

过氧化脲和过氧化氢两种漂白剂对牙本质拉曼光谱激光诱导荧光的影响

李锐强¹, 尹晨², 马琰¹

<https://doi.org/10.12307/2026.512>

投稿日期: 2024-09-29

采用日期: 2024-11-26

修回日期: 2025-02-25

在线日期: 2025-03-18

中图分类号:

R459.9; R318.08; R781

文章编号:

2095-4344(2026)02-00296-07

文献标识码: A

文章快速阅读: 牙齿漂白过程中的物质变化检测

实验材料:
45 颗拔除的
废弃牙齿。

材料的处理及分组:

将牙齿处理成实验所需的牙本质切片样本, 随机分成对照组 ($n=15$)、过氧化脲组 ($n=15$) 和过氧化氢组 ($n=15$)。

样本处理时间:

对照组、过氧化脲组和过氧化氢组样品分别放于去离子水、中性 10% 过氧化脲、中性 40% 过氧化氢中, 每天处理 6 h, 持续 1 周。

结果:

(1) 3 组的拉曼相对强度并未发生明显改变;
(2) 荧光背景强度在对照组中未有明显改变, 但在过氧化脲组和过氧化氢组中呈现不同程度下降;
(3) 对照组酰胺 I 和酰胺 III 峰值没有明显改变, 过氧化脲组和过氧化氢组酰胺 I 和酰胺 III 峰值呈现明显下降。

数据的收集:

1 周内, 每天利用拉曼光谱仪收集拉曼绝对强度、拉曼相对强度和荧光背景强度相关数据; 红外光谱仪记录并检测酰胺 I 和酰胺 III 峰值变化情况。

文题释义:

漂白剂: 是一类化学试剂, 通过氧化还原反应将有色小分子物质转化为无色小分子物质, 使颜色去除或变淡以达到漂白的效果, 常用的漂白剂有过氧化氢和过氧化脲。

激光诱导荧光: 产生拉曼光谱荧光背景的物质与生物组织中存在的有机成分有关, 牙齿作为生物样本的拉曼光谱具有一个很强的激光诱导荧光背景, 在漂白剂对牙齿进行漂白后这个荧光背景显著降低, 与此同时牙齿的颜色发生了明显改变, 二者的变化具有很强的相关性。

摘要

背景: 过氧化氢类漂白剂被广泛用于临床牙齿美白治疗, 但其作用机制至今没有统一的定论。

目的: 检测中性 10% 过氧化脲和中性 40% 过氧化氢两种漂白剂对牙齿的影响, 探寻牙齿美白的机制。

方法: 收集因正畸治疗拔除的废弃牙齿 45 颗, 制作牙本质切片后进行抛光处理, 去除玷污层后随机分 3 组, 对照组 ($n=15$) 放入去离子水中, 过氧化脲组 ($n=15$) 放入中性 10% 过氧化脲溶液中, 过氧化氢组 ($n=15$) 放入中性 40% 过氧化氢溶液中, 每天处理 6 h, 持续处理 1 周。利用拉曼光谱仪检测 3 组样本每天的拉曼绝对强度、拉曼相对强度, 计算荧光背景强度 (拉曼绝对强度与拉曼相对强度的差值), 用红外光谱仪记录 3 组样品每天酰胺峰值的变化趋势。

结果与结论: ① 3 组组内处理 1-7 d 的拉曼相对强度均未发生明显变化, 对照组处理 1-7 d 的荧光背景强度未发生明显变化, 过氧化脲组处理 1-7 d 的荧光背景强度呈现下降趋势, 过氧化氢组处理 1-4 d 的荧光背景强度显著降低, 此后未再发生明显变化; ② 对照组处理 1-7 d 的酰胺 I 和酰胺 III 峰值面积未发生明显变化, 过氧化脲组、过氧化氢组处理 1-7 d 的酰胺 I 和酰胺 III 峰值面积均呈下降趋势, 并且过氧化氢组下降趋势更明显; ③ 结果表明, 牙本质拉曼光谱激光诱导荧光背景强度的改变可能来源于牙本质中的非胶原蛋白成分, 并且在美白剂的作用下可能会对牙体组织造成一定不利影响。

关键词: 牙齿漂白; 过氧化氢; 过氧化脲; 牙本质; 拉曼; 红外光谱; 工程化口腔材料

Effect of carbamide peroxide and hydrogen peroxide bleaching agents on laser-induced fluorescence in dentin Raman spectroscopy

Li Ruiqiang¹, Yin Chen², Ma Yan¹

¹Department of Stomatology, Second Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; ²Graduate School of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Li Ruiqiang, Master candidate, Department of Stomatology, Second Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Corresponding author: Ma Yan, Associate chief physician, Department of Stomatology, Second Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Abstract

BACKGROUND: Hydrogen peroxide-based bleach is widely used in clinical tooth whitening treatment, but its mechanism of action has not been uniformly determined so far.

OBJECTIVE: To examine the effects of two bleaching agents, neutral 10% carbamide peroxide and neutral 40% hydrogen peroxide, on teeth and explore the mechanism of teeth whitening.

¹新疆医科大学第二附属医院口腔科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000; ²新疆医科大学研究生院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000
第一作者: 李锐强, 男, 1999 年生, 湖南省株洲市人, 汉族, 新疆医科大学在读硕士, 主要从事牙齿美白方向研究。

通讯作者: 马琰, 副主任医师, 新疆医科大学第二附属医院口腔科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000

<https://orcid.org/0009-0001-4086-8686> (李锐强)

基金资助: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2022D01C265), 项目负责人: 马琰, 项目名称: 过氧化脲处理对牙本质拉曼光谱激光诱导荧光影响的实验研究

引用本文: 李锐强, 尹晨, 马琰. 过氧化脲和过氧化氢两种漂白剂对牙本质拉曼光谱激光诱导荧光的影响 [J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(2):296-302.



METHODS: Forty-five discarded teeth extracted for orthodontic treatment were collected, and the dentin sections were made and polished. After removing the smear layer, they were randomly divided into three groups. The control group ($n=15$) was placed in deionized water; the carbamide peroxide group ($n=15$) was placed in a neutral 10% carbamide peroxide solution, and the hydrogen peroxide group ($n=15$) was placed in a neutral 40% hydrogen peroxide solution. The treatment was continued for 6 hours every day for 1 week. The Raman absolute intensity and Raman relative intensity of the three groups of samples were detected by Raman spectrometer every day, and the fluorescence background intensity (the difference between the Raman absolute intensity and the Raman relative intensity) was calculated. The change trend of the amide peak of the three groups of samples every day was recorded by infrared spectrometer.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) The relative Raman intensity of the three groups did not change significantly during the 1–7 days of treatment. The fluorescence background intensity of the control group did not change significantly during the 1–7 days of treatment. The fluorescence background intensity of the carbamide peroxide group showed a downward trend during the 1–7 days of treatment. The fluorescence background intensity of the hydrogen peroxide group decreased significantly during the 1–4 days of treatment and did not change significantly thereafter. (2) The peak areas of amide I and amide III did not change significantly during the 1–7 days of treatment in the control group. The peak areas of amide I and amide III showed a downward trend during the 1–7 days of treatment in the carbamide peroxide group and the hydrogen peroxide group, and the downward trend was more obvious in the hydrogen peroxide group. (3) The results show that the change in the laser-induced fluorescence background intensity of dentin Raman spectroscopy may be derived from the non-collagen components in dentin, and under the action of whitening agents, it may have a certain adverse effect on tooth tissue.

Keywords: tooth bleaching; hydrogen peroxide; carbamide peroxide; dentin; Raman; infrared spectroscopy; engineered dental material

Funding: Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region, No. 2022D01C265 (to MY)

How to cite this article: LI RQ, YIN C, MA Y. Effect of carbamide peroxide and hydrogen peroxide bleaching agents on laser-induced fluorescence in dentin Raman spectroscopy. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2026;30(2):296–302.

0 引言 Introduction

随着生活水平的提高,人们对美观的要求也越来越高,牙齿颜色和形态成为影响面部美观的重要因素之一,因此,越来越多的人以牙齿颜色不佳作为主诉要求改善美观。牙齿美白自从 1884 年到现在已经有上百年的时间了,而且被用于临床治疗后的疗效就一直受到大家的认可^[1]。过氧化氢作为一种临床上常用的漂白剂本身就具有强氧化性,与牙齿接触后直接产生新生态的游离氧,紧接着再形成超氧化物自由基 $\text{HO}^{\cdot 2}$, 而新生态的游离氧和自由基可以与牙体硬组织中的长链有色分子发生反应,将该物质进一步分解为短链小分子物质,而这些短链的小分子物质则可以自由地穿过牙体的硬组织到达牙齿表面,从而被冲洗掉达到漂白的效果^[2–3]。在家庭漂白技术中,最常使用的就是过氧化脲,浓度在 10%–22% 之间,当其与水接触时便发生反应,分解成尿素和过氧化氢,而过氧化氢再次分解为水和活性氧,它们负责氧化牙齿结构的有机成分,从而增加光散射并促进牙齿白度的增加^[4–5]。对于过氧化氢类漂白剂的作用,有学者认为对牙齿的损伤小,最大限度地保持了牙体硬组织的完整性,并且对大多数轻度的着色牙都有良好治疗效果^[6]。然而,其他研究表明,漂白剂降低了牙体硬度并增加了表面粗糙度,并且高浓度产品引起的变化与低浓度产品引起的变化并没有本质上的差异^[7–8],这些差异可能是由于应用研究的不同模型而产生的。因此,尽管漂白剂能促进颜色变化使牙齿颜色变浅,但对牙体组织可能产生的负面影响在文献中仍然存在争议。漂白效果以及硬组织表面的变化和不良反应主要取决于漂白剂浓度与使用时间的关系,也可能受漂白剂黏度、扩散能力及其 pH 值呈酸性的影响^[9–14]。除了与漂白剂相关的因素外,还有一个与患者饮食有关的问题,例如在漂白治疗期间饮用碳酸饮料、红酒和咖啡等食物就会对牙齿表面产生不利影响^[15–18],

所以在对患者进行治疗时需要更加谨慎。

因此,评估和比较不同漂白剂对牙齿造成的变化是有意义的。为了更加准确地检测漂白剂在漂白过程中对牙体组织的影响、探索牙齿美白过程中的牙齿漂白原理,此次实验采用 pH 值约等于中性的过氧化氢和过氧化脲试剂作为处理液,将漂白剂自身酸性对无机质改变造成的影响降到最低,并且将拉曼光谱技术作为一种无损的技术手段,以非侵入的形式对牙齿美白过程进行分析^[19–20],同时利用红外光谱仪检测牙本质中的有机质,这些手段可以从分子水平的角度去分析在漂白剂处理前后牙体硬组织所发生的微小变化,从而以更准确的方式为过氧化氢类漂白剂的使用提供一个更为详细的实验数据。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 观察性实验,组间比较采用多组重复测量方差分析和单因素方差分析。

1.2 时间及地点 实验于 2023 年 10 月至 2024 年 5 月在新疆医科大学第二附属医院实验室、新疆医科大学协同楼以及新疆大学计算机学院实验室完成。

1.3 材料

牙齿样品: 收集 2023 年 10 月于新疆医科大学第二附属医院口腔科就诊因正畸拔除的前磨牙及第三磨牙 45 颗,患者年龄 20–30 岁,所有牙齿无牙釉质断裂、龋齿、染色等缺陷。牙齿拔除后于室温保存在体积分数 (70±5)% 乙醇溶液中,浸泡 5 d 后清除牙齿上剩余的软组织,放在 4 °C、0.2% 麝香草酚溶液中保存,直到研究需要时取出(样本保存不超过 2 个月)。供者对实验知情同意并签署了知情同意书。实验方案已获得新疆医科大学第二附属医院伦理委员会的审查与批准,伦理审批编号: 2022H003。

主要试剂和仪器：过氧化氢 (美国皓齿制品有限公司)；

过氧化脲 (美国皓齿制品有限公司)；去离子水 (Servicebio, 赛维尔生物科技有限公司, 武汉)；高分辨率共焦拉曼光谱仪 (LabRAM HR Evolution, gora Raman spectroscopy, ideaoptics, China)；傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR-850, 港东科技, 中国)；慢速切割机 (Isomet 1000, Buehler Ltd, Lake Bluff, IL, 美国)；pH 试纸和标准比色卡 (比克曼生物科技有限公司, 湖南)；麝香草酚溶液 (湖北鑫宇宏生物医药技术有限公司)；氢氧化钠 (国药集团化学试剂有限公司, 上海)；超声振荡机 (KQ5200DE, 昆山市超声仪器有限公司, 中国)；砂纸 (3M 中国有限公司)。

1.4 实验方法

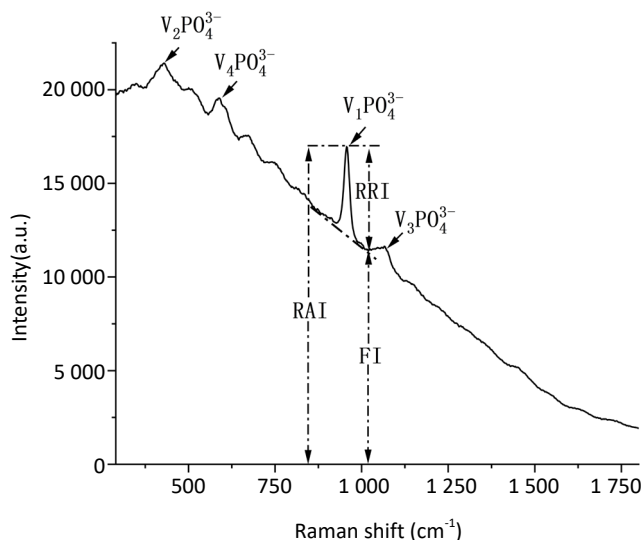
1.4.1 实验样本的处理 常温下使用慢速切割机对牙齿进行切片处理，将牙齿的颊轴面片切下来后，注意不能切到髓腔，再打磨去除牙釉质，制备成 2 mm 厚的牙本质切片，并且用砂纸抛光牙本质表面，之后用蒸馏水超声清洗 5 min，以保证去除掉其表面的玷污层，置于 36 °C 真空干燥 30 min 备用。

1.4.2 溶液配制及分组 在室内温度下，将氢氧化钠和去离子水调配成饱和的氢氧化钠溶液，取上清液调节 40% 过氧化氢溶液和 10% 过氧化脲溶液的 pH 值，并用 pH 试纸和标准比色卡比对溶液的 pH 值 (pH≈7)。

将牙齿样本随机分成 3 组，对照组 (n=15) 放入去离子水中，过氧化脲组 (n=15) 放入中性 10% 过氧化脲溶液中，过氧化氢组 (n=15) 放入中性 40% 过氧化氢溶液中，每天处理 6 h，持续处理 1 周。每次处理后都用去离子水将试剂从样本表面洗掉。在整个美白过程中，样品未使用时都浸泡在 37 °C 的去离子水中。

1.4.3 拉曼光谱测试 为避免在光谱采集过程中产生误差，在每个样品不同位置记录 3 个光谱，并获取每个样本的平均光谱进一步分析。处理 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 d，使用高分辨率共焦拉曼光谱仪测各组样本拉曼绝对强度与拉曼相对强度，激发波长为 785 nm 的半导体激光器，物镜为 ×10，积分时间为 15 s，光谱扫描范围 0–3 200 cm⁻¹，设置采集方式为连续采集。拉曼光谱在 960 cm⁻¹ 的绝对强度和拉曼相对强度是根据以往的研究定义和计算的^[21]，分别测量拉曼光谱 960 cm⁻¹ 处拉曼绝对强度和拉曼相对强度，计算出荧光背景强度 (为拉曼绝对强度与拉曼相对强度的差值)，见图 1。最后将数据导出到 OriginPro 2022 进行绘图分析。

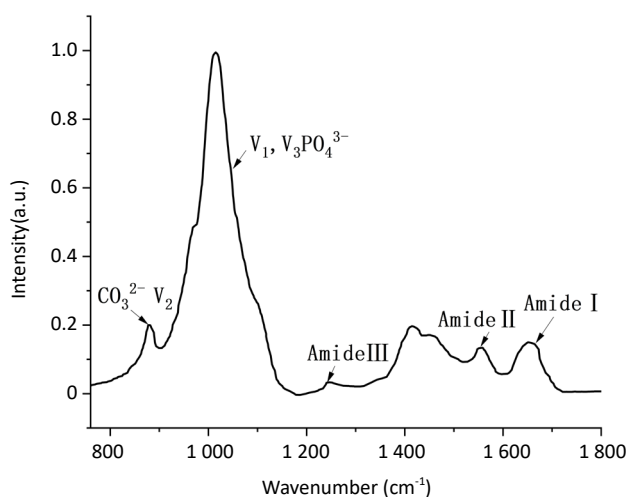
1.4.4 红外光谱测试 在红外光谱中不同位置峰的面积与产生该峰相对应物质成分含量的多少呈正相关^[22]。由于在牙本质有机质中胶原纤维的含量占比高达 90%，并且红外光谱中



图注：RAI 为拉曼绝对强度，RRI 为拉曼相对强度，FI 为荧光背景强度。

图 1 | 牙本质特征性的拉曼光谱图及其对应的磷酸根峰位
Figure 1 | Characteristic Raman spectra of dentin and their corresponding phosphate peak positions

的酰胺峰主要来源于牙本质中胶原纤维蛋白的含量^[23]，所以可以通过酰胺峰值变化来反映牙本质中胶原蛋白含量或者有机质的变化情况。胶原纤维蛋白特征峰为酰胺 I (1 610–1 710 cm⁻¹) 和酰胺 III 峰 (1 220–1 330 cm⁻¹)^[24]，见图 2。处理 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 d，采用傅里叶变换红外光谱仪获得各组样本在 675–1 800 cm⁻¹ 范围内的光谱，分辨率为 4 cm⁻¹，扫描次数为 128，均在恒定的温度和空气湿度下进行^[25]。同样为了避免在光谱采集过程中产生误差，在每个样品不同位置记录 3 个光谱，并获取每个样本的平均光谱进一步分析。



图注：图中 Amide 为酰胺。

图 2 | 牙本质特征性的红外光谱图及其对应的化学基团峰位
Figure 2 | Characteristic infrared spectra of dentin and their corresponding peak positions of chemical groups

1.5 主要观察指标 各组样本的拉曼光谱与红外光谱测试结果。

1.6 统计学分析 实验数据采用 SPSS 27.0 统计软件包进行相应的统计分析, 数据符合正态分布, 采用多组重复测量方差分析和单因素方差分析方法对牙本质样本的拉曼光谱实验数据进行统计分析。P < 0.05 为差异有显著性意义。该文统计学方法已经新疆医科大学生物统计学专家审核。

2 结果 Results

2.1 各组样本拉曼光谱测试结果 3 组组内处理 1-7 d 960 cm⁻¹ 对应的拉曼最强峰 ν₁PO₄³⁻ 处拉曼相对强度都没有明显改变 (P=0.77, P=0.80 和 P=0.69), 见图 3A-C。但是 3 组的荧光背景强度变化趋势不一致: 对照组处理 1-7 d 的荧光背景强度未见明显变化 (P=0.57), 见图 3D; 过氧化脲组处理 1-7 d 的荧光背景强度呈现不断下降的趋势 (P < 0.01), 见图 3E, 并且处理 7 d 与处理 1 d 的差异最大; 过氧化氢组处理 1-4 d 的荧光背景强度显著下降 (P < 0.01), 但在处理 4 d 后变化不明显, 图形线段变化趋于平缓 (P > 0.05), 见图 3F。

3 组样本的处理不同时间的拉曼相对强度与荧光背景强度, 见表 1, 2。

表 1 | 处理不同时间各组牙本质样本拉曼相对强度变化 (x̄±s, n=15)
Table 1 | Variation of Raman relative intensities in different time periods for each group

时间	对照组	过氧化脲组	过氧化氢组
处理 0 d	7 966.65±261.523	7 929.04±229.333	7 960.89±273.816
处理 1 d	7 926.20±230.708	7 975.71±263.257	7 975.01±277.084
处理 2 d	7 942.91±218.162	7 922.98±284.232	7 941.39±256.325
处理 3 d	7 960.06±201.740	7 960.89±258.055	7 965.38±269.860
处理 4 d	7 975.89±254.528	7 983.32±225.852	7 926.82±228.830
处理 5 d	7 954.71±245.386	7 938.90±256.146	7 983.23±246.452
处理 6 d	7 940.86±236.528	7 962.74±241.084	7 917.11±243.864
处理 7 d	8 005.62±220.558	7 992.77±260.294	8 001.11±219.345
F 值	0.59	0.54	0.68
P 值	0.77	0.80	0.69

表 2 | 处理不同时间各组激光诱导荧光背景强度变化 (x̄±s, n=15)
Table 2 | Changes in laser-induced fluorescence background intensity for different time periods in each group

时间	对照组	过氧化脲组	过氧化氢组
处理 0 d	13 492.40±629.251	13 754.22±652.306	13 804.68±911.596
处理 1 d	13 464.20±733.018	13 428.61±631.721	9 973.79±521.377
处理 2 d	13 430.59±715.886	13 157.21±514.470	7 394.51±373.981
处理 3 d	13 387.37±650.374	12 785.94±650.245	4 013.62±333.717
处理 4 d	13 356.40±730.639	12 523.59±414.291	1 431.29±226.034
处理 5 d	13 321.84±6 431.135	12 142.95±550.509	1 288.27±254.258
处理 6 d	13 284.63±737.087	11 839.58±388.278	1 309.47±317.751
处理 7 d	13 249.80±714.124	11 501.38±524.910	1 305.21±233.626
F 值	0.83	108.71	6 118.33
P 值	0.57	< 0.01	< 0.01

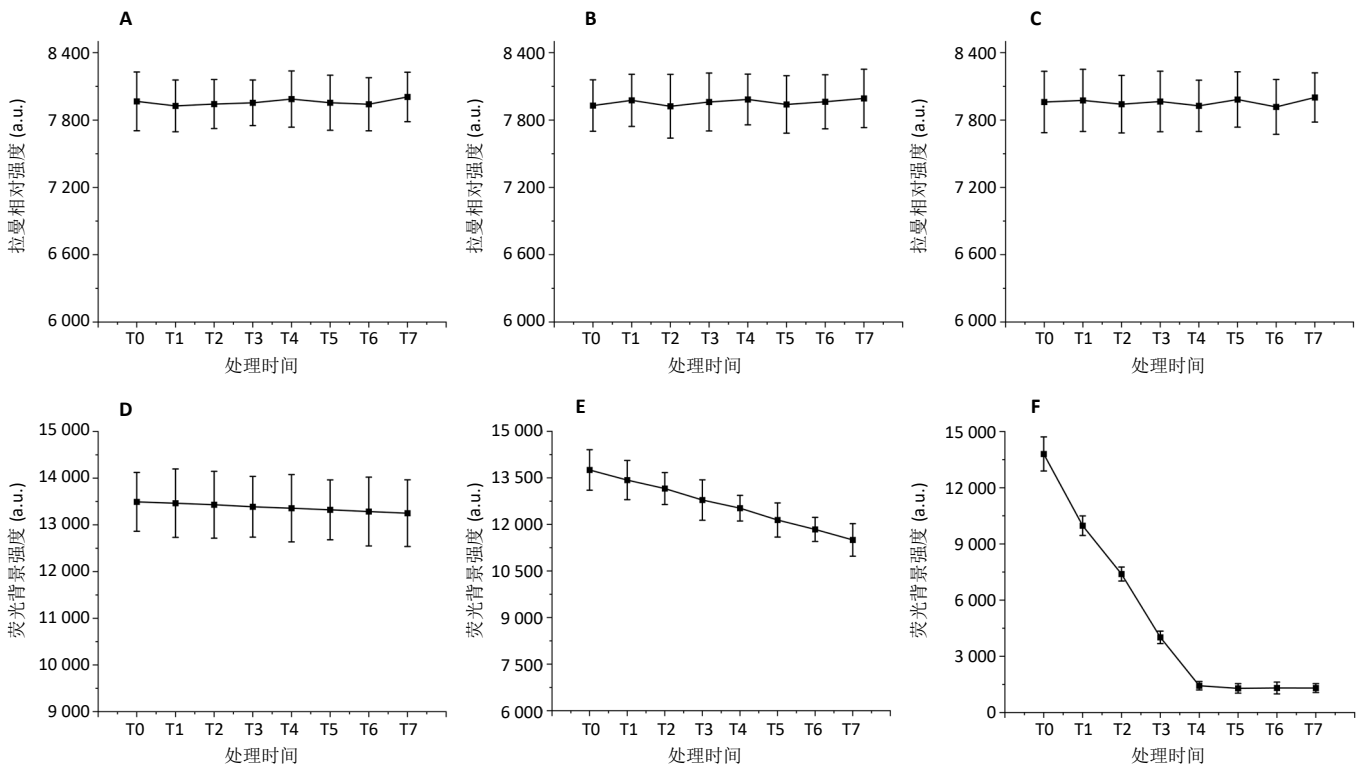
2.2 各组样本红外光谱测试结果 红外光谱检测结果显示, 处理 1-7 d, 对照组酰胺 I 和酰胺 III 峰值面积均无明显变化, 见图 4A; 过氧化脲组与过氧化氢组酰胺峰值都发生了明显变化, 过氧化脲组、过氧化氢组酰胺 I 和酰胺 III 峰值面积均呈明显的下降趋势, 并且过氧化氢组下降趋势更明显, 见图 4B, C。

3 讨论 Discussion

过氧化氢类漂白剂在临床上作为常用的美白剂能够有效治疗牙齿的变色问题, 已经得到了医生的广泛认可。正是由于过氧化氢的强氧化性才使其具有牙齿美白的效果^[26]。虽然牙齿漂白的具体作用机制目前还不清楚, 但是在以往的研究当中, 使用过氧化氢类漂白剂时牙齿表面涂有漂白剂的位置均发生了明显的颜色改变, 与之对应的牙齿组织拉曼光谱激光诱导荧光背景强度也发生了改变, 并且在正常牙齿组织漂白的过程当中, 激光诱导荧光背景强度变化的趋势与牙齿变面颜色变化趋势一致, 具有很强的线性关系^[19, 27], 这一趋势提示导致牙齿颜色发生改变的物质与引起荧光背景强度改变的物质具有一定的相关性。

此次实验采用拉曼光谱仪检测过氧化氢类漂白剂在不同时间段下作用于牙本质时激光诱导荧光背景强度和拉曼相对强度改变的变化趋势, 同时利用红外光谱仪检测牙本质中酰胺 I 和酰胺 III 峰值的变化反映牙本质样本中有机质的变化规律, 通过以上的检测手段研究激光诱导荧光背景强度和牙齿的组成成分的变化对于牙体组织的影响并初步探究牙齿美白的机制。以往研究显示, 牙体硬组织中磷酸根基团的浓度是反映矿化组织矿化程度的一个很好指标^[28], 而在拉曼光谱中磷酸根 (ν₁PO₄³⁻) 峰的强度又与牙体硬组织中羟基磷灰石分子中的磷酸根浓度之间存在线性相关性^[29]。此次实验发现, 3 组牙本质的拉曼相对强度在整个实验处理过程中均未发生显著变化, 即牙齿中的无机质在整个实验过程中没有发生明显改变, 该实验结果与以往的实验结论相同^[30], 提示牙齿表面的矿化程度在实验处理前后并未发生改变。现在的牙科市场上大多数的漂白产品一般都偏酸性, 并且漂白产品在牙齿上使用, 随着处理时间的增加会使牙齿表面发生酸化, 从而导致牙体组织的硬度降低、表面粗糙度增加等改变^[31-33]。此次实验使用临床上最常用的两类漂白药物过氧化脲和过氧化氢分别进行测试, 得出中性 40% 过氧化脲和中性 10% 过氧化氢并不会使牙齿无机质产生明显改变, 同时也保证了在无机成分不发生改变的前提下进一步探索拉曼光谱的激光诱导荧光背景来源。

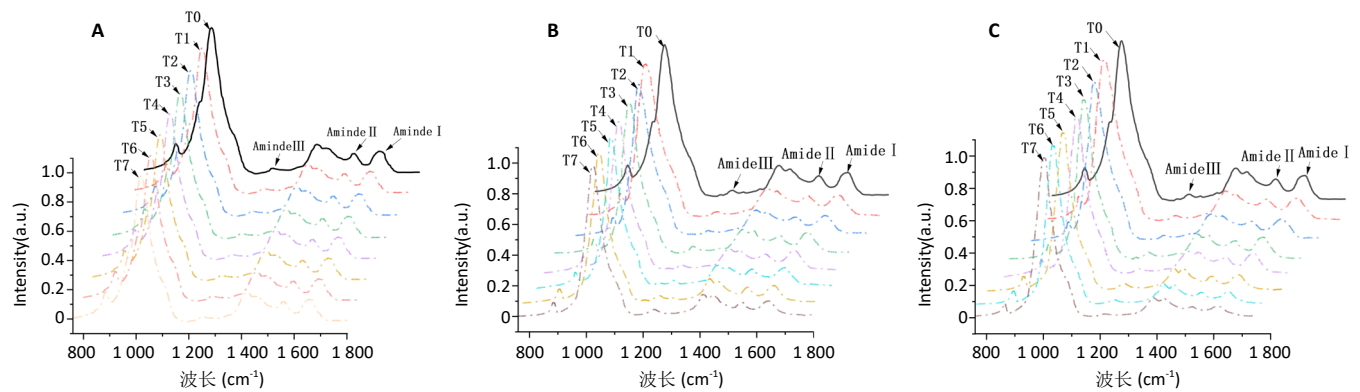
过氧化脲组、过氧化氢组和对照组的拉曼光谱激光诱导



图注：图 A-C 分别为对照组、过氧化脲组、过氧化氢组拉曼相对强度变化趋势图；D-F 分别为对照组、过氧化脲组、过氧化氢组荧光背景强度变化趋势图。T0-T7 分别代表处理 0-7 d。3 组组内处理 1-7 d 的拉曼相对强度均未发生明显变化，对照组处理 1-7 d 的荧光背景强度未发生明显变化，过氧化脲组处理 1-7 d 的荧光背景强度呈现下降趋势，过氧化氢组处理 1-4 d 的荧光背景强度显著降低，此后未再发生明显变化。

图 3 | 处理不同时间各组牙本质拉曼相对强度和激光诱导荧光背景强度变化趋势图

Figure 3 | Trend plots of dentin Raman relative intensity and laser-induced fluorescence background intensity values at different time intervals for each group



图注：图 A-C 分别为对照组、过氧化脲组和过氧化氢组红外光谱变化。T0-T7 分别代表处理 0-7 d；Amide 为酰胺。处理 1-7 d，对照组酰胺 I 和酰胺 III 峰值面积均无明显变化；过氧化脲组与过氧化氢组酰胺峰值都发生了明显变化，过氧化脲组、过氧化氢组酰胺 I 和酰胺 III 峰值面积均呈明显的下降趋势，并且过氧化氢组下降趋势更明显。

图 4 | 处理不同时间各组牙本质样本的红外光谱变化

Figure 4 | Changes in infrared spectra of each group of dentin samples at various time points

荧光背景强度变化趋势并不相同，去离子水对照组荧光背景强度在整个实验过程中改变量轻微，可能是激光对牙本质的反复照射所引起的改变^[21, 34]。过氧化脲组荧光背景强度整个处理过程中都在不断下降，但下降的速率较为缓慢，并且在实验结束阶段依然有下降的趋势，这种结果也可能是由于在

处理过程中真正起作用的是过氧化脲分解之后产生的过氧化氢，以往的研究发现 10% 过氧化脲只能分解产生 3.5% 的过氧化氢^[35]，导致有效成分过氧化氢的含量显著降低，所以可能因此原因才导致荧光背景强度的下降速率缓慢。与前两组相比，过氧化氢组处理 1-4 d 的荧光背景强度发生了明显

改变,下降速率相较于过氧化脲组要快很多,但是在处理4 d后荧光背景强度却不再发生变化,并处理4-7 d时间点的荧光背景强度相比无明显差异,认为引起拉曼光谱激光诱导荧光背景的物质在4 d后就已经消失或者被过氧化氢的氧化能力分解破坏了。

在红外光谱测试中3组的实验结果也有明显不同。对照组整个实验处理过程中酰胺I和酰胺III峰值并未发生明显改变,表明牙本质样本在去离子水的作用下并未有胶原蛋白含量上的改变。过氧化脲组整个实验处理过程中酰胺峰值呈现逐步下降的趋势,但每天的变化程度并不大,最后一天和第一天相比差异明显,表明在过氧化脲处理下牙本质样本中的胶原纤维蛋白含量在不断减少或被氧化分解,该趋势的缓慢变化可能是过氧化脲分解成过氧化氢后,利用过氧化氢的氧化性对胶原纤维蛋白进行分解破坏。过氧化氢组酰胺峰值在整个实验过程中都呈现一个明显下降趋势,并且直至最后一天酰胺I和酰胺III峰值都有消失的趋势,变化也是极为明显。

如果拉曼光谱激光诱导荧光的变化是来源于牙本质中的胶原蛋白成分,那么牙本质的拉曼光谱激光诱导荧光强度应该随着牙本质中胶原蛋白含量的减少而相应减少,但此次实验发现,过氧化氢组处理4 d之后红外光谱中的酰胺峰值依然在减少甚至直到实验结束阶段都有消失的趋势,但牙本质拉曼光谱激光诱导荧光背景在处理4 d之后不再发生改变,可以推测出荧光背景强度与胶原纤维蛋白的含量并没有直接联系,也就推断可能只是牙本质中占比很小的一部分有机质引起荧光背景强度的改变。

所以有学者就将牙齿中的有机物分为了2个部分^[36],即为“organic-1”与“organic-2”,这两部分在含量上有很大差异,“organic-1”的含量要远大于“organic-2”。所以依据该理论的说明,作者推测“organic-1”在牙本质的有机质中为占比90%的胶原纤维蛋白,而“organic-2”为剩下占比10%的非胶原蛋白成分,并且占比较小的这部分物质与牙本质的荧光背景强度具有明显的线性相关性,虽然其是否就是引起荧光背景强度改变的直接物质来源还需要进一步证明,但此次实验也进一步提供了两者之间存在联系的证据。

虽然现在以过氧化脲和过氧化氢为主要有效成分的漂白剂依然是临床上最常用的美白套装,但是这些产品对于牙齿本身的不利影响不能被忽略,不论是该实验或者是其他的研究^[37],都同样证明了过氧化脲和过氧化氢会对牙齿自身的胶原蛋白和非胶原蛋白造成损害,但是这种影响的产生也可能就是使牙本质拉曼光谱激光诱导荧光背景变化或者牙齿漂白变色的根本原因。

作者贡献: 李锐强进行实验设计,实验实施为李锐强和尹晨,实验评估为马琰,资料收集为李锐强、尹晨和马琰,李锐强成文,马琰校审。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范: 该文章撰写遵守了国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] HAYWOOD VB. Nightguard vital bleaching: current concepts and research. *J Am Dent Assoc.* 1997;128 Suppl:19S-25S.
- [2] DAHL JE, PALLESEN U. Tooth bleaching--a critical review of the biological aspects. *Crit Rev Oral Biol Med.* 2003;14(4):292-304.
- [3] KAHLER B. Present status and future directions- Managing discoloured teeth. *Int Endod J.* 2022;55 Suppl 4(Suppl 4):922-950.
- [4] EPPLE M, MEYER F, ENAX J. A Critical Review of Modern Concepts for Teeth Whitening. *Dent J (Basel).* 2019;7(3):79.
- [5] ALKAHTANI R, STONE S, GERMAN M, et al. A review on dental whitening. *J Dent.* 2020;100:103423.
- [6] UTHAPPA R, SUPRITH ML, BHANDARY S, et al. A comparative study of different bleaching agents on the morphology of human enamel: an in vitro SEM study. *J Contemp Dent Pract.* 2012;13(6):756-759.
- [7] MELO M, FIORESTA R, SANZ JL, et al. Effect of highly concentrated bleaching gels on enamel microhardness and superficial morphology, and the recovery action of four remineralizing agents. *BMC Oral Health.* 2022;22(1):645.
- [8] XAVIER GMB, GIL GS, PAES YFO, et al. Assessment of the effect of experimental gel of pregabalin associated with 35% hydrogen peroxide bleaching on bovine dental enamel: an in vitro study. *Odontology.* 2024. doi: 10.1007/s10266-024-00978-2.
- [9] TORRES CR, ZANATTA RF, GODOY MM, et al. Influence of Bleaching Gel Peroxide Concentration on Color and Penetration through the Tooth Structure. *J Contemp Dent Pract.* 2021;22(5):479-483.
- [10] WIJETUNGA CL, OTSUKI M, ABDU A, et al. The effect of in-office bleaching materials with different pH on the surface topography of bovine enamel. *Dent Mater J.* 2021;40(6):1345-1351.
- [11] ACUÑA ED, PARREIRAS SO, FAVORETO MW, et al. In-office bleaching with a commercial 40% hydrogen peroxide gel modified to have different pHs: Color change, surface morphology, and penetration of hydrogen peroxide into the pulp chamber. *J Esthet Restor Dent.* 2022;34(2):322-327.
- [12] DA SILVA KL, FAVORETO MW, CENTENARO GG, et al. Can all highly concentrated in-office bleaching gels be used as a single-application? *Clin Oral Investig.* 2023;27(7):3663-3671.
- [13] TORRES C, MOECKE SE, MAFETANO A, et al. Influence of Viscosity and Thickener on the Effects of Bleaching Gels. *Oper Dent.* 2022;47(3):E119-E130.

- [14] BARROS JÚNIOR ES, RIBEIRO MES, LIMA RR, et al. Excessive Dental Bleaching with 22% Carbamide Peroxide Combined with Erosive and Abrasive Challenges: New Insights into the Morphology and Surface Properties of Enamel. *Materials (Basel)*. 2022;15(21):7496.
- [15] HARDAN L, BOURGI R, FLORES-LEDESMA A, et al. Is a White Diet Necessary for Tooth Bleaching Procedures? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Dent J (Basel)*. 2024;12(4):118.
- [16] CARLOS NR, PINTO A, DO AMARAL F, et al. Influence of Staining Solutions on Color Change and Enamel Surface Properties During At-home and In-office Dental Bleaching: An In Situ Study. *Oper Dent*. 2019;44(6):595-608.
- [17] CARVALHO RF, DA MATA GALVÃO A, CAMPOLINA MG, et al. Does polishing of bleached enamel affect roughness and tooth color stability after exposure to coffee? *J Esthet Restor Dent*. 2022;34(2):351-359.
- [18] SOUZA JM, AGUIAR JP, NEVES WJ, et al. Influence of diet and red wine exposure on the velocity of at home bleaching: A randomized controlled clinical trial. *Am J Dent*. 2022;35(4):191-196.
- [19] LIANG S, JIANG T, WANG Y. Effect of hydrogen peroxide with different pH values on the color, translucency and laser-induced fluorescence of human dentin. *Chinese J Stomatol*. 2013;48(8):453-457.
- [20] OTEL I. Overall Review on Recent Applications of Raman Spectroscopy Technique in Dentistry. *Quantum Beam Sci*. 2023;7:5.
- [21] JIANG T, MA X, WANG Y, et al. Investigation of the effects of 30% hydrogen peroxide on human tooth enamel by Raman scattering and laser-induced fluorescence. *J Biomed Opt*. 2008;13(1):014019.
- [22] PASCHALIS EP, MENDELSON R, BOSKEY AL. Infrared assessment of bone quality: a review. *Clin Orthop Relat Res*. 2011;469(8):2170-2178.
- [23] BOSKEY A, MENDELSON R. Infrared analysis of bone in health and disease. *Biomed Opt*. 2005;10(3):31102.
- [24] TSUDA H, RUBEN J, ARENDS J. Raman spectra of human dentin mineral. *Eur J Oral Sci*. 1996;104(2 (Pt 1)):123-131.
- [25] JIANG T, MA X, WANG Y, et al. Effects of hydrogen peroxide on human dentin structure. *J Dent Res*. 2007;86(11):1040-1045.
- [26] PLOTINO G, BUONO L, GRANDE NM, et al. Nonvital tooth bleaching: a review of the literature and clinical procedures. *J Endod*. 2008;34(4):394-407.
- [27] LIANG S, WANG M, WANG Y, et al. A Pilot Study About the Effect of Laser-Induced Fluorescence on Color and Translucency of Human Enamel During Tooth Bleaching. *Photobiomodul Photomed Laser Surg*. 2020;38(3):151-159.
- [28] HANNIG C, HAMKENS A, BECKER K, et al. Erosive effects of different acids on bovine enamel: release of calcium and phosphate in vitro. *Arch Oral Biol*. 2005;50(6):541-552.
- [29] GILCHRIST F, SANTINI A, HARLEY K, et al. The use of micro Raman spectroscopy to differentiate between sound and eroded primary enamel. *Int Jpaediatr Dent*. 2007;17(4):274-280.
- [30] SUN L, LIANG S, SA Y, et al. Surface alteration of human tooth enamel subjected to acidic and neutral 30% hydrogen peroxide. *J Dent*. 2011;39(10):686-692.
- [31] GODINHO M, DE ATAIDE IN, LAMBOR R, et al. Influence of two remineralizing agents on bleached enamel surface morphology and mineral composition-An In Vitro study. *Indian J Dent Res*. 2022;33(2):188-192.
- [32] ARAGÃO WAB, CHEMELO VS, ALENCAR CM, et al. Biological action of bleaching agents on tooth structure: A review. *Histol Histopathol*. 2024;39(10):1229-1243.
- [33] MANSO AP, DE MORAIS DC, YAMAMOTO K, et al. Effects of prolonged use of over-the-counter bleaching agents on enamel: An in vitro study. *Microsc Res Tech*. 2022;85(3):1016-1027.
- [34] TSUDA M, ONO T, OGAWA T, et al. Pyridinoline is a real moiety of collagen. *Biochem Biophys Res Commun*. 1982;104(4):1407-1412.
- [35] AMER M. Intracoronary tooth bleaching- A review and treatment guidelines. *Aust Dent J*. 2023;68 Suppl 1:S141-S152.
- [36] BRIK A, HASKELL E, BRIK V, et al. Anisotropy effects of EPR signals and mechanisms of mass transfer in tooth enamel and bones. *Appl Radiat Isot*. 2000;52(5):1077-1083.
- [37] JUNQUERA LB, CARLOS NR, OTSUKI M, et al. Effect of Bleaching Treatments on the Mechanical Properties of the Dentin Matrix and on Collagen Biodegradation by Endogenous Protease. *Oper Dent*. 2024;49(5):564-573.

(责任编辑: 关伟, 邱杨, 张楠)