

钛/瓷连接界面残余应力有限元分析

Finite Element Modeling of Residual Stress in the Bonding Interface of Ti/Porcelain

朱 松¹, 段珍珍², 刘 杰², 邱小明², 孙大千²

(1 吉林大学 口腔医学院, 长春 130021;

2 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130022)

ZHU Song¹, DUAN Zhen-zhen², LIU Jie², QIU Xiao-ming², SUN Da-qian²

(1 College of Stomatology, Jilin University, Changchun 130021; 2 College of

Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022)

摘要: 采用有限元法分析了钛/瓷、钛/ZrO₂/瓷连接冷却过程中界面残余应力形成的大小和分布特征。结果表明, 钛/瓷试样在结合界面处存在较大的残余应力。在平行于界面的方向上, 陶瓷表面受拉应力的作用, 易导致表面裂纹的产生。钛/瓷界面的边缘处存在较大的应力集中, 尤其是结合界面位于Z向棱边的顶角处, 应力集中较为明显, 易导致瓷崩和瓷裂。ZrO₂中间层可抑制钛表面过度氧化, 缓和钛/瓷界面应力集中, 提高钛/瓷结合强度, 降低陶瓷层裂纹倾向。

关键词: 钛; 陶瓷; 残余应力; 有限元; 中间层

中图分类号: TG425.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)02-0045-05

Abstract: The numerical value and distribution of residual stress in the bonding interface of Ti/porcelain and Ti / ZrO₂/porcelain have been investigated by finite element method. The results show that the high residual stresses existed in the interface of Ti/porcelain specimen. Porcelain surface tended to produce cracks due to the tensile stress parallel to the surface. Stress concentration in the rim of interface of Ti/porcelain made it a vulnerable area of the bonding and usually led to porcelain collapse or crack, especially at the corner angle of Z-orientation edge. ZrO₂ could efficiently protect the surface of Ti from excessive oxidative, lower the degree of stress concentration in the interface, improve the bonding strength of Ti/porcelain and reduce the cracking tendency of porcelain.

Key words: Ti; porcelain; residual stress; finite element; interlayer

在钛烤瓷修复体制作过程中, 由于钛和瓷的热膨胀系数存在明显的差异加之钛/瓷试样需要经过多次加热和冷却的过程, 在钛/瓷界面处将产生不均匀的应力^[1-3]。研究界面残余应力的分布特点及影响因素, 对于提高钛/瓷界面结合强度和烤瓷质量具有重要的指导意义。

迄今为止, 对金/瓷修复体应力的研究常采用实验检测(包括电阻应变测量法、光弹法、激光全息干涉度量法等)和数学计算(包括解析法和数值法)两种手段。由于钛/瓷界面残余应力的产生是一个涉及热、传热、应力、应变等多参数耦合的复杂过程, 采用试验测量和数学计算的方法难以得到满意的结果^[4-6]。随着计算机和软件技术的发展, 有限元法越来越多地应用于金属烤瓷工艺的残余应力分析中。有限元分析法避免了实验力学过程由于操作过程中器材、实验者、测控仪器等因素引起的误差; 不损坏

对象模型的完整性, 可重复利用; 可以准确地表达细致复杂的结构, 获取信息全面准确; 可以在同一模型上对不同性质的材料进行力学分析; 可以进行复杂载荷条件下的应力分析; 对应力的内部状态及其他力学性能定量测定的代表性好; 数据、图形、图像可重复使用等众多优点。但是, 有限元分析法往往将材料的热力学特性进行简化, 同时忽略了金/瓷厚度比、冷却速率, 应力释放等外部因素的影响, 所以还存在一定的局限性^[7-10], 因此应该把应力的理论分析和实验观察结合起来。

本工作利用多物理场耦合有限元分析软件FEM-LAB进行钛/瓷连接界面残余应力的研究, 通过建立钛/瓷界面的瞬态热-应力有限元模型, 并与钛烤瓷体缺陷特征相结合, 分析了钛/瓷界面温度场和应力场的分布特点以及溅射中间层后界面残余应力的分布特征。

1 实验材料和方法

1.1 实验方法

实验用金属基底为 0.5mm 厚的 TA2 锻造纯钛，

陶瓷为德国 Vita Titankeramik 钛烤瓷专用瓷。钛表面用砂纸打磨后喷砂，分别在纯钛和溅射 ZrO_2 涂层的金属基体表面，按照表 1 工艺参数烧结黏结剂、遮色瓷、体瓷，控制瓷层总厚度为 1mm。

表 1 烤瓷工艺参数

Table 1 Firing parameters

	Start temperature/℃	Pre-heat time/min	Heat rate/(℃·min ⁻¹)	Final temperature/℃	Holding time/min	Vacuum/kPa
Bonder	400	2	67	800	1	5
Opaque	400	2	98	790	1	5
Dentine	400	6	53	770	1	5

1.2 简化与假设

钛烤瓷修复体制作是一个十分复杂的过程，为简化数值计算，在建立界面三维有限元模型时作以下假设：

- (1) 试样材料为均匀材质，材料各向同性；
- (2) 试样材料为弹性的；
- (3) 钛/瓷界面结合良好，不存在缺陷。

影响钛/瓷界面残余应力的主要参数为材料的热膨胀系数、弹性模量、泊松比和密度，如表 2 所示。

表 2 材料的主要性能

Table 2 Main properties of materials

	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	E/GPa	μ	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
Porcelain	8.9×10^{-6} (TG: 583℃)	66	0.20	2.4
Ti	9.8×10^{-6} (20~600℃)	106	0.41	4.51
ZrO ₂	9.3×10^{-6} (20~600℃)	140	0.32	5.89

在烤瓷过程中，遮色瓷的厚度很小，仅为 0.2mm，且与体瓷只是热膨胀系数有略微差异，因此在建立有限元模型时，将遮色瓷与体瓷作为一层陶瓷进行数值计算。

1.3 建立模型和划分网格

根据试样的尺寸以及烤瓷工艺的特点，为减少计算量，以试样的 1/2 建立几何模型。图 1 是生成的有限元网格模型。试样下部是钛基体，尺寸规格为 4mm×3mm×0.5mm；上部是陶瓷层，尺寸规格为 4mm×3mm×1mm。由图 1 可见，X-O-Y 面为钛/瓷的结合界面，Y-O-Z 面为整个试样在 X 方向上的对称面。有限元网格的划分采用 8 节点正六面体耦合单元，总自由度数目为 634434，总网格点数为 26691，单元数目为 24000。采用中间层的有限元实体模型采取网格局部细分。

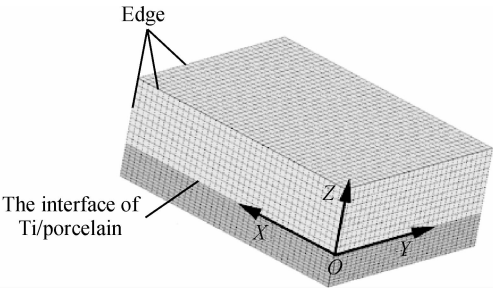


图 1 有限元分析网格划分

Fig. 1 Finite element mesh used for residual stress analysis

2 计算结果与讨论

2.1 钛/瓷连接界面残余应力分析

图 2 为钛/瓷界面应力分布云图。由图 2 可见，在钛/瓷界面区存在明显的应力集中，钛/瓷内部最大应力值分别为： $\sigma_x = 14.4\text{MPa}$ ， $\sigma_y = 14.3\text{MPa}$ ， $\sigma_z = 10.0\text{MPa}$ ， $\tau_{xy} = 1.6\text{MPa}$ ， $\tau_{yz} = 6.1\text{MPa}$ ， $\tau_{zx} = 6.0\text{MPa}$ 。结果表明，钛/瓷界面区的应力集中是影响钛/瓷结合强度的重要因素。

图 3 为试样 Z 向棱边处的应力分布。结合图 2(a)，(b)，(c)和图 3(a)可以看出， σ_x 和 σ_y 在钛/瓷界面处为正，产生最大拉应力，在靠近界面的陶瓷一侧 σ_x 和 σ_y 为负，表明该区域内陶瓷在 X,Y 方向上均受压；随着与界面距离的增加，陶瓷中压应力逐渐减小，当接近陶瓷层表面时， σ_x 和 σ_y 变为正值，即陶瓷表面在 X,Y 方向上受拉应力作用，这是导致陶瓷层表面裂纹(见图 4(a))产生的力学因素。钛基体在靠近界面附近 σ_x 和 σ_y 均为正，拉应力值较大，随着与界面距离的增加，拉应力逐渐减小，当接近钛基体表面时 σ_x 和 σ_y 变为负值。 σ_z 在钛/瓷界面的分布不同于 σ_x 和 σ_y 。在钛基体一侧 σ_z 为负，主要为压应力；陶瓷一侧 σ_z 为正，主要为拉应力，在距离结合界面 0.2mm 处 σ_z 达到最大值，表明陶瓷在 Z 向受拉，且侧表面较中心处受拉程度更高，该拉应力极易诱发裂纹产生，并沿平行于界面的方向扩展(见图 4(b))。

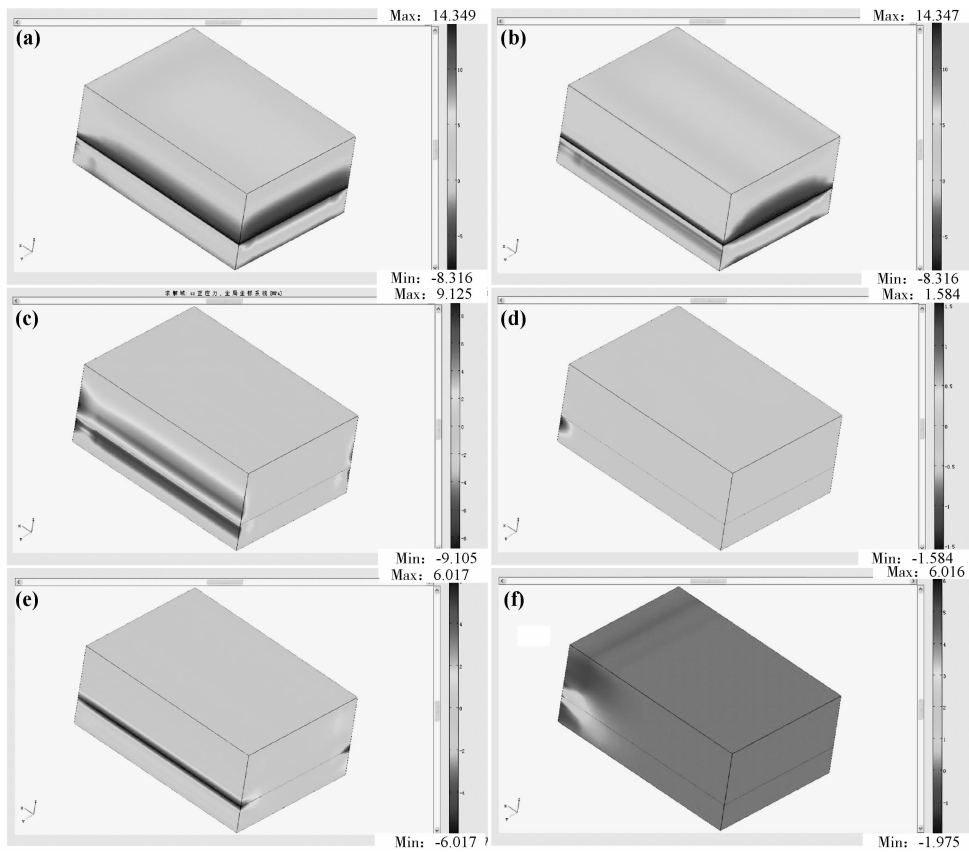


图 2 钛/瓷连接界面残余应力分布 (a) σ_x ; (b) σ_y ; (c) σ_z ; (d) τ_{xy} ; (e) τ_{yz} ; (f) τ_{zx}
Fig. 2 Residual stress distribution in Ti/porcelain interface (a) σ_x ; (b) σ_y ; (c) σ_z ; (d) τ_{xy} ; (e) τ_{yz} ; (f) τ_{zx}

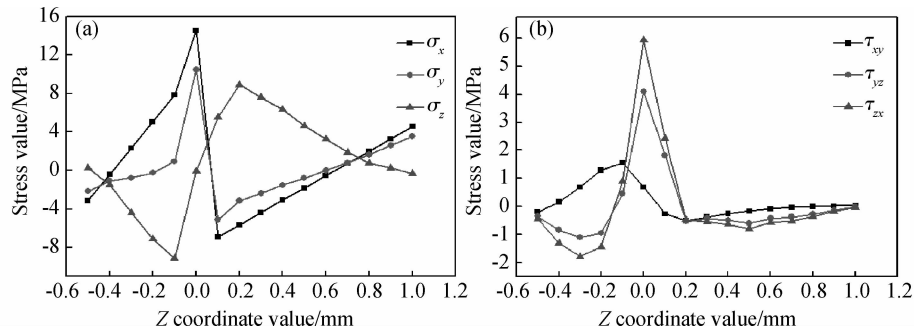


图 3 Z 向棱边处的应力分布 (a)正应力; (b)剪应力
Fig. 3 The stress distribution of edge in Z direction (a)normal stresses; (b)shearing stresses

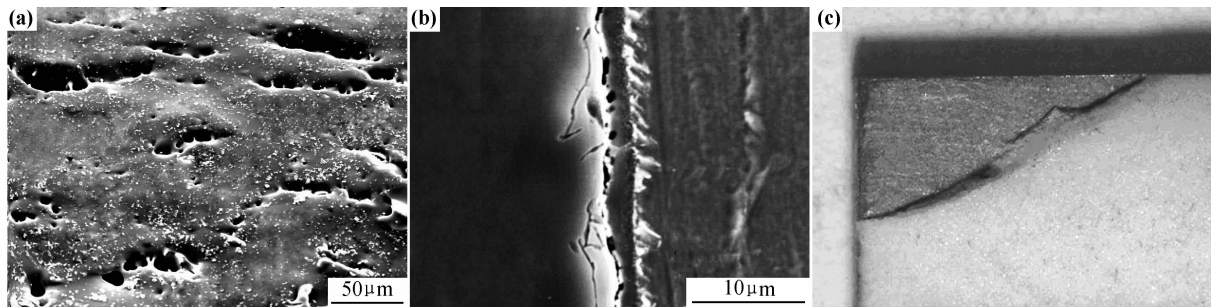


图 4 钛/瓷裂纹形貌 (a)表面裂纹; (b)内部裂纹; (c)棱角裂纹
Fig. 4 The morphology of crack in Ti/porcelain
(a)crack on porcelain surface; (b)crack in porcelain; (c)crack near the edge angle

由图 2(d),(e),(f)可以看出,平行于界面的剪应力 τ_{xy} 主要集中在试样的 Z 向棱边上,垂直于界面的剪应力 τ_{yz}, τ_{zx} 主要集中在结合界面的边缘附近。根据图 3(b)可知,当由陶瓷过渡到钛基体时, τ_{xy} 在钛/瓷界面处有较大变化,且在陶瓷距离界面 0.2mm 处达到最大值。 τ_{yz}, τ_{zx} 在界面边缘处达到最大值,随着与界面距离的增加,应力值迅速下降。通过以上分析可知,在结合界面的边缘区域存在较大的剪应力集中,尤其是界面位于 Z 向棱边的顶角处,很容易因应力集中而导致裂纹的产生,成为钛/瓷结合的薄弱位置。因此,图 4(c)所示的钛/瓷棱角裂纹与界面区域的剪应力和正应力有关。以上研究结果表明,钛/瓷界面应力集中不

仅影响结合强度,而且高的应力水平还导致陶瓷层中产生裂纹缺陷。

2.2 钛/ZrO₂/瓷连接界面残余应力分析

研究表明,在钛表面溅射中间层后,可效的抑制钛表面的过度氧化。ZrO₂ 中间层线胀系数介于钛、瓷之间,为此,通过建立钛/ZrO₂/瓷界面有限元模型,分析了中间层对界面残余应力分布的影响规律。

图 5 为钛/ZrO₂/瓷界面应力分布云图。由图 5 可知,陶瓷内部最大应力值分别为: $\sigma_x = 10.8\text{MPa}$, $\sigma_y = 10.6\text{MPa}$, $\sigma_z = 6.9\text{MPa}$, $\tau_{xy} = 1.1\text{MPa}$, $\tau_{yz} = 5.1\text{MPa}$, $\tau_{zx} = 5.0\text{MPa}$ 。结果表明,与未添加无中间层比较,钛/ZrO₂/瓷界面区应力集中的程度有所降低。

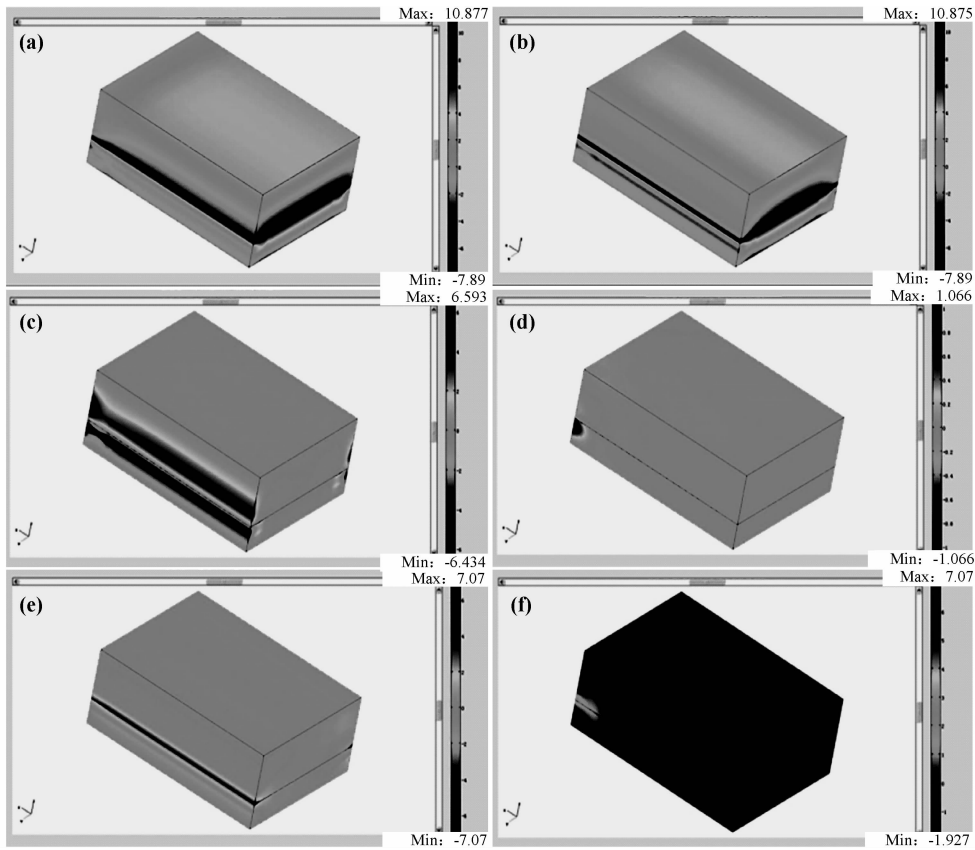


图 5 钛/ZrO₂/瓷连接界面残余应力分布 (a) σ_x ; (b) σ_y ; (c) σ_z ; (d) τ_{xy} ; (e) τ_{yz} ; (f) τ_{zx}

Fig. 5 Residual stress distribution in Ti/ ZrO₂/porcelain interface (a) σ_x ; (b) σ_y ; (c) σ_z ; (d) τ_{xy} ; (e) τ_{yz} ; (f) τ_{zx}

图 6 为试样 Z 向棱边处的应力分布。从图 5(a), (b),(c)和图 6(a)可以看出,正应力的分布与无中间层时类似,但界面区的应力集中程度和整体应力水平降低,这有利于提高钛/瓷结合强度,降低陶瓷层裂纹倾向。在靠近中间层陶瓷一侧 σ_x 和 σ_y 仍为负,即陶瓷在平行于界面的方向依然受压应力的作用,但比无中间层时低;随着与中间层距离的增加,压应力逐渐减小,当接近陶瓷表面时,应力转变为正值,但与无中间层时相比应力值较小,陶瓷产生表面裂纹的倾向减小。

σ_z 极值分布在界面区的两侧,陶瓷一侧 σ_z 为正,最大值出现在距离界面 0.2mm 处,但应力值小于不加中间层。由图 5(d),(e),(f)和图 6(b)可以看出,剪应力 τ_{xy} 主要集中在试样的 Z 向棱边上, τ_{yz}, τ_{zx} 主要集中在中间层的边缘附近,其分布状态与无中间层时相近,在界面边缘处应力值最大,随着与界面距离的增加,应力值迅速下降。应力的分布表明钛/瓷界面的边缘、顶角以及试样的棱边处仍然是应力集中最为明显的区域,但 ZrO₂ 中间层的存在明显减小了应力集中的程度。

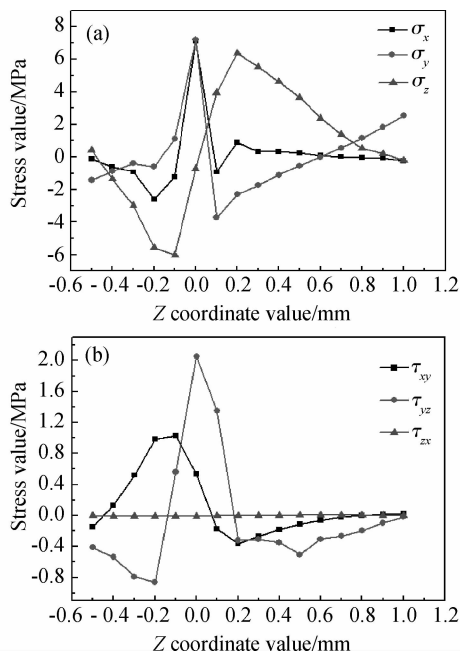


图6 Z向棱边处的应力分布 (a)正应力;(b)剪应力
Fig. 6 The stress distribution of edge in Z direction
(a)normal stresses;(b)shearing stresses

此外, ZrO_2 是一种生物陶瓷,具有优良的生物相容性,其晶体结构和 TiO_2 相同,均能和硅酸盐陶瓷在钛/瓷界面构成玻璃网络。因此, ZrO_2 中间层可抑制钛表面过度氧化,缓和钛/瓷界面应力集中,对提高钛/瓷结合强度和降低陶瓷层裂纹倾向十分有利。

3 结论

(1) 钛/瓷试样在结合界面处存在较大的残余应力。在平行于界面的方向上,陶瓷表面受拉应力的作用,易导致表面裂纹的产生。钛/瓷界面的边缘处存在较大的应力集中,尤其是结合界面位于 Z 向棱边的顶角处,应力集中较为明显,易导致瓷崩和瓷裂。

(2) ZrO_2 能有效地缓和冷却过程中的变形失配,降低界面处残余应力的集中程度,可提高钛/瓷结合强度和降低陶瓷层裂纹倾向。

参考文献

- [1] 雷亚超,魏治统,杜传诗,等. 金属与陶瓷热膨胀差对金属烤瓷冠热稳定性的影响 [J]. 中华口腔医学杂志, 1991, 26(6): 329—332.
- [2] LENZ J, KESSEL S. Thermal stresses in metal-ceramic specimens for the ISO crack initiation test (three-point flexure bond test) [J]. Dental Materials, 1998, 14(4): 277—280.
- [3] CASCONI P J, NABATRAN D. Determination of thermal expansion compatibility limits for porcelain-metal systems [J]. Journal of Dental Research, 1982, 61(9): 330—333.
- [4] TOPARLI M, SASAKI S. Finite element analysis of the temperature and thermal stress in a post restored tooth [J]. Journal of Oral Rehabilitation, 2003, 30(9): 921—926.
- [5] 辛海涛,马轩祥,李玉龙,等. 金-瓷修复体粘弹性残余应力的有限元分析 [J]. 华西口腔医学杂志, 2004, 22(6): 463—465.
- [6] 李臻熙,张同俊,李星国. Al_2O_3 -Ti 系梯度功能材料残余热应力有限元分析 [J]. 材料工程, 1998, (3): 11—16.
- [7] PROOS K A, SWAIN M V, IRONSIDE J, et al. Finite element analysis studies of a metal-ceramic crown on a first premolar tooth [J]. The International Journal of Prosthodontics, 2002, 15(6): 521—527.
- [8] TRÓIA M G, HENRIQUES G E P, NÓBILO M A A, et al. The effect of thermal cycling on the bond strength of low-fusing porcelain to commercially pure titanium and titanium-aluminum-vanadium alloy [J]. Dental Materials, 2003, 19(8): 790—796.
- [9] MARKLUND S, BERGMAN B, HEDLUND S O, et al. An intraindividual clinical comparison of two metal-ceramic systems: a 5-year prospective study [J]. The International Journal of Prosthodontics, 2003, 16(1): 70—73.
- [10] HUSSAINI I A, WAZZAN K A. Effect of surface treatment on bond strength of low-fusing porcelain to commercially pure titanium [J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2005, 94(4): 350—356.

基金项目: 吉林省科技发展基金资助(20050511)

收稿日期: 2011-06-21; 修订日期: 2011-12-04

作者简介: 朱松(1965—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为新材料连接, E-mail: zhusong1965@163.com

通讯作者: 邱小明(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 联系地址: 吉林省长春市人民大街 5988 号吉林大学材料科学与工程学院(130022), E-mail: qiu xm@jlu.edu.cn

(上接第 29 页)

- [12] MAGGANA G, PISSIS P. Water sorption and diffusion studies in an epoxy resin system [J]. J Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1999, 37(11): 1170—1182.
- [13] 郑路,常新龙,赵峰等. 湿热环境中复合材料吸湿性研究 [J]. 纤维复合材料, 2007, (2): 37—39.
- [14] GUO M L, YANG F, FAN X Y. Moisture diffusion parameters of polymer matrix composites [J]. Acta Materiea Composi-

tae Sinica, 2001, (1): 34—37.

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2011-04-03

作者简介: 张利军(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事先进树脂基复合材料研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路北京航空航天大学材料科学与工程学院 104 教研室(100191), E-mail: zhanglijun0000@163.com