

## · 基础研究 ·

# 牙科可切削聚醚醚酮表面抛光性能的初步研究

王睿瑾 张嘉琪 衣颖杰 吴国锋

南京大学医学院附属口腔医院,南京市口腔医院修复科 210008

通信作者:吴国锋,Email:wgffmmu@sina.com

**【摘要】 目的** 研究牙科可切削聚醚醚酮(PEEK)抛光前后表面微观形貌与粗糙度值变化,并与临床可切削临时冠桥树脂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)抛光效果进行比较,探讨牙科可切削聚醚醚酮是否能满足临床抛光性能要求。**方法** 选择牙科可切削聚醚醚酮材料作为实验组(PT组),以可切削临时冠桥树脂材料作为对照组(R组),通过数字化铣削技术将两者加工为圆盘形试件(直径10 mm,厚度2 mm)各7个;所有试件表面经研磨机砂纸打磨平整后,采用同一种牙科抛光系统对其表面进行抛光;每组试件分别编号为1~7,使用Excel软件生成2个1~7的随机整数,抽取随机数对应的2个试件,使用扫描电镜(SEM)观察试件抛光前后的表面形貌。使用原子力显微镜(AFM)对2组剩余的5个试件抛光前后分别进行表面扫描,观察各试件表面形貌并得到粗糙度Ra值,对各组组内抛光前后试件的Ra值进行配对样本t检验,2组间抛光前后Ra值数据进行独立样本t检验分析。**结果** 通过SEM及AFM均可观察到,PT组及R组试件抛光后较抛光前表面形貌更加平整;使用AFM测得PT组抛光前 $Ra=(0.047 \pm 0.016) \mu m$ ,抛光后 $Ra=(0.022 \pm 0.003) \mu m$ ,R组抛光前 $Ra=(0.036 \pm 0.011) \mu m$ ,抛光后 $Ra=(0.018 \pm 0.008) \mu m$ ;2组材料抛光前与抛光后其Ra值均差异无统计学意义( $t_{\text{抛光前}}=1.075, P_{\text{抛光前}}=0.309; t_{\text{抛光后}}=3.562, P_{\text{抛光后}}=0.070$ ),但同种材料抛光后的试件的Ra值明显降低,抛光前后的Ra值差异具有统计学意义( $t_{\text{PT组}}=5.851, P_{\text{PT组}}<0.001; t_{\text{R组}}=5.166, P_{\text{R组}}<0.001$ )。**结论** 抛光处理可显著降低牙科可切削聚醚醚酮Ra值,与牙科可切削冠桥树脂抛光效果相近,其性能可达到口腔修复体临床抛光要求。

**【关键词】** 聚合物; 牙科抛光; 计算机辅助设计与制作; 表面特性

**基金项目:**国家自然科学基金(重点项目,51835010);江苏省科技项目(BE2019622)

**引用著录格式:**王睿瑾,张嘉琪,衣颖杰,等.牙科可切削聚醚醚酮表面抛光性能的初步研究[J/OL].中华口腔医学研究杂志(电子版),2021,15(5):278-283.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2021.05.004

## Polishing performance of dental milled polyetheretherketone: An *in vitro* study

Wang Ruijin, Zhang Jiaqi, Yi Yingjie, Wu Guofeng

Department of Prosthodontics, Nanjing Stomatological Hospital, Medical School of Nanjing University, Nanjing 210008, China

Corresponding author: Wu Guofeng, Email: wgffmmu@sina.com

**【Abstract】 Objective** In this *in vitro* study, the effect of polishing protocols on the surface morphology and roughness of the dental-milled polyetheretherketone (PEEK) was evaluated, compared with the clinical-milled polymethylmethacrylate (PMMA) for crowns and bridges, so as to confirm whether the dental-milled PEEK can meet clinical requirements. **Methods** Two kinds of milled specimens were included in this study: dental milled PEEK (PT group) as the test group and clinical-milled PMMA for crowns and bridges (R group) as the control group. A total of seven specimens of each material were milled as cylinders with the diameter of 10 mm and the height of 2 mm. All specimens were ground using SiC paper and polished with the same polishing protocol. Among the seven specimens, two were randomly chosen. A scanning electron microscope (SEM) was used to observe the surface morphology of the specimens before and after polishing. The left five specimens were subjected to atomic force microscope

(AFM) to measure the surface roughness (Ra) before and after polishing. Paired *t*-test was used to compare the mean values of Ra before and after polishing in each group. Independent sample *t*-test was used for comparison between the two groups. **Results** After polishing, each group showed a more regular surface. The Ra value of PT group decreased from  $(0.047 \pm 0.016) \mu\text{m}$  to  $(0.022 \pm 0.003) \mu\text{m}$  ( $t_{\text{before}} = 1.075, P_{\text{before}} = 0.309; t_{\text{after}} = 3.562, P_{\text{after}} = 0.070$ ). The Ra value of R group decreased from  $(0.036 \pm 0.011) \mu\text{m}$  to  $(0.018 \pm 0.008) \mu\text{m}$  ( $t_{\text{PT group}} = 5.851, P_{\text{PT group}} < 0.001; t_{\text{R group}} = 5.166, P_{\text{R group}} < 0.001$ ). No statistical difference in Ra value was found between groups after polishing. There was statistical difference in Ra value for each group. The Ra value of each group decreased after polishing. **Conclusions** Dental-milled PEEK could get lower surface roughness after polishing. No statistical difference in Ra values was observed between the dental-milled PEEK and the clinical-milled PMMA for crown and bridge after polishing. Dental-milled PEEK can meet the clinical requirements.

**【Key words】** Polymers; Dental polishing; CAD-CAM; Surface properties

**Fund programs:** National Natural Science Foundation of China(51835010); Science and Technology Project of Jiangsu Province (BE2019622)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2021.05.004

聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)因具有良好的生物安全性、与牙本质相似的弹性模量等优点,逐渐成为广受关注的新型高性能生物材料<sup>[1]</sup>,国内外已有不少临床文献报道了PEEK在固定义齿修复、种植体基台及可摘局部义齿支架等方面的应用案例<sup>[2-4]</sup>,Sinha等<sup>[3]</sup>和Zoidis等<sup>[4]</sup>报道了使用复合纳米二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )PEEK材料与数字化铣削技术完成首例全冠修复体的治疗。但是,由于数字化铣削刀具在加工过程中不可避免地会在修复体表面留下细小刀痕,铣削后需要进行表面抛光才能临床使用,因此有必要系统地研究牙科可切削PEEK表面抛光性能是否能够符合临床要求。

口腔修复体表面光洁度对维护口腔软硬组织健康至关重要,已有研究证实修复体表面若过于粗糙可能利于细菌滋生聚集,从而导致修复后发生牙周炎及龋病等问题<sup>[5]</sup>,临床对于口腔修复体粗糙度有明确的要求(应低于 $0.2 \mu\text{m}$ )<sup>[6]</sup>。当前关于PEEK表面抛光性能方面文献较少,Kurahashi等<sup>[7]</sup>曾使用6种抛光方法对纯PEEK的抛光效果进行了比较研究,结果显示纯PEEK抛光后其表面粗糙度可达到 $0.009 \sim 0.08 \mu\text{m}$ 。但因纯PEEK(外观棕褐色)不宜于用作口腔修复材料,目前市场上可售的牙科可切削PEEK材料为以复合纳米级 $\text{TiO}_2$ 的PEEK聚合物(外观灰白色)。刘亚男等<sup>[8]</sup>使用4种牙科抛光材料对可切削树脂进行抛光,认为使用碳化硅为主要磨料的Enamic® Polishing Set系统可以获得良好的粗糙度。考虑到可切削PEEK与牙科冠桥树脂材料聚甲基丙烯酸甲酯(polymethylmethacrylate, PMMA)硬度相近,本研究计划以可切削冠桥树脂作为实验

对照,考察比较该抛光系统对牙科可切削PEEK抛光前后表面形貌与表面粗糙度Ra值差异,评价牙科可切削PEEK材料抛光性能是否达到临床性能要求。

## 材料与方法

### 一、实验材料与仪器

1. 材料:牙科可切削PEEK块(VESTAKEEP® DC4420 R,赢创,德国);可切削临床冠桥树脂块(美晶瓷® A2,上海沪鸽医疗器械有限公司);牙科抛光系统(Vita Enamic® Polishing Set, Vita, 德国);碳化硅砂纸(800~7000目,STARCKE®,德国)。

2. 设备:牙科数字化铣削设备(UF-2SS-U,哈斯自动化公司,加拿大);研磨机(Mecatech 234, PRESI, 法国);超声波清洗器(KQ-250DE, 昆山市超声仪器有限公司);原子力显微镜(atomic force microscope, AFM; Bruker Dimension® Icon™, BRUKER, 美国);扫描电子显微镜(SEM; Regulus 8220, HITACHI, 日本);接触角测量仪(JC2000DS, 上海中晨有限公司)。

### 二、实验方法

1. 试件制备:实验组为牙科可切削PEEK组(PT组),对照组为可切削冠桥树脂组(R组)。使用牙科数字化铣削设备,配备D4铣刀及D8倒角刀,以6500 r/s的转速将牙科可切削PEEK与冠桥树脂盘研磨加工成厚度为2.0 mm、直径为10 mm的圆盘形试件,每种材料各7个试件;所有试件通过Mecatech Z34研磨机进行表面打磨,依次分别使用1000、1500、2500、3000、5000和7000目的碳化硅砂纸,在水冷条件下以上盘30 r/s顺时针、下盘300 r/s逆时

针的速度,以1 daN的压力,打磨120 s;打磨完成后所有试件均使用超声波清洗器将试件荡洗20 min,之后以98 ℃流水冲洗3次,每次冲洗5 s,以彻底去除抛光残余的污迹,气枪吹干。观察每个试件的表面形貌并测量Ra值。

测量后的试件清洗表面后采用牙科抛光系统进行抛光,按照厂家的说明书抛光90 s。抛光后所有试件采用相同的流程进行超声荡洗及流水冲洗,彻底去除抛光残余的污迹。气枪吹干后测量。试件处理流程见图1。

2. 表面性能检测:(1)SEM观察:给每组每个试件编号为1~7,使用Excel软件生成2个1~7的随机整数,抽取随机数对应的2个试件待测。试件彻底干燥,真空喷金后,由同一位测试者使用SEM观察抛光前后的表面形貌特点,放大倍数为500倍。(2)AFM扫描:每组各剩余5个样本抛光前随机选取3个不同区域,由同一位测试者使用原子力显微镜在25 ℃室温,25%相对湿度下进行扫描,扫描频率为1.98 Hz,扫描范围为30  $\mu\text{m}$   $\times$  30  $\mu\text{m}$ 。所获得数据

采用NanoScope Analysis 1.9软件(BRUKER,美国)进行分析,以获得2D及3D表面形貌,并同时自动生成Ra值。抛光后尽量在之前取点的重叠处进行第二次测量。

### 三、统计学处理方法

采用SPSS 22.0统计学软件对Ra值进行正态分布检验,方差齐性检验,抛光前后同种材料组内的粗糙度Ra值采用配对 $t$ 检验,抛光前后不同材料间粗糙度Ra值分别进行两独立样本 $t$ 检验进行对比。检验水准双侧 $\alpha=0.05$ 。

## 结 果

### 一、扫描电镜实验结果

SEM观察可见,牙科可切削PEEK(PT组)与可切削临时冠桥树脂材料(R组)抛光前表面粗糙,可见大量密集划痕,且划痕边缘不规则,图2箭头处所示为抛光前2组材料表面的深划痕及凹坑。经抛光处理后2组材料均获得了较为平整的表面,划痕减少,划痕及凹坑深度明显降低。

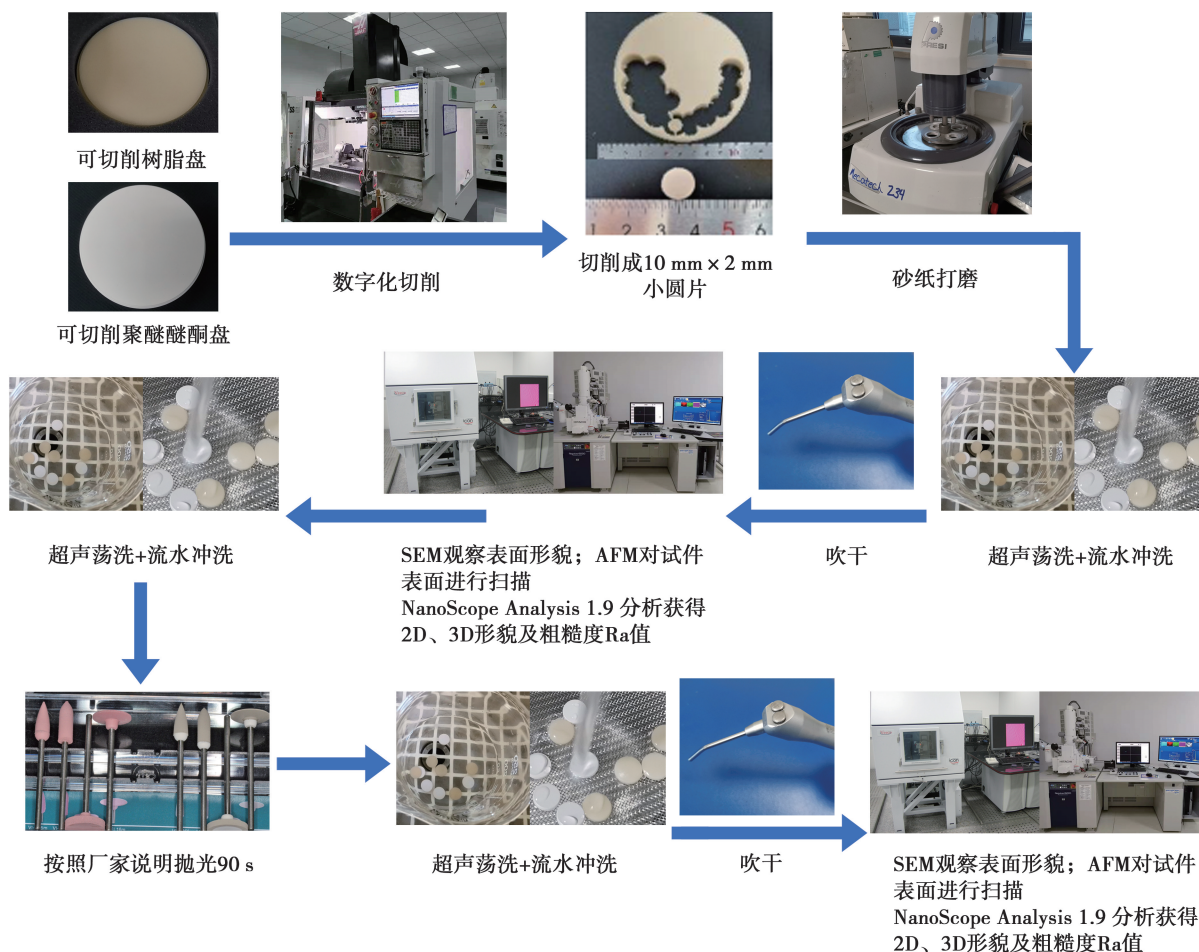


图1 试件制备及处理流程示意图 SEM为扫描电镜,AFM为原子力显微镜

## 二、原子力显微镜实验结果

1. 表面形貌分析:图3为2组材料抛光前后 AFM 下的3D形貌图,可见PT组抛光前有较多较深的沟壑及高耸的脊状突起,抛光后沟壑深度明显降低,大多为单方向细小划痕,伴有少量其他方向划痕,没有明显的深大凹坑,仅有少量隆起,R组抛光前也可观察到沟壑及突起,抛光后表面相对平整,为交

叉方向的细小划痕,少见深大凹坑及明显隆起,多为刺状细小突起,突起高度明显降低。图4为2组材料 AFM 下的2D形貌图,抛光前2组均呈现规律的纹路,并可见少量较深沟壑。抛光后PT组可见少量凹坑及深度较浅的裂隙,但仍有部分隆起存在,R组表面可见方向不一的细小划痕及少量凹坑,仅有个别散在高点。

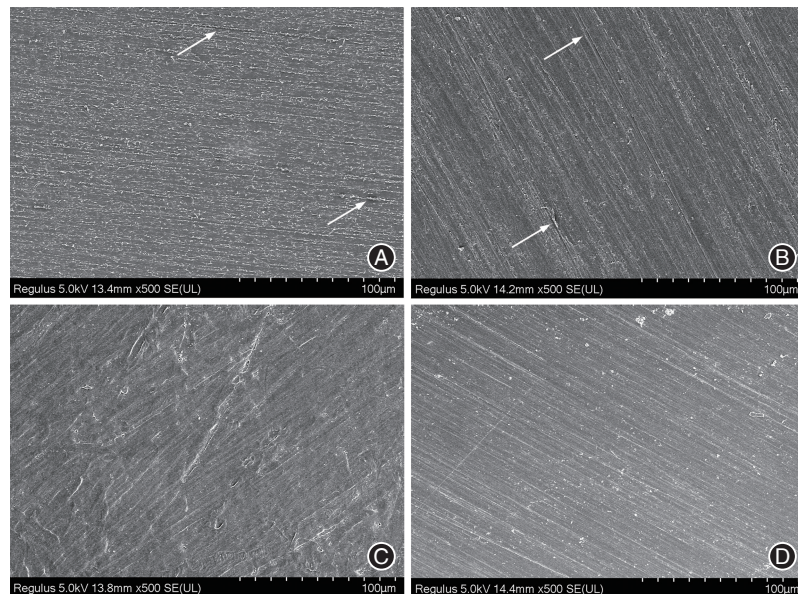


图2 牙科可切削聚醚醚酮(PT组)与可切削临时冠桥树脂材料(R组)表面微观结构(SEM) A:PT组抛光前;B:R组抛光前;C:PT组抛光后;D:R组抛光后;箭头示抛光前2组材料均可见明显深划痕及凹坑

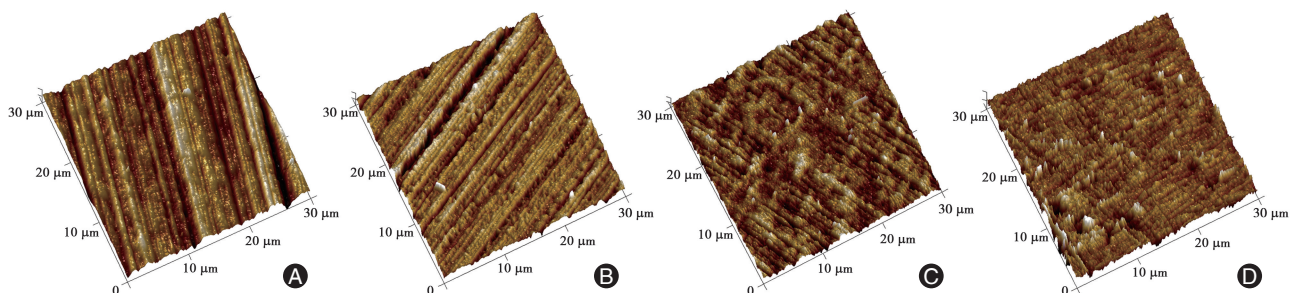


图3 牙科可切削聚醚醚酮(PT组)与可切削临时冠桥树脂材料(R组)的3D形貌图(原子力显微镜) A:PT组抛光前3D形貌图;B:R组抛光前3D形貌图;C:PT组抛光后3D形貌图;D:R组抛光后3D形貌图

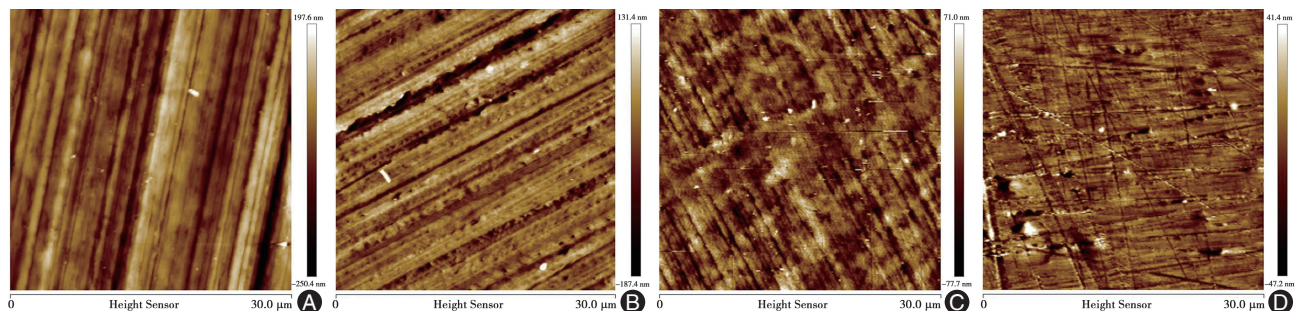


图4 牙科可切削聚醚醚酮(PT组)与可切削临时冠桥树脂材料(R组)的2D形貌图(原子力显微镜) A:PT组抛光前2D形貌图;B:R组抛光前2D形貌图;C:PT组抛光后2D形貌图;D:R组抛光后2D形貌图

2. 表面粗糙度: 配对样本  $t$  检验结果显示, 无论是PT组还是R组, 同种材料抛光前后 Ra 值差异均有统计学意义 ( $P < 0.001$ ), 同种材料抛光后的粗糙度明显小于抛光前各组的粗糙度。两独立样本  $t$  检验显示, 抛光前2组组间的 Ra 值差异无统计学意义 ( $t = 1.075, P = 0.309$ ); 抛光后2组组间 Ra 值差异也无统计学意义 ( $t = 3.562, P = 0.070$ )。具体结果见表1及图5。

表1 牙科可切削聚醚醚酮(PT组)与可切削临时冠桥树脂材料(R组)抛光前后粗糙度统计结果( $\mu\text{m}, \bar{x} \pm s$ )

| 组别    | 试件数 | 抛光前 Ra            | 抛光后 Ra            | $t$ 值 | $P$ 值     |
|-------|-----|-------------------|-------------------|-------|-----------|
| PT组   | 5   | $0.047 \pm 0.016$ | $0.022 \pm 0.003$ | 5.581 | $< 0.001$ |
| R组    | 5   | $0.036 \pm 0.011$ | $0.018 \pm 0.008$ | 5.166 | $< 0.001$ |
| $t$ 值 |     | 1.075             | 3.562             |       |           |
| $P$ 值 |     | 0.309             | 0.070             |       |           |

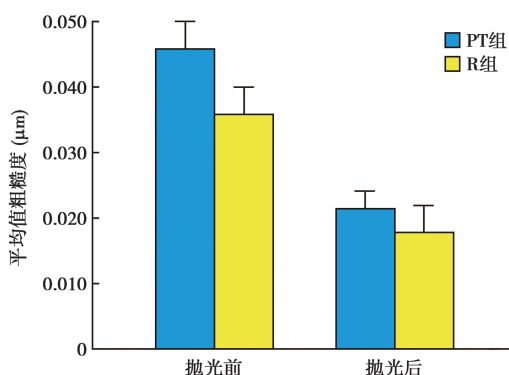


图5 牙科可切削聚醚醚酮(PT组)与可切削临时冠桥树脂材料(R组)抛光前后粗糙度统计图

## 讨论

口腔修复材料应具备良好的表面抛光性能, 国内外文献一般推荐口腔修复体表面粗糙度值至少应控制在  $0.2 \mu\text{m}$  以下, 否则修复体表面过于粗糙容易形成菌斑聚集<sup>[5,9-12]</sup>, 从而导致继发龋、牙周病及修复体染色等不良问题<sup>[13]</sup>。同时也有研究认为, 修复体表面不应过于追求光滑, 否则会存在临床问题, 例如可能会使患者咬合时对颌牙感知异常<sup>[14]</sup>。因此, 口腔修复材料表面粗糙度应控制在一个合理范围, 理想状态是修复体表面应尽量与天然牙牙釉质的粗糙度相似 ( $0.02 \sim 0.03 \mu\text{m}$ )<sup>[14-15]</sup>。本研究测得使用 Vita Enamic® Polishing Set 抛光系统抛光后, 牙科可切削 PEEK Ra 值为 ( $0.022 \pm 0.003$ )  $\mu\text{m}$ , 非常接近前述要求, 初步显示牙科可切削 PEEK 材料表面抛

光性能可达到临床要求。

有研究认为, 细菌在材料表面的凹陷处更易聚集, 形成生物膜<sup>[16-17]</sup>。经过刷牙等常规口腔清洁后, 凹陷处的细菌仍很难被去除<sup>[18]</sup>。本次实验使用 SEM 观察可见 7000 目砂纸打磨后, 试件表面仍有较多深刻痕及凹坑, 且打磨后划痕边缘粗糙不规则, 抛光可有效减少试件表面的凹陷, 降低粗糙度, 从而减少细菌聚集。

Prechtel 等<sup>[19]</sup>对 4 种 PEEK 的硬度进行测量, 报道不同厂家 PEEK 马氏硬度值范围  $102 \sim 227 \text{ N/mm}^2$ ; Liebermann 等<sup>[20]</sup>报道了 PEEK (马氏硬度值  $191 \sim 202 \text{ N/mm}^2$ ) 与牙科可切削冠桥树脂 (马氏硬度值  $182 \sim 207 \text{ N/mm}^2$ ) 相似。由此可见, 可切削 PEEK 与可切削冠桥树脂硬度相似, 因此采用同种抛光系统两种材料有望获得相近的粗糙度。刘亚男等<sup>[8]</sup>使用抛光组套 (Vita Enamic® Polishing Set) 对可切削冠桥树脂进行抛光, 获得了较佳的粗糙度。本研究使用同种抛光系统结果证实, 牙科可切削 PEEK 具有良好的抛光性能。此外, 已有研究显示高分子复合材料中填料颗粒会对其抛光效果造成影响<sup>[20]</sup>。一般来说抛光系统材料的硬度应大于被抛光材料基质及其填料颗粒, 才能同时将基质材料与填料颗粒有效磨除, 避免存在填料颗粒的脱落或突出, 从而获得平整的抛光表面<sup>[21-22]</sup>。本研究使用的牙科可切削 PEEK, 为使其颜色 (灰白色) 较纯 PEEK (棕褐色) 材料更符合临床美学性能需要, 在其材料成分中添加了纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒。该抛光组套中主要抛光成分为碳化硅和金刚石颗粒, 其中碳化硅莫氏硬度值约为 9, 金刚石莫氏硬度值为 10, 均高于二氧化钛填料颗粒 (莫氏硬度值为  $5.5 \sim 7$ )<sup>[23-24]</sup>, 因此理论上对复合纳米  $\text{TiO}_2$  牙科可切削 PEEK 表面应能有效抛光。本研究结果支持了这一结论, 抛光后原子力显微镜下牙科可切削 PEEK 表面平整光滑, 未见有填料颗粒脱落或突起。

口腔修复体在口内经过咀嚼及刷牙清洁, 其表面粗糙度会发生变化。王瑞莉等<sup>[25]</sup>对树脂试件模拟进行 10 000 次刷牙后, 发现试件表面粗糙度值下降。此外, 修复材料的抗老化性能对于修复体表面粗糙度也存在影响, 而研究显示 PEEK 材料抗老化性能显著优于可切削树脂<sup>[19]</sup>。因此, 本研究虽然初步证明了实验室条件下牙科可切削 PEEK 与 PMMA 树脂表面抛光效果无明显差异, 但其在口内长期使用后效果如何尚需要进一步的系统研究。

综上所述,牙科可切削PEEK与可切削冠桥树脂使用同种抛光组套处理后其表面粗糙度Ra值均与天然牙牙釉质相似,且2组间数值差异无统计学意义,提示抛光后牙科可切削PEEK表面性能能够满足临床需要。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参 考 文 献

- [1] Feng P, Wu P, Gao C, et al. A multimaterial scaffold with tunable properties: Toward bone tissue repair [J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2018, 5(6): 1700817. DOI: 10.1002/adv.201700817.
- [2] Xu X, Li Y, Wang L, et al. Triple-functional polyetheretherketone surface with enhanced bacteriostasis and anti-inflammatory and osseointegrative properties for implant application [J]. *Biomaterials*, 2019, 212: 98-114. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2019.05.014.
- [3] Sinha N, Gupta N, Reddy KM, et al. Versatility of PEEK as a fixed partial denture framework [J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2017, 17(1): 80-83. DOI: 10.4103/0972-4052.197941.
- [4] Zoidis P, Bakiri E, Polyzois G. Using modified polyetheretherketone (PEEK) as an alternative material for endocrown restorations: A short-term clinical report [J]. *J Prosthet Dent*, 2017, 117(3): 335-339. DOI: 10.1016/j.prosdent.2016.08.009.
- [5] Hao Y, Huang X, Zhou X, et al. Influence of dental prosthesis and restorative materials interface on oral biofilms [J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(10): 251-267. DOI: 10.3390/ijms19103157.
- [6] Bollen CM, Papaioannou W, van Eldere J, et al. The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-implant mucositis [J]. *Clin Oral Implants Res*, 1996, 7(3): 201-211. DOI: 10.1034/j.1600-0501.1996.070302.x.
- [7] Kurahashi K, Matsuda T, Ishida Y, et al. Effect of polishing protocols on the surface roughness of polyetheretherketone [J]. *J Oral Sci*, 2020, 62(1): 40-42. DOI: 10.2334/josnusd.18-0473.
- [8] 刘亚男, 王立凯, 刘思思, 等. 4种抛光系统抛光Lava Ultimate表面效果的比较[J]. *实用口腔医学杂志*, 2019, 35(4): 490-494. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3733.2019.04.002.
- [9] Hassan AM, Nabih SM, Mossa HM, et al. The effect of three polishing systems on surface roughness of flowable, microhybrid, and packable resin composites [J]. *J Int Soc Prev Community Dent*, 2015, 5(3): 242-247. DOI: 10.4103/2231-0762.159965.
- [10] Elter C, Heuer W, Demling A, et al. Supra- and subgingival biofilm formation on implant abutments with different surface characteristics [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2008, 23(2): 327-334. DOI: 10.1016/j.ijom.2007.09.170.
- [11] Quirynen M, Bollen CM, Papaioannou W, et al. The influence of titanium abutment surface roughness on plaque accumulation and gingivitis: Short-term observations [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 1996, 11(2): 169-178.
- [12] Quirynen M, Marechal M, Busscher HJ, et al. The influence of surface free energy and surface roughness on early plaque formation. An *in vivo* study in man [J]. *J Clin Periodontol*, 1990, 17(3): 138-144. DOI: 10.1111/j.1600-051x.1990.tb01077.x.
- [13] 周建飞. 不同口腔修复材料的颜色稳定性实验研究[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2010. DOI: 10.7666/d.y1800461.
- [14] Fratolin MM, Bianco VC, Santos MJ, et al. The effect of prophylactic powders on the surface roughness of enamel [J]. *Compend Contin Educ Dent*, 2014, 35(9): e31-e35.
- [15] 于凡. 复合树脂抛光性能的研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2007. DOI: 10.7666/d.d036214.
- [16] 苗辛超. 钛表面纳米形貌对软硬组织细胞及细菌的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [17] 王美艳, 赵婵媛, 王杨洋, 等. 不同抛光处理对两种氧化锆陶瓷表面粗糙度和细菌粘附性能的影响[J]. *口腔医学研究*, 2020, 6(3): 239-242. DOI: 10.13701/j.cnki.kqxyj.2020.03.012.
- [18] Derchi G, Vano M, Barone A, et al. Bacterial adhesion on direct and indirect dental restorative composite resins: An invitro study on a natural biofilm [J]. *J Prosthet Dent*, 2017, 117(5): 669-676. DOI: 10.1016/j.prosdent.2016.08.022.
- [19] Prechtel A, Reymus M, Edelhoff D, et al. Comparison of various 3D printed and milled PAEK materials: Effect of printing direction and artificial aging on Martens parameters [J]. *Dent Mater*, 2020, 36(2): 197-209. DOI: 10.1016/j.dental.2019.11.017.
- [20] Liebermann A, Wimmer T, Schmidlin PR, et al. Physico-mechanical characterization of polyetheretherketone and current esthetic dental CAD/CAM polymers after aging in different storage media [J]. *J Prosthet Dent*, 2016, 115(3): 321-328+328.e1-328.e2. DOI: 10.1016/j.prosdent.2015.09.004.
- [21] 马可, 高燕, 童忠春, 等. 不同抛光系统对纳米树脂表面粗糙度和菌斑黏附的影响[J/OL]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2016, 10(1): 17-21. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2016.01.004.
- [22] 王南燕, 欧阳勇. 纳米填料复合树脂抛光后表面粗糙度及微结构的比较[J/OL]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)*, 2010, 4(1): 27-33. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1366.2010.01.006.
- [23] 卢毅. SiC非球面反射镜计算机控制研磨关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014. DOI: 10.7666/d.D01107686.
- [24] 杨健林. 二氧化钛及其石墨烯复合材料的合成和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. DOI: 10.7666/d.D755058.
- [25] 王瑞莉, 袁重阳, 潘怡湘, 等. 流动与膏体复合树脂表面抛光性能的比较研究[J]. *中华口腔医学杂志*, 2017, 52(4): 243-247. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2017.04.010.

(收稿日期: 2021-06-06)

(本文编辑: 王曼)