

文章编号: 2095-4980(2018)02-0218-06

基于太赫兹技术的熔融沉积 3D 打印误差分析

管丽梅, 苗昕扬, 詹洪磊, 赵 昆*

(中国石油大学 理学院, 北京 102249)

摘 要: 熔融沉积(FDM)技术是目前市售 3D 打印机应用最广泛的材料成型技术, 基于这一技术的 3D 打印机精确度评价与打印试件的误差分析还没有十分完善的标准化方法。FDM 3D 打印常用的聚合物材料在太赫兹波段存在明显吸收。基于太赫兹时域光谱(THz-TDS), 通过缝隙注水的方式放大试件非实体部分的太赫兹响应, 使得太赫兹技术可同时监测 3D 打印试件实体部分与非实体部分的打印精确度。通过分析试件的太赫兹光谱, 能够分辨与原始设计相差 0.96% 的微米级误差, 补充了 3D 打印误差的分析方法。

关键词: 熔融沉积技术; 太赫兹光谱; 3D 打印

中图分类号: TN244

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0218

Terahertz dependent error analysis of 3D printing based on Fused Deposition Modeling

GUAN Limei, MIAO Xinyang, ZHAN Honglei, ZHAO Kun*

(College of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Fused Deposition Modeling(FDM) is a most widely applied material forming technology for 3D printer. Nevertheless, there is no standardized method for error analysis of 3D printing based on FDM. Polymer materials commonly used in FDM has a strong absorption in terahertz range. Using the method of injecting water into the apertures of specimens, error analysis of both the physical area and non-physical area of specimens is successfully realized by Terahertz Time Domain Spectroscopy(THz-TDS). Based on the analysis of terahertz spectrum, the micron error of 0.96% is able to be observed.

Keywords: Fused Deposition Modeling; terahertz spectrum; 3D printing

3D 打印技术是一种基于数字模型的快速成型制造技术, 也被称为“增材制造”(Additive Manufacturing, AM), 具有成型速度快, 节省制造原料, 简化制造流程的优势^[1-3]。目前, 市面上 3D 打印机的材料成型工艺大多基于熔融沉积(FDM)技术, 该技术是一种变杂性低、成本低廉、易于推广的快速成型技术, 其基本制造流程为基于 CAD、PRO-E 等计算机辅助设计软件设计打印目标的三维数字模型, 3D 数模经分层处理, 生成每层模型的成型路径及必要的支撑路径。打印机内部的热熔头把材料加热至熔融状态喷出, 按照模型成型轨迹分层涂敷, 逐层叠加直至工件完成^[4]。FDM 技术多使用聚合物材料, 主要有丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)与聚乳酸(PLA)2 种。制造过程中出现误差的原因主要有 3 点: 首先, 在前期模型构建阶段, 设计的模型文件通常被转换为大多数 3D 打印机都能够识别的 STL 格式, 其实质为利用众多空间三角形面来近似还原三维实体数字模型^[5], 在对数字模型进行近似描述的过程中, 所设置的角度控制、弦高等参数将直接影响文件的精确度; 其次, 在加工成型阶段, 在 XYZ 三个方向均会产生不同的凝结延迟; 另外, 热熔头在按照轨迹轮廓的往复运动过程中也存在一定的机械运动误差。

3D 打印在文物复刻、手术辅助导板定制以及地下气层重现指导能源开发等众多领域得到了广泛应用^[6-9], 在应用过程中, 过大的误差可能会产生威胁人身安全, 造成资源浪费等重大影响, 因此对 3D 打印精确度提出了较

收稿日期: 2017-02-11; 修回日期: 2017-04-11

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项基金资助项目(2012YQ140005); 国家自然科学基金资助项目(11574401); 中国石油和化学工业联合会科技指导计划资助项目(2016-01-07)

*通信作者: 赵 昆 email:zhk@cup.edu.cn

高要求。然而,现有的 3D 打印误差分析多基于对打印成型件进行尺度直接测量,统一的规范方法还没有完全建立^[10]。太赫兹(Terahertz, THz)技术是一种新兴的光谱技术,作为一种无损伤、非接触的检测方法,已广泛应用于食品、安全、能源等众多领域^[11-14]。FDM 技术常采用的 ABS 与 PLA 材料在太赫兹波段均存在明显吸收^[15],具有明显的响应,不同厚度或外形的 FDM 成型件可通过太赫兹光谱信号加以区分。因此,THz 技术可作为 3D 打印误差分析的有效手段。本文利用太赫兹光谱对 3D 打印样品进行误差分析与标定,采用样本内部注水测量的方式,放大打印误差对样品太赫兹波谱的影响,做到同时检测实体误差与非实体误差。将太赫兹技术引入到 3D 打印技术的评价当中,成为 3D 打印误差分析有力的补充手段。

1 样品准备及实验

使用型号为 da Vinci 2.0 Duo 的桌面 3D 打印机,产品说明书标注的打印机精确度为 100 μm 。所设计的试件为长 30 mm、宽 2.5 mm、高 25 mm 的实体,实体内部人为设置了长 20 mm、宽 500 μm 、高 25 mm 的长方体内部缺陷。在 3D 打印过程中,打印试件与打印平台的接触面积越大,越有利于底层材料凝固,因此模型底端增加了长 30 mm、宽 7 mm、高 5 mm 的底座,用于避免底面接触面积过小导致的试件翘边现象。首先,利用 Pro-Engineering 设计 3D 打印试件的三维数字模型,并将其转换为 STL 格式文件,其中,弦高设定为系统允许的最小值,以减少 STL 文件对设计模型描述的偏差。然后,将 STL 格式的模型文件导入 3D 打印机控制软件中,对模型进行分层处理,并在控制软件中设置相关打印参数,其中,打印速度设置为低速以便材料凝固,打印层厚设置为 100 μm 。基于上述三维数字模型,制备了具备相同 3D 打印参数的 40 个试件,编号 1~40,并对 40 个试件分别进行了透射式太赫兹时域光谱检测,检测结果作为参考信号用于后续光谱分析;其后,将每一个试件内注满去离子水,利用太赫兹波对空样品池以及装满样品的样品池分别进行透射式扫描,每个样品测试 2 次,作为样本信号;通过分析太赫兹光谱评价 3D 打印精确度。

采用注水检测的原因是水分子是一种极性分子,对太赫兹波的吸收很大,水含量的微量增加就能引起太赫兹信号的明显降低,因此,样品池的细微差异在注水之后将引起太赫兹光谱的明显变化,降低光谱分析的难度,使结果更加直观,同时也提高了分析的准确性。因此,采用样本注水的方式放大 3D 打印误差对太赫兹光谱的影响,从而方便波谱分析,有利于 3D 打印精确度的准确评估。

太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统采用中心波长为 800 nm 的飞秒激光器,产生脉冲宽度为 100 fs 的激光脉冲。偏振分束器将激光脉冲分成 2 束,分别作为泵浦脉冲与探测光束。泵浦脉冲激发光导天线产生太赫兹辐射,经过聚焦透镜形成准直的 THz 脉冲传输到检测系统中。太赫兹脉冲透射过样品后,携带样品信息的太赫兹样品信号传输至 ZnTe 晶体探测器被接收^[16]。为避免空气中水蒸气的干扰,实验在湿度小于 2% 的干燥空气环境下进行,为保证激光器及太赫兹时域光谱中的精密部件稳定运行,实验温度保持在 (294 ± 1) K。

2 结果与讨论

THz-TDS 系统中测得的参考与中空试件的太赫兹时域信号表现出明显区别,如图 1(a)所示,参考时域信号的峰值为 0.24 V,40 个试件的信号虽不尽相同,但从整体的太赫兹波形上看,信号峰值均大致在 21 ps 处出现,峰值的大小在 0.096 V 上下浮动。图 1(b)为随机选取的 5 个注水试件的太赫兹时域信号,由图中可以看出,由于水分子对太赫兹波的吸收显著,注水后信号出现了明显衰减,各个注水试件的峰值大致分布在 0.0025 V 上下。

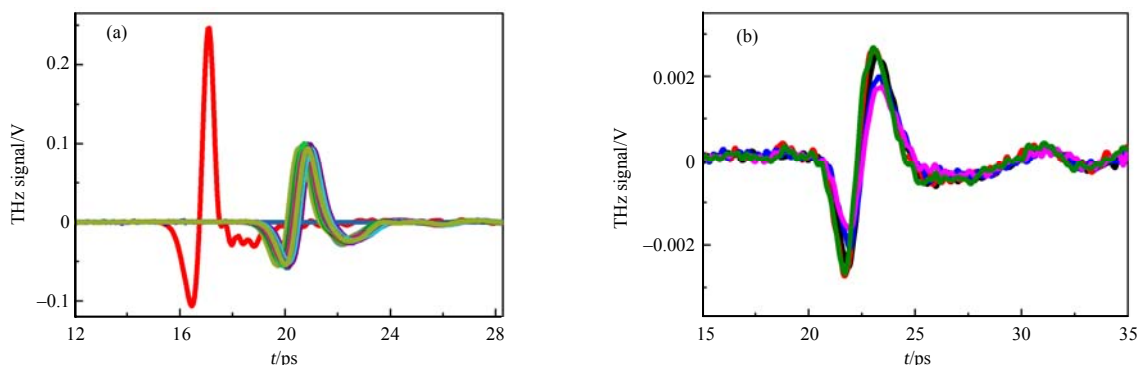


Fig.1 THz-TDS of the reference and specimens(a) and THz-TDS of 5 specimens filled with water(b)

图1 参考及试件的太赫兹时域光谱(a)以及随机选取的5个注水样本的太赫兹时域光谱(b)

为进一步分析试件之间的差异,分别将图 1 所示的 40 个试件的太赫兹时域信号峰值及 40 个注水样品池太赫兹时域信号的峰值提取出来,如图 2 所示。其中,横坐标 N 代表样品池编号, E_{p-cell} 为中空试件的太赫兹时域信号峰值, $E_{p-water}$ 为注水试件的太赫兹时域信号峰值。从图中可以看到,空样品池峰值在 0.096 V 上下浮动,注水样品池的信号峰值在 0.002 5 V 上下浮动。

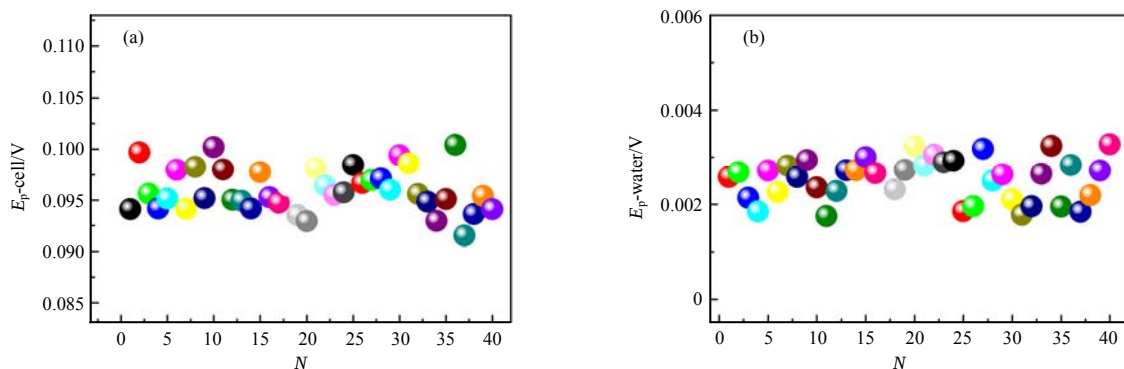


Fig.2 E_p (peak value of THz-TDS) of the 40 specimens(a) and E_p of the 40 specimens filled with water(b)

图 2 40 个试件的太赫兹时域信号峰值(a)以及注水试件太赫兹时域信号峰值(b)

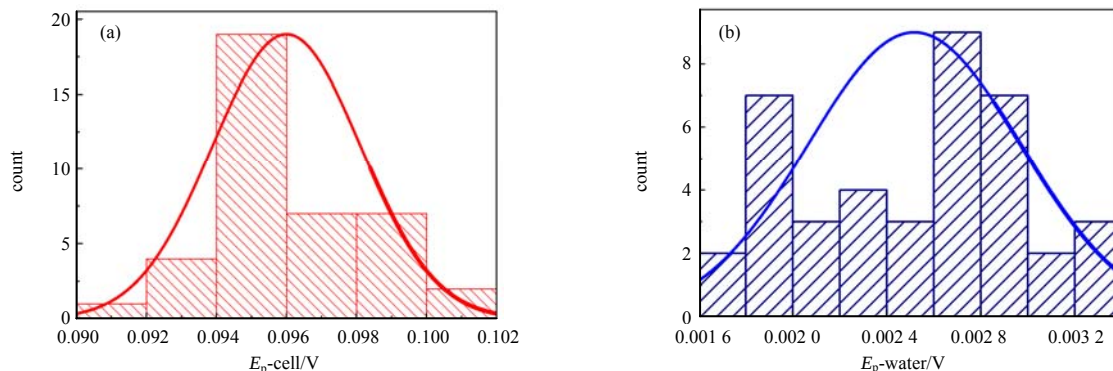


Fig.3 Normal distribution of E_{p-cell} (a) and normal distribution of $E_{p-water}$ (b)

图 3 40 个试件的太赫兹时域信号峰值的正态分布分析结果(a)以及注水试件太赫兹时域信号峰值正态分布分析结果(b)

对上述峰值信号的值进行正态分布分析,结果如图 3 所示,空样品池的信号峰值分布中心为 0.096 V,而注水样品池峰值则以 0.002 5 V 为中心上下分布。因此,综合空样品池信号峰值及注水样品池信号峰值信息,与二者差距最小的是 14 号样品池, E_{p-cell} 为 0.094 15 V, $E_{p-water}$ 为 0.002 73 V。在假定其检测区缝隙厚度恰好为 500 μm 的前提下,14 号样品池的注水前后的时域信号分别作为参考信号与样品信号,对 2 个信号进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),求得参考信号的太赫兹频域信号与样品的太赫兹频域信号,基于二者之比可求得样本折射率,从而计算样本吸收系数^[17]。在参考信号与样本信号确定的情况下,吸收系数与样本厚度存在一一对应的关系。基于上述假设,求得纯水的吸收系数如图 4 所示,与水的标准吸收完全一致^[18],证明对 14 号样品池的实际厚度为 500 μm 的假设是正确的,因此后续误差分析均利用 14 号试件作为基准。

误差分析计算的方法是以空载信号作为参考信号,使用 FFT 的数值可得到信号的频域谱。利用吸光度的定义 $A = \log(I_{\text{sam}}/I_{\text{ref}})$ 计算吸收光谱,其中 I_{ref} 和 I_{sam} 分别是参考信号与样品信号的太赫兹频域谱值,得到的吸收光谱即为仅由样品池壁引起的吸收在各个频率处的变化情况,频率有效范围 0.1~1 THz。以 0.1 THz 为频率间隔,分别计算各个样品池在 0.1~1 THz 范围内的吸光度与 14 号样品池在对应频率处的吸光度的比值,得到 10 个倍数

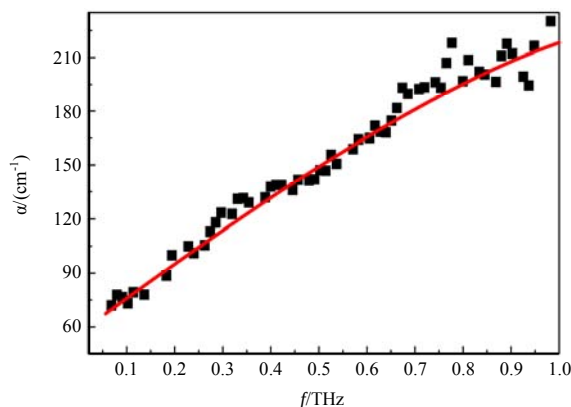


Fig.4 Absorption coefficient of ionic water using the terahertz spectrum data of NO.14 specimen based on the assumption that NO.14 specimen is exactly the same as the original design

图 4 基于 14 号样品池缝隙厚度与原始设计一致的前提下计算纯水的太赫兹吸收系数图

取平均,得到各个样品池的吸光度相对于 14 号样品池的平均倍数 m ,则各样品池壁厚为 $D=m \times 1\,000(\mu\text{m})$ 。结果如图 5(a)所示,40 个样品池的平均壁厚为 $1\,024.656\,\mu\text{m}$,整体偏大,其中 4 号样品池壁厚最大,达到 $1\,166.382\,\mu\text{m}$,10 号样品池的壁厚最小,只有 $952.235\,\mu\text{m}$ 。误差根据 $e_1=(|D(N)-D14|/D14) \times 100\%$ 计算,误差大于 10% 的有 3 件,占总体的 0.75%;误差在 5%~10% 的有 9 件,占总体的 22.5%;大多数试件实体误差小于 5%,共计 28 件,占总体的 70%,其中误差小于 3% 的有 26 件,占总数的 65%,平均误差为 2.47%。以同样的方法计算各试件测得的水的吸光度与 14 号测得的水的吸光度的比值 n ,则各试件的缝隙厚度可由公式 $d=n \times 500(\mu\text{m})$ 计算得到,最终结果如图 5(b)所示,40 个样品池的测试取平均厚度为 $499.516\,3\,\mu\text{m}$,整体偏小,其中 31 号样品池的测试区厚度最大达到了 $547.696\,8\,\mu\text{m}$,34 号样品池的测试区厚度最小,只有 $459.890\,9\,\mu\text{m}$ 。误差根据 $e_2=(|d(N)-d14|/d14) \times 100\%$ 计算,所有试件误差均小于 10%,大多数试件的误差小于 5%,共有 26 件,占总体的 65%,其中误差小于 3% 的 12 件,占比为 24%,平均误差为 0.96%。

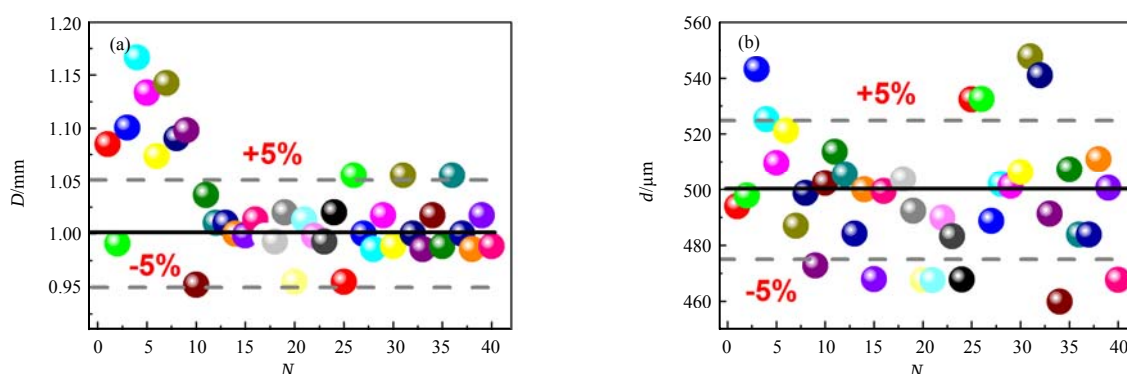


Fig.5 Analysis results of solid thickness of each specimen test area(a) and clearance width of each specimen test area(b)

图5 试件测试区壁厚分布(a)以及试件测试区缝隙厚度(b)

实验中,XYZ Davinci 2.0 的 ABS 实体打印误差为 2.47%,非实体打印误差为 0.96%。利用透射式太赫兹光谱可分辨 3D 打印试件的微米级误差,证明了太赫兹技术表征 FDM 3D 打印精确度的可行性。在此前的报道中,使用 CT 数据与实际测量的方法,标定了光固化 3D 打印 $0.62\sim 0.35\text{ mm}$ ($0.56\sim 0.39\%$) 的实体误差^[19];Chang P S 等检测到 3D 打印颅骨表面小于 2 mm 的打印误差^[20];Asaumi 等则发现打印试件 2.16% 的内部变化^[21];Philipp 等则验证了使用半透明材料的彩色 3D 打印机存在 1% 的试件打印误差^[22]。由此可见,太赫兹光谱检测技术的分析精确度水平与其他方法基本持平,但相比之下,太赫兹技术的应用具备两大优势:a) 安全度高,THz 光子的能量低,只有几毫电子伏特,不会对被检测物或人体造成任何破坏^[23-26];b) 可同时对实体与非实体的误差进行高精度分析。因此,在 3D 打印机生产校准、试件精确度要求高的情况下,太赫兹检测技术可作为一种安全高效的 3D 打印精确度评价手段。

3 结论

太赫兹技术是评价 3D 打印精确度的一种有效方式,可分辨微米级误差。利用基于 FDM 成型技术的 3D 打印机,制造了缝隙厚度为 $500\,\mu\text{m}$ 的 ABS 试件,并利用太赫兹技术进行了打印误差分析。分析结果表明,打印实体尺寸偏大,平均误差为 2.47%,大多数的试件误差小于 5%,存在个别试件误差超过 10%;打印的缝隙尺寸偏小,平均误差相对打印实体较小,只有 0.96%,大多数试件误差小于 5%,所有试件的误差均小于 10%。造成这一结果的影响因素有很多,可能为数字模型在进行文件转换过程中出现的偏差,材料凝固过程中出现的变形,以及加热喷头的机械运动过程中对材料的拖拉等。该实验结果证明了太赫兹技术作为 3D 打印误差分析手段的有效性。3D 打印技术与太赫兹技术的结合是一个新的领域,太赫兹技术可能在 3D 打印应用的航空航天零部件缺陷检测、医疗手术辅助模具合格检测以及 3D 打印地球物理模型等各个领域起到辅助作用;反之,3D 打印也可用于开发适用于太赫兹检测的仪器设备,如精确度要求极高的微流体芯片、高含水样品池等,二者的创新性结合具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] BABU S S,GOODRIDGE R. Additive manufacturing[J]. Materials Science & Technology, 2015,31(8):881-883.
- [2] TUMBLESTON J R,SHIRVANYANTS D,ERMOSHKIN N,et al. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. Science, 2015,347(6228):1349.

- [3] GAO W,ZHANG Y, RAMANUJAN D, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering[J]. *Computer Aided Design*, 2015,69(C):65–89.
- [4] 唐通鸣,张政,邓佳文,等. 基于 FDM 的 3D 打印技术研究现状与发展趋势[J]. *化工新型材料*, 2015(6):228–230. (TANG Tongming,ZHANG Zheng,DENG Jiawen, et al. Research status and trend of 3D printing technology based on FDM[J]. *New Chemical Materials*, 2015(6):228–230.)
- [5] SZILVSI-NAGY M,MÁTYÁSI Gy. Analysis of STL files[J]. *Mathematical & Computer Modeling*, 2003,38(7):945–960.
- [6] 仇国强,任宁宁. 普光高含硫气田:掌握核心技术 攻克世界难题[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2013(2):1–2. (QIU Guoqiang,REN Ningning. Puguang gas field with high sulfur content:mastering the core technology and overcoming problems of the world[J]. *China Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality*, 2013(2):1–2.)
- [7] 杨蕴. 浅谈 3D 打印技术在陶瓷类文物修复和复制中的应用[J]. *文物保护与考古科学*, 2015(2):110–113. (YANG Yun. The application of 3D printing technology in the restoration and reproduction of ceramic artifacts[J]. *Cultural Relics Protection and Archaeological Science*, 2015(2):110–113.)
- [8] VACCAREZZA M,PAPA V. 3D printing: a valuable resource in human anatomy education[J]. *Anatomical Science International*, 2015,90(1):64–65.
- [9] MALIK H H,DARWOOD A R J,SHAUNAK S, et al. Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications[J]. *Journal of Surgical Research*, 2015,199(2):512–522.
- [10] SILVA D N,OLIVEIRA M G D,MEURER E, et al. Dimensional error in selective laser sintering and 3D-printing of models for craniomaxillary anatomy reconstruction[J]. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 2008,36(8):443–449.
- [11] MIAO X Y,SUN S N,LI Y Z, et al. Real-time monitoring the formation and decomposition processes of methane hydrate with THz spectroscopy[J]. *Science China*, 2017,60(1):14221.
- [12] MIAO X Y,ZHAN H L,ZHAO K, et al. Oil yield characterization by anisotropy in optical parameters of the oil shale[J]. *Energy Fuel*, 2016,30(12):10365–10370.
- [13] ZHAN H,WU S,BAO R, et al. Qualitative identification of crude oils from different oil fields using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Fuel*, 2015,143(5):189–193.
- [14] ZHAN H,ZHAO K,XIAO L, et al. Spectral characterization of the key parameters and elements in coal using terahertz spectroscopy[J]. *Energy*, 2015(93):1140–1145.
- [15] BUSCH S F,WEIDENBACH M,FEY M, et al. Optical properties of 3D printable plastics in the THz regime and their application for 3D printed THz optics[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2014,35(12):993–997.
- [16] ZHAN H L,SUN S N,ZHAO K, et al. Less than 6 GHz resolution THz spectroscopy of water vapor[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015,58(12):2104–2109.
- [17] GUAN Limei,ZHAN Honglei,MIAO Xinyang, et al. Terahertz-dependent evaluation of water content in high-water-cut crude oil using additive-manufactured samplers[J]. *Science China*, 2017,60(4):044211.
- [18] XU J,PLAXCO K W,ALLEN S J. Absorption spectra of liquid water and aqueous buffers between 0.3 and 3.72 THz[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2006,124(3):036101.
- [19] CHOI J Y,CHOI J H,KIM N K, et al. Analysis of errors in medical rapid prototyping models[J]. *International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, 2002,31(1):23–32.
- [20] CHANG P S,PARKER T H,JR P C, et al. The accuracy of stereolithography in planning craniofacial bone replacement[J]. *Journal of Craniofacial Surgery*, 2003,14(14):164–170.
- [21] ASAUMI J,KAWAI N,HONDA Y, et al. Comparison of three-dimensional computed tomography with rapid prototype models in the management of coronoid hyperplasia[J]. *Dento Maxillo Facial Radiology*, 2001,30(6):330–335.
- [22] BRUNTON A,ARIKAN C A,URBAN P. Pushing the limits of 3D color printing:error diffusion with translucent materials[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2015,35(1):4.
- [23] TONOUCHI M. Cutting-edge THz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007,1(2):97–105.
- [24] MITTLEMAN D M. Frontiers in terahertz sources and plasmonics[J]. *Nature Photonics*, 2013,7(9):666–669.
- [25] BURNETT A D,FAN W,UPADHYA P C, et al. Broadband terahertz time-domain spectroscopy of drugs-of-abuse and the use of principal component analysis[J]. *Analyst*, 2009(134):1658–1668.
- [26] FECKO C J,EAVES J D,LOPARO J J, et al. Ultrafast hydrogen-bond dynamics in the infrared spectroscopy of water[J]. *Science*, 2003(301):1698–1702.

(下转第 232 页)