得试件内部的缺陷信息,与其他方法相比更为快速有效。

刘颖韬等^[23]在简单介绍了红外热像检测技术后,对多种夹心复合材料构件进行了检测。检测结果表明,该法可以适用于薄蒙皮蜂窝夹层结构的在役检测,对脱粘损伤和蜂窝积水等缺陷比较敏感。而该法也能给出清晰的结果和丰富的内部信息,很适用此类复合材料构的无损检测探伤。

3.3 复合材料层合板的红外热波检测

复合材料层合板作为复合材料的一种普遍应用方式^[24-25],是一种先进的结构材料,具有高比刚度、高比强度、耐高温及耐磨等优点。但复合材料层合板有其自身无法避免的缺点,即其层间强度低,在受到外来物体的低速冲击时,会造成结构损伤及承载能力下降,内部也会产生诸如脱层、基体开裂、纤维断裂等典型损伤。

武翠琴等^[26]等在研究固体火箭发动机的玻璃纤维壳体/绝热层试件时,以脱粘缺陷为研究主题,使用红外热像仪实

时监控试件的表面温度,并及时记录制件各部位的温度变化,利用制件的表面温度差异来判定制件内部缺陷的位置与尺寸等相关数据,接着通过对热成像图增强处理和分割从而定量识别缺陷。对实验结果进行分析后,再与超声C扫描结果进行对比分析:红外热成像在对制件进行无损检测时,能快速直观地识别出直径10 mm以上、深度5 mm以内的脱粘缺陷,但是超声C扫描检测更适用于对特定缺陷进行准确而又定量的检测。

宋远佳等^[27]基于热成像技术,将固体火箭发动机壳体/绝热层脱黏缺陷进行检测,使用消除背景对热成像图进行处理,同时使用分水岭法对热成像图进行增强、降噪,通过与实用表面热斑区域面积进行对比后,对缺陷大小进行估算,并计算缺陷深度。试验结果与声/超声技术相比较后,发现热波检测速度快,检测结果明了直观,热波检测技术更适用于进行定量检测分析。

赵延广等^[28]以锁相红外热成像理论为基础,对对象为复合材料网格加筋结构的若干类典型结构缺陷进行无损检测,采用法国Cedip公司的锁相红外热成像对检测结果进行计算分析。结论表明,相位图与幅值图相比,含有更多缺陷信息。加载频率不同,会出现不同的检测结果,选择适当的加载频率是能够成功检测的关键;在红外热波都能穿透制件的情况下,增大输出电压偏移量是非常有利于检测的。该方法也可用于对复合材料未知缺陷的检测和分析。

刘颖韬等^[29]分析了闪光灯脉冲热像法影响检测的主要几种参数,对该几种参数对检测结果产生的影响进行了分析,从而得出了最佳检测应满足的参数类型,并且针对各种常见的复合材料结构件进行了检测分析研究。对于碳纤维层压板,当缺陷掩埋位置较深时,热象法的检测优势得不到发挥,得出的缺陷边缘不如超声C扫描结果清晰。在进行深度检测时,与超声相比更有限。所以闪光灯激励热像法适用于检测厚度相对较薄的层压板结构件。

李晓霞等^[30]对碳纤维层压板进行分析,首先使用红外热波无损检测对低速冲击的碳纤维层压板进行检测,研究损伤尺寸与低速冲击能之间的关系。红外热波在对碳纤维层压板进行无损检测时,不仅能检测出层压板冲击损伤的尺寸,还能确定缺陷在材料内是以何种损伤方式进行。在用红外热成像进行无损检测的同时,采用C扫描对相同材料层压板进行检测,详细对比了两种检测方法的各种优缺点,发现对于碳纤维层压板的低速冲击缺陷的检测中,红外热波检测是一种快速、便捷的检测方法,同时,该方法也是一种有效而又可靠的无损检测技术和评估方法。

陈大鹏等^[31]介绍了红外热超声的基本理论及特点。红外热超声是一种较新的无损检测技术,近年来才逐渐得到应

用,对于复合材料结构制件中隐藏缺陷的检测很敏感。与常规的检测方法相比,不需液体、磁粉粒子、射线的加入,是利用损伤部位自身的振动产生热量,在没有损伤的部位热量的产生有所差异。因此,它只在损伤部位选择性加热,使用这种方法检测材料中缺陷效果会更好。

詹绍正等^[32]使用调制法热波检测技术对被测对象施加照射,通过热像中物体表面热波相位和振幅的改变来判断被测对象的内部情况。与传统超声 C 扫描相比,调制热波检测技术能够对多种复合材料结构实施有效的检测,不仅检测速度快,而且可以获得更多关于结构制作的工艺信息和纤维铺层方向等信息,从而对复合材料工艺改进做出合理的调整。

杨小林等^[33]认为超声热成像检测方法激励超声波在损伤处产生振动,该振动与非损伤处的振动频率产生差异,从而使损伤处因热弹效果和滞后效果等原因释放热量,热量释放后,工作人员利用红外热像仪对该部位发热过程进行监督,最后对发热图像进行计算、分析与解释。由于信号的频率、特别的图像处理以及其操作的快捷方便性,使得超声热成像检测方法优势非常独特明显。通过对某型号航空碳纤维复合材料检测说明,该法通过对制件的损伤部位产生不同频率的震动,能够有效快速地检测出裂纹缺陷、分层缺陷或破裂等缺陷,并能对这几种不同的缺陷进行分类,使用前景广阔。与其他的无损检测方式不同,该方法由于不需进行制件表面预处理,对各种复杂形状结构件的适应性能也非常良好,不需要再进行投入制作各种不同形状、不同规格的检测探头,因此该检测在航空飞机复合材料构件缺陷检测,以及在对金属构件疲劳损伤裂纹、应力腐蚀产生裂纹的前期预报和发现等方面应用潜能非常巨大。

4 红外无损检测在实际生产中的应用

红外热像是一种新型的复合材料无损检测方法,这种方法的原理是基于制件的热辐射特性。该方法在检测时,利用红外热像仪等设备,热像仪可以用来观测材料损伤区及完好区的红外辐射差异。有别于其他无损检测技术的是,该检测技术很适合大型结构部件,在对大型结构外形复杂部件进行检测时,快速便捷,检测速度快。同时,它还具有操作简单方便、培训便捷、结果直观易懂、实时检测、更便于原位检测等优点。但此方法的局限性在于它受制于探测器的自身性能特点,如果探测器的性能特点存在差异,也会使探测结果出现差异。

西方各国^[25]已将红外热像技术作为重要检测方式应用于实际生产中,并在航空航天领域得到了广泛的应用。而国内在该方面的介入较晚,各高校科研单位在红外热像研究方面已取得较大进展。

飞机雷达天线罩是航空飞行器的一种常用设备,作为

机载雷达的电磁窗口,主要原材料是由玻璃纤维与蜂窝或泡沫组成。雷达天线罩主要工作环境是暴露在外界环境中,工作环境非常恶劣,因此雷达罩会产生蜂窝进水现象,从而影响雷达罩电磁介电,对雷达罩进行在役使用时的无损检测是非常必要的^[16]。对于飞机雷达罩来说,进水与没有进水处,热成像显像不同,利用温差变化采用红外检测技术,从而确定水分的所在位置,再进行修理维护,会收到事半功倍的效果。

固体火箭发动机中的复合材料壳体/绝热层制件容易出现脱粘缺陷等,在制件正式安装使用前,对其进行无损检测是保证制件内部质量的必行之法。在操作时,利用脉冲闪光灯方式对制件进行加热,使用红外热像仪实时监控制件的表面温度变化,从而判断制件内部损伤。红外热像具有非接触性和检测效率高等优点,也具有在小尺寸缺陷、缺陷深度等信息的定量识别度较低的缺点,可与其特点互补的超声 C 扫描检测组合使用^[26]。

在对固体火箭发动机壳体/绝热层进行脱粘损伤进行无损检测时,使用消除背景和分水岭法对热图进行降噪处理、增强处理和分割处理,利用表面热点区域的面积对损伤尺寸进行大致估算,依据热图序列的时间特点来计算缺陷的深度尺寸,然后与声/超声检测结果进行比较。热波技术检测快,20 s 可对损伤准确定位,检测结果直观明了;5 mm 深的几个缺陷最佳检测时间均为 7 s;缺陷深度可以通过材料性能参数和缺陷大小尺寸进行计算分析,并且损伤越大,计算误差越小;该方法与声/超声技术相比较,更适合于进行定量的分析^[27]。

在对某型号航空碳纤维复合材料进行无损检测时,制件中产生的微裂纹可以通过超声热成像方法检测出,并且该方法可以对大面积损伤区域进行无损检测。在进行无损检测操作时,不需进行提前表面预处理,并且复杂形状结构制件对该方法有更强的适应性能,因此该方法可以应用在航空飞机复合材料结构制件上,金属结构件抗疲劳产生裂纹检测上,也可以应用在抗应力的腐蚀裂纹的早前期预报和诊断上,未来应用前景巨大^[30]。

5 结语

通过大量的复合材料验证说明,红外热成像检测技术对层压板结构、夹层结构、C/SiC 陶瓷基复合材料结构等几类常用航空复合材料均具有良好的检测能力,因此,该技术是一种检测复合材料结构有效的手段。

纵观现代各种无损检测技术^[34-35],均要求对零件的损伤进行快速、准确的检测与评估,未来无损检测要向检测速度更快、检测结果更直观可靠、检测流程更便捷、检测系统更廉价的方向发展。

参考文献

- [1] 周圣林,等. 飞机设计,2007,27(6):43-46.
Zhou Shenglin, et al. Aircraft Design, 2007, 27(6):43-46.
- [2] 周正干,等. 科技导报,2014,32(9):15-20.
Zhou Zhenggan, et al. Science & Technology Review, 2014, 32(9):15-20.
- [3] 李达,等. 航空科学技术,2008(1):14-16.
Li D, et al. Aeronautical Science and Technology, 2008(1):14-16.
- [4] 周正干,等. 航空制造技术,2009(8):70-73.
Zhou Zhenggan, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(8):70-73.
- [5] 黄松岭,等. 宇航材料工艺,2002(6):43-46.
Huang Songling, et al. Aerospace Materials & Technology, 2002(6):43-46.
- [6] 王冠,等. 无损检测,2015,37(5):10-12.
Wang Guan, et al. Nondestructive Testing, 2015, 37(5):10-12.
- [7] 杨玉娥,等. 济南大学学报(自然科学版),2015,29(6):471-476.
Yang Yu'e, et al. Journal of University of Jinan (Sci. & Tech.), 2015, 29(6):471-476.
- [8] 杜向阳,等. 科技与创新,2015(6):8-9.
Du Xiangyang, et al. Science and Technology & Innovation, 2015(6):8-9.
- [9] 梅辉,等. 材料导报(综述篇),2009,23(5):82-87.
Mei Hui, et al. Materials Review, 2009, 23(5):82-87.
- [10] 陈曦,等. 复合材料学报,2011,28(5):112-118.
Chen Xi, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(5):112-118.
- [11] 邓晓东,等. 复合材料学报,2009,26(5):112-119.
Deng Xiaodong, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(5):112-119.
- [12] 李斌,等. 机械科学与技术,2011,30(2):191-194.
Li Bin, et al. Mechanical Science & Technology, 2011, 30(2):191-194.
- [13] 袁英民,等. 无损检测,2015,37(5):7-9.
Yuan Yingmin, et al. Nondestructive Testing, 2015, 37(5):7-9.
- [14] 史俊伟,等. 无损检测,2015,37(3):39-43.
Shi Junwei, et al. Nondestructive Testing, 2015, 37(3):39-43.
- [15] 王焰,等. 无损检测,2010,32(11):880-883.
Wang Yan, et al. Nondestructive Testing, 2010, 32(11):880-883.
- [16] 马泽孟. 江苏航空,2009增刊:93-95.
Ma Zemeng. JiangSu Aerospace, 2009(S):93-95.
- [17] 黄松岭,等. 宇航材料工艺,2002(6):43-46.
Huang S L, et al. Aerospace Materials & Technology, 2002(6):43-46.
- [18] 陈桂才,等. 宇航材料工艺,2004(1):55-58.
Chen Guicai, et al. Aerospace Materials & Technology, 2004(1):55-58.
- [19] 蒋淑芳,等. 无损检测,2006,28(1):23-25.
Jiang Shufang, et al. Nondestructive Testing, 2006, 28(1):23-25.
- [20] 刘颖韬,等. 无损检测,2012,34(5):28-32.
Liu Yingtao, et al. Nondestructive Testing, 2012, 34(5):28-32.
- [21] 余轶,等. 玻璃钢/复合材料,2013(8):55-59.
Yu Yi, et al. FRP / Composites, 2013(8):55-59.
- [22] 刘文霞,等. 无损检测,2009,31(12):990-992.
Liu Wenxia, et al. Nondestructive Testing, 2009, 31(12):990-992.
- [23] 刘颖韬,等. 航空材料学报,2012,32(2):72-77.
Liu Yingtao, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(2):72-77.
- [24] 王铮,等. 南京航空航天大学学报,2012,44(4):138-141.
Wang Zheng, et al. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(4):138-141.
- [25] 顾国庆,等. 应用激光,2012,32(6):527-531.
Gu Guoqing, et al. Applied Laser, 2012, 32(6):527-531.
- [26] 武翠琴,等. 强激光与粒子束,2011,23(12):3271-3274.
Wu Cuiqin, et al. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12):3271-3274.
- [27] 宋远佳,等. 深圳大学学报(理工版),2012,29(3):252-257.
Song Yuanjia, et al. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2012, 29(3):252-257.
- [28] 赵延广,等. 复合材料学报,2011,28(1):199-205.
Zhao Yanguang, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(1):199-205.
- [29] 刘颖韬,等. 航空材料学报,2012,32(2):72-77.
Liu Yingtao, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(2):72-77.
- [30] 李晓霞,等. 复合材料学报,2010,27(6):88-93.
Li Xiaoxia, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6):88-93.
- [31] 陈大鹏,等. 激光与红外,2008,38(8):778-780.
Chen Dapeng, et al. Laser & Infrared, 2008, 38(8):778-780.
- [32] 詹绍正,等. 航空制造技术,2010(8):44-48.
Zhan Shaozheng, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(8):44-48.
- [33] 杨小林,等. 无损检测,2007,29(5):275-277.
Yang Xiaolin, et al. Nondestructive Testing, 2007, 29(5):275-277.
- [34] 马保全,等. 航空学报,2014,35(7):1787-1803.
Ma Baoquan, et al. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(7):1787-1803.
- [35] 姚中博,等. 材料导报,2014,28(7):125-129.
Yao Zhongbo, et al. Material Review, 2014, 28(7):125-129.