论 著

二甲基亚砜在牙本质干燥和润湿状态下对氟斑牙粘接强度的影响

张美凤，游潇潇，陈　龙，孙正帆，郭　玲
西南医科大学附属口腔医院 修复科（泸州 646000）

【摘　要】目的 评价二甲基亚砜（dimethyl sulfoxide，DMSO）在氟斑牙牙本质干燥和润湿状态下对微剪切粘接强度及粘接界面微观形态的影响。**方法** 收集新鲜拔除的非龋性氟斑牙120颗，按照Thylstrup-Fejerskov指数（TFI）对氟斑牙严重程度进行分组：轻度组（TFI = 1-3）、中度组（TFI = 4-5）和重度组（TFI = 6-9）。再按照不同的粘接方式，将每个组分为4个亚组：干粘接组、DMSO干粘接组、湿粘接组和DMSO湿粘接组。粘接完成后，各组样本分别进行微剪切粘接强度试验以测得粘接强度。从每组中选部分样本在扫描电镜下观察预处理后的牙本质表面，在激光共聚焦显微镜下观察树脂-牙本质粘接界面。**结果** 不同粘接方式会影响氟斑牙牙本质粘接强度，结果具有统计学意义（$F = 200.29$，$P < 0.05$），湿粘接组的粘接强度均高于干粘接组，而DMSO预处理可显著提高干、湿粘接组粘接强度，并在湿粘接组中效果最明显；随着氟斑牙严重程度的加重，粘接强度下降，结果具有统计学意义（$F = 89.87$，$P < 0.05$）；电镜观察干粘接组和DMSO干粘接组均出现牙本质小管内裂纹，且胶原纤维排列紧密，湿粘接组和DMSO湿粘接组未见小管内裂纹，且胶原纤维蓬松多孔呈网状；共聚焦观察干粘接组树脂突短而稀疏，湿粘接组树脂突长而密集，DMSO预处理可使干、湿粘接组混合层变厚和使树脂突变长。**结论** DMSO可有效提高氟斑牙牙本质在干燥和湿润状态下的粘接强度，但湿粘接下的粘接强度高于干粘接，且粘接强度随氟斑牙严重程度的加重而降低。

【关键词】氟斑牙；牙本质；二甲基亚砜；粘接强度；粘接界面
【中图分类号】 R781.2　**文献标志码** A　**DOI**：10.3969/j.issn.2096-3351.2022.03.003

Effect of dimethyl sulfoxide on the bond strength of fluorosed dentin in dry and moist condition

ZHANG Meifeng，YOU Xiaoxiao，CHEN Long，SUN Zhengfan，GUO Ling
Department of Prosthodontics，the Affiliated Stomatology Hospital of Southwest Medical University，Luzhou 646000，China

【Abstract】Objective To evaluate the effect of dimethyl sulfoxide（DMSO）on micro-shear bond strength and the micro-morphology of bonding interface in the dry and wetted state of fluorosed dentin. **Methods** 120 freshly extracted non-carious fluorosed teeth were collected and grouped according to the Thylstrup-Fejerskov Index（TFI）for the severity of fluorosis: mild group（TFI = 1-3），moderate group（TFI = 4-5）and severe group（TFI = 6-9）. Each group was divided into four subgroups according to the different interventions: dry bonding group，DMSO dry bonding group，wet bonding group，and DMSO wet bonding group. After the bonding was completed，specimens of each group were subjected to microshear bond strength test to measure the bond strength. Specimens from each group were selected to observe the pretreated dentin surfaces under scanning electron microscope，and the resin-dentin bonding interfaces were observed under laser confocal microscope. **Results** The bonding strength of fluorosed dentin was affected by different bonding methods，and the results were statistically significant（$F = 200.29$，$P < 0.05$）. The bonding strength of wet bonding group was higher than that of dry bonding group，while DMSO pretreatment significantly increased the bonding strength of both dry and wet bonding groups，which was most obvious in wet bonding group. The bond strength decreased with increasing severity of fluorosis and the results were statistically significant（$F = 89.87$，$P < 0.05$）. The dry bonding group and the DMSO dry bonding group both showed intra-tubular cracks in dentin and closely arranged collagen fibers，while the wet bonding group and the DMSO wet bonding group did not show intra-tubular cracks and the collagen fibers were fluffy and porous in a reticular pattern. Confocal observation showed that the resin protrusions were short and sparse in the dry bonding group but long and dense in the wet bonding group. DMSO pretreatment could make the hybrid layer and resin protrusions thicker and longer in both the dry and wet bonding groups. **Conclusion** DMSO can effectively

基金项目：中华口腔医学会口腔健康促进与口腔医学发展西部临床科研基金（CSA-W2019-07）；四川省医学会科研项目（S16078）
第一作者简介：张美凤，硕士生。
通信作者：郭　玲，教授，博士。E-mail：gl2005202@foxmail.com
引用本文：张美凤，游潇潇，陈龙，等. 二甲基亚砜在牙本质干燥和湿润状态下对氟斑牙粘接强度的影响[J]. 西南医科大学学报，2022，45（3）：195-199. DOI：10.3969/j.issn.2096-3351.2022.03.003

improve the bond strength of fluorosed dentin in dry and wet condition, but the bond strength under wet condition was higher than dry condition. The bond strength decreased with the severity of dental fluorosis.

【**Key words**】Dental fluorosis; Dentin; Dimethyl sulfoxide; Bond strength; Bonding interface

氟斑牙是由于在牙齿发育阶段长期摄入过量氟化物而导致牙齿结构异常的一种获得性疾病，表现为不透明、无光泽的白垩色、褐色斑块甚至实质性缺陷[1-2]。目前对氟斑牙的治疗主要采用粘接修复的方式，如贴面、嵌体、髓腔固位冠等[3-4]。以往研究多集中在氟斑牙牙釉质粘接，对于牙本质粘接的报道较少。事实上，受氟中毒影响的牙本质可以显著地以牙本质低矿化和牙本质小管紊乱的形式出现，其胶原纤维排列异常导致间隙大小不均，部分牙本质小管甚至被矿物盐阻塞[5-6]。这些变化会阻碍粘接剂向牙本质小管和脱矿的胶原纤维网中渗透，影响混合层和树脂突的形成，最终降低氟斑牙牙本质的粘接强度。有文献报道称，氟斑牙牙本质的粘结强度较正常牙本质粘接强度更低[3,7-10]。

牙本质粘接技术发展至今，全酸蚀粘接仍被视为评价牙本质界面粘接有效性的“金标准”。这种粘接方式可达到更大的脱矿深度，通过粘接剂充分渗透到脱矿区域可获得良好的粘接效果。然而，因粘接剂渗透深度小于脱矿深度，混合层底部留下大量未被树脂包裹的裸露的胶原纤维，在水的参与下极易被内源性酶降解[11]。近年提出的二甲基亚砜（dimethl sulfoxide，DMSO）粘接技术有望解决这一问题[12-15]。DMSO[分子式（CH_3）$_2$SO]是一种极性非质子溶剂，可溶解极性和非极性化合物。高浓度DMSO能够可逆地将牙本质基质中高度交联的胶原蛋白解离成疏松多孔的胶原纤维网络[16]。有文献报道，DMSO预处理使混合层底部胶原纤维裸露程度降低85.3%[17]。胶原纤维间距增大很可能促进粘接剂向更深处的脱矿区域渗透，从而减少混合层底部胶原纤维暴露。此外，DMSO可以破坏水的自蒂合趋势[18-19]。虽然水作为功能介质，积极参与混合层的形成，但多余的水也造成了粘接界面的降解。而DMSO可能会阻止水在胶原分子表面的聚集，暴露出胶原上更多树脂功能单体的结合位点[20-21]。

根据DMSO的这些特性，本研究将DMSO应用于氟斑牙上，分别研究DMSO预处理在不同程度氟斑牙牙本质干燥和湿润状态对粘接强度和界面形态的影响。

1 材料与方法

1.1 准备

1.1.1 *材料与仪器*　Adper Single Bond2牙本质粘接剂，Filtek Z350复合树脂，35% 磷酸酸蚀剂，二甲基亚砜（≥ 99.95%），超声荡洗机，万能材料试验机（WDW-20，中国济南伊诺），场发射电子显微镜（Inspect F50，美国FEI），激光共聚焦显微镜（TSC SP8，德国Leica）常规口腔治疗器械等。

1.1.2 *样本收集*　选取四川省泸州市古蔺、叙永县口腔科门诊因牙周病或正畸治疗拔除的120颗氟斑牙。纳入标准：①牙体发育完全，根尖孔已闭合；②无牙体缺损，未行充填治疗或根管治疗；③前磨牙或磨牙。排除标准：①牙体发育不全，根尖孔未闭合；②牙体缺损，已行充填治疗或根管治疗；③非前磨牙或磨牙。

1.2 分组

将120颗氟斑牙按照Thylstrup-Fejerskov指数（TFI）分为3个大组：轻度组（TFI = 1-3）、中度组（TFI = 4-5）和重度组（TFI = 6-9）。每个大组下又随机分为4个亚组（共12组），即干粘接组、DMSO干粘接组、湿粘接组和DMSO湿粘接组。

1.3 实验步骤

1.3.1 *样本处理*　在清理软组织和牙结石后，所有样本保存在4°C，1%的氯胺溶液中备用。样本包埋固定在超硬石膏，用低速切割机将其截断至釉牙本质界下约2 mm，得到新鲜平坦的牙本质面。暴露的牙本质用600目碳化硅砂纸湿抛光1 min，得到标准的玷污层。在蒸馏水中超声荡洗5 min后，按照表1分组进行操作。

1.3.2 *粘接强度测试*　96个样本按照氟斑牙严重程度和干预措施分为12个组（n = 8）。分组进行酸蚀和预处理后，将打有孔径为1 mm的双面胶带覆盖于牙本质面上。Single Bond2牙本质粘接剂均匀涂抹于牙本质表面（压力约10 N），无水无油气流轻吹5 s后，光固化灯照

表1　不同分组的操作步骤

Table 1　Operating steps for different groups

分组	操作步骤
干粘接组	牙本质表面用35%磷酸酸蚀30 s，流水下冲洗30 s后，使用三用枪在距离10 cm处连续吹气30 s；
DMSO干粘接组	牙本质表面用35%磷酸酸蚀30 s，流水下冲洗30 s后，使用三用枪在距离10 cm处连续吹气30 s，蘸取50% DMSO溶液均匀涂抹1 min，干棉球仔细擦拭；
湿粘接组	牙本质表面用35%磷酸酸蚀30 s，流水下冲洗30 s后，用纸张仔细地进行印迹干燥，使牙本质表面略有湿润；
DMSO湿粘接组	牙本质表面用35%磷酸酸蚀30 s，流水下冲洗30 s后，用纸张仔细地进行印迹干燥，使牙本质表面略有湿润，蘸取50% DMSO溶液均匀涂抹1 min，干棉球仔细擦拭。

射10 s至粘接剂固化。对应每个小孔处放置内径为1 mm、高度为2 mm的透明聚乙烯模具，将Filtek Z350复合树脂填充到模具中，光固化20 s，制成圆柱形树脂柱，去除模具、胶带和多余粘接剂。然后，将每个样本固定在万能试验机上，用直径0.2 mm的正畸钢丝缠绕在每个树脂微柱的底座上，钢丝加力的方向与界面平行，进行微剪切粘接强度测试。以牙齿为统计学单位，用SPSS 25.0行双因素方差分析得到结果，如表2所示。

1.3.3 扫描电镜观察 12个样本截除冠部牙釉质后，将其切成约1 mm厚的牙本质盘（每个样本至少可切4片），蒸馏水超声荡洗5 min。按照不同分组对牙本质盘进行酸蚀和预处理，用2.5% 戊二醛0.1 mol/L，pH 7.2磷酸盐缓冲液固定4 h。样本在酒精梯度脱水和表面喷金后，在扫描电镜下观察样本表面，如图1所示。

1.3.4 激光共聚焦观察 12个样本截除冠部牙釉质后，将其切成约1 mm厚的牙本质盘。按照不同分组对牙本质盘进行酸蚀和预处理，用Filtek Z350复合树脂制作形成4 mm × 4 mm × 3 mm树脂块，再用含0.1%罗丹明B染料的粘合剂将树脂块粘固。所有的样本都按照垂直粘接面的方向切片，并用碳化硅砂纸抛光至透亮，蒸馏水超声荡洗5 min。最后使用激光共聚焦显微镜观察切片的粘结界面形态，如图2所示。本研究经医院学术伦理委员会审核批准。

1.4 统计学分析

采用SPSS 25.0软件对各组数据进行统计分析，计量资料用$\bar{x} \pm s$表示，对氟斑牙严重程度和粘接方式的影响进行双因素方差分析，两两比较采用HSD法，$P < 0.05$为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 粘接强度

双因素方差分析结果显示：氟斑牙严重程度（$F = 89.87$，$P < 0.05$）、粘接方式（$F = 200.29$，$P < 0.05$）均对粘接强度造成显著性影响，且严重程度和粘接方式之间存在交互作用（$F = 3.17$，$P < 0.05$）。统计分析结果见表2。

表2 不同程度氟斑牙的微剪切粘接强度值（$\bar{x} \pm s$，MPa）

Table 2 Microshear bond strength of dental fluorosis with different severity（$\bar{x} \pm s$，MPa）

处理方式	轻度	中度	重度	F	P
干粘接组	22.34 ± 1.27^{Aa}	20.67 ± 1.36^{Ab}	17.84 ± 1.19^{Ac}	25.58	< 0.001
DMSO干粘接组	23.76 ± 1.64^{Ba}	22.15 ± 1.23^{Aa}	19.69 ± 1.40^{Bb}	16.45	< 0.001
湿粘接组	27.01 ± 1.73^{Ca}	26.34 ± 1.18^{Ba}	21.86 ± 1.39^{Cb}	29.81	< 0.001
DMSO湿粘接组	31.90 ± 1.47^{Da}	28.13 ± 1.02^{Cb}	27.48 ± 1.27^{Db}	28.30	< 0.001
F	60.89	67.48	80.98	3.17	–
P	< 0.01	< 0.01	< 0.01	–	0.01

注：不同的上标大写字母表示每一列中的差异有统计学意义（$P < 0.05$）；不同的上标小写字母表示每一行中的差异有统计学意义（$P < 0.05$）

2.2 电镜扫描

各组的牙本质粘接面扫描电镜观察如图1所示。干粘接组可明显看到牙本质小管内的裂纹，在轻中度组中呈条状向小管深处延伸，重度组中条状裂纹密集呈片状分布，而管壁上有规律而紧密排列的胶原纤维。DMSO干粘接组同样有小管壁的裂纹，但裂纹数量和宽度均较干粘接组少。湿粘接组中牙本质小管壁完整无明显裂纹，管壁内的胶原纤维蓬松交织分布，小管深处可见三维立体分布的胶原纤维网。DMSO湿粘接中蓬松的胶原纤维网状结构则更加明显，占据了整个牙本质小管，并向小管深处蔓延。

2.3 激光共聚焦成像

各组纵切面的激光共聚焦观察如图2所示。由于粘接剂中的罗丹明B能在特定波长的激光下发出红色荧光，从而可以直观地观察到粘接界面的被染色的树脂突微观形貌。在干粘接组中可见从粘接面混合层向牙本质中渗透的树脂突，树脂突密集分布，但长度较短。而湿粘接组树脂突长度明显增长，混合层厚度增加。DMSO干粘接组相对于干粘接组，树脂突长度和密度增加，但相较于湿粘接组和DMSO湿粘接组仍有差距。DMSO湿粘接组在所有组别中树脂突最长、最密集，混合层厚度也与湿粘接组相当。

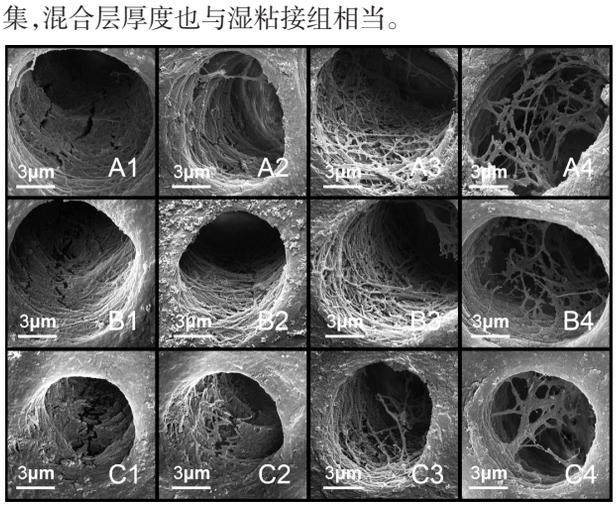


图1 牙本质表面的扫描电镜图（×50 000）

Figure 1 Scanning electron microscope images of the dentin surfaces（×50 000）

注：A、B、C分别代表轻度、中度和重度氟斑牙；1、2、3、4分别代表干粘接组、DMSO干粘接组、湿粘接组和DMSO湿粘接组

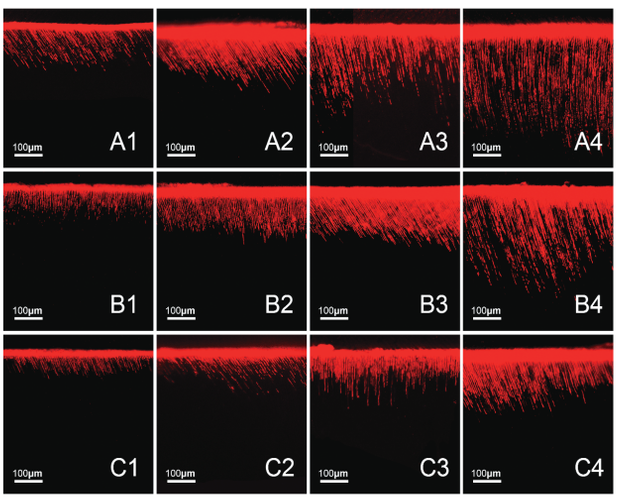


图2 样本纵切面的激光共聚焦图片(× 200)

Figure 2 Confocal laser scanning microscopy images of longitudinal section of the samples (×200)

注:A、B、C分别代表轻度、中度和重度氟斑牙;1、2、3、4分别代表干粘接组、DMSO干粘接组、湿粘接组和DMSO湿粘接组

3 讨论

氟斑牙是一种全球性的地方性疾病,我国更是全世界发病最严重的国家之一,其发生不仅损害了牙齿健康和美观,还会给患者心理造成一定的负担[3-4,22]。而临床对氟斑牙的治疗,如瓷贴面、嵌体、全瓷冠等,都离不开粘接修复[23]。因此粘接力的强弱对氟斑牙的治疗显得尤为重要。而氟斑牙牙釉质的粘接力低,易被磨耗,在重度氟斑牙中牙釉质甚至呈片状剥脱,因此其可提供的粘接力有限。这种情况下,研究如何提高氟斑牙牙本质粘接力就显得尤为重要。有研究发现,无论是采用自酸蚀或者全酸蚀方式,氟斑牙牙本质的粘接力始终低于正常牙本质[8]。所以本实验致力于寻找一种有效方案来提高氟斑牙牙本质的粘接强度。

本研究发现,重度氟斑牙的牙本质粘结强度始终低于轻度氟斑牙,而中度氟斑牙则介于两者之间,与前人的研究结果一致[7,24]。尤其是重度的氟斑牙,其牙本质粘接强度大幅减少,这可能与牙体的形态结构和成分的不规则有关。在牙齿发育过程中,高浓度氟化物会影响牙本质磷蛋白、酪蛋白激酶II和碱性磷酸酶的代谢[25-27]。磷酸化的减少降低了结合矿物的能力和晶体的启动,从而导致矿物沉积的减少[28]。这种低矿化会表现为氟斑牙牙本质小管形成不良和矿化不佳,进一步影响粘接效果。

然而,DMSO预处理无论是在牙本质干燥还是湿润状态下,都显著提高了氟斑牙牙本质粘接强度。以往这种结果都只在正常牙本质中看到,尚未有报道DMSO同样可提高氟斑牙牙本质粘接强度[29-31]。DMSO作为最佳医学渗透增强剂之一,可能在牙本质粘接界面形成中发挥了重要作用[15,32]。理想状况下,粘接剂充分均匀地渗入脱矿牙本质,置换出其中的水分并完全包裹胶原纤维,形成稳定的粘接界面。而粘接界面主要是由粘接剂单体通过牙本质小管(管内渗透)以及管间牙本质的胶原纤维间空隙(管间渗透)向脱矿牙本质中渗透而形成。其中,管间渗透(混合层)是主要粘接力来源。胶原纤维间空隙作为粘接剂的渗透通道,是由于酸蚀脱矿后的胶原肽之间形成新的氢键而形成。溶剂除非能破坏肽间的氢键,否则不能重新膨胀基质[33]。常见的能够抑制肽间氢键的溶剂有水和乙醇,所以湿粘接和乙醇湿粘接技术相继被提出。由于DMSO也能抑制胶原纤维之间的肽间氢键,使基质迅速膨胀,其在正常牙本质粘接中的作用才被逐渐发掘[12]。本研究(图1)发现,DMSO也能够使氟斑牙牙本质中的胶原纤维解离成疏松扩张的网状结构,但在牙本质干燥状态下效果不显著,可能是气压过强导致胶原纤维网皱缩坍塌(在干粘接组中见明显的裂纹)。这种蓬松多孔的胶原纤维网有利于粘接剂单体的渗透,形成均一稳定的混合层,并减少胶原纤维的裸露。这种"混合"的过程产生的微机械固位,可以显著提高牙本质-修复体粘结强度及粘结界面的密封性[34]。一些文献报道,DMSO预处理还可以增加牙本质表面的润湿性,使粘结剂的亲水性成分更好地渗透[12,16,29]。因此,本团队推测二甲基亚砜和氟斑牙牙本质之间可能存在类似的增强作用。

显微镜和共聚焦成像技术的不断发展使我们可以直观地观察物体表面的微观形态[35-36]。本研究利用罗丹明B荧光剂追踪和显示粘接界面,粘接剂单体在牙本质小管(管内渗透)中的渗透形成了粘接界面上数目众多的树脂突,是粘接力的重要组成部分[37]。共聚焦图片(图2)可以观察到DMSO处理组获得了明显更长、更密集的树脂突,混合层的厚度也有所增加,但在牙本质干燥状态下的效果较湿润状态下更差。不同程度氟斑牙的牙本质之间的粘接界面也有明显的差异。轻度组树脂突长而致密,而重度组树脂突相较之下更为稀疏、细小。本团队推测氟斑牙的结构和成分异常可能是阻碍粘结剂渗透的原因。有研究指出,氟斑牙牙本质矿化不良,表现为部分牙本质小管被矿物盐所阻塞,牙本质小管不规则或出现弯曲[5-6]。然而,还需要进一步的研究来检验这一假设。

4 结论

DMSO可以促进胶原纤维解离为疏松的网状结构,增加粘接面的树脂突长度,从而增强氟斑牙牙本质粘接强度。其在牙本质湿润状态下的增强效果远大于干燥状态下,但粘接强度会随着氟斑牙严重程度的加重而降低。

(利益冲突:无)

参 考 文 献

[1] 郑辉. 人氟斑牙显微硬度及微观结构研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
[2] 闫雪,伊哲. 高氟饮水与学龄期儿童青少年氟斑牙发病的相关性[J]. 中国卫生工程学,2020,19(3): 347-349.
[3] 双娈,陈黎明. 氟斑牙牙本质粘接性能的研究进展[J]. 贵州医药,2019,43(2): 214-216.
[4] 黎佳灵. 氟斑牙粘结的研究进展[J]. 泸州医学院学报,2016,39(4): 385-387.
[5] PRIYADHARSINI N, MALATHI N, TAMIZHCHELVAN H, *et al.* Dental fluorosis: a histological study using light and confocal microscopy[J]. Indian J Dent Res, 2015, 26(3): 248-251.
[6] RAMESH M, NARASIMHAN M, KRISHNAN R, *et al.* The effect of fluorosis on human teeth under light microscopy: a cross-sectional study[J]. J Oral Maxillofac Pathol, 2017, 21(3): 345-350.
[7] HUANG XY, XIE J, LAN YY, *et al.* The effects of 45S5 bioactive glass and Er: YAG laser on the microtensile bond strength of fluorosed teeth[J]. Microsc Res Tech, 2020, 83(12): 1558-1565.
[8] SWIFT EJ JR. Critical appraisal: bonding to fluorosed tooth structure[J]. J Esthet Restor Dent, 2009, 21(6): 416-421.
[9] HUANG XY, XIE J, ZHANG MF, *et al.* Effect of 45S5 bioactive glass on the microshear bond strength of dental fluorosis[J]. Microsc Res Tech, 2021. DOI: 10.1002/jemt.24026. Epub ahead of print.
[10] 双娈,汤晔,罗祎,等. 两种粘接剂对全瓷与氟斑牙牙本质粘接剪切强度的研究[J]. 贵州医药,2020,44(9): 1358-1359,1363.
[11] DELGADO AHS, JAMAL H, YOUNG A, *et al.* Scoping review of trials evaluating adhesive strategies in pediatric dentistry: where do simplified strategies lie?[J]. BMC Oral Health, 2021, 21(1): 33.
[12] GUO JM, LEI WL, YANG HY, *et al.* Dimethyl sulfoxide wet-bonding technique may improve the quality of dentin bonding[J]. J Adhes Dent, 2017: 229-237.
[13] STAPE THS, SESEOGULLARI-DIRIHAN R, TJÄDERHANE L, *et al.* A novel dry-bonding approach to reduce collagen degradation and optimize resin-dentin interfaces[J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 16890.
[14] STAPE THS, TJÄDERHANE L, ABUNA G, *et al.* Optimization of the etch-and-rinse technique: new perspectives to improve resin-dentin bonding and hybrid layer integrity by reducing residual water using dimethyl sulfoxide pretreatments[J]. Dent Mater, 2018, 34(7): 967-977.
[15] STAPE THS, MUTLUAY MM, TJÄDERHANE L, *et al.* The pursuit of resin-dentin bond durability: simultaneous enhancement of collagen structure and polymer network formation in hybrid layers[J]. Dent Mater, 2021, 37(7): 1083-1095.
[16] MEHTÄLÄ P, PASHLEY DH, TJÄDERHANE L. Effect of dimethyl sulfoxide on dentin collagen[J]. Dent Mater, 2017, 33(8): 915-922.
[17] STAPE THS, TJÄDERHANE L, MARQUES MR, *et al.* Effect of dimethyl sulfoxide wet-bonding technique on hybrid layer quality and dentin bond strength[J]. Dent Mater, 2015, 31(6): 676-683.
[18] MARBLE CB, XU XQ, PETROV GI, *et al.* New insights into a hydrogen bond: hyper-Raman spectroscopy of DMSO-water solution[J]. Phys Chem Chem Phys, 2021, 23(41): 24047-24051.
[19] YANG B, CAO XW, WANG C, *et al.* Investigation of hydrogen bonding in Water/DMSO binary mixtures by Raman spectroscopy[J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2020, 228: 117704.
[20] STAPE THS, TJÄDERHANE L, TEZVERGIL-MUTLUAY A, *et al.* Dentin bond optimization using the dimethyl sulfoxide-wet bonding strategy: a 2-year in vitro study[J]. Dent Mater, 2016, 32(12): 1472-1481.
[21] OH KI, RAJESH K, STANTON JF, *et al.* Quantifying hydrogen-bond populations in dimethyl sulfoxide/water mixtures[J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2017, 56(38): 11375-11379.
[22] 解静,黄晓宇,张美凤,等. 即刻牙本质封闭技术对氟斑牙牙本质粘接的影响[J]. 西南医科大学学报,2021,44(2): 134-137.
[23] CAVALHEIRO JP, SOUZA MIAV, DUQUE CCO, *et al.* Esthetic rehabilitation of anterior teeth with molar-incisor hypomineralization and dental fluorosis: a case report[J]. Gen Dent, 2020, 68(3): 34-39.
[24] JAÂFOURA S, KIKLY A, SAHTOUT S, *et al.* Shear bond strength of three composite resins to fluorosed and sound dentine: in vitro study[J]. Int J Dent, 2020, 2020: 4568568.
[25] MILAN AM, WADDINGTON RJ, EMBERY G. Fluoride alters casein kinase II and alkaline phosphatase activity in vitro with potential implications for dentine mineralization[J]. Arch Oral Biol, 2001, 46(4): 343-351.
[26] TULUMBACI F, GUNGORMUS M. In vitro remineralization of primary teeth with a mineralization-promoting peptide containing dental varnish[J]. J Appl Oral Sci, 2020, 28: e20200259.
[27] ZHAO L, SU JL, LIU SJ, *et al.* MAP kinase phosphatase MKP-1 regulates p-ERK1/2 signaling pathway with fluoride treatment [J]. Biochem Biophys Res Commun, 2021, 542: 65-72.
[28] ROBINSON C, CONNELL S, KIRKHAM J, *et al.* The effect of fluoride on the developing tooth[J]. Caries Res, 2004, 38(3): 268-276.
[29] TJÄDERHANE L, MEHTÄLÄ P, SCAFFA P, *et al.* The effect of dimethyl sulfoxide (DMSO) on dentin bonding and nanoleakage of etch-and-rinse adhesives[J]. Dent Mater, 2013, 29(10): 1055-1062.
[30] ZHANG ZN, YU J, YAO CM, *et al.* New perspective to improve dentin-adhesive interface stability by using dimethyl sulfoxide wet-bonding and epigallocatechin-3-gallate[J]. Dent Mater, 2020, 36(11): 1452-1463.
[31]SALIM AL-ANI AA, MUTLUAY M, STAPE THS, *et al.* Effect of various dimethyl sulfoxide concentrations on the durability of dentin bonding and hybrid layer quality[J]. Dent Mater J, 2018, 37(3): 501-505.
[32] MARREN K. Dimethyl sulfoxide: an effective penetration enhancer for topical administration of NSAIDs[J]. Phys Sportsmed, 2011, 39(3): 75-82.
[33] PASHLEY DH, TAY FR, CARVALHO RM, *et al.* From dry bonding to water-wet bonding to ethanol-wet bonding. A review of the interactions between dentin matrix and solvated resins using a macromodel of the hybrid layer[J]. Am J Dent, 2007, 20(1): 7-20.
[34] PAKEN G, ÇÖMLEKO LU ME, SONUGELEN M. Detection of the hybrid layer biodegradation initiation factor with a scanning electron microscope[J]. Microsc Res Tech, 2021, 84(9): 2166-2175.
[35] KUNTZE MM, MENDES SOUZA BD, SCHMIDT TF, *et al.* Scanning electron microscopy evaluation of dentin ultrastructure after surface demineralization[J]. J Conserv Dent, 2020, 23(5): 512-517.
[36] ABUSTEIT OE. Evaluation of resin sealer penetration of dentin following different final rinses for endodontic irrigation using confocal laser scanning microscopy[J]. Aust Endod J, 2021, 47(2): 195-201.
[37] TREVELIN LT, DA SILVA BTF, DE FREITAS PM, *et al.* Influence of Er: YAG laser pulse duration on the long-term stability of organic matrix and resin-dentin interface[J]. Lasers Med Sci, 2019, 34(7): 1391-1399.

(2021-12-16 收稿,2022-03-09 修回)