

## 大鼠冲击性脑创伤的太赫兹波成像检测

王与焯<sup>1,2\*</sup>, 李海滨<sup>1,2</sup>, 王泽龙<sup>1,2</sup>, 武丽敏<sup>1,2</sup>, 葛梅兰<sup>1,2</sup>, 徐德刚<sup>1,2</sup>, 陈图南<sup>3</sup>, 冯华<sup>3</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup><sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 天津 300072;<sup>2</sup>天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;<sup>3</sup>陆军军医大学西南医院神经外科, 重庆 400038

**摘要** 冲击波造成的脑创伤是目前较常见的致死致残疾病之一, 对冲击性脑损伤的检测与分类具有重要意义。基于连续太赫兹波成像系统, 对不同程度冲击波致伤的大鼠脑组织进行了连续太赫兹波衰减全反射成像检测, 并采用支持向量机(SVM)分类器对不同创伤程度的脑组织太赫兹波成像结果进行分类识别。结果表明, 太赫兹波衰减全反射成像技术可以实现对轻度、中度冲击性脑创伤脑部组织的检测。通过 SVM 分类器对不同创伤程度的脑部组织成像结果进行分类识别, 其分类识别准确率可以达到 86.36%。太赫兹波成像技术有望实现对不同程度冲击性脑创伤的早期精确检测与诊断。

**关键词** 医用光学; 太赫兹波; 衰减全反射; 冲击性脑创伤; 支持向量机

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1017001

## Terahertz Wave Imaging Detection of Blast-Induced Traumatic Brain Injury of Rats

Wang Yuyue<sup>1,2\*</sup>, Li Haibin<sup>1,2</sup>, Wang Zelong<sup>1,2</sup>, Wu Limin<sup>1,2</sup>, Ge Meilan<sup>1,2</sup>,  
Xu Degang<sup>1,2</sup>, Chen Tunan<sup>3</sup>, Feng Hua<sup>3</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2</sup><sup>1</sup> School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, The Institute of Laser and Opto-Electronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;<sup>3</sup> Department of Neurosurgery, The Southwest Hospital of Army Medical University, Chongqing 400038, China

**Abstract** Traumatic brain injury (TBI) caused by shock waves is one of the most common fatal and disabling diseases, and thus the early detection and classification of blast-induced TBI (bTBI) have important clinical significance. In this paper, based on the continuous terahertz wave imaging system, the brain tissues of rats with different degrees of bTBI are detected by the continuous-wave terahertz attenuated total reflection (CW THz-ATR) imaging system, and the THz images of these brain tissues of different levels of trauma are classified and identified by the support vector machine (SVM). The imaging results show that the detection of brain tissues with mild and moderate bTBI can be realized by the THz-ATR imaging technology. Moreover, the identification and classification of THz images of different levels of trauma by SVM can achieve the accuracy of 86.36%. This suggests that THz imaging technology has great potential for the early and precise detection and diagnosis of different degrees of bTBI.

**Key words** medical optics; terahertz wave; attenuated total reflection; blast-induced traumatic brain injury; support vector machine

收稿日期: 2021-10-12; 修回日期: 2021-10-19; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金 (U1837202, 62175182, 61775160, 61771332, 62011540006)

通信作者: \*yuyewang@tju.edu.cn

# 1 引言

冲击性脑创伤(bTBI)是一种由冲击波引起的头部突然加速或减速所导致的创伤性脑部疾病。近年来,高能武器不断发展,煤矿、油气田爆炸等工业事故的发生率也持续升高,bTBI已经成为了军事冲突与民用爆炸的主要伤害类型<sup>[1]</sup>。轻度、中度的冲击性脑损伤通常会对脑组织造成弥散性的整体损伤,在短时间内可能只会引起不适感、头痛、头晕或短暂的无意识,在临床检查中难以观察到水肿或缺血等症状<sup>[2-3]</sup>,因此难以对轻、中度的冲击性脑创伤进行精确诊断和及时治疗。

目前针对冲击性脑创伤的检测手段可以分成三类:神经功能障碍评估法、影像学检查和生物标志物检测法。其中,神经功能障碍评估法通常根据自我陈述和临床表现的神经症状进行诊断<sup>[4]</sup>,该方法的不确定性较高。影像学检查是目前应用最广泛的临床检测方法<sup>[5]</sup>。2011年,Mac Donald等<sup>[6]</sup>利用核磁共振成像(MRI)技术分别对63名轻度冲击性脑创伤患者和21名正常人的脑部进行了检测,结果发现所有人的MRI检测结果均没有显示出异常。除此之外,一些新型的成像技术,如功能型MRI<sup>[7]</sup>、计算机断层成像(CT)<sup>[8]</sup>、正电子发射型计算机断层显像(PET)<sup>[9]</sup>等,也被用于检测不同程度的冲击性脑创伤,但均无法进行高灵敏度和高准确率的检测,不能为冲击性脑创伤的诊断提供明确手段。生物标志物检测法,如酶联免疫吸附实验法和蛋白质印迹法等,通过测量与冲击性脑创伤相关的特征物质的含量来推断损伤程度<sup>[10-11]</sup>,具有耗时且昂贵的缺点。因此,迫切需要一种更精准高效的检测方法,来帮助医生更快速准确地对冲击性脑创伤进行创伤程度的评估以及手术的执行。

太赫兹波(THz)是指频率位于0.1~10 THz的电磁波,具有低光子能量、指纹谱、穿透性、对水敏感等特性。鉴于这些特性,近年来太赫兹波成像被广泛应用于生物医学领域多种病灶的检测研究中<sup>[12-14]</sup>,如皮肤癌<sup>[15]</sup>、乳腺癌<sup>[16]</sup>、口腔癌<sup>[17]</sup>等,特别是针对各种脑部病灶的相关检测研究<sup>[18]</sup>,已取得巨大进步。2004年,Darmo等<sup>[19]</sup>使用连续太赫兹量子级联激光器对鼠脑切片进行了太赫兹成像研究,证明了太赫兹波成像技术可以获得脑组织的高分辨率和高对比度图像。随后,太赫兹技术被广泛应用于脑胶质瘤<sup>[20]</sup>、脑创伤<sup>[21]</sup>、脑缺血<sup>[22]</sup>等脑部病灶的诊断研究中。在脑创伤方面,2018年,天津大学激

光与光电子研究所Zhao等<sup>[23]</sup>将太赫兹波应用于脑创伤的检测研究中,对新鲜的击打性脑创伤大脑组织切片进行了透射式成像,结果表明:不同程度的脑创伤组织对太赫兹波的透过率存在明显差异,太赫兹波可用于区分不同程度的脑创伤,这是由于创伤后组织含水量随着创伤程度的增加而增加;进一步结合三维重构技术,实现了对鼠脑内部创伤区域的三维分布检测<sup>[24]</sup>。基于上述工作,天津大学激光与光电子研究所结合机器学习,实现了对不同程度击打性脑创伤组织的太赫兹图像分类识别,其分类识别准确率达到87.5%<sup>[25]</sup>。击打性脑创伤会造成脑组织水肿,且水肿程度随着创伤程度的增加而增加。冲击性脑创伤往往伴随着脑部组织弥散性损伤、混合性损伤等闭合性脑损伤,与击打性脑创伤不同,冲击性脑创伤的脑部组织的含水量、神经结构等没有明显变化,给诊断造成了很大的困难,目前的检测手段无法对轻度、中度冲击性脑创伤进行准确诊断。鉴于太赫兹波对生物组织中细胞密度、含水量等较为敏感,太赫兹波成像技术有望实现冲击性脑创伤的早期检测诊断。

本文采用太赫兹波衰减全反射成像系统,对正常大鼠脑组织和不同程度冲击波致伤的大鼠脑组织分别进行了成像检测,实验结果表明,太赫兹波成像技术可以实现轻度、中度冲击性创伤脑组织的成像,并且将太赫兹波成像技术与支持向量机(SVM)分类器相结合,可以实现不同程度冲击性脑创伤组织太赫兹图像的分类识别,其分类准确率达86.36%。

## 2 研究方法

### 2.1 实验装置

图1为连续太赫兹波衰减全反射成像系统示意图。在此实验中,使用高功率、可调频率的光泵连续太赫兹波激光器(FIRL100, Edinburgh Instruments Ltd., 英国)作为辐射源,令其工作在2.52 THz,此时最高输出功率可达150 mW。设置斩波器的频率为50 Hz,并对连续太赫兹波进行调制。为了提高成像质量,使用太赫兹波线栅偏振器将太赫兹波分成两束光,其中,参考光直接由高莱探测器1(GC-1P, Tydex Ltd., 俄罗斯)所接收,用于提高成像的信噪比;信号光与样品相互作用后由高莱探测器2(GC-1P, Tydex Ltd., 俄罗斯)接收。太赫兹透射式成像系统对新鲜生物样品的厚度具有较高的要求和反射式成像系统中漫反射、干涉等问题导致成像效果较差<sup>[26]</sup>,因此在该实验中采用衰减

全反射成像模式,通过倏逝波与样品的相互作用进行成像,这样可在保证图像具有高对比度的同时也具有较高的分辨率。使用高阻硅材质的棱镜作为全反射成像窗口,棱镜形状设计为等腰三角形<sup>[27]</sup>。实验前,将放有样品的载物台固定在  $x$ - $y$  线性扫描移动平台 (SGSP20-85, SIGMA KOKI Ltd., 日本) 上,将载物台上升至待测样品与棱镜下表面紧密贴合后,将其与棱镜固定于一体。实验中,经平面镜反射后的信号光由离轴抛物面镜 1 聚焦至成像窗口下

表面,与样品相互作用后又经过离轴抛物面镜 2 和离轴抛物面镜 3 被高莱探测器 2 接收<sup>[28]</sup>。实验前测量得到该成像系统的  $x$  轴和  $y$  轴分辨率分别为  $400\ \mu\text{m}$  和  $460\ \mu\text{m}$ ,如图 2 所示。实验中,将扫描步长设置为  $200\ \mu\text{m}$ ,扫描速率为  $10\ \text{pixel/s}$ 。为了减小环境对生物样本的影响,将生物样品所在的载物台与温控仪 (ITC4015, THORLABS) 相连接,将成像时的样本温度稳定在  $4\ ^\circ\text{C}$ ,环境湿度为  $14.5\% \pm 0.2\% \text{RH}$ 。

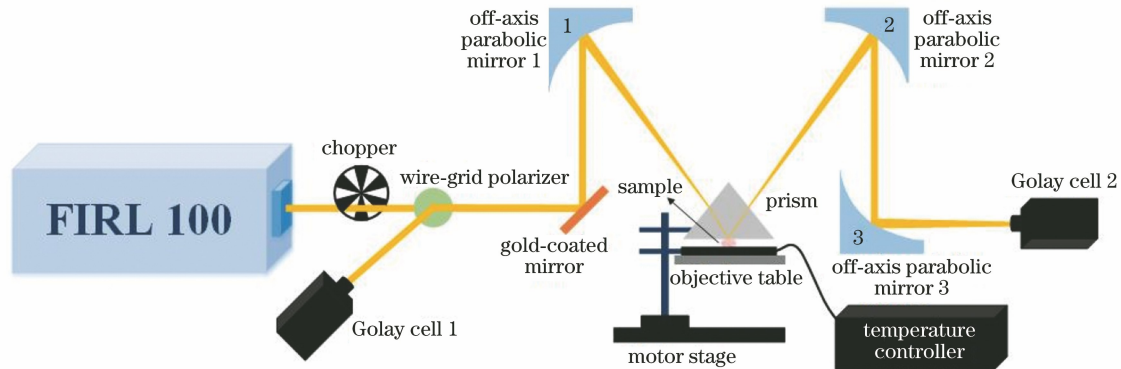


图 1 连续太赫兹波衰减全反射成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous terahertz attenuated total reflection imaging system

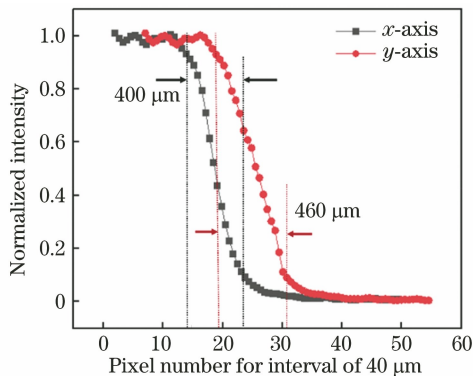


图 2 连续太赫兹波衰减全反射成像系统的分辨率

Fig. 2 Resolution of continuous terahertz attenuated total reflection imaging system

## 2.2 样品制备

本次实验中所有的动物实验操作均依照中国的《动物福利法》规定进行,并且得到了陆军军医大学实验动物伦理委员会的许可。实验动物选用体重为  $250\ \text{g}$  左右的成年 (9 周龄) 雄性 Sprague-Dawley 大鼠,大鼠从陆军军医大学动物实验中心购得。本研究采用陆军军医大学大坪医院所研制的生物激波管 (BST-1 型) 作为冲击波的模拟装置,建立冲击性脑创伤动物的模型。将未麻醉的大鼠安置在金属网状笼子中,再将其放置在激波管中,使其在闭口模式下工作,通过调整激波管驱动端的压力峰值来模

拟不同程度的冲击波对实验大鼠造成的不同程度的冲击性脑创伤。本实验共对 21 例大鼠进行冲击波实验,其中,受到  $4\ \text{MPa}$  驱动压冲击的大鼠有 14 例,对应轻度创伤组 (mild),受到  $5\ \text{MPa}$  驱动压冲击的大鼠有 7 例,对应中度创伤组 (moderate)<sup>[29]</sup>。另外,随机选取同一批次中的 7 只正常大鼠,将其设置为未经过激波管冲击的假性对照组 (sham)。

## 3 分析与讨论

在创伤 3 h 后,从每组中随机选取 4 只大鼠,采用改进的大鼠神经功能缺损评估方法 (mNSS),通过提尾实验、平面行走、感觉实验、平衡木站立和反射测试对大鼠的神经功能缺损程度进行评价,其结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,神经功能障碍的严重程度与机体受到冲击波后的脑部损伤程度呈正相关,三组大鼠得分差异明显。其中对照组各方面行为表现正常; $4\ \text{MPa}$  驱动压冲击组在创伤后 3 h 可以正常行走,但在提尾实验和平衡木实验中均表现异常,耳廓反射和惊恐反射丧失,mNSS 的平均创伤得分为 3.5 分,在轻度创伤得分范围内; $5\ \text{MPa}$  驱动压冲击组在创伤后 3 h 不能直线行走,耳廓反射和惊恐反射丧失,并且在平衡木实验中的表现更差,平均创伤得分为 6.5 分,位于中度创伤得分范围内。

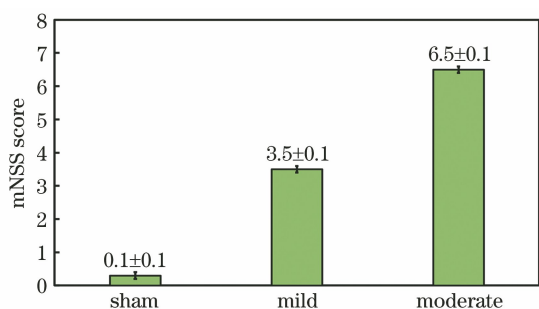


图 3 对照组与不同程度冲击性脑创伤大鼠的神经功能缺损评估得分

Fig. 3 mNSS scores of sham and different degrees of bTBI tissues

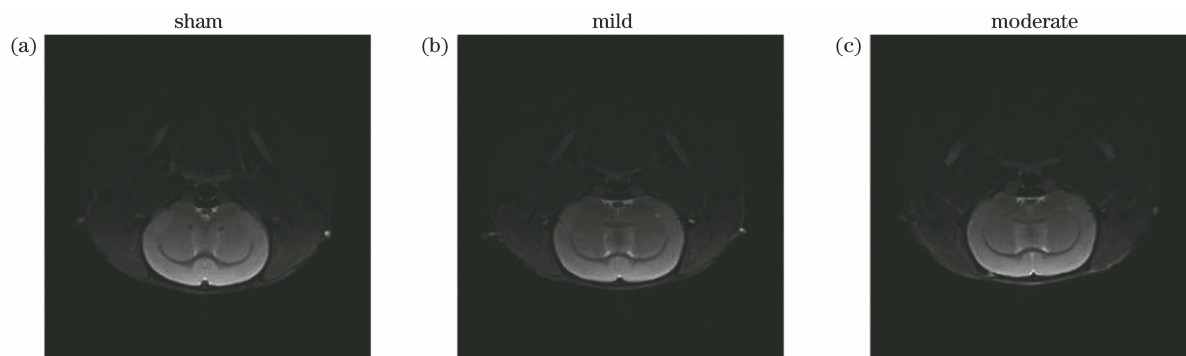


图 4 大鼠脑部核磁共振图像。(a)对照组；(b)轻度创伤组；(c)中度创伤组

Fig. 4 MRI images of rat brain. (a) Control group; (b) mild bTBI group; (c) moderate bTBI group

大脑组织的创伤位置及受损范围，将其余脑组织浸泡在油酸中低温保存以防止组织水分的流失。TTC 本身可作为一种氧化还原指示剂，其与正常脑组织接触时，和正常脑组织中的脱氢酶反应后变成红色；其与缺血梗塞组织接触时，创伤导致脑组织内脱氢酶活性下降，无法与其发生反应，因此颜色不会发生变化，呈现苍白色。图 5 为 TTC 染色结果，从图中可以看出正常组的大鼠脑组织的 TTC 染色切片中除了脑组织本身的白质区域外，无苍白色区域；轻度、中度创伤组的 TTC 染色结果与对照组无肉眼可见的差别，因此，无法使用该方法对轻度、中度冲击性脑创伤进行检测。

进一步地，对创伤脑组织进行太赫兹波衰减全反射成像检测。为了保证大鼠脑组织与衰减全反射棱镜紧密贴合，在对大鼠脑组织进行成像检测之前，先将脑组织从油酸中取出，去除表面残留油酸，将其固定在冰冻切片机(CM1950, Leica Ltd., 德国)上，将待测面切平，使其表面平整，如图 6(a)~(c)所示，将待测样品通过升降台上升至棱镜表面，并采用一定的压力确保样品待测区域与衰减全反射窗口紧密接触，控制步进电机对样品及成像窗口整体进行

利用核磁共振成像分别对对照组、轻度创伤组和中度创伤组的大鼠脑部进行断层成像。图 4 分别为对照组、轻度创伤组和中度创伤组的大鼠脑部核磁共振成像结果，可以看出，不同冲击波强度造成大鼠脑部损伤后，其脑部核磁图像中脑组织各区域均完整，无明显的灰度变化，该结果表明核磁共振成像技术对冲击性脑创伤检测的效果较差，无法实现对轻度、中度冲击性脑创伤的诊断。

在上述实验后，取出对照组和轻度、中度创伤组大鼠的完整脑部组织，每组中随机选择两例脑组织进行一氯化三苯基四氮唑(TTC)染色，进一步观察

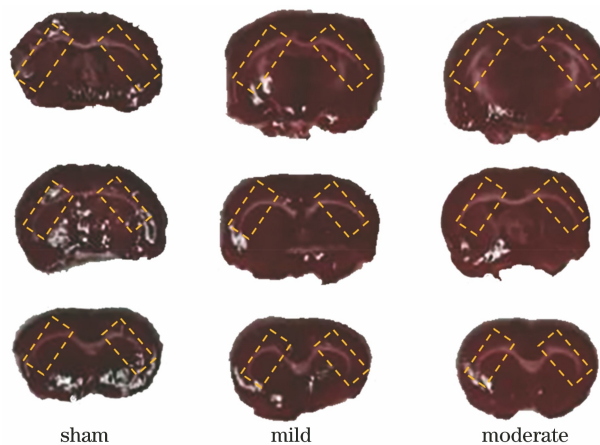


图 5 对照组与不同程度冲击性脑创伤大鼠的脑部 TTC 染色结果

Fig. 5 TTC staining results of brain TTC of sham and different degrees of bTBI tissues

移动，通过点扫描的方式获得大鼠脑组织的太赫兹波强度信息，对每个脑组织进行 3 次扫描。图 6(d)~(f)为正常鼠脑组织与轻度、中度创伤鼠脑组织的太赫兹波成像结果，结果表明：正常大鼠脑组织的全反射率相对均匀，为  $43.0\% \pm 0.2\%$ 。对于轻度、中度创伤大鼠脑组织，组织整体的平均全反

射率分别为  $41.2\% \pm 0.65\%$  和  $40.3\% \pm 0.8\%$ ，相比正常脑组织有一定程度的降低，这说明太赫兹波能够检测出不同创伤程度脑组织总含水量的微小变化。特别是，随着创伤程度的增加，轻度、中度创伤

大鼠脑组织成像区域中全反射率降低区域所占的比例分别为 7% 和 13%，表明脑组织中的创伤面积逐渐增大，这可能是由脑组织中水含量轻微变化、细胞特性等因素的改变造成的。

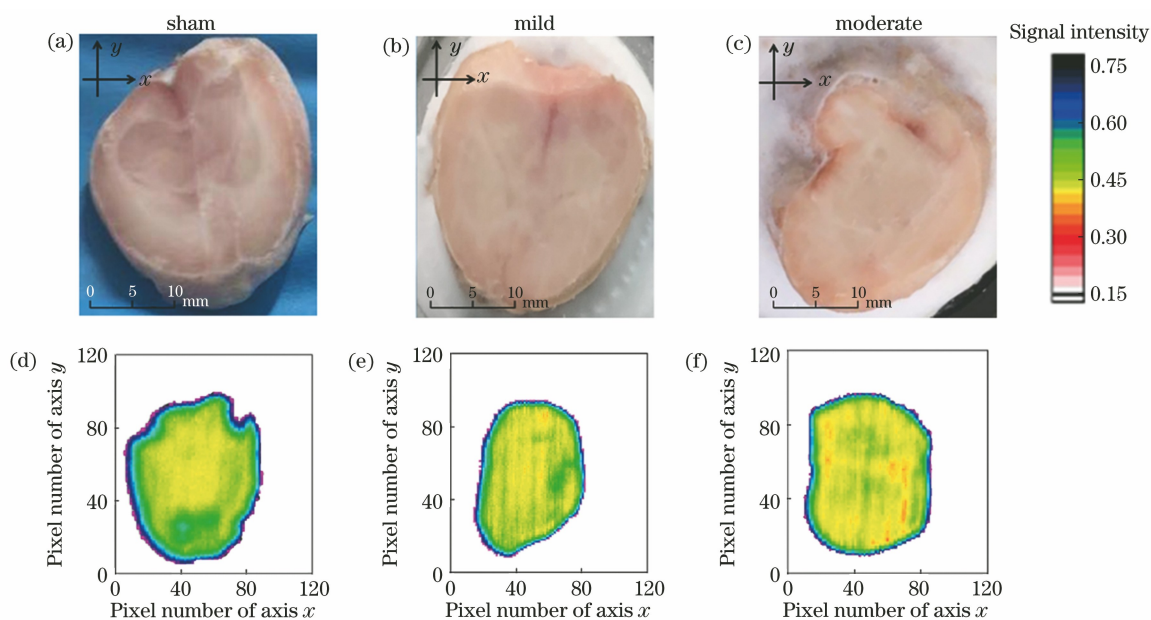


图 6 鼠脑组织实物照片和对应的太赫兹波成像结果。(a)正常、(b)轻度创伤、(c)中度创伤的鼠脑组织实物照片；(d)~(f)图 6(a)~(c)对应的太赫兹波成像结果

Fig. 6 Physical photographs of mouse brain tissue and corresponding terahertz wave imaging results. Physical photographs for (a) normal, (b) mild trauma, and (c) moderate trauma of mouse brain tissue; (d)–(f) THz imaging results corresponding to Figs. 6(a)–(c)

为了实现不同创伤程度脑组织的准确分类识别,使用机器学习分类器对实验所得的太赫兹图像进行自动识别<sup>[25]</sup>,包括 5 个对照组图像、12 个轻度损伤图像和 5 个中度损伤图像。考虑到太赫兹成像过程中每个样本的放置位置及角度的差异,需要对图像进行预处理。预处理分为三个步骤,如图 7 所示。首先,将所有图像以灰度图格式进行

处理,其中亮点表示对太赫兹波吸收较小的区域,暗点表示对太赫兹波吸收较大的区域;其次,对灰度图像进行二值化处理,并旋转图像使每张图像中鼠脑的角度一致,之后进行二值化,分割出脑组织区域并将其标记为感兴趣(ROI)区域;最后将所有 ROI 区域按照等比重置,提取出特征维度相同的鼠脑区域。

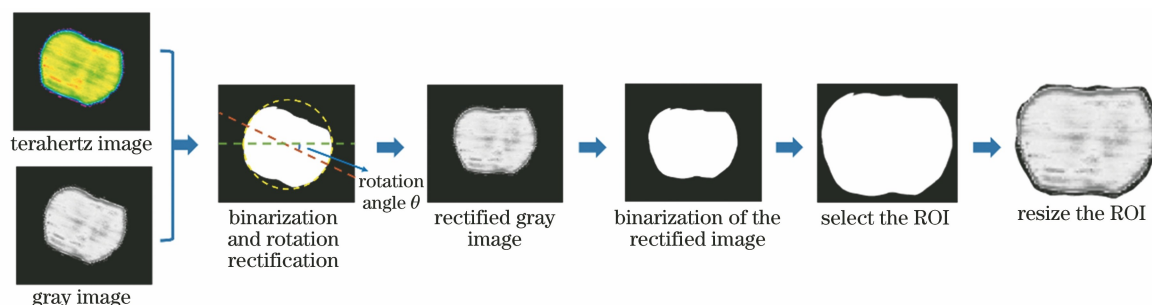


图 7 太赫兹图像预处理及标准化

Fig. 7 Preprocessing and standardization of THz images

在完成图像预处理后,基于不同程度的脑创伤组织对太赫兹波吸收的差异性,在太赫兹图像的 ROI 区域中提取其反射率在空间域分布特征,其

中,图 8(a)中的变量  $F$  为反射率在空间域中分布特征的特征向量,  $[f_1 - f_{240}]$  则为特征向量  $F$  的前 240 个值,由太赫兹图像中每列的最小、平均和最大

反射率值( $d_{i, \min}, d_{i, \text{mean}}, d_{i, \max}, i=1, 2, \dots, 80$ )构成。除此之外,不同创伤程度的脑组织对太赫兹波的吸收存在一定的差异,导致其太赫兹图像的归一化灰度直方图呈现差异性分布。因此,通过将 ROI 区域的灰度值图像进行归一化处理,获得归一化的灰度直方图,即太赫兹图像的统计学分布特征,如图 8(b)所示,其中, $h_i (i=0, 1, 2, \dots, 255)$ 为太赫兹图像中不同灰度的像素数量占总像素数量的百分比。综上,通过空间域的强度分布特征提取及统计学分布提取,共获得 499 个特征信息。

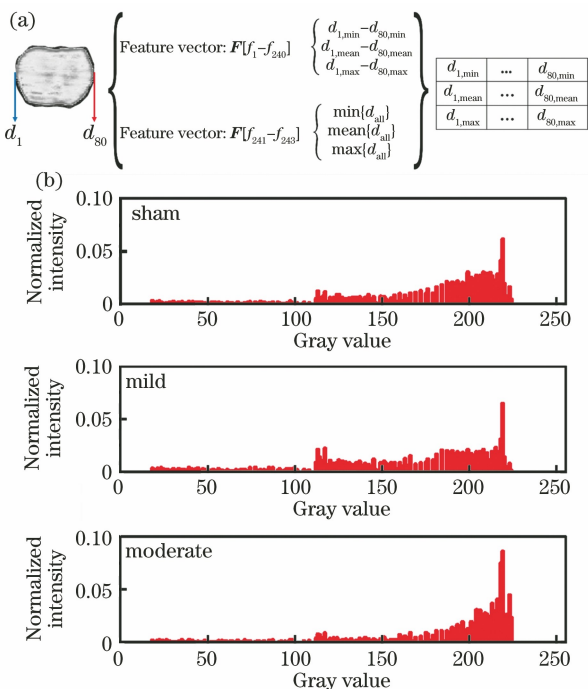


图 8 太赫兹图像特征提取过程。(a)空间域强度分布特征提取示意图;(b)基于归一化灰度直方图的统计学分布特征提取示意图

Fig. 8 Feature extraction process of THz images. (a) Diagram of intensity distribution feature extraction in spatial domain; (b) diagram of statistical distribution feature extraction based on normalized gray histogram

最后,利用多标签过滤式选择(ReliefF)技术对从太赫兹图像中提取的空间域强度分布特征和统计学分布特征进行分析,对其按照重要性从大到小的顺序排序,之后分别选取 1~499 个特征建立特征子集用于支持向量机分类器(SVM)的训练与学习,随着选择特征的数量从 1 增加至 499, SVM 分类器采用留一交叉验证法(LOOCV)分别对颅脑创伤程度进行分类识别,分类总准确率如图 9 所示。当采用第 55~202 个特征以及第 241~262 个特征时,识

别准确率超过 80%,最高为 86.36%。

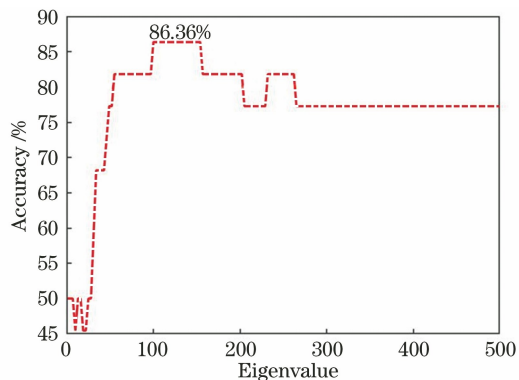


图 9 脑创伤识别准确率随特征值取值的变化  
Fig. 9 Accuracy of brain trauma recognition varying with eigenvalue

## 4 结 论

基于太赫兹波衰减全反射扫描成像系统,分别对正常大鼠脑组织及不同程度冲击波致伤的大鼠脑部组织进行了衰减全反射成像。成像结果表明:相对于正常脑部组织,大鼠脑组织中的创伤区域对太赫兹波具有更低的反射率,且随着创伤程度的增强,太赫兹波图像的创伤面积增大。通过支持向量机分类器可以实现对不同创伤程度太赫兹图像的分类识别,其识别准确率达到 86.36%。由此可知,连续太赫兹波衰减全反射成像技术与机器学习分类器相结合,可以实现冲击性脑创伤的快速检测与识别,该方法有望应用于不同程度冲击性脑创伤的精准检测与快速分级诊疗中。

## 参 考 文 献

- [1] Ning Y L, Zhou Y G. Shock tubes and blast injury modeling [J]. Chinese Journal of Traumatology, 2015, 18(4): 187-193.
- [2] DePalma R G, Burris D G, Champion H R, et al. Blast injuries[J]. New England Journal of Medicine, 2005, 352(13): 1335-1342.
- [3] Rutter B, Song H L, DePalma R G, et al. Shock wave physics as related to primary non-impact blast-induced traumatic brain injury[J]. Military Medicine, 2021, 186(Supplement1): 601-609.
- [4] Yu S, Kaneko Y, Bae E, et al. Severity of controlled cortical impact traumatic brain injury in rats and mice dictates degree of behavioral deficits [J]. Brain Research, 2009, 1287: 157-163.
- [5] Weiss N, Galanaud D, Carpentier A, et al. Clinical review: prognostic value of magnetic resonance imaging in acute brain injury and coma [J]. Critical

- Care, 2007, 11(5): 230.
- [6] Mac Donald C L, Johnson A M, Cooper D, et al. Detection of blast-related traumatic brain injury in US military personnel[J]. The New England Journal of Medicine, 2011, 364(22): 2091-2100.
- [7] Jorge R E, Acion L, White T, et al. White matter abnormalities in veterans with mild traumatic brain injury[J]. American Journal of Psychiatry, 2012, 169(12): 1284-1291.
- [8] Badea A, Kamnakhsh A, Anderson R J, et al. Repeated mild blast exposure in young adult rats results in dynamic and persistent microstructural changes in the brain [J]. NeuroImage: Clinical, 2018, 18: 60-73.
- [9] Wang K K, Yang Z H, Zhu T, et al. An update on diagnostic and prognostic biomarkers for traumatic brain injury [J]. Expert Review of Molecular Diagnostics, 2018, 18(2): 165-180.
- [10] Mondello S, Muller U, Jeromin A, et al. Blood-based diagnostics of traumatic brain injuries [J]. Expert Review of Molecular Diagnostics, 2011, 11(1): 65-78.
- [11] Gyorgy A, Ling G, Wingo D, et al. Time-dependent changes in serum biomarker levels after blast traumatic brain injury[J]. Journal of Neurotrauma, 2011, 28(6): 1121-1126.
- [12] 符张龙, 李锐志, 李弘义, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的生物医学成像研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 0207014.
- Fu Z L, Li R Z, Li H Y, et al. Progress in biomedical imaging based on terahertz quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207014.
- [13] 王与焯, 蒋博周, 徐德刚, 等. 基于焦平面阵列的连续太赫兹波生物组织成像技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0711001.
- Wang Y Y, Jiang B Z, Xu D G, et al. Continuous terahertz wave biological tissue imaging technology based on focal plane array[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0711001.
- [14] Peng Y, Shi C J, Wu X, et al. Terahertz imaging and spectroscopy in cancer diagnostics: a technical review[J]. BME Frontiers, 2020, 2020: 1-11.
- [15] Joseph C S, Patel R, Neel V A, et al. Imaging of *ex vivo* nonmelanoma skin cancers in the optical and terahertz spectral regions optical and terahertz skin cancers imaging[J]. Journal of Biophotonics, 2014, 7(5): 295-303.
- [16] 武丽敏, 廖彬, 徐德刚, 等. 小鼠在体皮下乳腺癌的太赫兹波成像检测研究[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(5): 553-560.
- Wu L M, Liao B, Xu D G, et al. Study of *in-vivo* breast cancer in a subcutaneous xenograft mouse model using terahertz imaging[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(5): 553-560.
- [17] Sim Y C, Park J Y, Ahn K M, et al. Terahertz imaging of excised oral cancer at frozen temperature [J]. Biomedical Optics Express, 2013, 4(8): 1413-1421.
- [18] 徐德刚, 王与焯, 胡常灏, 等. 光学太赫兹辐射源及其在脑创伤检测中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1914002.
- Xu D G, Wang Y Y, Hu C H, et al. Optical terahertz radiation sources and terahertz application in traumatic brain injury[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1914002.
- [19] Darmo J, Tamosiunas V, Fasching G, et al. Imaging with a terahertz quantum cascade laser [J]. Optics Express, 2004, 12(9): 1879-1884.
- [20] Wu L M, Xu D G, Wang Y Y, et al. Study of *in vivo* brain glioma in a mouse model using continuous-wave terahertz reflection imaging [J]. Biomedical Optics Express, 2019, 10(8): 3953-3962.
- [21] Wang Y Y, Wang G Q, Xu D G, et al. Terahertz spectroscopic diagnosis of early blast-induced traumatic brain injury in rats[J]. Biomedical Optics Express, 2020, 11(8): 4085-4098.
- [22] 王与焯, 孙忠成, 徐德刚, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的脑缺血检测[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0430001.
- Wang Y Y, Sun Z C, Xu D G, et al. Detection of cerebral ischemia based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0430001.
- [23] Zhao H L, Wang Y Y, Chen L Y, et al. High-sensitivity terahertz imaging of traumatic brain injury in a rat model [J]. Journal of Biomedical Optics, 2018, 23: 036015.
- [24] 王与焯, 陈霖宇, 徐德刚, 等. 基于太赫兹波成像的鼠脑创伤三维重构[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0317002.
- Wang Y Y, Chen L Y, Xu D G, et al. Three-dimensional reconstruction of rat brain trauma based on terahertz imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0317002.
- [25] Shi J, Wang Y Y, Chen T N, et al. Automatic evaluation of traumatic brain injury based on terahertz imaging with machine learning[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 6371-6381.
- [26] Wang Y F, Wang Y Y, Xu D G, et al. Interference elimination based on the inversion method for continuous-wave terahertz reflection imaging [J].

- Optics Express, 2020, 28(15): 21926-21939.
- [27] Liu H X, Wang Y Y, Xu D G, et al. High-sensitivity attenuated total internal reflection continuous-wave terahertz imaging [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(37): 375103.
- [28] 武丽敏, 徐德刚, 王与焯, 等. 共光路连续太赫兹反射和衰减全反射成像[J]. 物理学报, 2021, 70(11): 118701.
- Wu L M, Xu D G, Wang Y Y, et al. Common path continuous terahertz reflection and attenuated total reflection imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(11): 118701.
- [29] 袁丹凤, 杨傲, 麻超, 等. 冲击波强度与幼年大鼠肺冲击伤程度的量效关系[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(6): 780-784.
- Yuan D F, Yang A, Ma C, et al. Dose-effect relationship between shock wave intensity and blast lung injury in juvenile rats [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(6): 780-784.