

多光谱成像技术在古代壁画颜料无损检测中的应用探索

李景儒¹ 丁诚刚² 刘得琛²

1. 中科谱光科技(天津)有限公司 天津 300392

2. 天津中科谱光信息技术有限公司 天津 300392

【摘要】：多光谱成像技术利用不同波段的光谱图像，能够提供关于壁画颜料成分和状态的精确数据，且无需破坏文物。随着古代壁画因环境变化而逐渐退化，采用无损检测技术对颜料进行分析和监测显得尤为重要。通过多光谱成像技术，可以有效识别古代壁画颜料的成分、识别颜料的变色和劣化情况，为壁画修复提供科学依据。多光谱成像技术的应用不仅为艺术品保护提供了新的解决方案，也推动了文物保护领域的技术革新。研究表明，该技术在实际应用中具有良好的前景，可以大大提高壁画保护的准确性和有效性。

【关键词】：多光谱成像技术；无损检测；古代壁画；颜料分析；文物保护

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.095

引言

古代壁画作为文化遗产的重要组成部分，承载着丰富的历史和艺术价值。随着时间的推移，壁画的颜料和绘画层面逐渐受到环境因素的侵蚀，影响其原始面貌。颜料的老化和退化常常不可避免，但如何准确无损地分析和监测这些变化一直是文物保护中的一大难题。多光谱成像技术的出现，为这一问题提供了全新的解决方案。该技术通过不同波段的光谱图像，对壁画颜料的化学成分、结构变化及退化情况进行全面检测，不仅避免了破坏壁画的风险，还能为修复工作提供准确的数据支持。随着科技的进步，多光谱成像技术逐渐成为古代壁画保护中的重要工具，展现了在艺术与科技结合领域的巨大潜力。

1 壁画颜料的退化现象及其影响

1.1 壁画颜料的常见退化类型

古代壁画的颜料退化可通过多种形式表现，其中最为常见的是颜料褪色、剥落和裂纹的形成。颜料褪色主要是由于长时间暴露于阳光下，紫外线的作用导致颜料中的色素分解，从而使颜色逐渐消失或变浅。颜料表面的裂纹通常是由于温湿度变化引起的膨胀与收缩作用，导致漆层的破裂。氧化反应也可能导致金属颜料产生变色或腐蚀，这些退化现象不仅影响壁画的美学效果，也可能破坏其原有的艺术风貌。

1.2 颜料退化对壁画艺术价值的影响

颜料的退化现象不仅影响古代壁画的视觉效果，还严重干扰了艺术品的历史真实性和文化价值。退化的颜料常常使原本鲜艳的色彩变得暗淡甚至消失，导致壁画的细节模糊不清，失去原有的艺术层次和表现力^[1]。这些变化使壁画的艺术魅力大大降低，观众难以领会到古代艺术家的创作意图和技巧。颜料退化也使得壁画的保存变得困难，修复时的技术要求和处理方法需要更加精准，才能确保最大限度地恢复其历史风貌。

1.3 当前颜料检测方法的局限性

传统的颜料检测方法多依赖于取样分析或直接接触壁画

表面，但这些方法常常会对壁画造成不可逆的损害，且无法对颜料的完整性进行全面评估。X射线荧光(XRF)和红外光谱分析等技术虽然可以较好地识别颜料成分，但仍然存在对表面和深层颜料的辨识能力不足、解析度不够等问题。传统技术对复杂的颜料层次和壁画表面状况的适应性有限，难以全面有效地获取颜料的详细信息，这使得文物保护工作面临一定的挑战。

2 多光谱成像技术概述

2.1 多光谱成像的原理与特点

多光谱成像技术基于对物体在多个不同光谱波段的响应进行测量。通过对不同波段的光进行采集，能够揭示物体表面及内部的多层次信息。每个波段的光谱数据反映了物质的化学组成和物理特性，不同波长的光谱图像可以突出特定的物质信息，避免了传统可见光成像中信息的缺失。该技术具有非接触式、无损等优势，能够在不破坏文物的前提下进行精确检测，获得精准的分析数据。

2.2 多光谱成像技术的发展历程

多光谱成像技术最早应用于遥感领域，用于大范围地获取地面物体的光谱信息。随着技术的进步，该技术逐渐进入文化遗产保护领域，尤其是在文物鉴定与保护中得到了广泛应用^[2]。从初期的简单光谱成像，到如今能够采集上百个波段的高精度设备，多光谱成像技术不断向高分辨率、深层次的数据分析发展。它不仅提高了文物分析的准确性，还拓宽了其应用领域，成为了文物保护不可或缺的技术工具之一。

2.3 多光谱成像在文化遗产中的应用

多光谱成像技术在文化遗产中的应用，尤其是在壁画、古籍和雕塑等文物的保护上，展现出了重要的价值。通过对不同波段的光进行分析，可以揭示文物的材质、颜料层次和退化状态。该技术使得对壁画颜料成分、书法墨迹以及雕塑表面腐蚀的检测变得更加精准，且不会对文物造成任何物理损伤。利用

该技术能够恢复文物的原始面貌，帮助修复师制定更加合理的修复方案，显著提升了文化遗产的保护效果。

3 多光谱成像技术在古代壁画颜料分析中的应用

3.1 检测古代壁画颜料成分

多光谱成像技术能够精确检测古代壁画中颜料的成分，这主要依赖于不同波段的光谱响应。壁画颜料通常由矿物质、植物颜料或金属化合物等组成，每种成分在特定波段的吸收和反射特性各不相同。通过多光谱成像设备获取这些不同波段的图像，能够细致地分析出颜料的化学成分及其在壁画中的分布情况。该技术尤其在分析复杂颜料体系时表现突出，能区分表层颜料和深层颜料，识别复合材料或层叠结构的组成。与传统的化学分析方法相比，多光谱成像技术无须直接接触壁画，不仅减少了对文物的破坏风险，还能够提供快速、全面的数据支持，为壁画的修复和保护提供科学依据。

3.2 监测颜料退化与变色情况

颜料的退化通常伴随着颜色的变化和物理结构的破损，传统检测手段难以准确揭示颜料的微观变化^[3]。而多光谱成像技术可以通过不同波长的光谱反射，精确捕捉颜料退化过程中的微小变化，特别是对色彩变化的灵敏检测。随着时间推移，壁画颜料中的有机成分和无机颜料可能发生化学反应，导致色彩的褪色、变色或混合。通过对多光谱数据的分析，能够揭示不同颜料的退化程度和变色情况，甚至预测可能的进一步退化趋势。这一过程不仅有助于评估壁画的现状，也为修复提供了必要的参考，避免过度修复或修复偏差。

3.3 无损检测方法的优势与挑战

无损检测方法是多光谱成像技术的一个突出优势，尤其在文物保护领域。通过该技术，研究人员能够在不接触壁画表面的情况下，获取到精准的颜料信息，避免了传统取样过程中对文物的破坏。多光谱成像技术能够对不同层次的壁画材料进行非破坏性分析，包括底层和面层颜料，获取的信息更加全面。尽管该技术具有诸多优势，但其仍面临一定的挑战。多光谱成像的精度和解析度受设备性能和光源控制的影响，需要高质量的设备支持才能获取清晰的数据。复杂的颜料混合和层叠结构可能导致一些波段的数据难以准确解读，需依赖先进的算法进行数据处理。

4 多光谱成像技术在壁画修复中的实际应用

4.1 国内外壁画保护案例

多光谱成像技术已在国内外多个壁画保护项目中得到广泛应用。国内方面，敦煌莫高窟的壁画修复便利用了多光谱成像技术来精确识别颜料层的结构变化及颜料的化学成分。通过对不同波段的光谱反射进行分析，研究人员得以精确判断颜料的退化程度，避免了传统修复方法中可能对壁画造成的破坏。这一技术不仅帮助揭示了壁画表面和深层的颜料信息，还为修

复工作提供了科学依据，有效提高了修复效果。国外的保护案例则更为丰富。以意大利的庞贝古城壁画修复为例，利用多光谱成像技术对壁画的损伤情况进行了详细分析。通过对不同波段数据的比对，修复人员能够准确找到颜料的原始颜色和变化区域，为壁画的修复提供了更加清晰的数据支持。该技术还帮助识别了壁画中的细微裂纹和隐藏的图层，从而保证了修复的精度，避免了盲目修复带来的潜在风险。这些实际案例展示了多光谱成像技术在壁画保护中的实际效果，为全球文物保护事业提供了借鉴，促进了多领域技术的交流与合作。

4.2 多光谱成像技术在壁画修复中的实施过程

采用专业的多光谱成像设备对壁画进行详细扫描，捕捉从紫外光到红外光等多个波段的数据。这些数据可以反映颜料、墨水等材料的成分和分布，揭示不同层次的画面结构。在这一阶段，修复人员可以全面了解壁画的整体状态，尤其是对表面和深层的损坏部分，形成一个完整的数据信息图谱。技术人员通过图像处理和分析，结合反射光谱数据，识别出颜料的退化区域，并与历史文献和其他修复案例进行比对，推测颜料的原始颜色与质地^[4]。通过这种方法，修复人员可以精准确定修复的目标区域和修复材料，避免了不必要的干预。修复过程的最后阶段是实际操作。通过多光谱成像技术提供的具体数据，修复人员可以在尽可能保留原始艺术特征的前提下，对颜料进行补充或修复。这一过程依赖于修复技术的不断精细化和多光谱数据的支持，确保了每一步的科学性与可持续性。多光谱成像技术不仅提升了修复效果，也推动了文物保护技术向着更高的精准度与无损修复迈进。

4.3 技术应用的成果与反思

多光谱成像技术在壁画修复中的应用，取得了显著成果。通过精准的成分分析和退化监测，修复人员能够更加科学地选择修复材料和方法，避免了传统修复中的人为误差。这一技术极大提高了修复效率，且能够在不破坏文物的情况下，最大限度地恢复原始面貌。例如敦煌壁画中的部分颜料因历史退化严重，传统的修复方法难以应对，而多光谱成像技术提供的数据帮助修复人员科学地判断了颜料的退化区域和程度，使修复效果更加自然和真实。尽管多光谱成像技术在壁画修复中展现出巨大的优势，但在实际应用中仍存在一定的挑战。成像设备的高成本和维护要求，使得该技术的普及受到了一定制约。多光谱成像技术对数据处理的要求较高，特别是在面对复杂的颜料层次和历史退化现象时，数据的分析和解读仍然需要依赖专业人员的经验和技能。该技术在某些情况下可能无法完全揭示壁画中极细微的裂纹和结构性损伤，仍需结合其他修复手段来全面评估。随着技术不断发展和优化，多光谱成像技术将在壁画修复领域发挥越来越重要的作用，成为文物保护不可或缺的工具之一。

5 未来的研究方向与发展潜力

5.1 技术进一步发展与优化

未来技术的提升主要体现在分辨率和光谱范围的扩展。通过提高设备的传感器灵敏度,能够获取更高分辨率的图像,进而提升对壁画细节的捕捉能力。拓展光谱波段,尤其是进入超光谱领域,将使得对更复杂材质和层次的分析变得可能。随着数据处理算法的不断优化,图像分析的精度将大幅提升,这有助于精准识别颜料成分、退化程度及微小的损伤。增强人工智能与机器学习技术的结合,将使得数据的处理与解读更加智能化和自动化,极大提高工作效率和分析深度。

5.2 多光谱成像与其他技术的融合

多光谱成像与其他先进技术的融合,正成为未来研究的重要方向。与激光扫描、X射线荧光、红外成像等技术的结合,能够从多个角度全面分析文物的物理与化学特性,实现无损、精确的多维度检测^[5]。通过结合不同技术的优势,修复人员可以更好地理解文物的损伤原因,制定出更加科学合理的修复方案。具体来说,光谱成像可为其他检测方法提供初步的参考数据,帮助识别表面和深层的细节,从而提升整体的修复效果。集成化的技术平台将使得不同设备和技术的协同工作更加高

效,推动文物保护进入全新阶段。

5.3 多光谱成像技术在文物保护中的广泛应用

随着技术的不断进步,多光谱成像技术将在文物保护中发挥越来越广泛的作用。不仅仅是壁画,其他形式的文物,如古籍、雕塑、陶器等,也将从这一技术中受益。通过精确分析文物材料的组成与退化过程,能够为多种类型的文物提供针对性的保护方案,帮助文物修复师制定科学的修复方法。在考古发掘和历史遗址的保护中,光谱成像也具有巨大潜力,能够帮助识别遗址中的微小细节,推测遗物的使用和历史背景。未来,随着全球文物保护工作日益重视无损检测技术的应用,多光谱成像将成为文物保护和修复领域的核心工具之一,为全球文化遗产的传承和保护提供更坚实的技术支持。

6 结语

多光谱成像技术为古代壁画的保护与修复提供了强有力的支持。通过精确的颜料分析、退化监测及无损检测,能够为文物的保存和修复提供科学依据。随着技术不断发展与优化,多光谱成像的应用将更加广泛,为全球文化遗产的保护贡献更多力量。同时,技术与其他手段的融合,将进一步提升文物修复的精准度与效率,为文物保护开辟新的前景。

参考文献:

- [1] 郭欣悦,陈国良,朱良宽,刘大洋,孙泉雄.基于高光谱成像技术的蓝莓糖度无损检测模型优化研究[J].食品安全质量检测学报,2025,16(11):207-214.
- [2] 朱小青,李红,陈超,赵晶.基于高光谱成像技术的生菜叶片叶绿素和氮素含量快速无损检测[J].排灌机械工程学报,2025,43(9):964-972.
- [3] 周禹,袁伟东,张聪,吴俣,周宏平,蒋雪松,姜洪喆.基于高光谱成像技术的文冠果籽含水率无损检测[J].中国食品学报,2025,25(6):327-338.
- [4] 胡妍,王玉洁,张雪晨,张熠强,于桦昊,宋馨蓓,叶思潭,周继红,陈振林,纵巍伟,何勇,李晓丽.基于高光谱成像技术的茯砖茶发花品质无损检测与智能识别方法[J].智慧农业(中英文),2025,7(4):71-83.
- [5] 张瑶,田雨,吕毅,锁占杰,吴龙国.基于荧光高光谱成像技术的宁夏枸杞菊酯类农药残留无损检测[J].食品研究与开发,2025,46(16):181-190.