

使用太赫兹技术研究航天飞机失事的原因^{*}

谢旭 钟华 袁韬 许景周 张希成[†]

(伦斯勒理工学院太赫兹研究中心 纽约 美国)

摘要 太赫兹脉冲成像技术被应用于航天飞机隔热层泡沫材料中缺陷的探测. 通过对泡沫样品的各个层面进行逐点扫描, 得到每个点太赫兹脉冲的时域波形, 然后利用多种图像处理手段分析波形的变化, 判断出不同层面缺陷的大小、形状、位置和种类. 太赫兹成像技术作为一种可以提供多维信息的新兴无损探伤技术, 将可能被美国宇航局应用到以后的发射过程中的安全检查中.

关键词 太赫兹波成像, 太赫兹时域光谱, 电光取样

Terahertz imaging of defects in space shuttle foam insulation

XIE Xu ZHONG Hua YUAN Tao XU Jing-Zhou ZHANG Xi-Cheng[†]

(Center for Terahertz Research , Rensselaer Polytechnic Institute , Troy , NY 12180 , USA)

Abstract T-ray imaging technology is applied to identify defects in space shuttle foam insulation. The temporal waveform of the terahertz pulse of each pixel is obtained by scanning every layer of the foam sample. Multiple imaging analysis techniques are implemented to analyze waveform changes, in order to pin-point the size, shape, location and type of defects in each layer. T-ray imaging has become a novel non-destructive detection technology and will be applied by NASA in safety tests for future launches.

Key words T-ray imaging, terahertz time domain spectra, electro-optic sampling

据 2003 年 4 月 29 日的 USA Today 报道, 2003 年 2 月 1 日, 哥伦比亚号航天飞机失事之后不久, 根据航天飞机发射时拍摄的录像资料, 提出了对失事原因的分析. 调查小组相信航天飞机发射时主燃料舱上有一块 1 英尺 × 1 英尺大小的隔热材料发生了脱落, 脱落的隔热材料击中了正在高速飞行的航天飞机的机体, 造成了航天飞机外壳上的破损. 在哥伦比亚号航天飞机完成了飞行任务重新返回大气层时, 由于和空气摩擦产生的大量的热从这个破损处漏进了航天飞机内部, 最终造成了机毁人亡的悲剧.

那么什么是造成隔热材料从主燃料舱上脱落的原因呢? 这种隔热材料是使用发泡工艺在铝制底板上“喷”出来的几英寸厚的泡沫状材料, 美国国家航空和航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的专家猜测, 一种可能的原因是在有

些地方这种泡沫状材料并不能很好地和铝制底板结合, 由于这种空隙的存在, 当航天飞机以很高的加速度起飞时, 泡沫状材料分离并且脱落.

当然这只是一种猜想, 但是这种猜想作为一种可能的事故隐患告诉我们, 下一步必须检查现有的航天飞机主燃料舱的外壳上是不是也存在这种“隔热材料和箱体之间的空隙”. 但是很可惜, 作为两种已经发展得很成熟的无损探伤技术, X 射线和超声探伤技术都不能清楚地观察到这样的空隙的存在, 前者是因为 X 射线的穿透性太高, 以致于无法区分泡沫材料中正常和异常的区域, 后者是因为声波很难穿过这种泡沫材料. 因此 NASA 的专家想到了使用太赫兹技术和微波进行探伤应用. 太赫兹比微波

^{*} 2003-07-17 收到

[†] 通讯联系人. E-mail: zhngx@rpi.edu

具有更高的空间分辨率。

太赫兹辐射是 $0.1\text{--}10\text{ THz}$ (10^{12} s^{-1}) 的电磁辐射。从研究的历史上看,由于一些简单分子的振动和转动光谱在这个波段之内,因此最早的时候太赫兹辐射被天文学家用来研究大气对太赫兹波段的吸收。但在过去的 20 年中,随着材料科学和激光科学的发展,太赫兹技术应用于半导体、制药、加工、空间以及国防工业密切相关的更加广泛的领域。由于太赫兹辐射可以穿过纸张、塑料等非极性分子构成的材料,近年来太赫兹辐射也被应用于遥感探测等领域。

为了证明太赫兹辐射可以用来对上面这种隔热材料进行无损探伤,我们进行了实验。实验中使用的是一块有 8 个人工制备的缺陷的这种带有铝制底板的隔热材料,这 8 个缺陷包括两种可能在实际的制造工艺中出现的不同缺陷,包括尺寸从 $1/4$ 英寸到 1 英寸的空气泡以及隔热材料和铝制底板之间的分离。

材料的横截面包括三层,分别是铝制底板、1 英寸厚的超轻致密材料 SLA (super light ablator) 和 3 英寸厚的绝热材料 SOFI (sprayed-on foam insulation)。

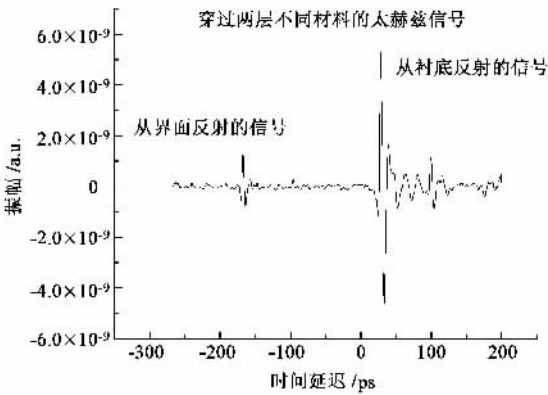


图 1 太赫兹脉冲分别被 SLA 与 SOFI 交界面和 SOFI 与铝板交界面反射后的时域空间波形

我们采用的太赫兹脉冲中心频率为 1 THz , 频带宽度为 3 THz 。经过测量,组成隔热层的 SLA 和 SOFI 这两种材料对于太赫兹波段的电磁辐射来说都是相当透明的材料,折射率分别为 1.02 和 1.20。由于太赫兹脉冲会在各个表层反射,通过分析层面上每个点反射的脉冲的波形和时间延迟就可以得出缺陷点

的位置、形状和大致深度。图 1 显示一个太赫兹脉冲分别被 SOFI 和 SLA 交界层和 SLA 与铝板交界层反射后的时域的波形。

实验使用时域扫描 (TDS) 的方法。超快激光脉冲 (中心波长 800 nm , 脉冲宽度 130 fs) 被分成两束,一束是抽运光束,用来照射天线产生太赫兹脉冲,另一束是探测光束,在太赫兹脉冲穿过这种隔热材料并被铝制底板反射第二次穿过隔热材料之后,这两束脉冲被同时聚焦在光电探测晶体上,采用平衡探测加锁相放大的方法测量。我们在时域上平移抽运光束以延迟太赫兹脉冲,这样就可以得到太赫兹脉冲在时域上各个点的大小。在得到了实验样品上某点的信息之后,我们继续在 $x-y$ 平面上移动样品,对样品进行二维扫描,并由此得到整个样品的信息。

图 2 分别显示了在正常点和缺陷点太赫兹脉冲从 SLA 和 SOFI 交界面反射的波形。数据处理方法包括对每个点脉冲的峰值强度或者时间延迟作图,分析波形的变化,对波形在时域的一次导数寻找最大变化点,等等。图 2 中小图显示了对每个波形的峰值作图后看到的缺陷点。

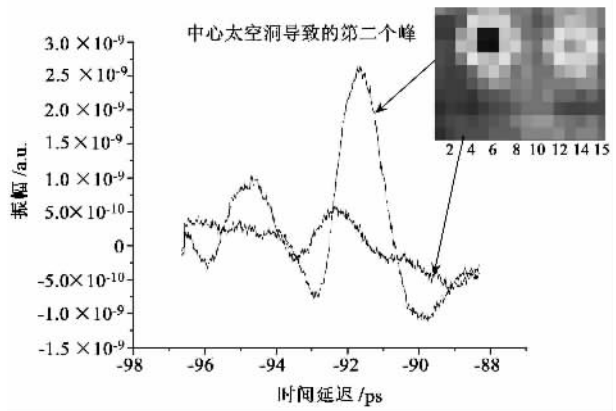


图 2 太赫兹脉冲在 SLA 与 SOFI 交界处正常点和缺陷反射波形比较 (右上小图为处理后此片区域的缺陷分布图)

多次实验,尤其是最近的对 PAL-Ramp SOFI 绝热泡沫层的成功探测 (见本期封面),充分证明太赫兹脉冲的确可以对航天飞机燃料舱的隔热材料进行有效的无损探伤。虽然现有太赫兹探测设备还不能做到快速扫描,但是实现真正的太赫兹大规模工业化应用已经为时不远。太赫兹技术作为一项新兴的探测技术,已经越来越受到人们的重视,必将逐渐造福于民。