

股骨假体热应力有限元分析

王沫楠^{1,2}, 王红晶², 杜志江¹

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 150080 哈尔滨;

2. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 150080 哈尔滨)

摘要: 为定量研究材料热物性对股骨-假体系统应力的影响,以热弹性力学为基础,利用有限元方法对髋关节置换后股骨-假体系统的应力进行分析.假设假体、骨水泥、股骨为线弹性和各向同性材料且完全结合的同轴圆柱体,经力学分析和有限元仿真,分别求得钛合金和钴铬合金作为假体材料时考虑热效应前后的假体/骨水泥、骨水泥/股骨随轴向位置分布的界面剪切应力以及假体、骨水泥、股骨的轴向应力.结果表明:界面失效是股骨-假体系统的主要失效形式,热效应使界面产生了混合而不是纯剪切的失效形式,加快了股骨-假体系统的界面失效,加速了假体柄的松动;由于钴铬合金的热膨胀系数大于钛合金,钴铬合金作为假体材料时更易引起界面失效,导致手术失败.选择热膨胀系数小的假体材料,可以减小界面失效的可能性,提高手术成功率.

关键词: 股骨;假体;钛合金假体;钴铬合金假体;热应力;有限元分析

中图分类号: R496

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)07-0038-05

Finite element analysis of thermal stress of femoral prosthesis

WANG Mo-nan^{1,2}, WANG Hong-jing², DU Zhi-jiang¹

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China;

2. College of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, 150080 Harbin, China)

Abstract: To study the influence of thermo property on stress of femur-prosthesis system quantitatively, the finite element method is used to analyze the stress of femur-prosthesis system when the hip joint has been replaced, in which the prosthesis, bone cement and femur are assumed as linear elastic and isotropic materials in shape of a concentric cylinder. Considering the thermal effect, the axial stress of prosthesis, bone cement, femur and the interface shear stress along axial of the prosthesis/bone cement and bone cement/femur when the prosthesis are made of titanium alloy and cobalt-chromium alloy are acquired separately by mechanical analysis and FEM simulation. The results indicate that the interface failure is the primary failure mode of the femur-prosthesis system. The existence of thermal effect accelerates the interface failure of femur-prosthesis system and the loose of prosthesis stem. The possibility of interface failure which result in operation failure will ascend when the cobalt-chromium alloy is used, because the thermal expansion coefficient of cobalt-chromium alloys is higher than that of titanium alloy.

Key words: femur; prosthesis; titanium prosthesis; cobalt-chromium prosthesis; thermal stress; finite element analysis

收稿日期: 2011-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61073144); 黑龙江省新世纪优秀人才培养计划资助项目(251NCET006); 机器人技术与系统国家重点实验室开放研究资助项目.

作者简介: 王沫楠(1973—)女,博士,教授.

通信作者: 王沫楠, qqwmnan@163.com.

近年来人工关节置换术迅速发展,欧美等发达国家每年仅人工髋、膝关节置换的数量就超过 5×10^5 人次,据推算我国也有 10×10^5 左右的病人需要人工关节手术^[1],其中又以髋关节置换最为广泛.当假体植入骨组织内,假体与组织之间的界面不仅仅是分界线,而是一个相互作用区

域^[2-3]. 股骨假体系统较易发生以下两种失效,从而导致手术的失败:第一,由于应力遮挡的存在,置换后的假体将承担大部分的载荷,而股骨所承担的载荷会大大减小,根据 Wolff 定律,应力遮挡的股骨将产生骨吸收,引起假体柄的松动,导致手术失败;第二,置换后股骨系统靠接触界面传递应力,不适合的假体材料选择和假体外形设计也会导致手术失败率的增加. 选择假体时,不仅要考虑在几何学的匹配,还要在生物力学性能上达到最优,这对提高置换术后疗效具有现实意义^[4]. 有关假体的研究主要集中在几何形状和材料的强度、密度、弹性模量等对置换效果的影响上,而关于材料的热物性对导致股骨假体置换失效影响的研究却鲜见报道. 相关文献研究了股骨假体置换界面的应力模型,但未考虑热效应的影响,不能真实反映股骨假体的受力情况. 由于假体柄通常是通过骨水泥与股骨粘结的^[5],而骨水泥材料主要是聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA),具有比股骨高得多的热膨胀系数,在较高的温差下,它的存在将极大影响界面应力传递的效率. 同样,不同热膨胀系数的假体材料也会对界面应力传递效率产生不同的影响. 所以,研究在考虑热效应条件下不同假体材料的股骨-假体系统应力传递规律具有重要意义.

目前,髋关节置换中使用的假体材料多种多样,其中用得最多的是钴铬合金和钛合金^[6]. 本文将分别选用钴铬合金和钛合金作为假体材料,以热弹性力学为基础,运用有限元软件分析在热效应下两种假体材料股骨-假体系统的应力分布规律,为假体材料的选择提供参考.

1 股骨假体热应力分析

假设假体、骨水泥、股骨为线弹性和各向同性材料,在置换后它们是同心圆柱体,且完全结合,则当考虑热效应时,假体柄(用 p 表示)、骨水泥(用 c 表示)、股骨(用 f 表示)的轴向应力-应变关系分别如下:

$$\varepsilon_p(z) = \frac{du_p(z)}{dz} = \frac{\sigma_p}{E_p} + \alpha_p \Delta t, \quad (1)$$

$$\varepsilon_c(z) = \frac{du_c(z)}{dz} = \frac{\sigma_c}{E_c} + \alpha_c \Delta t, \quad (2)$$

$$\varepsilon_f(z) = \frac{du_f(z)}{dz} = \frac{\sigma_f}{E_f} + \alpha_f \Delta t. \quad (3)$$

式中, ε 、 u 和 σ 分别表示应变、位移和应力, α 为热膨胀系数, E 为弹性模量, Δt 表示从某个高温 (本文为体温 37 °C) 冷却到室温 (20 °C) 的温差,

Δt 一般为负数.

骨水泥和股骨中的剪切应力可分别表达为

$$\tau_c(r, z) = G_c \frac{du_c(r, z)}{dz},$$

$$\tau_f(r, z) = G_f \frac{du_f(r, z)}{dz}.$$

式中: τ 为剪切应力; G 为剪切模量, 且 $G = 0.5E/(1 + \nu)$; ν 是泊松比, r 为径向位移.

骨水泥和股骨沿轴向应力的平均值为

$$\overline{\sigma_c}(z) = \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b \sigma_c(r, z) r dz, \quad (4)$$

$$\overline{\sigma_f}(z) = \frac{2}{c^2 - b^2} \int_b^c \sigma_f(r, z) r dz. \quad (5)$$

假体柄轴向应力、骨水泥和股骨中的平均轴向应力满足下面的平衡关系:

$$\sigma_p(z) a^2 + \overline{\sigma_c}(z) (b^2 - a^2) + \overline{\sigma_f}(z) (c^2 - b^2) = a^2. \quad (6)$$

式中, σ 为在站立条件下人的体重作用于单个髋关节上的压应力.

联立式(1)~(6)就可以求得假体、骨水泥、股骨的轴向应力和假体/骨水泥、骨水泥/股骨的界面剪切应力.

2 股骨假体热应力有限元模型

有限元法 (FEM) 将研究对象的连续求解区域离散为一组有限个、且按一定方式相互联结在一起的单元组合体,然后对单元 (小区域) 进行分析,最后再整体分析.

热应力分析实际包括热分析和应力分析,运用有限元方法进行热应力分析,是对这两种分析的耦合.

热分析时,根据热传导微分方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q$$

进行推导,最后得出其有限元计算通式

$$[C_e] \{T_e\} = \{Q_e\}^f + \{Q_e\}^g.$$

应力分析时,则根据 $\{\sigma_e\} = \{\varepsilon_e\} + [D_e]$ 计算出单元应力.

将各单元按一定的边界条件进行整合分析,即可求出模型的温度和应力分布. 最后根据

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}^T + \{\varepsilon\}^\sigma$$

进行计算,可求出模型的热应力. 其中, $\{\varepsilon\}$ 为总的应变向量; $\{\varepsilon\}^T$ 为由温度引起的应变向量; $\{\varepsilon\}^\sigma$ 为应力引起的应变向量.

运用有限元分析软件求解,首先定义了材料属性,并按照考察对象的实际情况添加了边界条

件,分析在考虑热效应前后同种假体材料股骨-假体系统各应力随轴向位置的分布规律和研究在热效应影响下不同假体材料各应力的区别。

2.1 材料属性

分别采用钴铬合金和钛合金作为假体材料,由于股骨的骨松质部分几乎全部为假体柄所代替,因此假设股骨的材料特性近似为骨密质。

密质骨、骨水泥、钴铬合金和钛合金的材料属性如表1。

表1 材料属性^[7-11]

材料	E/GPa	泊松比	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	热传导率/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
密质骨	12.4	0.30	0.1×10^{-6}	0.434
骨水泥	2.4	0.33	72.2×10^{-6}	0.200
钴铬合金	200.0	0.30	13.9×10^{-6}	23.00
钛合金	115.0	0.33	10.0×10^{-6}	22.00

2.2 边界条件及载荷

假设成年人体重为 $m = 60 \text{ kg}$, 髋关节承受的压力约为体重的 6~7 倍^[12], 则作用在单个髋关节上的压力约为 $p = 2000 \text{ N}$, 压应力大小为 $\sigma = p/(\pi a^2) = 25.5 \text{ MPa}$ 。在施加压力时对股骨末端进行约束, 考虑热效应时假设材料温度为 20°C , 人体温度为 37°C 。

2.3 有限元模型的建立

主要定量考虑存在热效应时各应力随轴向位置变化的情况, 故可对受力模型进行一定程度的简化。假设假体、骨水泥、股骨为线弹性和各向同性的材料, 在置换后它们是同心圆柱体, 且完全结合。在上述假设下, 其他截面上的应力变化与此界面相同, 建立模型如图1所示。

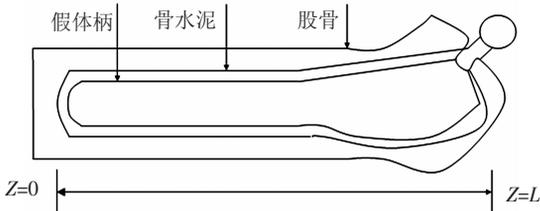


图1 髋关节置换界面示意图

假设假体的半径为 a , 骨水泥的半径为 b , 股骨的半径为 c , 假体柄的轴向与 z 轴相同, 假体嵌入股骨长度为 L , 嵌入端 $z = 0$, 加载端 $z = L$, 各参数值如表2所示。

表2 股骨假体置换参数^[13]

代号	a	b	c	L
半径(长度)/mm	5	10	17	150

在分析软件里建立模型并划分网格, 最终的受力模型如图2所示。

经划分网格后, 得到 3 618 个节点, 1 145 个单元, 图中的 A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示假体柄、骨水泥、股骨的横截面, 各界面通过布尔操作完全结合。根据圣维南原理, 作用于一点上的力, 可以均匀分散成较小的力作用于较多的点, 但其从整体上产生的力学效果是相同的。根据这一原理, 本研究将作用于股骨-假体系统的生理载荷施加在假体近端中点, 从而将力均匀地传递到假体上所有点。

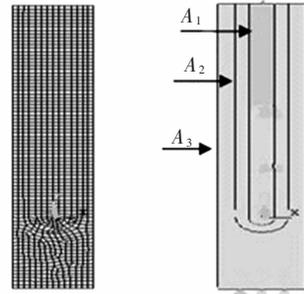


图2 髋关节受力模型

3 股骨假体热应力分析结果

分析软件的热-应力耦合功能包括直接耦合与间接耦合, 本研究采用间接耦合, 先对结构进行热分析, 然后将热分析所得到的节点温度作为“体载荷”施加到结构的节点上, 热单元采用 8 节点 PLANE77 单元, 结构单元采用 8 节点 PLANE82 单元。按照前述的边界条件和载荷对有限元模型加载求解, 分别求出了钴铬合金和钛合金两种材料作为假体柄时考虑热效应前后各应力随轴向位置的分布, 这些应力包括假体柄、骨水泥、股骨的轴向应力, 假体柄/骨水泥、骨水泥/股骨的界面剪切应力, 对以上各应力进行对比分析, 得出热效应对股骨-假体系统应力的影响, 为假体材料的选择提供参考。股骨-假体系统各应力随轴向位置的分布规律如图3~7(其中横坐标代表轴向位置, 纵坐标代表应力)。

图3为假体柄/骨水泥界面剪切应力 τ_p 随轴向位置 z 的分布情况。 τ_p 在假体远端最大, 迅速减小后保持相对稳定。远端界面的高应力加大了远端失效的可能; 在考虑热效应情况下, 远端失效趋势加剧, 文献[7]通过建模分析假体柄/骨水泥界面应力传递, 指出热效应对界面环向和径向应力影响较大, 这和本文的结果一致; 热应力的存在还加大了外载荷经过骨水泥传到股骨的应力, 一定程度上缓解了应力遮挡; 从图3可以看出, 钴铬合金假体材料产生的假体柄/骨水泥界面应力大于钛合金假体材料所产生的界面应力, 故钴铬合金材料假体更容易引起远端失效。

图4为的骨水泥/股骨界面剪切应力 τ_f 随轴向位置 z 的分布情况。 τ_f 分布与图3具有相似性,均是先从远端最大值减小到一定值然后保持相对稳定。从图4可以看出,热应力的存在在一定程度上加大了 τ_f ,尽管传递到股骨上的应力提高,但是加速了骨水泥/股骨界面的失效。所以,从骨水泥/股骨界面剪切应力分析,热效应具有加速远端失效的作用。文献[8]通过有限元建模方法得出:热应力较大时,骨水泥/股骨界面上的剪切破坏容易引发裂纹。这和本文结论是一致的。

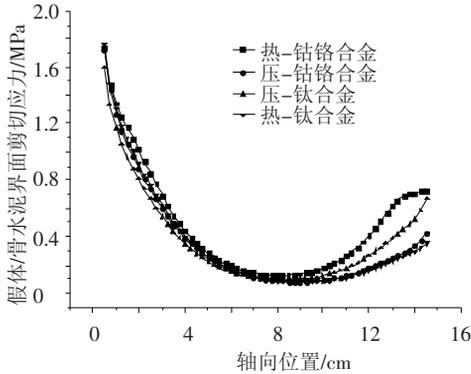


图3 假体柄/骨水泥界面剪切应力轴向分布

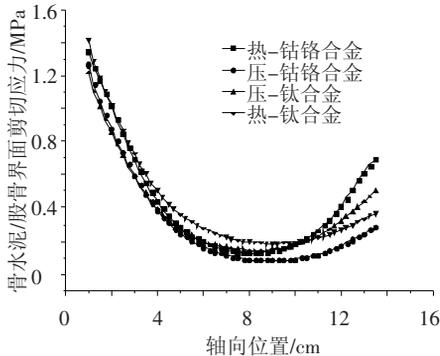


图4 骨水泥/股骨界面剪切应力轴向分布

从图3和图4可以看出,随着轴向位置的变化,假体柄/骨水泥与骨水泥/股骨界面应力分布规律相同,接触界面远端应力最大,最容易产生远端界面失效,热效应的存在,加大了界面应力,加速了界面失效,而且由于钛合金假体材料的热膨胀系数和弹性模量都比钴铬合金小,所以钛合金假体柄在一定程度上减小了界面失效的概率。

图5为假体柄分别为钛合金和钴铬合金材料的骨水泥轴向应力随轴向位置的分布情况。假体由室温(20℃)增加到体温(37℃),运用钴铬合金和钛合金所得的曲线几乎相同:在远端从最小快速增大到一定值后基本保持不变,在加载端增大到最大值。这是由于骨水泥材料(PMMA)拉伸或压缩强度一般在50~77MPa左右,从图5可以看出,在温差为-17℃时骨水泥平均轴向应力在5MPa左右,因此不会造成骨水泥本身的破坏,这

体现了用聚甲基丙烯酸甲酯作骨水泥材料的一大优点。

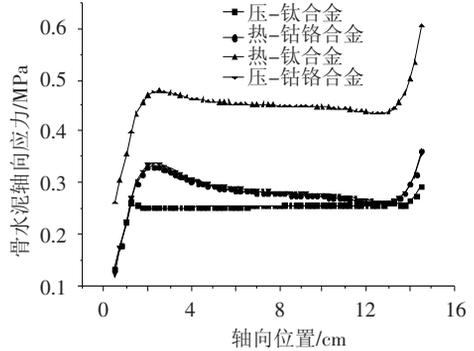


图5 骨水泥轴向应力分布

从图3~5可以看出,由于骨水泥具有比假体和股骨高得多的热膨胀系数,热效应的存在加速了假体柄/骨水泥、骨水泥/股骨界面的破坏,加速了远端失效。

图6为考虑热效应前后两种不同材料假体柄轴向应力随轴向位置的分布情况。对钛合金和钴铬合金两种假体材料,在考虑热效应前后,假体柄轴向应力分布规律都相同,都是在远端最小,快速增大后增幅减缓,在加载端应力值到达最大;置换后两种材料假体都承载了髋关节大部分应力,都导致了应力遮挡;在考虑热效应时,钴铬合金材料假体承载应力所受影响比钛合金材料假体大得多,这是因为钛合金的弹性模量和热膨胀系数都比钴铬合金的小,热效应的影响相对较弱。

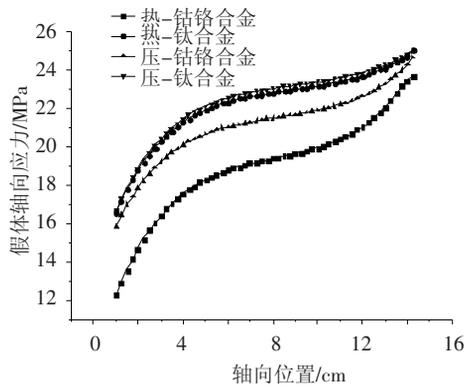


图6 假体柄轴向应力分布

图7为股骨平均轴向应力随轴向位置 z 的分布情况。可以看出,股骨平均轴向应力分布与假体柄轴向应力分布正好相反。因为股骨和假体共同分担应力,图6和图7的应力分布验证了分析的正确性。当不考虑热效应时,股骨所承载的应力约为假体柄相同情况下的30%,表明植入假体后,股骨轴向应力大大减小,产生了较大的应力遮挡;在考虑热效应时,从股骨轴向应力分析,热效应的存在对应力遮挡有所缓解,但效果不明显,这与图3和图4结果相符。

由图6和图7可以看出,髋关节置换后假体承担大部分载荷,股骨承担的载荷较置换前大大减小,导致应力遮挡,热效应存在时,相对于钛合金,钴铬合金具有更好的缓解应力遮挡的作用,但效果不明显.

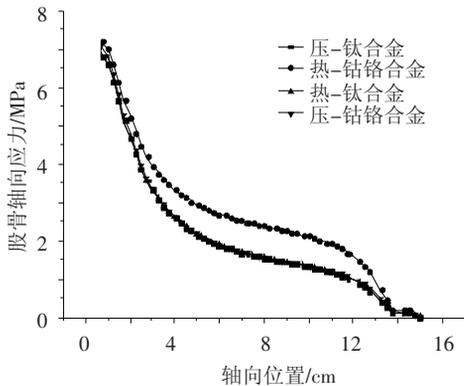


图7 股骨应力轴向分布

4 结 论

1) 热效应存在时,随着轴向位置的变化,两种假体材料在考虑热效应前后的假体柄/骨水泥与骨水泥/股骨界面应力分布规律相同,而假体、骨水泥、股骨的轴向应力分布规律不同.

2) 假体柄/骨水泥、骨水泥/股骨界面失效,特别是远端失效是髋关节置换后承受压力的主要失效形式,且在热应力作用下,界面容易产生混合而不是纯剪切的失效形式.

3) 由于骨水泥具有比假体高得多的热膨胀系数,热效应的存在加速了假体柄/骨水泥、骨水泥/股骨界面的破坏,加速了远端失效.

4) 当热效应存在时,由于钛合金假体材料的热膨胀系数和弹性模量都比钴铬合金小,所以钛合金假体柄在一定程度上缓解了界面失效.因此,在选择假体材料时,不但要考虑材料的刚度、弹性模量等对置换效果的影响,也要考虑材料热膨胀系数的影响.选择热膨胀系数小的假体材料,可以减小置换失效的可能.

参考文献:

[1] 吴淑玺,寇伯龙. 人工髋关节的选择[J]. 现代医药卫生,2004,20(1):24-25.

[2] 陈美雄,林业武. 复合材料人工骨在骨缺损修复中的应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2007,11(48):9797-9800.

[3] ZHAO L, LI Q, LIN L J, *et al.* Interface shear stress between the artificial bones and inject able calcium phosphate glue: Experimental study in rabbits[J]. Nanfang Yike Daxue Xuebao, 2009,29(1):78-81.

[4] TANG X J, GUI L, LU X Y. Hard tissue compatibility of natural hydroxyl apatite/chitosan composite [J]. Biomed Mater, 2008,3(4):44-45.

[5] OQUZ K. Fermi erzineanli-finite element modeling and analysis of a new cemented hip prosthesis[J]. Advances in Engineering Software, 2006,37(2):477-483.

[6] GE S R, WANG Q L, ZHANG D K, *et al.* Friction and wear behavior of nitrogen ion implanted UHMWPE against ZrO₂ ceramic [J]. Wear, 2003,255(7/8/9/10/11/12):1069.

[7] JOSHI M G, ADVANI S G, MILLER F S, *et al.* Analysis of a femoral hip prosthesis designed to reduce stress shielding[J]. Journal of Biomechanics,2000,33(12):1655-1662.

[8] LENNON A B, PRENDERGAST P J. Residual stress due to curing call initiate damage in porous bone cement experimental and theoretical evidence[J]. Journal of Biomechanics,2002,35(3):311-321.

[9] LIU P F, TAO W M, YU X Z, *et al.* Bridging proper types of the depended interface with frictional sliding [J]. Progress in Natural Science,2006,16(2):153-162.

[10] 张珂,陈文革,张玲. 铜-碳电接触摩擦材料的研究[J]. 机械工程材料,2005,29(1):43-45.

[11] 赵阳培,黄因慧,吴安德. 射流电铸快速成型技术研究[J]. 南京理工大学学报,2003,27(4):359-362.

[12] CHEAL E J, SPECTOR M, HAYES W C. Role of loads and prosthesis material properties on the mechanics of the proximal femur after total hip arthroplasty [J]. J Northrop Res,1992,10(3):405-422.

[13] NOUN N, AVANZOLINI G. Modelling depended stem-cement interface for hip implants effect of residual stresses[J]. Clinical Biomechanics,2002,17(1):41-48.

(编辑 杨波)