

牙科修复用氧化锆的粘结性能： 系统评价和 Meta 分析

Adhesion to Zirconia Used for Dental Restorations: A Systematic Review and Meta-Analysis

Mutlu Ozcan, Mira Bernasconi

原载 Int J Adhes Dent, 2015, 17: 7-26. (英文)

成宵译 滕伟审

摘要

目的：目前，对于牙科氧化锆陶瓷的最佳粘结方案仍未达成共识；粘结对于机械固位不足的修复体尤其重要。本系统评价分析了树脂水门汀和玻璃离子水门汀与氧化锆的粘结潜力，旨在突出影响氧化锆与粘结材料的粘结强度的可能主导因素。**材料和方法：**本篇系统评价纳入 1995 年 1 月 1 日至 2011 年 6 月 1 日在 MEDLINE (PubMed) 数据库中发表的有关氧化锆粘结的科学论文原文。使用以下 MeSH 主题词、检索词及其组合词进行检索：“Dental bonding”，“Zirconium”，“Zirconia”，“Y-TZP”，“Y-TZP ceramic”，“Materials Testing/methods”，“Test”，“Cement”，和“Resin bonding”。两名评价员独立进行文献筛选和数据提取。对数据进行描述性统计，计算研究参数的频率、均值、标准差、置信区间 (95% CI; 非校正和校正)、中位数和四分位数间距 (IQR)，报告不同因素水平下粘结强度的数据：表面处理方法（对照组、物理化学方法组、物理方法组、化学方法组）、水门汀类型 (bis-GMA—、MDP— 和 4-META— 基树脂水门汀、自粘结树脂水门汀、玻璃离子水门汀)、有或无冷热循环 (TC) 老化和检测方法（宏观剪切试验、微观剪切试验、宏观拉伸试验和微观拉伸试验）。**结果：**最终文献检索获得了 177 个标题及摘要。进一步通过摘要筛选获得了 72 篇文章，其中 54 篇被认为可能适合纳入。通过全文评价，排除其中 2 篇。文献选择过程最终纳入 52 篇文献。这些文献总共研究了 169 种不同的表面处理方法，主要是空气喷砂方案和粘结促进剂（底涂剂或硅烷）的组合。总共报告了 5 种类型水门汀和 4 种检测方法的使用情况，其中有 26 项研究未进行 TC 老化，另外 26 项研究则采用了不同循环次数的冷热循环实验。本篇系统评价强调了粘固水门汀的粘结性能受表面处理方法 ($P=0.044$)、水门汀类型 ($P=0.018$)、检测方法 ($P=0.017$) 和老化处理 ($P=0.003$) 的影响。在无冷热循环加载的对照组中，宏观剪切试验和宏观拉伸试验测得的平均粘结强度分别在 1.15 (IQR=3.54) 和 8.93 (IQR=9)、6.9 (IQR=0) 和 8.73 (IQR=13.93) MPa 之间。采用物理方法处理后，与其他树脂水门汀相比，含 MDP 单体的树脂水门汀无论是宏观拉伸试验（无 TC 组：34.2, IQR=24.18MPa, TC 组：42.35, IQR=0MPa）还是微观拉伸试验（无 TC 组：37.2, IQR=41.5MPa, TC 组：17.1, IQR=31.15MPa），其测得的粘结强度均最高。**结论：**本篇系统评价的结果表明，物理和化学方法共处理可以提高氧化锆与粘结材料的粘结强度。宏观拉伸试验和微观拉伸试验检测发现，含 MDP 单体的树脂水门汀比其它类型水门汀具有更高的粘结强度。关于氧化锆粘结的研究和数据汇报仍需进一步标准化。

关键词 粘结；粘结强度；牙科水门汀；Meta 分析；表面处理；系统评价；检测方法；氧化锆

译者单位 中山大学光华口腔医学院·附属口腔医院

广州市越秀区陵园西路 56 号 510055

1 引言

氧化钇稳定的氧化锆陶瓷广泛应用于临床，如固定修复体（FDPs）、根桩或牙科重建种植基台。其它高强度陶瓷的抗弯强度为900~1200MPa，抗折强度大于2000N，断裂韧性为9~10MPa·m^{0.5}，而氧化锆陶瓷具有最优越的机械性能——几乎是氧化铝增强陶瓷的两倍，是二硅酸锂陶瓷的三倍。树脂粘结型FDP的粘结固化过程是一系列牙科治疗的最后一步。目前由于粘结促进剂的研究进一步发展，粘结修复成为微创牙科的重要组成部分。就这方面而言，除了修复体的强度之外，粘结剂对牙体组织和特定修复材料的粘结力对远期临床成功也具有重要意义。当FDP的固位不依赖于宏观机械原理时，例如树脂粘结型FDP或悬臂梁修复体，粘结剂的性能变得更加重要。

对玻璃基陶瓷使用氢氟酸（HF）酸蚀粘结面和随后的硅烷化是树脂基粘结材料获得持久粘结力的基本方法。硅烷偶联剂通过硅氧键促进了陶瓷的无机相和粘结剂的有机相之间的粘结力。此外，硅烷增加了陶瓷材料的表面能，提高了粘结剂的润湿性。目前酸蚀和硅烷化这种方法使得修复体和牙体组织之间实现微创粘结成为可能。然而，由于氧化锆陶瓷材料不含二氧化硅相，无论是使用酸蚀剂酸蚀还是应用硅烷偶联剂，树脂水门汀和高氧化铝陶瓷或氧化锆陶瓷之间都无法获得足够的粘结力。因此，为了提高粘结剂和氧化物基陶瓷之间的粘结强度，在过去的二十年已有大量的表面处理方法被提出。其中一些方法利用氧化铝颗粒进行空气喷砂处理，有助于增强树脂—陶瓷的微机械（物理）嵌合，而其他方法基于硅烷化处理后应用涂布二氧化硅的氧化铝颗粒对陶瓷表面进行物理化学活化，或者基于使用含功能性单体的粘结促进剂或树脂水门汀的化学活化。除此之外，其他方法包括火焰处理/硅沉积、表面选择性渗透酸蚀和使用含磷酸酯单体10-甲基丙烯酰氧基甲基二氢磷酸酯（MDP）的树脂水门汀。采用其中一些体外方法无法获得bis-GMA基树脂水门汀和氧化锆陶瓷之间持久的粘结力。另外，含MDP单体的树脂水门汀的主要粘结机制不单是MDP单体的化学性能，还包括空气喷砂后氧化锆陶瓷的表面粗糙度。最近的替代方法，如选择性渗透酸蚀技术和MDP单体的应用，与新型反应性硅烷单体相结合，可获得较高的初始粘结强度。

由于空气喷砂方法可能产生损害，一些制造商已经开始推广基于氧化锆专用的有机磷酸酯/羧酸单体的底涂剂或树脂水门汀，这些方法能够避免侵入性的表面处理方法。然而，硅烷、底涂剂或这些酸性单体的水解性仍然是一个问题。硅烷和底涂剂遇水降解会降低硅烷的性能，所以粘结接头的耐久性有限。此外，对树脂水门汀和氧化锆之间的粘结接头有各种各样的老化处理方法，从短期和长期放入水中浸泡到在不同温度、停留时间和循环次数下的冷热循环。将使用同种材料的不同研究进行比较也因为这些因素而较为困难，即使这些研究采用了相同的检测方法。

一些检测方法如剪切、拉伸和微观拉伸试验是评价树脂水门汀和牙科陶瓷之间粘结强度的公认方法。这些检测方法以加载负荷为基础，在粘结接头产生压应力直到粘结失败。因此，为了精确测量粘结材料和氧化锆陶瓷之间的粘结强度值，无论采用何种检测方法，粘结界面应该是加载最大压应力的区域，这一点十分关键。一项研究比较了不同的检测方法，但有关树脂水门汀和氧化锆之间粘结力的信息较少。因为在咀嚼运动中粘结接头既受到剪切力又受到拉伸力，根据待检验的研究假设，目前需采用所有的检测方法。因此，不建议只采用一种检测方法。

关于氧化锆粘结的各体外研究的检验参数差异较大；所以，氧化锆的最佳粘结方案仍未达成共识。由于缺乏共识，牙科界对氧化锆FDPs粘结应该使用哪种粘结剂以及哪种表面处理方法尚不明确。目前已发表研究中的检验参数差异较大，因此，为了检验和诠释氧化锆粘结的相关数据，发展其方法学指南的需求十分显著。本篇系统评价的目的是分析树脂水门汀和玻璃离子水门汀与氧化锆陶瓷之间的粘结潜能，以及强调影响氧化锆粘结强度的可能决定因素。

2 材料和方法

2.1 检索策略

在文献检索开始前，作者们同意以下检索方案。在MEDLINE（PubMed）（<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi>）电子检索从1995年01月01日到2011年06月01日（含06月01日）发表在牙科杂志的英文文章，使用以下MeSH主题词、检索词及其组合词：“Dental bonding”，“Zirconium”，“Zirconia”，

“Y-TZP”，“Y-TZP ceramic”，“Materials Testing/methods”，“Test”，“Cement”和“Resin bonding”。MEDLINE 检索获得了174篇参考文献，再根据文章标题和摘要筛选可能的纳入文献（表1）。进一步人工检索从1995年01月01日到2011年06月01日（含06月01日）发表在以下杂志的文章：Journal of Dental Research, Dental Materials, Journal of Adhesive Dentistry, International Journal of Prosthodontics 和 Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials。通过人工检索另外获得了3篇参考文献。

2.2 纳入 / 排除标准

纳入采用微观拉伸、宏观拉伸、微观剪切或宏观剪切试验检测氧化锆或其他陶瓷材料粘结性的体外研究。如果氧化锆粘结至牙体组织上、数据未以MPa显示以及各亚组的样本量少于5的研究则予以排除。另外，采用拔出实验检测的研究不予纳入。单纯使用粘结促进剂如粘结类树脂、硅烷偶联剂或底涂剂的这种表面处理方法的研究分组为“化学方法组”，单纯应用空气喷砂处理、摩擦材料或酸蚀剂的研究分组为“物理方法组”，物理和化学表面处理方法均采用的研究分组为“物理化学方法组”。

“对照组”是指仅采用碳化硅纸研磨氧化锆陶瓷材料的研究。

2.3 研究选择

为获得可能的纳入文献，两位独立的评价员（M.B. 和 M.O.）对电子检索和人工检索所获得的177个标题进行筛选。初始的排除之后，根据文献标题和摘要，两位评价员均接受纳入其中72篇摘要。经过讨论协商后达成一致，最终纳入54篇文献。这54篇文献的全文已获得。此外，人工检索了纳入文献的参考文献和公认的述评，以此来判定检索过程是否遗漏相关文献。这一步骤并未获得另外的文献。两位评价员独立地评价这54篇全文文章，以判定其是否符合定义的最终纳入标准。若意见不统一则通过讨论协商解决。52篇符合最终纳入标准的文献予以纳入，其它2篇通过阅读全文后予以排除。从初始的177个标题到最终本系统评价所纳入的52篇文献这一选择过程见图1。

2.4 数据提取

两位评价员采用了公认的数据提取方法进行独立的数据提取，创建了包含26个项目的数据收集表，用于评价可能影响氧化锆陶瓷和粘结剂之间粘结强度的实验条件。之后的步骤排除了2项研究，记录

表1 本篇系统评价在MEDLINE采用的检索策略

检索	文献检索策略	结果
1	“Dental bonding” [MeSH]	17009
2	“Zirconium” [MeSH]	3585
3	“Zirconia” [MeSH]	0
4	“Zirconia”	1907
5	“y-tzp”	169
6	“y-tzp ceramic”	31
7	(“1995/01/01” [Publication Date]: “2011/06/01” ” [Publication Date]) AND (((((#1) AND #2) OR #4) OR #5) OR #6)	2088
8	“Materials Testing/methods” [MeSH]	4049
9	Test	2851288
10	((#7) AND #8) OR #9	2851311
11	((#7) AND #8)	43
12	((#7) AND #9)	656
13	Cement	35035
14	Resin bonding	9398
15	((#12) AND #13) AND #14	174

#：检索；MeSH：词典词语，指医学主题词标题。

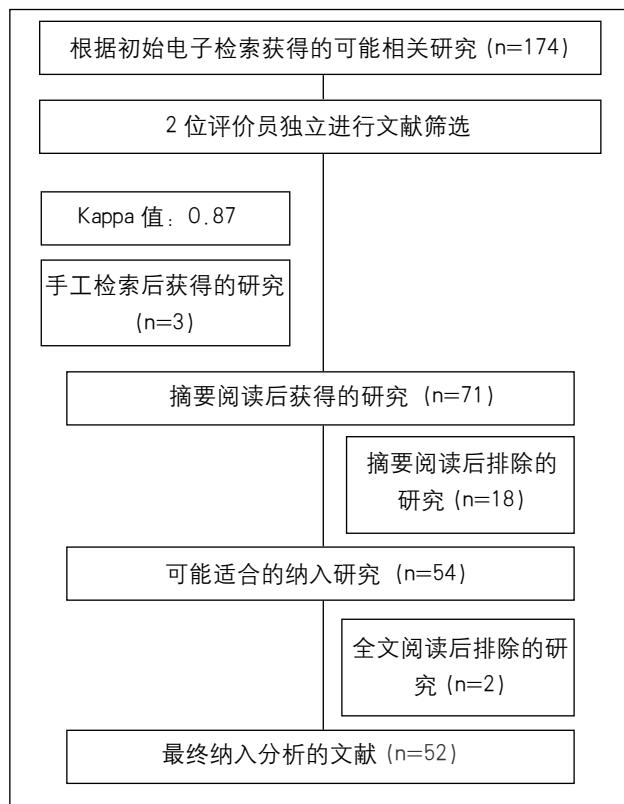


图1 文献筛选流程

排除原因。关于数据提取的意见分歧通过讨论和协商解决。采用 Excel 软件记录研究变量，并制成相应的表格。

如果研究存在某一变量的数据缺失或无法计算，则该变量数据输入为“未报告”。

2.5 统计学分析

使用社会科学统计软件（18.0 版，SPSS；芝加哥，伊利诺伊州，美国）进行统计分析。在协商共识会议之前，关于对纳入文献摘要中实验条件的报告，研究者之间的共识度表示为加权的 Cohen's Kappa 值。描述性统计量记录均数和标准差，或偏态分布的中位数和四分位数间距。计算研究参数的频率。计算所有结果的加权平均值和 95% 置信区间（confidence interval, CI）。计算不同影响因素水平下的平均粘结强度的 95% 置信区间（95% CI，非校正和校正的均含）：表面处理方法（对照组、物理化学方法组、物理方法组、化学方法组），水门汀类型（bis-GMA-，MDP-，4-META 基树脂水门汀，自粘结树脂水门汀，玻璃离子水门汀），老化处理方法（是否加载冷热循环）以及检测方法（宏观剪切、微观剪切、宏观拉伸、微观拉伸试验）。在所有的比较中，P 值小于 0.05 被认为具有统计学差异。计算由于材料检测方法、表面处理方法和水门汀类型所致粘结强度的差异。进行数据转换后，采用 Ln 表计算研究参数影响粘结强度的百分比。采用 Meta 回归分析的方法，用标准差衡量每个研究对本研究的贡献。

3 结果

3.1 纳入 / 排除文献的特征

符合纳入标准的文献见表 2。在文献摘要筛选方面，研究者之间共识度的 Kappa 值为 0.87。

表2 本系统评价中符合纳入标准的文献

篇数	按年代次序排列的文献来源
1	Kem M, Wegner SM. Bonding to zirconia ceramic: adhesion methods and their durability. Dent Mater 1998;14:64–71.
2	Derand P, Derand T. Bond strength of luting cements to zirconium oxide ceramics. Int J Prosthodont 2000;13:131–135.
3	Wegner SM, Kem M. Long-term resin bond strength to zirconia ceramic. J Adhes Dent 2000;2:139–147.
4	Janda R, Roulet JF, Wulf M, Tiller HJ. A new adhesive technology for all-ceramics. Dent Mater 2003;19:567–573.
5	Ozcan M, Vallittu PK. Effect of surface conditioning methods on the bond strength of luting cement to ceramics. Dent Mater 2003;19:725–731.
6	Blatz MB, Sadan A, Martin J, Lang B. In vitro evaluation of shear bond strengths of resin to densely-sintered high-purity zirconium-oxide ceramic after long-term storage and thermal cycling. J Prosthet Dent 2004;91:356–362.
7	Bottino MA, Valandro LF, Scotti R, Buso L. Effect of surface treatments on the resin bond to zirconium-based ceramic. Int J Prosthodont 2005;18:60–65.

续表

篇数	按年代次序排列的文献来源
8	Derand T, Molin M, Kvam K. Bond strength of composite luting cement to zirconia ceramic surfaces. <i>Dent Mater</i> 2005;21:1158–1162.
9	Amaral R, Ozcan M, Bottino MA, Valandro LF. Microtensile bond strength of a resin cement to glass infiltrated zirconia-reinforced ceramic: the effect of surface conditioning. <i>Dent Mater</i> 2006;22:283–290.
10	Atsu SS, Kilicarslan MA, Kucukesmen HC, Aka PS. Effect of zirconium-oxide ceramic surface treatments on the bond strength to adhesive resin. <i>J Prosthet Dent</i> 2006;95:430–436.
11	Luthy H, Loeffel O, Hammerle CH. Effect of thermocycling on bond strength of luting cements to zirconia ceramic. <i>Dent Mater</i> 2006;22:195–200.
12	Matlinlinna JP, Heikkinen T, Ozcan M, Lassila LV, Vallittu PK. Evaluation of resin adhesion to zirconia ceramic using some organosilanes. <i>Dent Mater</i> 2006;22:824–831.
13	Tsuo Y, Yoshida K, Atsuta M. Effects of alumina-blasting and adhesive primers on bonding between resin luting agent and zirconia ceramics. <i>Dent Mater J</i> 2006;25:669–674.
14	Uo M, Sjogren G, Sundh A, Goto M, Watari F, Bergman M. Effect of surface condition of dental zirconia ceramic (Denzir) on bonding. <i>Dent Mater J</i> 2006;25:626–631.
15	Valandro LF, Ozcan M, Bottino MC, Bottino MA, Scotti R, Bona AD. Bond strength of a resin cement to high-alumina and zirconia-reinforced ceramics: the effect of surface conditioning. <i>J Adhes Dent</i> 2006;8:175–181.
16	Aboushelib MN, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Selective infiltration-etching technique for a strong and durable bond of resin cements to zirconia-based materials. <i>J Prosthet Dent</i> 2007;98:379–388.
17	Blatz MB, Chiche G, Holst S, Sadan A. Influence of surface treatment and simulated aging on bond strengths of luting agents to zirconia. <i>Quintessence Int</i> 2007;38:745–753.
18	Matlinlinna JP, Lassila LV, Vallittu PK. Pilot evaluation of resin composite cement adhesion to zirconia using a novel silane system. <i>Acta Odontol Scand</i> 2007;65:44–51.
19	Quaas AC, Yang B, Kern M. Panavia F 2.0 bonding to contaminated zirconia ceramic after different cleaning procedures. <i>Dent Mater</i> 2007;23:506–512.
20	Wolfart M, Lehmann F, Wolfart S, Kern M. Durability of the resin bond strength to zirconia ceramic after using different surface conditioning methods. <i>Dent Mater</i> 2007;23:45–50.
21	Lohbauer U, Zipperle M, Rischka K. Hydroxylation of dental zirconia surfaces: Characterization and bonding potential. <i>J Biomed Mater Res B Appl Biomater</i> 2008;87:461–467.
22	Nishigawa G, Maruo Y, Oka M, Yoshihara K, Minagi S, Nagaoka N, Yoshida Y, Suzuki K. Ultrasonic cleaning of silica-coated zirconia influences bond strength between zirconia and resin luting material. <i>Dent Mater J</i> 2008;27:842–848.
23	Ozcan M, Nijhuis H, Valandro LF. Effect of various surface conditioning methods on the adhesion of dual-cure resin cement with MDP functional monomer to zirconia after thermal aging. <i>Dent Mater J</i> 2008;27:99–104.
24	Ozcan M, Kerkdijk S, Valandro LF. Comparison of resin cement adhesion to Y-TZP ceramic following manufacturer's instructions of the cements only. <i>Clin Oral Investig</i> 2008;12:279–282.
25	Re D, Augusti D, Sailer I, Spreafico D, Cerutti A. The effect of surface treatment on the adhesion of resin cements to Y-TZP. <i>Eur J Esthet Dent</i> 2008;3:186–196.
26	Spohr AM, Borges GA, Junior LH, Mota EG, Oshima HM. Surface modification of In-Ceram zirconia ceramic by Nd: YAG laser, Rocatec system, or aluminum oxide sandblasting and its bond strength to a resin cement. <i>Photomed Laser Surg</i> 2008;26:203–208.
27	Valandro F, Ozcan M, Amaral R, Vanderlei A, Bottino MA. Effect of testing methods on the bond strength of resin to zirconia-alumina ceramic: microtensile versus shear test. <i>Dent Mater J</i> 2008;27:849–855.
28	Komine F, Kobayashi K, Saito A. Shear bond strength between an indirect composite veneering material and zirconia ceramics after thermocycling. <i>J Oral Sci</i> 2009;51:629–634.

续表

篇数	按年代次序排列的文献来源
29	Nothdurft FP, Motter PJ, Pospiech PR. Effect of surface treatment on the initial bond strength of different luting cements to zirconium oxide ceramic. <i>Clin Oral Investig</i> 2009;13:229–235.
30	Oyague RC, Monticelli F, Toledano M, Osorio E, Ferrari M, Osorio R. Effect of water aging on microtensile bond strength of dual-cured resin cements to pre-treated sintered zirconium-oxide ceramics. <i>Dent Mater</i> 2009;25:392–399.
31	Oyague RC, Monticelli F, Toledano M, Osorio E, Ferrari M, Osorio R. Influence of surface treatments and resin cement selection on bonding to densely-sintered zirconium-oxide ceramic. <i>Dent Mater</i> 2009;25:172–179.
32	Aboushelib MN, Feilzer AJ, Kleverlaan CJ. Bonding to zirconia using a new surface treatment. <i>J Prosthodont</i> 2010;19:340–346.
33	Akyil MS, Uzun IH, Bayindir F. Bond strength of resin cement to yttrium-stabilized tetragonal zirconia ceramic treated with air abrasion, silica coating, and laser irradiation. <i>Photomed Laser Surg</i> 2010;28:801–808.
34	Blatz MB, Phark JH, Ozer F, Mante FK, Saleh N, Bergler M, Sadan A. In vitro comparative bond strength of contemporary self-adhesive resin cements to zirconium oxide ceramic with and without air-particle abrasion. <i>Clin Oral Investig</i> 2010;14:187–192.
35	Jevnikar P, Krnel K, Kocjan A, Funduk N, Kosmac T. The effect of nano-structured alumina coating on resin-bond strength to zirconia ceramics. <i>Dent Mater</i> 2010;26:688–696.
36	Magne P, Paranhos MP, Burnett LH Jr. New zirconia primer improves bond strength of resin-based cements. <i>Dent Mater</i> 2010;26:345–352.
37	May LG, Passons SP, Capelli DB, Ozcan M, Bottino MA, Valandro LF. Effect of silica coating combined to a MDP-based primer on the resin bond to Y-TZP ceramic. <i>J Biomed Mater Res B Appl Biomater</i> 2010;95:69–74.
38	Mirmohammadi H, Aboushelib MN, Salameh Z, Feilzer AJ, Kleverlaan CJ. Innovations in bonding to zirconia based ceramics: Part III. Phosphate monomer resin cements. <i>Dent Mater</i> 2010;26:786–792.
39	Mirmohammadi H, Aboushelib MN, Salameh Z, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Influence of enzymatic and chemical degradation on zirconia resin bond strength after different surface treatments. <i>AM J Dent</i> 2010;23:327–330.
40	Ntala P, Chen X, Niggli J, Cattell M. Development and testing of multi-phase glazes for adhesive bonding to zirconia substrates. <i>J Dent</i> 2010;38:773–781.
41	Passons SP, May LG, Barca DC, Ozcan M, Bottino MA, Valandro LF. Adhesive quality of self-adhesive and conventional adhesive resin cement to Y-TZP ceramic before and after aging conditions. <i>Oper Dent</i> 2010;35:689–696.
42	Takeuchi K, Fujishima A, Manabe A, Kuriyama S, Hotta Y, Tamaki Y, Miyazaki T. Combination treatment of tribochemical treatment and phosphoric acid ester monomer of zirconia ceramics enhances the bonding durability of resin-based luting cements. <i>Dent Mater J</i> 2010;29:316–323.
43	Ural C, Kulunk S, Kurt M, Baba S. Determination of resin bond strength to zirconia ceramic surface using different primers. <i>Acta Odontol Scand</i> 2010;69:48–53.
44	Ural C, Kulunk S, Kurt M. The effect of laser treatment on bonding between zirconia ceramic surface and resin cement. <i>Acta Odontol Scand</i> 2010;68:354–359.
45	Yun JY, Ha SR, Lee JB, Kim SH. Effect of sandblasting and various metal primers on the shear bond strength of resin cement to Y-TZP ceramic. <i>Dent Mater</i> 2010;26:650–658.
46	Zhang W, Masumi SI, Song XM. Bonding property of two resin-reinforced glass-ionomer cements to zirconia ceramic. <i>Quintessence Int</i> 2010;41:132–140.
47	Attia A, Lehmann F, Kern M. Influence of surface conditioning and cleaning methods on resin bonding to zirconia ceramic. <i>Dent Mater</i> 2011;27:207–213.
48	Behr M, Proff P, Kolbeck C, Langrieger S, Kunze J, Handel G, Rosentritt M. The bond strength of the resin-to-zirconia interface using different bonding concepts. <i>J Mech Behav Biomed Mater</i> 2011;4:2–8.

续表

篇数	按年代次序排列的文献来源
49	Foxton RM, Cavalcanti AN, Nakajima M, Pilecki P, Sherriff M, Melo L, Watson TF. Durability of resin cement bond to aluminum oxide and zirconia ceramics after air abrasion and laser treatment. <i>J Prosthodont</i> 2011;20:84–92.
50	Kuriyama S, Terui Y, Higuchi D, Goto D, Hotta Y, Manabe A, Miyazaki T. Novel fabrication method for zirconia restorations: Bonding strength of machinable ceramic to zirconia with resin cements. <i>Dent Mater J</i> 2011;30:419–424.
51	Monaco C, Cardelli P, Scotti R, Valandro LF. Pilot evaluation of four experimental conditioning treatments to improve the bond strength between resin cement and Y-TZP ceramic. <i>J Prosthodont</i> 2011;20:97–100.
52	Paranhos MP, Burnett LH Jr, Magne P. Effect Of Nd:YAG laser and CO ₂ laser treatment on the resin bond strength to zirconia ceramic. <i>Quintessence Int</i> 2011;42:79–89.

在纳入的 52 篇文献中，确定了总共 609 个实验亚组，其粘结强度结果以 MPa 显示。在所有纳入的亚组中，粘结前氧化锆的表面处理方法差异较大，检索确定了 169 种不同的氧化锆表面处理方法（表 3）。在纳入的 52 篇文献中，有 38 篇不含未进行表面处理的对照组，而其它 24 篇文献的 66 个

亚组均含对照组。氧化锆表面处理方法的所有步骤如作者所述，并分为 4 组。318 个实验亚组采用了基于应用摩擦材料或酸蚀剂后使用粘结促进剂的物理化学表面处理方法，201 个亚组采用了仅使用摩擦材料的物理表面处理方法，11 个亚组采用了仅使用粘结促进剂的化学表面处理方法。

表 3 根据作者所述顺序列出的氧化锆表面处理方法

表面处理方法
未处理
50–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min
100–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min
Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
110–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min
110–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
110–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
110–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + Kevloc 烘箱烘干
800 颗粒度研磨 + PyrosilPen 技术处理 5s + 硅烷化
800 颗粒度研磨 + PyrosilPen 技术处理 10s + 硅烷化
800 颗粒度研磨 + PyrosilPen 技术处理 20s + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 乙酸乙酯中超声清洗 10min + 酸蚀 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 乙酸乙酯中超声清洗 10min + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 乙酸乙酯中超声清洗 10min + 110–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min + 110–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min + CoJet 系统处理 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 50–μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 双蒸水中超声清洗 5min
1200 颗粒度研磨 + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 双蒸水中超声清洗 1min + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 双蒸水中超声清洗 5min + 硅烷化
125–μm Al ₂ O ₃ 喷砂
摩擦化学二氧化硅涂层 50–μm (Supradental)

续表

50- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
40- μm 研磨 + 乙酸乙酯中超声清洗 5min + 110- μm Al_2O_3 喷砂
40- μm 研磨 + 乙酸乙酯中超声清洗 5min + 110- μm Al_2O_3 喷砂 + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂
40- μm 研磨 + 乙酸乙酯中超声清洗 5min + 110- μm Al_2O_3 喷砂 + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + Nd:YAG 激光蚀刻照射 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 110- μm Al_2O_3 喷砂
1200 颗粒度研磨 + 110- μm Al_2O_3 喷砂 + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 110- μm Al_2O_3 喷砂 + CoJet 系统处理 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + AlloyPrimer 处理
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + Cesead II Opaque Primer 处理
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + SilanoPen 处理 5s + 硅烷化
800 颗粒度研磨 + 110- μm Al_2O_3 喷砂 + HIM/SIE
800 颗粒度研磨 + 110- μm Al_2O_3 喷砂
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min + 50- μm Al_2O_3 喷砂
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 3min
异丙醇中超声清洗 3min
异丙醇中超声清洗 3min + 50- μm Al_2O_3 喷砂
异丙醇中超声清洗 3min + Rocatec Soft + 硅烷化
600 颗粒度研磨 + 异丙醇中超声清洗 3min
110- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
110- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
50- μm Al_2O_3 喷砂 + 乙醇中超声清洗 10min + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 乙醇中超声清洗 10min + 硅烷化
70- μm Al_2O_3 喷砂
125- μm SiC 喷砂
125- μm SiC 喷砂 + 酸蚀
125- μm SiC 喷砂 + 酸蚀 + 硅烷化
Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
250- μm Al_2O_3 喷砂 + 硅烷化
50- μm Al_2O_3 喷砂 + 硅烷化
50- μm Al_2O_3 喷砂 + 酸蚀 + 硅烷化
研磨 + 硅烷化
600 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 唾液处理 + 喷水冲洗 + 50- μm Al_2O_3 喷砂
600 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 唾液处理 + 喷水冲洗 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 酸蚀 + 喷水冲洗
600 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 唾液处理 + 喷水冲洗 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 酸蚀 2 次 + 喷水冲洗
600 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 唾液处理 + 喷水冲洗 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中清洗 15s + 喷水冲洗
600 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 唾液处理 + 喷水冲洗 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 喷水冲洗
1200 颗粒度研磨 + 乙醇中超声清洗 10min + 110- μm Al_2O_3 喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 乙醇中超声清洗 10min + CoJet 系统处理 + 硅烷化

续表

125- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min
125- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
125- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化 + 粘结
125- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + CoJet 系统处理
125- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + CoJet 系统处理 + 硅烷化
125- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + CoJet 系统处理 + 硅烷化 + 粘结
异丙醇中超声清洗 3min + Heliobond 粘结
用气 - 粉 - 水喷头 (碳酸氢钠溶液) 清洗 + 异丙醇中超声清洗 3min + Heliobond 粘结
50- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + Heliobond 粘结
110- μm Al_2O_3 喷砂 + 乙醇中超声清洗 10min + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 乙醇中超声清洗 10min + 硅烷化
600 颗粒度研磨 + 110- μm Al_2O_3 喷砂 + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 乙醇中超声清洗 10min + Rocatec-Pre 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + 硅烷化
乙醇中清洗
乙醇中清洗 + 硅烷化
乙醇中清洗 + RF plasma 处理
乙醇中清洗 + Micro Pearls of low fultrasonicizing porcelain
乙醇中清洗 + Micro Pearls of low fultrasonicizing porcelain + 硅烷化
800 颗粒度研磨 + 酸蚀 + 硅烷化
800 颗粒度研磨 + 酸蚀 + 硅烷化 + Rocatec-Plus 粉喷砂
800 颗粒度研磨 + 酸蚀 + 硅烷化 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + Rocatec-Plus 粉喷砂
800 颗粒度研磨 + 酸蚀 + 硅烷化 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + NaOH
800 颗粒度研磨 + 酸蚀 + 硅烷化 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + H_3PO_4
800 颗粒度研磨 + 酸蚀 + 硅烷化 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + Piranha(H_2SO_5)
800 颗粒度研磨 + 酸蚀 + 硅烷化 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4/\text{HCL}$
800 颗粒度研磨 + 酸蚀 + 硅烷化 + Rocatec-Plus 粉喷砂 + Piranha(H_2SO_5) + 硅烷化
600 颗粒度研磨 + 丙酮中超声清洗 10min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 丙酮中超声清洗 10min + AlloyPrimer 处理
600 颗粒度研磨 + 丙酮中超声清洗 10min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 丙酮中超声清洗 10min + AZ Primer 处理
600 颗粒度研磨 + 丙酮中超声清洗 10min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 丙酮中超声清洗 10min + Estenia Opaque Primer 处理
600 颗粒度研磨 + 丙酮中超声清洗 10min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 丙酮中超声清洗 10min + Porcelain Liner M Liquid
50- μm Al_2O_3 喷砂
75- μm Al_2O_3 喷砂
100- μm Al_2O_3 喷砂
150- μm Al_2O_3 喷砂
25- μm Al_2O_3 喷砂 + 底涂剂
异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗 3min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗 3min + Er:YAG 激光蚀刻 + 异丙醇中超声清洗 3min + 硅烷化
乙醇中超声清洗 10min + 硅烷化
乙醇中超声清洗 10min + CoJet 系统处理 + 硅烷化
乙醇中超声清洗 10min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 (烧结前) + 硅烷化
乙醇中超声清洗 10min + 100- μm Al_2O_3 喷砂 + 硅烷化
乙醇中超声清洗 10min + 50- μm Al_2O_3 喷砂 (烧结后) + 硅烷化
1500 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + Nd:YAG + 酸蚀 (磷酸) + 超声清洗 2min + 底涂剂
1500 颗粒度研磨 + CoJet 系统处理 + Nd:YAG + 酸蚀 (磷酸) + 超声清洗 2min + 底涂剂

续表

1500 颗粒度研磨 + Nd:YAG + 酸蚀(磷酸) + 超声清洗2min + 底涂剂
1500 颗粒度研磨 + 50-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + CO ₂ 激光蚀刻 + 酸蚀(磷酸) + 超声清洗2min + 底涂剂
1500 颗粒度研磨 + CoJet系统处理 + CO ₂ 激光蚀刻 + 酸蚀(磷酸) + 超声清洗2min + 底涂剂
1500 颗粒度研磨 + CO ₂ 激光蚀刻 + 酸蚀(磷酸) + 超声清洗2min + 底涂剂
1500 颗粒度研磨 + 50-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 酸蚀(磷酸) + 超声清洗2min + 底涂剂
1500 颗粒度研磨 + CoJet系统处理 + 酸蚀(磷酸) + 超声清洗2min + 底涂剂
1500 颗粒度研磨 + 酸蚀(磷酸) + 超声清洗2min + 底涂剂
1200 颗粒度研磨 + 异丙醇中超声清洗30s + 双蒸水中超声清洗5min
1200 颗粒度研磨 + CoJet系统处理 + 硅烷化 + 双蒸水中超声清洗5min
110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 硅烷化
110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + Rocatec-Plus粉喷砂 + 硅烷化
110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 硅烷化
Rocatec-Pre粉喷砂 + Rocatec-Plus粉喷砂 + 硅烷化
Rocatec-Pre粉喷砂 + Rocatec-Plus粉喷砂 + 异丙醇中超声清洗3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗3min + 110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗3min + CoJet系统处理 + 硅烷化
异丙醇中超声清洗3min + Er:YAG激光蚀刻 + 异丙醇中超声清洗3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗3min + Nd:YAG激光蚀刻 + 异丙醇中超声清洗3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗3min + CO ₂ 激光蚀刻 + 异丙醇中超声清洗3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗3min + 110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗3min + Er:YAG激光蚀刻 + 异丙醇中超声清洗3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗3min + 110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗3min + Nd:YAG激光蚀刻 + 异丙醇中超声清洗3min + 硅烷化
异丙醇中超声清洗3min + 110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 异丙醇中超声清洗3min + CO ₂ 激光蚀刻 + 异丙醇中超声清洗3min + 硅烷化
600 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗3min + 110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 硅烷化
600 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗3min
600 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗3min + 酸蚀(氢氟酸)
600 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗3min + CO ₂ 激光蚀刻
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗5min + 酸蚀(磷酸)
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗5min + 硅烷化
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗5min + CoJet系统处理 + 硅烷化
800 颗粒度研磨 + 110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 双蒸水中超声清洗10min
50-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + Overglaze1 + 硅烷化
50-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + Overglaze2 + 硅烷化
50-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + Overglaze3 + 硅烷化
50-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + Overglaze4 + 硅烷化
110-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 双蒸水中超声清洗10min
乙酸乙酯中超声清洗10min
乙酸乙酯中超声清洗10min + 25-μm Al ₂ O ₃ 喷砂
乙酸乙酯中超声清洗10min + RocatecSoft + 硅烷化
乙酸乙酯中超声清洗10min + 底涂剂
乙酸乙酯中超声清洗10min + 25-μm Al ₂ O ₃ 喷砂 + 底涂剂
乙酸乙酯中超声清洗10min + RocatecSoft + 硅烷化 + 底涂剂

续表

1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 5min
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 5min + 90- μm Al_2O_3 喷砂
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 5min + Alloy Primer
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 5min + 90- μm Al_2O_3 喷砂 + Alloy Primer
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 5min + V-Primer
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 5min + 90- μm Al_2O_3 喷砂 + V-Primer
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 5min + Metaltite
1200 颗粒度研磨 + 双蒸水中超声清洗 5min + 90- μm Al_2O_3 喷砂 + Metaltite
4000 颗粒度研磨
4000 颗粒度研磨 + 氧化铝涂层 (AIN 粉)
110- μm Al_2O_3 喷砂 + 氧化铝涂层 (AIN 粉)
氧化铝涂层 (AIN 粉)
选择性渗透酸蚀 (SIE)
1500 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 磷酸清洗 + 双蒸水中超声清洗 2min
1500 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 磷酸清洗 + 双蒸水中超声清洗 2min + Zirconia Primer
1500 颗粒度研磨 + 50- μm Al_2O_3 喷砂 + 磷酸清洗 + 双蒸水中超声清洗 2min + Clearfil Ceramic Primer
120- μm Al_2O_3 喷砂 + 双蒸水中超声清洗 10min

类似的，由于在一项研究中检测不同种类的粘结水门汀，所以应列出这些实验亚组所使用的粘结剂，并根据其在文献中或材料安全数据表中所示的主要化学成分进行分类（表4）。关于主要化学成分，已确定5种粘结水门汀：bis-GMA(n=82), MDP(n=168), 4-META(n=15)，自粘结树脂水门汀(n=337)，以及玻璃离子水门汀(n=7)。主要将属于非自粘结树脂水门汀且不含MDP或4-META成分的甲基丙烯酸酯基水门汀归类于bis-GMA基树脂水门汀。

关于老化处理方法，实验组分为非老化处理和老化处理组；列出老化处理方法的类型和持续时间。在纳入的52篇文献中，26篇中粘结样本经过冷热循环加载后老化。虽然419个实验亚组未进行冷热循环加载，190个亚组加载不同的冷热循环次数，范围在500到37500次之间。其它老化处理或水中浸泡的方法差异较大，主要包括放入水、异丙醇或乙醇中老化。放入水中浸泡这一老化处理方法的持续时间在0.16到730天之间，浸泡介质是自来水或蒸馏水。因为关于水中浸泡法的报道具有极大的异质性，所以在数据分析时仍主要考虑冷热循环加载法。

表4 研究粘结水门汀及其材料安全性数据表中的主要成分列表

水门汀类型	商品名
bis-GMA 树脂水门汀	Elite Cement Quadrant Posterior Dense BisCem Experimental Bis-GMA resin Variolink II Variolink Ultra Bifix OM
含MDP单体的树脂水门汀	Panavia F Panavia F2.0 Panavia EX Panavia 21 EX Panavia 21
自粘结树脂水门汀	M Bond Duo-Link ResiCem RelyX U100 RelyX Luting RelyX ARC RelyX Unicem Clearfil Esthetic Cement Permacem Smartmix Multilink Automix

续表

水门汀类型	商品名
	Multilink Sprint
	Multilink
	Clearfil SA Cement
	Bistite II DC
	Maxcem
	Nexus
	G-Cem automatrix GC
	G-Cem capsule GC
	G-Cem
	Calibra
	Duo Cement Plus
	Paracem Universal DC
	Dual Cement
	Twinlook
	Linkmax HV
	Estenia C&B Body Opaque
玻璃离子水门汀	Dyract Cem
	Fuji I
	Fuji Plus
	Ketac-Cem
4-META 树脂水门汀	Superbond

四种检测方法包括宏观拉伸试验($n=60$)，微观拉伸试验($n=117$)，微观剪切试验($n=30$)以及宏观剪切试验($n=402$)。采用这四种检测方法来评价粘结水门汀与氧化锆之间的粘结力。

表5显示了根据表面处理方法、粘结水门汀类型、老化处理方法和检测方法(仅考虑Ln平均粘结强度，单位为MPa)，从纳入研究中提取列出的不同参数的描述性统计量。

基于水门汀种类的主要发现如下所示。

3.1.1 Bis-GMA 基树脂水门汀

采用宏观剪切试验检测非老化处理组经不同表面处理后的平均粘结强度，结果显示物理化学方法组的粘结强度(10.1MPa, IQR=11.1)比对照组(1.15MPa, IQR=3.54)、物理方法组(9.7MPa, IQR=12.6)、化学方法组(4.4MPa, IQR=0)均更高。冷热循环加载后，物理化学方法组的粘结强度(9MPa, IQR=11.35)仍然比其它表面处理方法组高(化学方法组: 1MPa, IQR=0, 物理方法组: 2.7MPa, IQR=0)。物理方法表面处理后进行冷热循环加载，粘结强度有降低的趋势。

目前尚未获得宏观拉伸试验检测的数据。采用微观拉伸试验检测 Bis-GMA 树脂水门汀

表5 因变量是平均粘结强度(MPa)的检验参数的统计学意义

物体间作用效果的检验					
因变量: Ln 平均粘结强度 (MPa)					
来源	III型平方和	df	均方	F	显著性
校正模型	109.710 ^a	38	2.887	4.109	0.000
截距	233.371	1	233.371	332.168	0.000
冷热循环处理	1.480	1	1.480	2.107	0.147
粘结水门汀	8.764	4	2.191	3.119	0.015
检测方法	8.330	3	2.777	3.952	0.008
表面处理方法	20.528	3	6.843	9.739	0.000
粘结水门汀 × 检测方法	4.519	6	0.753	1.072	0.378
粘结水门汀 × 表面处理方法	13.147	9	1.461	2.079	0.030
检测方法 × 表面处理方法	15.621	7	2.232	3.176	0.003
粘结水门汀 × 检测方法 × 表面处理方法	2.417	5	0.483	0.688	0.633
误差	354.094	504	0.703		
总计	3734.016	543			
校正后总计	463.805	542			

^aR² = 0.237 (校正后 R² = 0.179).

的粘结强度在非老化处理组中只有物理化学方法组 (11.46 MPa, IQR=10.76) 和物理方法组 (10.1 MPa, IQR=11.10) 的结果, 而在老化处理组中只有物理化学方法组 (3.6 MPa, 95% CI: 0, 19.1) 的结果。采用微观拉伸试验测得的非老化处理组中物理化学方法组的粘结强度与宏观拉伸试验的结果相似, 但是在老化处理之后, 比宏观剪切试验测得的粘结强度更低。

采用微观剪切试验检测 Bis-GMA 基树脂水门汀的粘结强度, 仅获得未加载冷热循环的数据。该方法测得物理化学方法组的数据 (11.46 MPa, IQR=10.76) 与宏观剪切试验 (9 MPa, IQR=11.35) 和微观拉伸试验 (11.4 MPa, IQR=25.25) 测得的数据相似。

经过所有的数据评价后发现, 10 MPa 是共同粘结强度值 (图 2a 至 2f)。这种树脂水门汀类型经过老化处理和宏观剪切试验检测后, 只有物理化学方法组超出了这一粘结强度值 (图 2d)。

3.1.2 MDP 基树脂水门汀

采用宏观剪切试验检测非老化处理组的平均粘结强度, 结果显示物理化学表面处理方法组的粘结强度 (12.31 MPa, IQR=13.87) 比对照组 (8.93 MPa, IQR=9)、物理方法组 (15 MPa, IQR=13.27) 更高。冷热循环加载后, 物理化学方法组的粘结强度 (16.85 MPa, IQR=14.17) 仍然比其它表面处理方法组高, 其次是物理方法组 (11.58 MPa, IQR=23.21)。对照组在冷热循环加载后粘结强度 (0.61 MPa, IQR=2.4) 较未加载冷热循环时 (8.93 MPa, IQR=9) 降低。化学方法组无论是否加载冷热循环, 均未获得数据。

采用宏观拉伸试验检测未加载冷热循环组, 对照组的粘结强度结果 (42.35 MPa, IQR=0) 最高, 其次是物理方法组 (34.2 MPa, IQR=24.18), 以及物理化学方法组 (21.7 MPa, IQR=10.27)。冷热循环加载组只能获得物理方法组的数据 (44.05 MPa, IQR=0)。

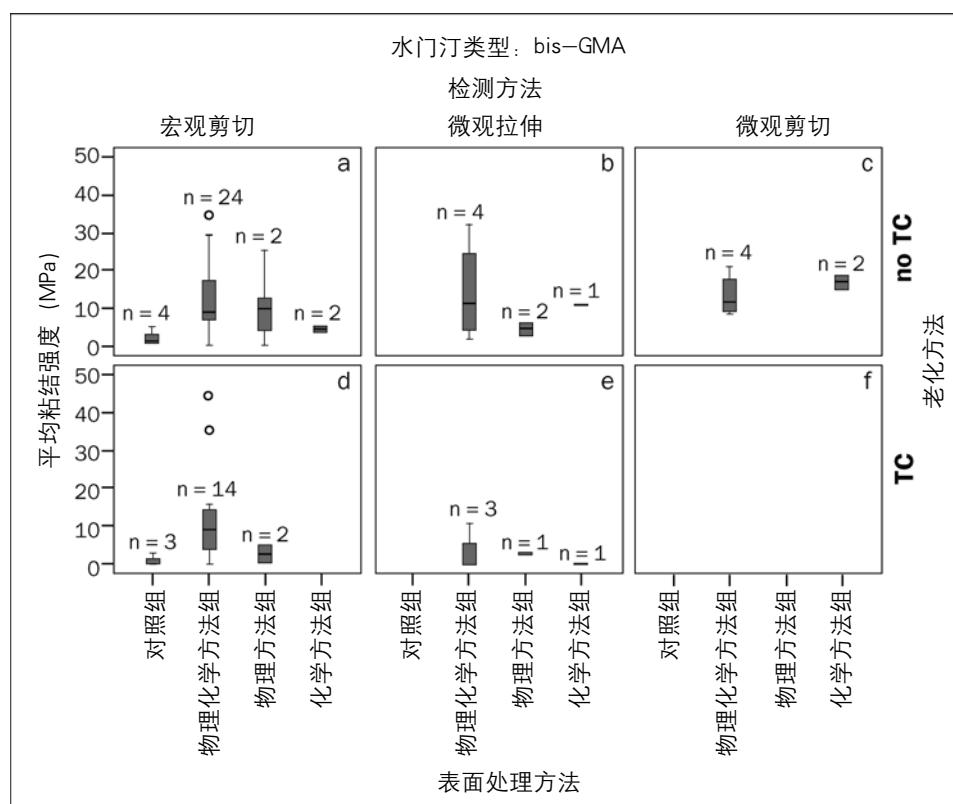


图 2 (a 到 f) 经宏观剪切试验、微观拉伸试验和微观剪切试验测得 bis-GMA 基树脂水门汀的平均粘结强度 (MPa), 包括加载 (d 到 f) 和未加载 (a 到 c) 冷热循环组; n= 统计学所涉及实验组的数量

采用微观拉伸试验检测只能获得有无冷热循环加载时各组分别进行不同表面处理的数据：物理化学方法组（12.03MPa, IQR=17.52 和 9.4MPa, IQR=0）以及物理方法组（37.2MPa, IQR=41.5 和 17.1MPa, IQR=31.15）。

采用微观剪切试验检测无论是否加载冷热循环，均未获得数据。

当 10MPa 是共同粘结强度时（图 3a 至 3h）——考虑到该水门汀类型、冷热循环老化处理、宏观剪切试验和微观拉伸试验检测以及物理化学方法和物理方法进行表面处理——宏观拉伸试验检测物理表面处理方法产生的粘结强度值结果更高（图 3e 至 3h）。

3.1.3 自粘结树脂水门汀

采用宏观剪切试验检测自粘结树脂水门汀非老化处理组的平均粘结强度，结果显示物理化学表面处理方法组的粘结强度（34.9MPa, IQR=25.6）比对照组（9.45MPa, IQR=8.64）和物理方法组（18.2 MPa, IQR=17.16）更高。经冷热循环加载后，

所有这些组别的粘结强度值均下降。

采用宏观拉伸试验检测未加载冷热循环组发现，对照组、物理化学方法组和物理方法组的结果在 8.73MPa, IQR=13.93 和 11.82MPa, IQR=7.79 之间。

采用微观拉伸法检测未加载冷热循环组发现，物理化学方法组（11.68MPa, IQR=28.11）和物理方法组（10.8MPa, IQR=7.85）比采用宏观拉伸法的结果更高。采用微观剪切法检测无论是否加载冷热循环或者采用宏观拉伸法和微观拉伸法检测冷热循环加载组，均未获得数据。共同点是 10 MPa 时，该树脂水门汀类型经过老化处理后，无超出此粘结强度值的数据（图 4e 至 4h）。

3.1.4 4-META 基树脂水门汀

仅可以获得采用宏观剪切法检测以及物理化学方法进行表面处理的数据：无冷热循环加载（19.9 MPa, IQR=8.3）以及冷热循环加载组（9.35 MPa, IQR=31.2）（图 5）。

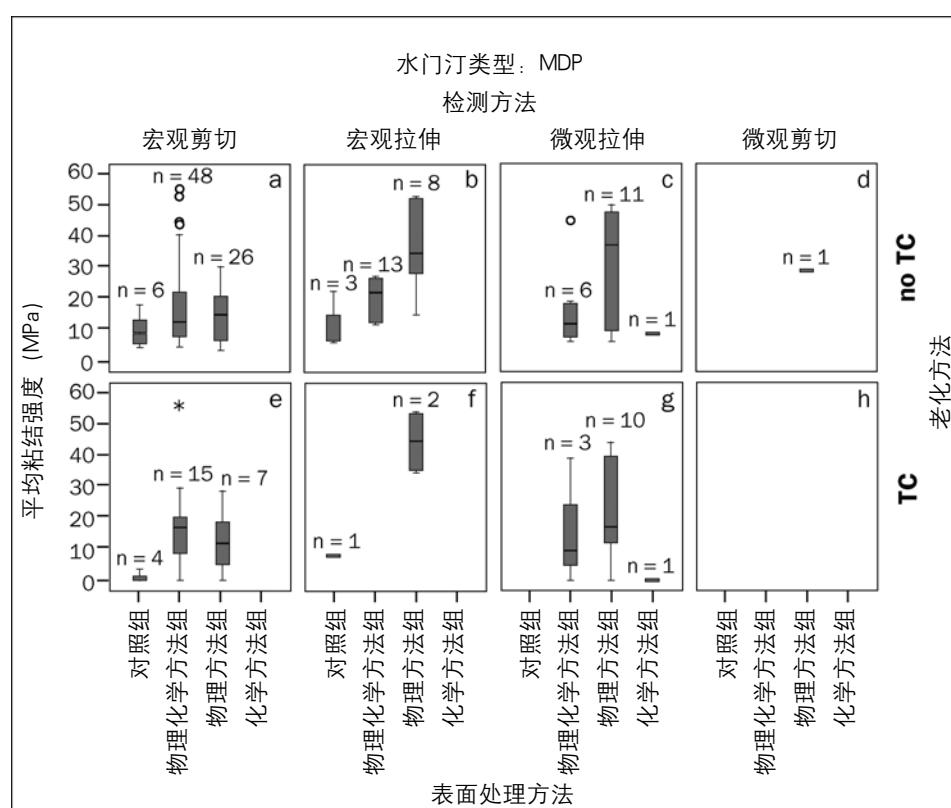


图 3 (a 到 h) 经宏观剪切试验、宏观拉伸试验、微观拉伸试验和微观剪切试验测得 MDP 基树脂水门汀的平均粘结强度 (MPa)，包括加载 (e 到 h) 和未加载 (a 到 d) 冷热循环组；n= 统计学所涉及实验组的数量

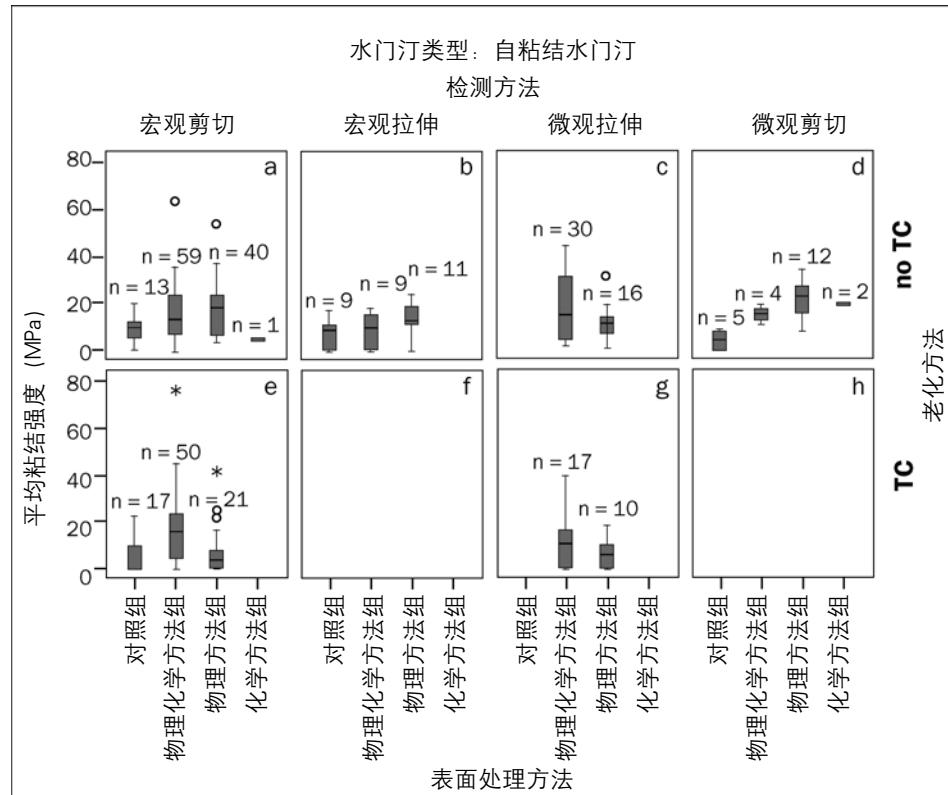


图4 (a到h) 经宏观剪切试验、宏观拉伸试验、微观拉伸试验和微观剪切试验测得自粘结树脂水门汀的平均粘结强度 (MPa), 包括加载 (e到h) 和未加载 (a到d) 冷热循环组; n= 统计学所涉及实验组的数量

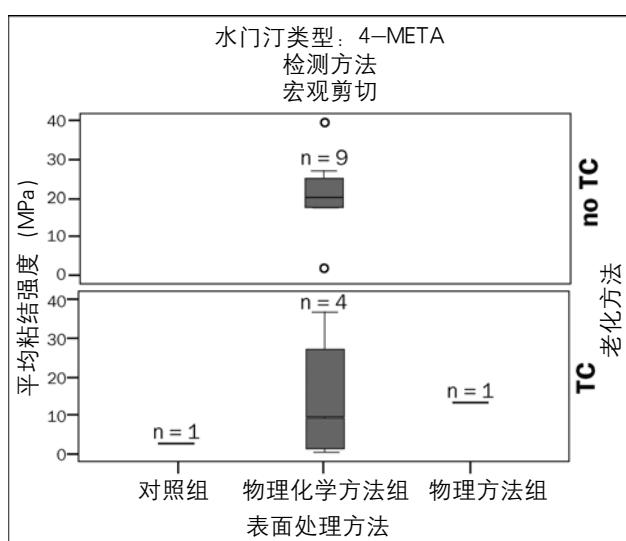


图5 经宏观剪切试验测得 4-META 水门汀的平均粘结强度 (MPa), 包括加载和未加载冷热循环组; n= 统计学所涉及实验组的数量。

3.1.5 玻璃离子水门汀

仅可以获得采用宏观剪切法检测以及未加载冷热循环的物理表面处理方法的数据 (4.7MPa, IQR=9.12) (图6)。

3.1.6 结果摘要

总而言之, 表面处理方法 ($p=0.002$) 和冷热循环加载 ($p=0.007$) 对粘结强度结果具有显著影响 (表5)。粘结水门汀类型 ($p=0.064$) 和检测方法 ($p=0.195$) 对粘结强度结果的影响不显著。粘结水门汀类型和检测方法之间相互作用不显著 ($p=0.356$)。

不论何种表面处理方法, 采用宏观剪切试验 ($p=0.032$) 和宏观拉伸试验 ($p=0.003$) 检测时, MDP 基树脂水门汀在未加载冷热循环和加载冷热循环这两种条件下具有显著性差异 (表6)。类似的, 当采用宏观剪切试验 ($p=0.000$) 时, 自粘结树脂水门汀在未加载冷热循环和加载冷热循环这两种条件下具有显著性差异。

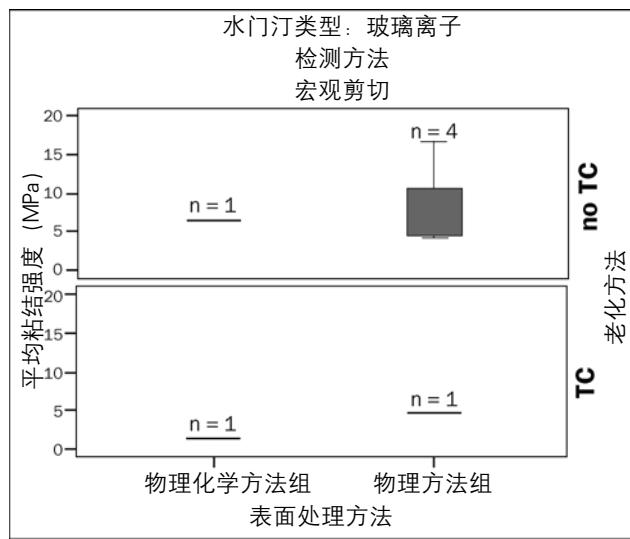


图6 经宏观剪切试验测得玻璃离子水门汀的平均粘结强度(MPa)，包括加载和未加载冷热循环组；n=统计学所涉及实验组的数量。

通过调整数据，Meta 回归分析表明，与表面处理方法 ($p=0.633$)、水门汀类型 ($p=0.582$) 或检测方法 ($p=0.403$) 相比，冷热循环加载 ($p=0.244$) 对粘结强度结果的影响不显著。为了发现水中浸泡老化法对氧化锆粘结结果的影响，尽管这不是主要目的，将样本分为浸泡 <90 天组 ($n=372$) 和浸泡 >90 天组 ($n=77$)。数据转化后，Ln 表格显示与水门汀种类 ($p=0.519$) 或表面处理方法 ($p=0.436$) 相比，浸泡 >90 天对粘结强度无显著影响，但与检测方法 ($p=0.019$) 相比，浸泡 >90 天具有显著影响。

平均粘结强度在检测方法、表面处理方法、水门汀类型和老化处理方法上的方差系数 (CV) 见表 7。尽管不可能将所有组别进行交叉比较，但是采用微观拉伸试验检测 Bis-GMA 和 MDP 这两种树脂水门汀发现，物理化学方法组的 CV 值更高。

表6 水门汀类型、检测方法和老化处理对氧化锆粘结影响的显著性

粘结水门汀	检测方法	冷热循环老化处理	P 值
bis-GMA 树脂水门汀	宏观剪切试验	无 TC	0.071
		TC	0.055
	微观拉伸试验	无 TC	0.706
		TC	0.607
	微观剪切试验	无 TC	0.355
		TC	—
	宏观拉伸试验	无 TC	—
		TC	—
含 MDP 单体的树脂水门汀	宏观剪切试验	无 TC	0.230
		TC	0.0320
	微观拉伸试验	无 TC	0.382
		TC	0.325
	微观剪切试验	无 TC	—
		TC	—
	宏观拉伸试验	无 TC	0.003
		TC	0.221
自粘结树脂水门汀	宏观剪切试验	无 TC	0.082
		TC	0.000
	微观拉伸试验	无 TC	0.890
		TC	0.301
	微观剪切试验	无 TC	0.008
		TC	—
	宏观拉伸试验	无 TC	0.047
		TC	—
玻璃离子水门汀	宏观剪切试验	无 TC	0.468
		TC	0.317
	微观拉伸试验	无 TC	—

续表

粘结水门汀	检测方法	冷热循环老化处理	P 值
		TC	—
	微观剪切试验	无 TC	—
		TC	—
	宏观拉伸试验	无 TC	—
		TC	—
4-META 树脂水门汀	宏观剪切试验	无 TC	—
		TC	0.931
	微观拉伸试验	无 TC	—
		TC	—
	微观剪切试验	无 TC	—
		TC	—
	宏观拉伸试验	无 TC	—
		TC	—

表7 检测方法、表面处理方法、水门汀类型和老化处理的平均粘结强度变异程度(变异系数)

粘结水门汀	检测方法	冷热循环老化	变异系数
bis-GMA	宏观剪切试验	无 TC	
		对照组	1.056
		物理化学法组	0.752
		物理方法组	0.751
		化学方法组	0.288
		TC	
		对照组	0.125
		物理化学法组	1.011
		物理方法组	1.222
	微观拉伸试验	无 TC	
		物理化学法组	0.945
		物理方法组	0.566
		TC	
		物理化学法组	1.733
	微观剪切试验	无 TC	
		物理化学法组	0.45
		化学方法组	0.18
MDP	宏观剪切试验	无 TC	
		对照组	0.517
		物理化学法组	0.737
		物理方法组	0.518
		TC	
		对照组	1.316
		物理化学法组	0.762
		物理方法组	0.869
	微观拉伸试验	无 TC	
		物理化学法组	0.836
		物理方法组	0.628
		TC	
		物理化学法组	1.263

续表

粘结水门汀	检测方法	冷热循环老化	变异系数
	宏观拉伸试验	物理方法组 无 TC 对照组 物理化学法组 物理方法组 TC 物理方法组	0.771 0.793 0.244 0.375 0.299
自粘结树脂水门汀	宏观剪切试验	无 TC 对照组 物理化学法组 物理方法组 TC 对照组 物理化学法组 物理方法组	0.619 0.701 0.729 1.305 0.79 1.338
	微观拉伸试验	无 TC 物理化学法组 物理方法组 TC 物理化学法组 物理方法组	0.866 0.672 1.045 0.936
	微观剪切试验	无 TC 对照组 物理化学法组 物理方法组 化学方法组	0.881 0.231 0.386 0.001
	宏观拉伸试验	无 TC 对照组 物理化学法组 物理方法组	0.883 0.9 0.49
玻璃离子	宏观剪切试验	无 TC 物理方法组	0.784
4-META	宏观剪切试验	无 TC 物理化学法组 TC 物理化学法组	— 0.469 1.225

4 讨论

由于 CAD/CAM 技术的普及率日益增长，氧化锆和其它氧化物基陶瓷也逐渐流行，粘结牙科学的发展也扩大了这类陶瓷作为树脂粘结 FDPs 的适应证。然而，与不含二氧化硅的氧化物陶瓷的粘结依然是牙科界的一个挑战。因此，为了获得对氧化锆陶瓷的最佳粘结力，越来越多的研究正陆续发表。

研究采用多种检测方法，应用各种表面处理方法和粘结促进剂或水门汀，但是对氧化锆的最佳粘结方案仍未确立。所以，本篇系统评价的目的是评价现有的粘结水门汀对氧化锆的粘结力以及为进一步研究提供建议。

聚合材料对任何材料形成有效粘结的重要前提条件是获得干净、无污染的表面。在纳入文献中，绝大多数研究采用 600 到 4000 粒度的碳化硅砂纸

打磨氧化锆样品表面，其它研究始于使用各种溶剂清洗陶瓷表面。那些未使用碳化硅砂纸的研究可能未报道本步骤，因为文中并未明确这一点。实际上，表面处理方法已经取代了打磨过程。当只采用化学表面处理方法时，比如使用硅烷偶联剂或底涂剂，初始表面粗糙度才可能对粘结强度结果有一定的影响。相对于表面处理方法而言，使用任意品种的碳化硅砂纸打磨 / 处理过的样品即视为对照组。而对于空气喷砂处理而言，可能因为之后陶瓷表面会被更剧烈地摩擦，所以打磨过程的重要性相对较小。

由于存在大量的表面处理方法，本篇系统评价仅将其分为 4 类（组）。颗粒沉积技术被视为物理表面处理方法。使用频率较高的摩擦材料是 Al_2O_3 或 SiO_2 颗粒，粒径在 30 到 250 μm 之间。空气喷砂处理的确能清洁材料表面和提高表面能。然而，有效的颗粒沉积不仅需要考虑颗粒大小，还应该考虑其应用方式，在这方面，颗粒沉积的压力和持续时间决定了表面粗糙度的水平。

尽管如此，总体结果表明物理化学表面处理方法——不考虑这些沉积相关参数——有可能增强树脂水门汀的粘结强度值。另一方面，不同的空气喷砂处理可能对氧化锆的晶相转变以及随后的低温降解有一定的影响，但尚未得到牙科界的阐明。由于空气喷砂处理的结果存在争议，而磷酸基硅烷偶联剂或底涂剂、含 MDP 单体的树脂水门汀或自粘结树脂水门汀能直接与氧化锆表面的氧化物反应，因此其应用是空气喷砂系统较好的替代性选择。然而，根据现有的数据，本篇系统评价的结果表明，与未进行表面处理的对照组相比，空气喷砂这一物理表面处理方法似乎提高了粘结强度。所以，含 MDP 单体的树脂水门汀或自粘结树脂水门汀也能够在初始表面处理方法中获益。而空气喷砂处理对氧化锆的疲劳强度是否存在不利影响，这一问题有待解决。

在本篇系统评价中，根据水门汀的化学组成，将其归类为自粘结树脂水门汀这一类别是一项艰巨的任务。这些水门汀在化学组成上差异较大：部分水门汀含磷酸酯、MDP、Bis-HEMA 磷酸盐、甘油磷酸二甲基丙烯酸酯或 4-META，而其它水门汀含单纯的 Bis-GMA 或其与 TEGDMA 的混合物。此外，这些单体的准确百分比并不总是明确的。原本根据这些单体成分来分组较为适合，但是这对于部分从制造商数据表获取信息的材料来说几乎是不可取的。再者，尽管这些水门汀为无任何额外的物理或化学表面处理氧化锆陶瓷而设计和使用，但是

其中一些水门汀包含单独的含甲基丙烯酸酯单体或 MDP 的陶瓷底涂剂，因此，本文从应用的角度，根据牙科市场上牙医对水门汀的使用情况及其表现，将其归类为自粘结树脂水门汀。另一方面，与玻璃离子水门汀相似，4-META/MMA 树脂水门汀单独成一类（组），因为该水门汀以粉 - 液体系为基础，不同于其它所有类型的树脂水门汀。

在关于粘结强度的研究中，粘结接头经受不同的老化处理方法以评估长期临床效果。水中浸泡法的原理是粘结接头吸收水分和水解而促进老化，而冷热循环加载代表体外水热作用引起的老化。冷热循环加载导致的样品内部或界面的温度变化及伴随的反复性收缩 - 膨胀应力被认为对粘结强度有显著影响。在纳入研究中，放入水中浸泡的天数差异较大，从 0.16 到 730 天不等。归纳水中浸泡超过 3 个月的研究，只确定了 67 个亚组；远远少于冷热循环加载的 419 个亚组。而且，水中浸泡的上限 730 天在分析数据中产生了更多的离散。因此，老化处理方法的重点主要是冷热循环加载，研究内部也进行了相应的比较。

由于冷热循环加载代表了结果更严重的老化处理方法，所以仅在非冷热循环加载组和冷热循环加载组中进行数据提取。循环次数的差异也非常大，在 500 和 37500 次之间，所以，本文显示的结果标准差较大。根据第 10477 条 ISO 标准，评估金属 - 树脂粘结的冷热循环加载最小循环次数是 5000 次。老化处理方法的一些标准化很关键。总而言之，冷热循环加载似乎会降低粘结强度值。目前体内冷热循环频率有待确定，并且需要严格的评估。在缺乏这一信息的情况下，假设循环次数在一天 20 到 50 次之间，那么 10000 次被认为是体内行使功能一年的可能代表值。

在评价过程中发现，采用微观拉伸试验检测时，要么氧化锆 - 水门汀块要么切割氧化锆 - 水门汀块后获得的粘结界面经受冷热循环加载。假定粘结界面的粘结面积大约是 1mm^2 ，粘结界面的老化效果更好，并导致粘结强度更低。在本篇 Meta 分析中，尽管这不是主要目的，但是根据检测方法归纳水中浸泡 >90 天的研究似乎有显著差异。因此，水中浸泡可能会导致粘结接头的水解，取决于每种检测方法测得的样品尺寸，与冷热循环加载相似。在另一篇关于牙本质粘结参数的 Meta 分析中，冷热循环加载和长期水中浸泡均未表现出高敏感性（统计学差异较小），但是水中浸泡表现出更强的粘结 - 降解效应。

进一步的研究，尤其是采用微观拉伸试验检测的研究应该考虑水中浸泡和冷热循环加载的降解效应。

一些检测方法（例如，宏观剪切试验、微观剪切试验、宏观拉伸试验和微观拉伸试验）是评估树脂水门汀对牙科陶瓷粘结强度的重要手段。因此，为了精确测量粘结剂和氧化锆陶瓷之间的粘结强度值，无论采用何种检测方法，粘结界面应该是应力最集中的区域，这一点很关键。已有采用应力分布分析的研究报道，一些粘结强度检测方法不能在粘结界面区施加适当的应力。剪切试验检测法由于在粘结界面产生非均匀应力分布而被批判已久，引起对粘结强度结果的低估或误解，因为粘结失败常始于氧化锆陶瓷基质且不在粘结区域。尽管常规的拉伸试验检测法也存在一些限制，比如样品排列困难以及有在粘结界面产生异质性应力分布的倾向，但是该检测方法可以提供全面的粘结强度信息。另一方面，微观拉伸试验除了对粘结力的比较或评估具有高敏感性之外，还使得样品排列更佳和应力分布更均匀。根据 Griffith 理论，均质材料的拉伸强度随样品尺寸的增加而降低，这是材料由于缺陷分布而发生的功能性改变，因为与小样品相比，粘结界面的粘结面积越大，缺陷就越多。这就是为什么宏观拉伸试验测得 MDP 基树脂水门汀的粘结强度结果比其他检测方法更高的原因。

本篇系统评价显示，尽管牙科文献发表了关于宏观剪切试验的不利证据，但是该检测方法仍继续被更广泛地应用。大部分原因在于它的简易性，该方法被视为是一个用于材料排序的快速、可重复的检测方法选择。微观剪切试验是牙科粘结研究中应用最少的检测方法。

研究样本包括每个实验组 6 到 10 个样品。每个实验组的样品数应该超过 10 个，而样品数少于 10 个的研究应视为统计学分析的试点研究。

尽管最开始时设计了失效形式分析，但是由于不一致性，本篇系统评价无法对其进行分类。

到目前为止，临床效果足够的粘结强度尚不清楚。考虑到采用宏观拉伸试验检测的 MDP 基树脂水门汀达到的粘结强度值较高，追求更高的粘结强度数据也许是不必要的。根据临床研究结果，氧化锆材料制成的冠或 FDPs 的固位丧失是较为罕见的。只有在粘结微创树脂粘结氧化锆 FDPs 的情况下，持久的粘结力才是必要的。由于临床试验存在许多混杂因素，所以体外研究优于这些试验。对粘结材料排序，以及确认在最糟糕情况下表现最佳的材料

仍然十分重要。由于粘结涉及到两个方面，一个是修复体表面的粘结，另一个是牙齿表面的粘结，关于氧化锆的体外研究应该也考虑树脂水门汀对牙本质的粘结力。

由于粘结促进剂和粘结水门汀领域的发展，也是不同修复材料的发展，所以在不久的将来，在新型粘结剂和氧化锆粘结的舞台上应该进行进一步的研究。因此，针对研究者和评价员作出以下评论：

- 为了确定所研究的表面处理方法的效果，研究应该包含一个未进行表面处理的对照组。表面处理过程的每一步都应该是精确定义的。
- 应对老化处理的步骤和参数达成共识。达成该共识之前，应当采用至少 5000 次的冷热循环加载老化法。
- 应列出准确的粘结水门汀成分。
- 同一研究课题组应该采用另一种检测方法来核实一个粘结体系的粘结潜能。
- 粘结强度数据应表示为置信区间、均值、最小值和最大值。
- 应详细描述粘结检测后的失效形式。

5 结论

本篇系统评价可以得出以下结论：

应从表面处理方法、水门汀类型、老化处理方法和检测方法这些方面，仔细评估现有的关于氧化锆粘结水门汀的粘结性研究。当研究氧化锆粘结时，尤其在老化处理方法方面，需要一个更系统的方法来评价。

因为绝大部分纳入研究缺乏未进行表面处理的对照组数据，所以关于氧化锆粘结的进一步研究应该设置一个对照组，并且应准确定义表面处理方法。

表面处理方法，尤其是物理化学方法，提高了树脂水门汀和氧化锆的粘结强度。

尽管研究间设置的循环次数差异很大，但是与对照组相比，冷热循环加载显著降低了粘结强度。

当 10MPa 被认为是共同粘结强度值时，MDP 基树脂水门汀即使在冷热循环加载后依然可以提供更加有利的粘结，而在需要良好粘结强度的部位应谨慎使用自粘结树脂水门汀和玻璃离子水门汀。

6 鸣谢

本研究要感谢瑞士苏黎世大学社会与预防医学研究所生物统计学系博士 Małgorzata 在统计分析方面的帮助。