

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.07.003

股骨假体结构与材料性能分析及多目标优化

王沫楠^{1,2}, 李鹏程², 付宜利¹

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

2. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为依据患者个体信息获得优选的假体结构及假体材料, 利用患者 CT 体数据集提取股骨内外轮廓线, 并通过三维建模软件分别获得股骨和假体模型, 对股骨和假体进行虚拟装配, 通过力学计算得到最优股骨假体结构模型, 利用有限元分析方法获得股骨假体额定载荷、疲劳寿命、应力遮挡率、最大变形量, 依据模糊物元分析方法实现多目标优化设计, 最终获得最优球头和假体柄材料匹配模型. 将该方法应用于优选实例, 结果表明: 依据专门患者 CT 图像, 通过完整的优选流程后, 确定出最优假体结构为椭球形球头和定制式假体柄组合, 最优材料匹配方案为碳纤维增强的聚醚醚复合材料球头和锆钕合金材料假体柄匹配方案. 该方法为股骨假体的优选提供了有效参考.

关键词: 股骨假体; 优选方法; 模糊物元法; 有限元法; 多目标优化

中图分类号: TB12; R318.01

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)07-0020-07

Multi-objective optimization of femoral prosthesis based on analysis of structure and material properties

WANG Monan^{1,2}, LI Pengcheng², FU Yili¹

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

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

Abstract: The aim of this paper is to optimize femoral prosthesis structure and material based on special patient information. Firstly, femoral external and internal contour are extracted from CT data. Femur model and prosthesis model are got respectively and assembled by using 3D reconstruction software, and then the optimized prosthesis structure is developed based on biomechanical analysis results. Secondly, the prosthesis rated load, the life of prosthesis, stress shielding and deformation are determined by the finite element analysis results, and the optimized material matching model is developed based on multi-objective optimization results that are resolved by fuzzy matter-element method. Finally, this prosthesis design method is utilized to a special patient. The optimized structure for this patient is the spheroidic femoral head and individual prosthesis stem, and the optimized materials are the carbon fiber enhanced pek composite for femoral head and Zr-Nb alloy for prosthesis stem.

Keywords: femoral prosthesis; optimization method; fuzzy matter-element method; finite element method; multi-objective optimization

由于人体个体差异, 人体股骨的形状、大小都不相同, 尤其是骨骼先天性畸形的人群, 标准化假体已经不能满足各类人群对假体置换的要求, 已有医学

临床经验证明股骨假体使用寿命关键是要看股骨假体柄的形状是否与股骨上段髓腔形态结构达到良好的匹配, 因为良好的匹配可以减少应力集中, 从而达到长期使用的效果^[1]. 同时, 也有学者质疑人体的股骨头形状并不是球体, 而是蚶线绕中心轴旋转而成的蚶线球体^[2]. Afoke 等^[3]通过研究发现, 人体股骨头确实与标准球体有些偏差. 对此国内的一些专家也开始研究, 丁秀敏等^[4]对半球与椭球形状人工股骨头对髓臼应力分布进行对比分析, 得出结论是椭球形人工股骨头的应力分布更均匀. 目前, 常用

收稿日期: 2015-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61272387); 教育部新世纪优秀人才(NCET-13-0756); 机器人技术与系统国家重点实验室开放研究项目(SKLR-2014-ZD-02); 黑龙江省高校长江学者后备项目(2013CJHB007)

作者简介: 王沫楠(1973—), 女, 博士, 教授, 博士生导师;

付宜利(1966—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王沫楠, qqwmnan@163.com

的股骨假体材料有金属材料、生物陶瓷和复合材料3种,它们有各自不同的特点和临床效果^[5]。

综上所述,大部分研究是依据不同结构或不同材料假体模型的有限元分析结果,得到假体的载荷、变形量等单项指标评价情况。目前还没有将多目标评价方法应用于股骨假体优选研究。假体与人体组织的相容性和假体的稳定性都是由多种因素决定的,这些因素会对每一个评价指标产生复杂的影响,单目标的假体优选不能给患者提供最好的选择。

本文提出将股骨头与定制的假体柄分体设计并进行股骨假体结构优化,提出多目标优化方法优选材料匹配方案,利用有限元方法实现力学分析,利用模糊物元法实现股骨假体多目标优选,并基于以上思想确定出股骨假体优选流程,改善了依据单一目标进行股骨假体优选的研究现状。

1 股骨及假体结构建模

1.1 股骨内外轮廓线的提取

利用医学专用软件 MIMICS 导入多张 DICOM 格式的文件图像,本研究共导入 461 张 CT 图像,通过阈值设定、面罩编辑、区域增长、3D 计算、光顺处理和网格划分等步骤,最终得到股骨的内外轮廓线。

1.2 股骨假体柄结构设计

将 MIMICS 中提取的轮廓线导入 UG 中,然后分别对假体柄和球头进行建模。对假体柄进行建模时采用中心线多截面混合法,如图 1 所示。图 2 是混合扫描后得到的假体柄,股骨假体柄模型在干骺端进行横条纹处理,以增大假体与股骨的摩擦,增加假体的固定度,防止假体松动。在股骨干部分进行竖条纹处理,目的是防止假体转动,进而防止假体松动和微动。

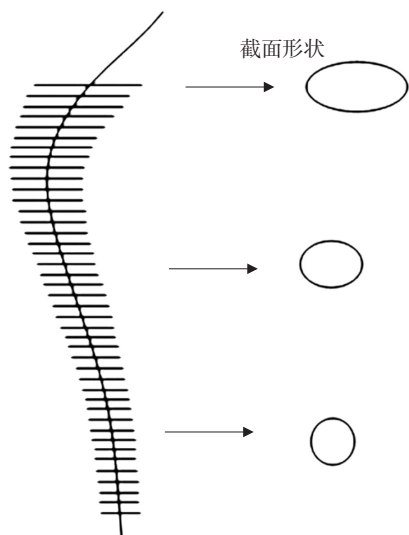


图 1 中心线及特定位置的截面形状

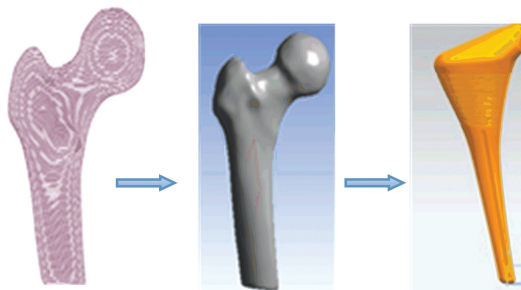


图 2 提取股骨轮廓线实现三维重建

1.3 球头结构设计

人工关节假体的稳定性另一影响因素为假体球头与髌臼的匹配状况。建立 3 种不同形状的股骨头,优化股骨头和髌臼的匹配形式。球状人工股骨头的直径为 26 mm,根据球状股骨头的尺寸,椭圆股骨头尺寸的长轴取为 26 mm,短轴为 24 mm;蜡线球体股骨头的尺寸是根据 Wenschik 计算的,蜡线球体由蜡线绕中轴线旋转而成,蜡线在柱坐标系下的几何公式为 $r = a + b \cos \Phi$, 其中 $a = 12.258$, $b = 14.235$ ^[6]。3 种形状股骨头在人体矢状面内投影均是圆形,在冠状面、横断面内分别是圆、椭圆和蜡线。

1.4 股骨模型与假体模型的装配

根据提取外轮廓线建立股骨模型,模型建好后,将股骨三维实体导入 UG 中,在 UG 中对股骨模型进行处理,完成股骨模型与假体模型的装配。

2 股骨假体材料性能对比

选择材料的原则为:首先在假体研制方面应尽量保证假体建模精度以及加工精度,避免出现应力集中现象;在材料选择方面说应该尽量优选出生物相容性好、抗磨性高的假体材料。本研究依据文献选取钴钎合金、氧化锆陶瓷、碳纤维增强的聚酯酮复合材料 3 种材料^[7],通过 3 种材料的组合,利用多目标优化手段优选出材料设计模型。

3 有限元模型的建立

将建好的模型导入 ANSYS 中,对球头与髌臼模型采用 8 节点 4 面体单元分别进行网格划分,球形球头与髌臼模型共划分为 11 046 个单元,椭圆球头与髌臼接触模型共划分为 12 428 个单元,蜡线球形球头与髌臼接触模型共划分为 10 033 个单元。将球头与髌臼之间的接触方式定义为面-面接触,根据接触准则可知,如果在面-面接触的两种材料中,一种材料的刚度大于另外一种材料,则应设定刚度较大的材料所在的面为标准面。由材料学知识可知钴钎合金刚度大于髌臼,因此,在此处接触设置时以球面为标准面,髌臼为接触面。接触方式为“标准接触”,摩擦系数 μ 取 0.1^[8]。

3.1 材料参数的设置和材料匹配方式

经性能优选,选出 3 种假体材料,分别为钴钨合金、氧化锆陶瓷、碳纤维增强的聚醚酮复合材料,3 种材料及股骨的性能参数^[9]见表 1.

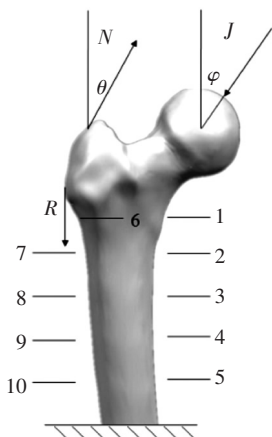
表 1 材料性能

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (g · cm ⁻³)	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa
股骨	16.9	0.26	1.202	124	170.0
钴钨合金	42.1	0.33	8.900	650	550.0
氧化锆陶瓷	190.0	0.31	5.890	2 800	1 200.0
碳纤维增强的 聚醚酮复合材料	23.0	0.30	2.010	550	307.9

对球头及假体柄分别进行材料优选,进而获取最优材料组合. 根据 3 种材料参数,分别对球头与假体柄进行赋材,其中包括:(A) 钴钨合金-钴钨合金,(B) 钴钨合金-氧化锆陶瓷,(C) 钴钨合金-碳纤维增强的聚醚酮复合材料,(D) 氧化锆陶瓷-钴钨合金,(E) 氧化锆陶瓷-氧化锆陶瓷,(F) 氧化锆陶瓷-碳纤维增强的聚醚酮复合材料,(G) 碳纤维增强的聚醚酮复合材料-钴钨合金,(H) 碳纤维增强的聚醚酮复合材料-氧化锆陶瓷,(I) 碳纤维增强的聚醚酮复合材料-碳纤维增强的聚醚酮复合材料.

3.2 载荷的构建

由于股骨载荷多变且方向不定,计算比较复杂,现将股骨受力进行简化,如图 3 所示. 状态 1 为静态受力,假设人体是单脚站立的负重状态;状态 2 为动态受力,假设人体是匀速行走状态^[10]. 状态 1 中髌臼对股骨的作用力 J 为 1 588 N,臀肌肌群力 N 为 1 039 N,髂肌束肌力 R 为 169 N. 状态 2 中的载荷为交变载荷,股骨在人体平面上的载荷范围^[11] J 为 684~1 588 N, N 为 586~1 039 N, R 为 0. 状态 2 中的载荷状态将在疲劳分析中加以考虑.



1~5 内测点,6~10 外测点

图 3 股骨 Y 方向受力简图及测点分布

4 评价指标及多目标优化

4.1 评价指标

1) 股骨假体额定载荷. 股骨假体在不发生破损下的最大载荷可以评价假体的承载性能:

$$\sigma_i(F) < P\sigma_{bi}.$$

式中: $\sigma_i(F)$ 为作用在股骨假体上的最大载荷应力值, σ_{bi} 为股骨假体屈服强度, P 为安全系数.

2) 股骨假体疲劳寿命. 变幅应力下寿命计算公式如下:

$$N = \lambda \sum_{i=1}^n n_i = \omega \sum_{i=1}^n n_i / \sum_{i=1}^n n_i / N_i.$$

式中: λ 为零件可以承受的载荷循环总周期数, ω 值为 0.68, n_i 为零件每次运行中的某一种循环的次数, N_i 为该循环的疲劳极限.

3) 股骨假体应力遮挡率. 在股骨的某一点的应力遮挡程度通常用应力遮挡率 η 表示,计算某一点应力遮挡率公式:

$$\eta = (1 - \sigma/\sigma_0) \times 100\%.$$

式中: σ_0 为假体未置换前股骨所承受的正常应力, σ 为假体置换后同一点股骨所承受的应力.

4) 股骨假体最大变形量. 股骨模型设置为弹性模型,由广义胡克定律形式的弹性变形方程计算股骨假体变形量.

4.2 股骨假体优选方法

由于评价股骨假体性能指标的多样化,不能以单一指标来衡量一个股骨假体的好坏,且各指标之间存在一定的模糊性和不相容性,故本研究采用模糊物元分析法实现股骨假体的多目标优化.

5 仿真分析及结果

5.1 优选球头结构的力学仿真

以钴钨合金为股骨假体材料,分别对球形球头、椭球形球头、蚶线球形球头进行力学仿真. 图 4(a)、(b)、(c) 是髌臼模型分别与 3 种不同形状股骨头匹配时其变形分布. 球形股骨头作用在髌臼模型上时,髌臼最大变形量发生在中心处,且随着半径的增大变形量减小,最大变形量为 0.037 mm; 椭球形股骨头作用在髌臼模型上时,最大变形量也发生在球心处,最大变形量为 0.025 mm; 而蚶线球形股骨头则不同,其对髌臼模型产生的最大变形量位置发生在偏离球心处,说明蚶线形股骨头与髌臼没有直接接触. 最大变形为 0.062 mm. 图 4(d)、(e)、(f) 显示相同载荷条件下 3 种球头的应力分布云图. 3 种形状球头的最大应力均出现在中心位置,且以中心为半径,随着半径的增大应力值逐渐减小,球形股骨头最

大应力为 10.25 MPa, 椭球形股骨头的最大应力为 5.39 MPa, 蜡线球体股骨头的最大应力值为 12.19 MPa. 对 3 种球头表面进行取点测量可知, 球形股骨头表面应力在 0.041 ~ 1.500 MPa, 椭球形股

骨头的表面应力为 0.025 ~ 0.920 MPa, 蜡线球形球头的表面应力为 0.057 ~ 2.040 MPa. 椭球形股骨头的中心的内外应力均比相同载荷条件下的其他两种球头值要小.

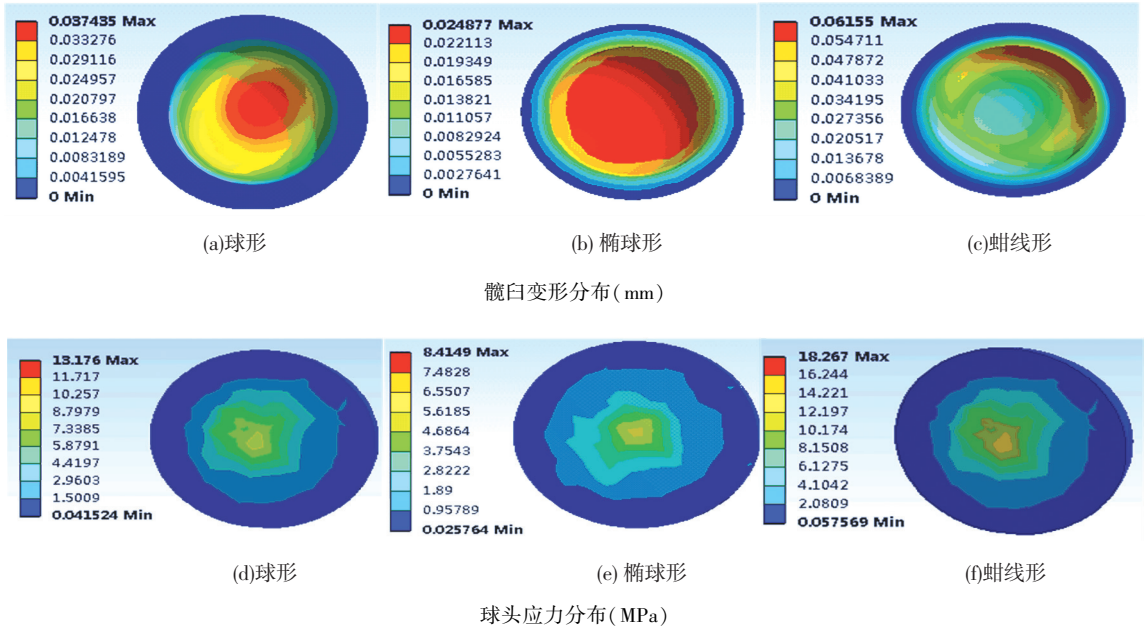


图 4 髋臼变形分布云图和球头应力分布云图

5.2 股骨假体应力遮挡率

由分析可知, 3 种球头结构中以椭球结构为最优, 因此可以确定股骨假体最终结构为椭球形球头+假体柄. 设定球头-假体柄 9 种材料匹配模型 (A) ~ (I), 进行有限元仿真, 按照图 3 所示测点提取结果绘制趋势图, 如图 5 所示.

由以上分析结果可知, 由于 A、D、G 假体柄材料、结构完全相同, 因此应力仿真结果一致, 同理可知 B、E、H 仿真结果相同, C、F、I 仿真结果相同. 根据应力遮挡率计算公式可以得出 3 种假体柄材料的应力遮挡率. 根据以上分析可以得出, C、F、I 模型假体柄所用的碳纤维增强的聚醚酮复合材料在载荷作用下对股骨产生的应力遮挡最小, B、E、H 模型假体柄所用的氧化锆陶瓷材料在载荷作用下对股骨产生的应力遮挡最大, 进而对股骨的损坏也最大.

同理, 分别对以上 9 种材料匹配方案进行有限元应力仿真, 结果如图 6 所示.

图 6 为 (A) ~ (I) 9 种材料匹配方案中假体柄及球头仿真应力分布云图, 由仿真结果可知, 9 种假体均无明显应力集中现象. 但从股骨假体应力分布云图中可以看出, 假体易发生应力集中的区域是股骨头与假体柄接触区域, 而当假体柄材料为碳纤维增强的聚醚酮复合材料时, 假体柄螺纹处应力集中现象相对其他材料明显, 因此可以得出复合材料不适合作为股骨假体柄材料, 但由应力遮挡率角度分析得出的结论恰恰与此矛盾, 因此需要引入疲劳寿命等指标做进一步分析为股骨假体优选做出判断.

5.3 股骨假体变形分析

除假体应力分析外, 其变形也是评价假体性能的一个重要指标, 提取股骨假体仿真变形分布云图,

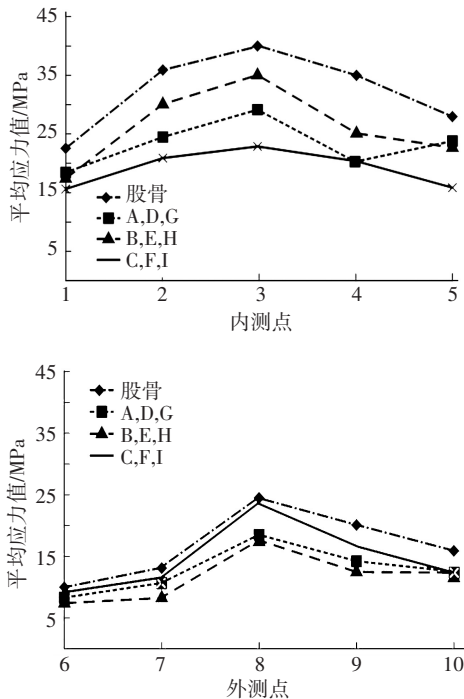


图 5 假体置换后股骨测点-应力趋势图

提取结果如图 7 所示。

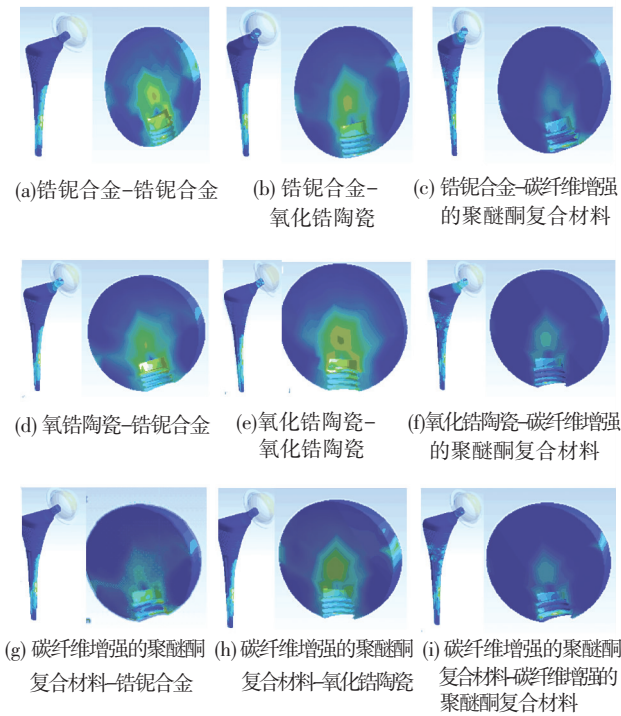


图 6 假体 ANSYS 仿真应力云图

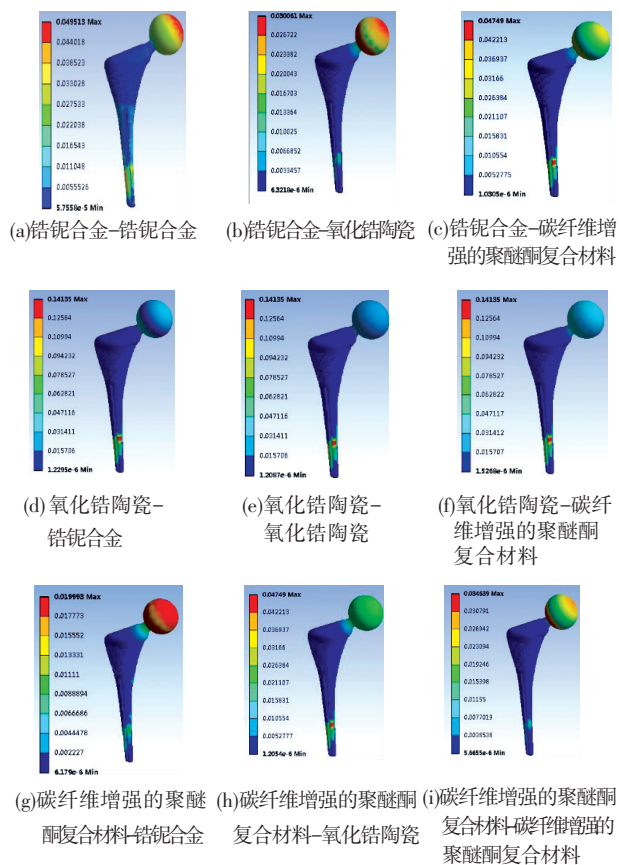


图 7 股骨假体 ANSYS 仿真变形云图 (mm)

由图 7 可知,选用不同材料的球头对股骨假体的变形有很大的影响,例如选用氧化铝陶瓷做球头,假体的变形量是所有模型中最大的.而选用碳纤维增强的聚醚酮复合材料做球头,假体的变形量相对比较小,模型(G)碳纤维增强的聚醚酮复合材料-钛铝合金股骨头变形分布均匀,且变形量是所有模型中最小的.通过股骨假体变形分析,球头最适用的材料为碳纤维增强的聚醚酮复合材料,最适用做假体柄的材料为钛铝合金.

5.4 股骨假体疲劳寿命分析

疲劳寿命分析结果中寿命分布图见图 8,安全系数分布图见图 9.

通过对股骨假体进行疲劳寿命分析,提取其寿命分析结果,可得出相同载荷条件下不同材料组合股骨假体模型的先后发生疲劳破损的一般顺序,疲劳寿命值从大到小依次为:模型 G、模型 H、模型 B、模型 A、模型 E、模型 D、模型 I、模型 C、模型 F.分析其原因是材料属性造成它们的疲劳寿命的巨大差异.提取疲劳寿命分析结果中的安全因子分布图,发现模型 I、模型 C、模型 F 的疲劳破损处安全因子更密集,由此也可推断出受力更集中,因此,相同载荷条件下螺纹处更易发生疲劳破坏.

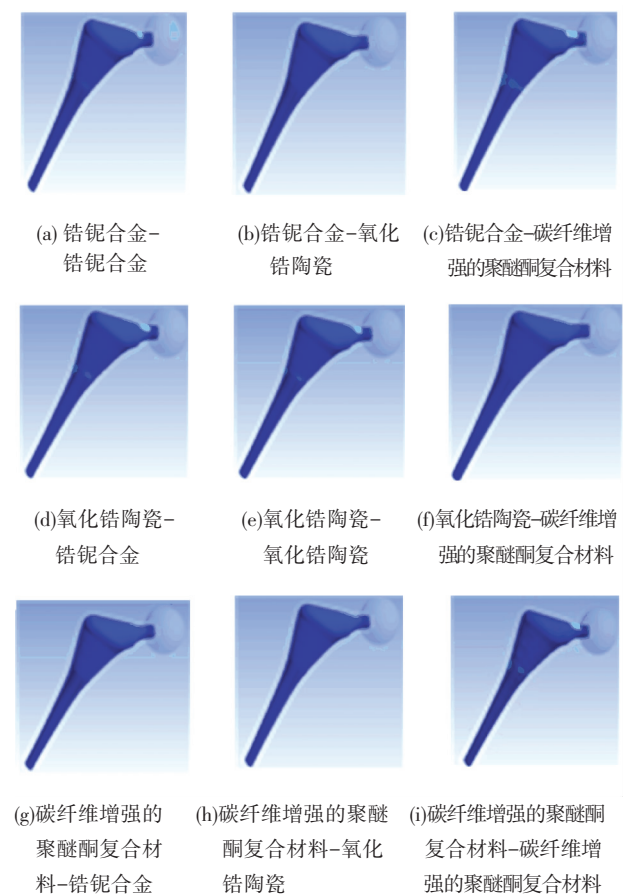


图 8 寿命分布

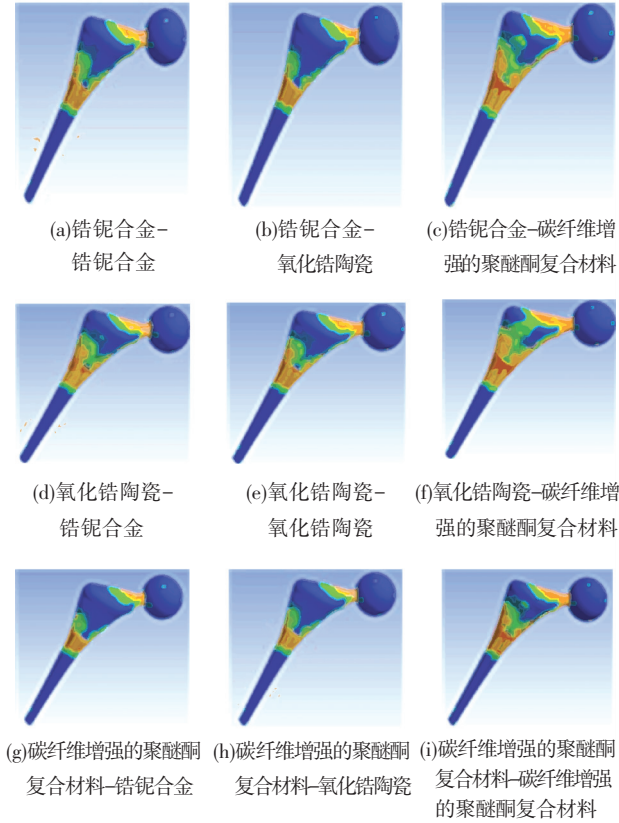


图 9 安全系数分布

5.5 股骨假体优选多目标优化结果

5.5.1 优化指标的计算

1) 股骨假体额定载荷 $N\sigma_{bi}$. 由于股骨假体由两种材料匹配而成, 因此当对两种材料组成的假体进行额定载荷计算时, 应以两种材料中屈服强度较低的材料为准进行计算. 安全系数 N 常用取值为 0.2. 根据表 2 中的屈服强度值可算出 9 种假体额定载荷.

表 2 各种材料匹配方案额定载荷 MPa

材料	屈服强度	额定载荷
A	550.0	110.00
B	550.0	110.00
C	307.9	61.58
D	550.0	110.00
E	1 200.0	240.00
F	307.9	61.58
G	307.9	61.58
H	307.9	61.58
I	307.9	61.58

2) 应力遮挡率根据 9 种股骨假体内外两侧应力平均值提取可以得出 9 种假体应力遮挡率, 如表 3 所示.

表 3 各种材料匹配方案应力遮挡率 %

材料	内侧遮挡率	外侧遮挡率	平均遮挡率
A	26.88	22.88	24.88
B	37.60	29.43	33.56
C	19.32	13.48	16.40
D	26.88	22.88	24.88
E	37.69	29.43	33.56
F	19.32	13.48	16.40
G	26.88	22.88	24.88
H	37.69	29.43	33.56
I	19.32	13.48	16.40

3) 最大变形量. 根据股骨假体变形仿真结果可以提取出仿真结果中假体最大变形量, 结果如表 4 所示.

表 4 假体仿真变形最大值统计 mm

材料	A	B	C	D	E	F	G	H	I
变形量	0.047	0.030	0.043	0.138	0.141	0.140	0.019	0.047	0.035

4) 疲劳寿命. 由疲劳分析仿真结果可知, 9 种假体疲劳寿命值均大于 3.24×10^7 , 因此 (A) - (I) 9 种材料匹配方案均可作为股骨假体优选中的备选方案来进行优化, 疲劳分析结果如表 5 所示.

表 5 各种材料匹配方案疲劳寿命

模型	A	B	C	D	E	F	G	H	I
循环次数/ $\times 10^8$	3.402	5.074	1.121	3.317	3.355	1.096	5.325	5.294	1.143

5.5.2 基于模糊物元方法的多目标优化

对 4 个特征进行赋值后, 采用模糊物元分析方法建立 9 个实验方案 4 种优化指标的股骨假体性能综合评价模型:

$$R = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{19} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{29} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{39} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & \cdots & x_{49} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $x_{11} \sim x_{19}$ 为股骨假体额定载荷评价指标值, $x_{21} \sim x_{29}$ 为股骨假体应力遮挡率评价指标值, $x_{31} \sim x_{39}$ 为股骨假体最大变形量评价指标值, $x_{41} \sim x_{49}$ 为股骨假体疲劳寿命评价指标值.

应力遮挡率和最大变形量评价指标的从优隶属度为额定载荷和疲劳寿命评价指标的从优隶属度.

$$\mu_{ij} = x_{ij\min}/x_{ij}, (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, \dots, 9), \quad (2)$$

$$\mu_{ij} = x_{ij}/x_{ij\max}, (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, \dots, 9), \quad (3)$$

$$\mu_{ij} = \xi_{ij}. \quad (4)$$

式中： μ_{ij} 为各评价指标隶属度， ξ_{ij} 为各评价指标关联系数。

关联系数矩阵为

$$R_{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} & \cdots & \xi_{19} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} & \cdots & \xi_{29} \\ \xi_{31} & \xi_{32} & \xi_{33} & \cdots & \xi_{39} \\ \xi_{41} & \xi_{42} & \xi_{43} & \cdots & \xi_{49} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

各特征的权重值以及建立评价指标权重矩阵为

$$\sum_{i=1}^4 \theta_i = 1, \quad (6)$$

$$W_i' = \sum_{i=1}^4 \xi_{ij} / \left(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^9 \xi_{ij} \right), \quad (7)$$

$$W_i = \theta_i W_i' / \left(\sum_{i=1}^4 \theta_i W_i' \right), \quad (8)$$

$$R_k = [0.692\ 7 \quad 0.745\ 4 \quad 0.433\ 6 \quad 0.510\ 4 \quad 0.668\ 1 \quad 0.580\ 7 \quad 0.867\ 8 \quad 0.702\ 3 \quad 0.587\ 5].$$

根据以上分析结果可以得出，(A)~(I)9种材料匹配方案中，G方案——碳纤维增强的聚醚酮复合材料-钴钎合金材料匹配方案为最佳方案。

6 结 论

1) 依据专门患者 CT 体数据集得出了椭球形球头组合定制式假体柄的最优结构设计。

2) 依据专门患者假体置换环境得出了碳纤维增强的聚醚酮复合材料球头-钴钎合金材料假体柄为最佳材料匹配方案。

参 考 文 献

[1] 赵光明. 人工全髋关节置换三维有限元建模及其在体生物力学研究[D]. 洛阳:河南科技大学, 2013.

[2] 李宏斌, 朱振安. 定制型人工髋关节的临床应用[J]. 国外医学骨科学分册, 2002, 23(3): 161-165.

[3] AFOKE N Y, BYERS P D, HUTTON W C. The incongruous hip joint a casting study [J]. Journal of Bone and Joint Surgery, 1980, 62(4): 511-514.

$$R_w = [W_1 \quad W_2 \quad W_3 \quad W_4]. \quad (9)$$

式中： θ_i 为主观权重， W_i' 为客观权重。

由式(5)与式(9)采用 $M(\cdot, +)$ 算子, 获取股骨假体复合模糊物元为

$$R_k = [K_1 = \sum_{j=1}^4 W_j \xi_{1j} \quad K_2 = \sum_{j=1}^4 W_j \xi_{2j} \cdots K_9 = \sum_{j=1}^4 W_j \xi_{9j}]. \quad (10)$$

根据以上仿真结果对比分析, 可知分析实例中更侧重于疲劳寿命和应力遮挡率两项指标, 因此, 取主观权重值 $\theta_1 = 0.10, \theta_2 = 0.30, \theta_3 = 0.20, \theta_4 = 0.40$, 由式(1)~(10), 带入4个评价指标特征值, 即可获得股骨假体模糊物元为

[4] 丁秀敏, 侯丽丽, 郭子学. 半球与椭球髋臼假体对骨性髋臼应力分布的对比分析[J]. 医用生物力学, 2008, 23(6): 465-471.

[5] 姚进. 不同材料髋关节假体在髋关节置换中的应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(7): 3196-3199.

[6] MENSCHIK F. The hip joint as a conchoid shape [J]. Journal of Biomechanics, 1997, 30(9): 971-973.

[7] PANCANTI A, BERNAKIEWICZ M, VICECONTI M. The primary stability of a cementless stem varies between subjects as much as between activities [J]. Journal of Biomechanics, 2011, 38(9): 777-785.

[8] 何荣新. 全髋关节置换前后股骨应力变化的三维有限元分析[J]. 中华医学杂志, 2012, 6(18): 1549-1552.

[9] NORMAN T L, THYAGARAJAN G. Stem surface roughness alters creep induced subsidence and taper-lock in a cemented femoral hip prosthesis [J]. Journal of Biomechanics, 2001: 1325-1333.

[10] 毛宾尧, 庞清江, 吕厚山, 等. 人工髋关节外科学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011.

[11] 王超. 无柄髋假体的设计方法研究及有限元分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

(编辑 杨 波)