

文章编号:1004-7220(2021)01-0092-05

利用有限元分析预警经阴道分娩瘢痕子宫破裂风险

马新刚¹, 于迎春¹, 孟颜颜², 贺磊²

(1.淄博市妇幼保健院 手术麻醉科, 山东 淄博 255000; 2.山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:目的 应用有限元法分析瘢痕子宫受力与瘢痕厚度及位置的关系,研究瘢痕子宫破裂风险因素。方法 首先基于孕期为40周孕妇产子尺寸应用SolidWorks建立瘢痕厚度和位置可变的子宫三维模型,然后在ANSYS软件中设置宫内压力,压力范围为4.83~23.9 kPa,计算子宫受力。结果 在宫缩过程中,最大应力位于子宫瘢痕处,瘢痕厚度低于3 mm子宫所受最大应力大于子宫抗拉强度;以3 mm作为子宫下体厚度界限,若测量厚度小于3 mm,子宫破裂应立即选择剖宫产,反之可以选择经阴分娩;当瘢痕厚度为3.0 mm时,子宫所受最大应力随着与子宫底距离的增加先减小后增大,在距离子宫底295 mm时子宫瘢痕处的应力最小;瘢痕距离子宫底为285~305 mm时,瘢痕所受极限应力小于其抗拉强度,选择顺产比较安全。结论 基于ANSYS有限元分析研究瘢痕子宫破裂风险因素,分析结果与临床资料相符,为临床中分娩方式的选择提供分析方法和理论指导。

关键词:瘢痕子宫; 瘢痕厚度; 切口位置; 破裂预警; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.015

Rupture Warning of Scar Uterus in Vaginal Delivery by Finite Element Analysis

MA Xingang¹, YU Yingchun¹, MENG Yanyan², HE Lei²(1. Department of Surgical Anaesthesia, Zibo Maternal and Child Health Hospital, Zibo 255000, Shandong, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China)

Abstract: **Objective** To analyze the relationship between scar uterine stress and scar thickness/position by using finite element method, so as to study risk factors of scar uterus rupture. **Methods** Firstly, SolidWorks was used to establish a three-dimensional (3D) model of the uterus with variable scar thickness and position based on uterine size of the pregnant woman at 40th week of gestation, and then the intrauterine pressure was set in the ANSYS software with pressure range of 4.83-23.9 kPa to calculate the uterine stress. **Results** During the contraction process, the maximum stress was located in uterine scar, the maximum stress on the uterus with scar thickness smaller than 3 mm was greater than tensile strength of the uterus; 3 mm was used as thickness limit of the lower uterine body. If the thickness was smaller than 3 mm, cesarean section should be selected immediately. Otherwise, transvaginal delivery could be selected. When the scar thickness was 3.0 mm, the maximum stress experienced by the uterus decreased at first and then increased with the distance from the uterine floor increasing. The stress at the uterine scar was the smallest when the distance from the uterine floor was 295 mm; when the scar was 285-305 mm from the uterine floor, the ultimate stress on the scar was smaller than its tensile strength, and it was safer to choose a vaginal delivery. **Conclusions** Risk factors of scar uterine rupture were studied based on ANSYS finite element analysis. The analysis results were consistent with the clinical data, which provided analysis method and theoretical guidance for the choice of delivery method in clinic.

Key words: scar uterus; scar thickness; incision position; rupture warning; finite element analysis

收稿日期:2020-03-31; 修回日期:2020-04-28

基金项目:淄博市科技发展计划项目(2016kj010029)

通信作者:于迎春,主任医师,E-mail:243699837@qq.com

既往判断瘢痕子宫能否经阴分娩主要通过超声监测子宫下段瘢痕处的形态与厚度,但子宫是否发生破裂,与子宫下段瘢痕组织结构和抗拉强度等力学特征的关系更加紧密。冯颖等^[1]通过超声监测瘢痕肌层变化情况发现,肌层厚度变薄是子宫瘢痕破裂的预警标志。林瑞玉等^[2]研究发现,对瘢痕子宫孕妇实施分娩镇痛能够提高经阴分娩率。针对瘢痕组织的抗拉强度研究发现,瘢痕的力学特征与剖宫产术后的年限无关,大多可以承受子宫内压^[3-6]。Naji等^[7]研究表明,子宫前壁下段厚度越大,子宫越不易破裂。Doshi等^[8]研究发现,瘢痕子宫经阴分娩的成功率为75%,对产妇和胎儿无不良影响。国家二胎政策推动了妇女再次妊娠的意愿,瘢痕子宫再次妊娠在条件具备的情况下完全可以顺产,顺产有利于胎儿出生后建立呼吸系统,且并发症较少^[9]。因此,孕妇选择顺产的意愿愈来愈多,然而并不是所有的瘢痕子宫都适合经阴分娩,会发生子宫破裂的情况。本文通过有限元法分析瘢痕子宫受力与瘢痕厚度及位置的关系,为瘢痕子宫破裂预警提供力学分析理论和方法,避免分娩方式选择的盲目性,研究结果对临床诊断具有重要的应用价值。

1 材料与方法

1.1 子宫三维几何模型建立

参考文献[10-11]中的建模方法,对子宫结构进行适当简化,建立近似椭球体的足月瘢痕子宫模型(见图1)。

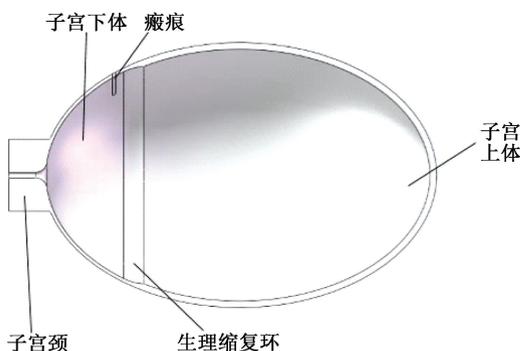


图1 足月子宫三维模型剖视图

Fig.1 Sectional view of 3D full-term uterus model

具体尺寸参数如下:子宫总体尺寸为350 mm×250 mm×220 mm,子宫颈长度为30 mm,生理缩腹

环宽度为80 mm,距离子宫底270 mm,子宫上体厚度为6 mm,子宫下体厚度为2~6 mm(参数化,厚度可调),瘢痕尺寸为100 mm×40 mm×(2~6) mm(参数化,厚度可调),距离子宫底为265~325 mm(参数化,距离可调)。

1.2 子宫三维有限元模型建立

1.2.1 材料特性 根据文献对子宫力学性质的研究^[12-14],设置子宫壁弹性模量为566 kPa,密度为1 052 kg/m³,泊松比为0.4;瘢痕组织弹性模量为1 379 kPa,密度为1 060 kg/m³,泊松比为0.4。

1.2.2 边界条件和载荷 子宫有限元模型网格划分类型为四面体SOLID45单元,对重点研究的瘢痕处精细划分为较密的网格,其他部分选择自由划分网格[见图2(a)]。在宫口处添加固定约束,模拟韧带对子宫运动的约束作用^[15][见图2(b)]。在分娩时,宫缩运动增强使子宫内压升高。Manoogian等^[16]研究发现,子宫组织的真实应力峰值为500 kPa,固定瘢痕位置与子宫底的距离为295 mm。改变瘢痕厚度,施加不同的子宫内压直至瘢痕处所受极限应力达到抗拉强度500 kPa,此时记录所施加的子宫内压;子宫横切剖宫产时,刀口位于子宫下段,固定瘢痕厚度为3 mm,改变瘢痕距离子宫底的位置,施加实际分娩时最大宫缩内压13.9 kPa,获得子宫应力图,并记录最大应力。

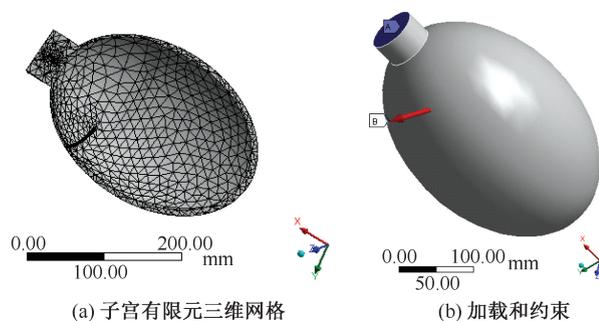


图2 子宫有限元网格划分和边界条件施加

Fig.2 Uterine finite element meshing and boundary condition application (a) 3D finite element meshes of the uterus, (b) Loading and boundary

2 结果

2.1 子宫破裂时内压临界值与瘢痕厚度关系

2.1.1 仿真分析结果 由子宫应力分布可知,瘢痕所受应力最大(见图3)。分析子宫破裂内压临界值

与瘢痕厚度的关系可知:厚度越大,内压临界值越大,子宫越不易破裂(见图4)。通过MATLAB拟合出子宫破裂时内压临界值与瘢痕厚度关系等式:

$$y = 0.730 3x^4 - 9.698x^3 + 41.92x^2 - 36.93x + 39.84 \quad (1)$$

式中: x 为瘢痕厚度, $1 \text{ mm} < x < 6 \text{ mm}$; y 为子宫内压临界值,单位是 mmHg ($1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$)。相关系数为 0.99。

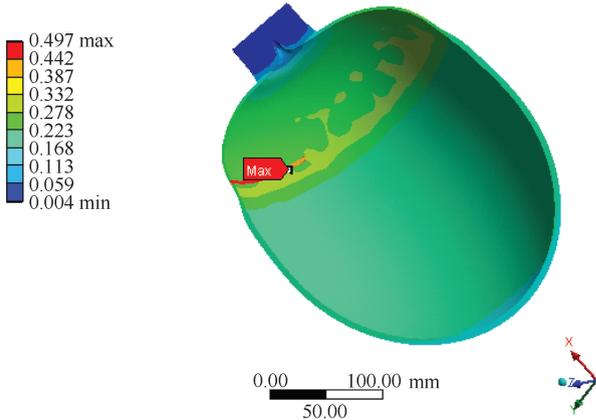


图3 瘢痕厚度为3 mm 子宫应力分布

Fig.3 Stress distributions of the uterus with scar thickness of 3 mm

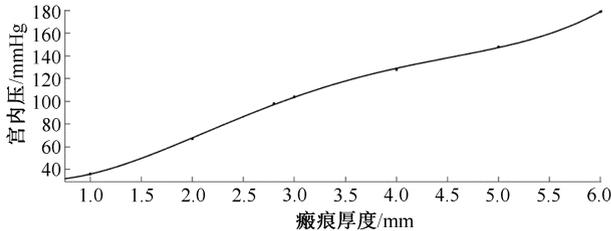


图4 子宫内压临界值与瘢痕厚度关系

Fig.4 Relationship between critical intrauterine pressure and scar thickness

由临床资料数据代入拟合等式(1)中得到子宫破裂内压临界值,若实际试产宫内压小于该临界值,子宫不会破裂,可以选择经阴分娩,否则行剖宫产术。

妇产科学临床资料显示,宫缩内压约为 100 mmHg 时,顺利娩出胎儿^[25]。表1显示瘢痕厚度 $\geq 3 \text{ mm}$ 时,施加的宫内压高于 100 mmHg ,瘢痕才会发生破裂,这种情况可以考虑经阴分娩;反之,瘢痕厚度 $< 3 \text{ mm}$ 时,应待足月行剖宫产术。以上分析结果与文献[17]的研究结果相符合。

2.1.2 仿真分析结果的验证 随机选取淄博市妇幼保健院瘢痕子宫孕妇20例(见表2)。其中,瘢痕

表1 宫内压与瘢痕厚度的关系

Tab.1 Relationship between intrauterine pressure and scar thickness

厚度/mm	宫内压/kPa	宫内压/mmHg
1	4.788	36
2	8.911	67
2.8	13.034	98
3	13.832	104
4	17.024	128
5	19.684	148
6	23.807	179

表2 孕例分娩情况

Tab.2 Pregnancy delivery

参数	瘢痕厚度/mm					
	2.8	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4
孕例	4	1	3	5	4	3
分娩方式	剖宫产	顺产	顺产	顺产	顺产	顺产

厚度 $< 3 \text{ mm}$ 的4个孕妇选择剖宫产;瘢痕厚度 $> 3 \text{ mm}$ 的16个孕例均成功经阴分娩,且整个分娩过程中最大宫内压为 100 mmHg 。

将上述临床资料数据带入拟合式(1)以验证仿真结果的正确性。由拟合等式(1)得,3.0、3.1、3.2、3.3、3.4 mm的不同瘢痕厚度对应子宫破裂时的临界宫内压分别为103、106、109、112、115 mmHg ,均大于实际分娩宫内压 100 mmHg ,故瘢痕子宫不会破裂,与实际临床结果符合,由此验证了仿真分析结果的正确性,对临床诊断具有实际的应用价值。

2.2 子宫所受最大应力与瘢痕位置关系

为研究瘢痕位置对子宫受力的影响,选取子宫下段厚度为 3 mm 三维几何模型,施加 100 mmHg 内压,改变瘢痕与子宫底的距离,得到子宫所受极限应力的变化情况,并拟合出子宫所受极限应力与瘢痕位置的关系等式:

$$y = 1760e^{-0.02942x} + 1.2 \times 10^{-8}e^{0.0555x} \quad (2)$$

式中: x 为瘢痕与子宫底的距离, $265 \text{ mm} < x < 325 \text{ mm}$; y 为子宫所受极限应力,单位为 MPa 。相关系数为 0.98。

图5分析结果显示,瘢痕处所受极限应力与瘢痕位置有关,子宫瘢痕处受到的最大应力随着与子宫底距离的增加先减小后增大。其中,距离子宫底 295 mm 时,子宫瘢痕处的应力最小。在厚度为 3 mm 瘢痕模型中,瘢痕距离子宫底为 $285 \sim 305 \text{ mm}$ 时,选择顺产比较安全,在其他范围时选择顺产并不安全。

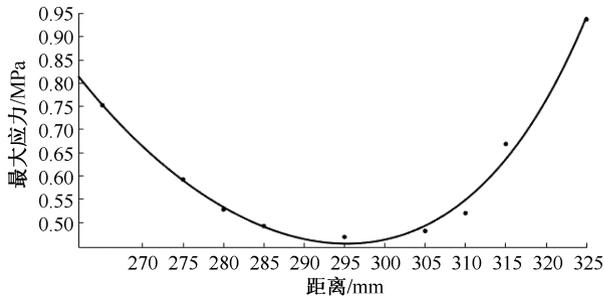


图5 子宫所受极限应力与瘢痕位置关系曲线

Fig.5 Relationship between the ultimate stress on the uterus and the scar location

3 讨论与结论

以往通过超声评估或者依据经验判断瘢痕子宫能否经阴分娩,力学研究方面的内容较少,但子宫是否发生破裂,与瘢痕厚度、瘢痕长度以及材料力学特性等密切相关。本文从力学角度出发,基于ANSYS仿真分析子宫破裂与瘢痕厚度及位置的关系。

(1) 研究瘢痕厚度对子宫破裂的影响。结果表明,在宫缩过程中,瘢痕厚度越小,子宫越易破裂。以3 mm作为子宫下体厚度的边界值,若测量厚度小于3 mm时,子宫易发生破裂,应行剖宫产术,反之可以选择经阴分娩。

(2) 研究瘢痕位置对子宫破裂的影响。结果表明,子宫受到的最大应力随着与子宫底距离的增加先减小后增大。其中,距离子宫底295 mm时,子宫瘢痕处的应力最小。在瘢痕厚度为3 mm三维模型中,瘢痕距离子宫底为285~305 mm时,瘢痕所受极限应力小于其抗拉强度,子宫不会发生破裂,选择顺产是比较安全的;反之,在其他范围时,瘢痕所受极限应力大于其抗拉强度,子宫易发生破裂,选择顺产并不安全。因此,初次分娩选择剖宫产时,应在顺利分娩的条件下尽量选择合适的切口位置,以降低瘢痕子宫再次妊娠选择经阴分娩时子宫破裂的风险。

综上所述,子宫瘢痕处的受力情况不仅与子宫下体厚度有关,还受到瘢痕位置的影响,以往将子宫下体厚度3 mm作为分娩方式选择的分界点并不准确。本文为判断能否选择经阴分娩提供了有效的新方法,虽然该模型中的材料属性和载荷使用近似值,但分析结果与临床资料相符,对临床诊断具有重要的应用价值。将来的研究期望应用更加合

适的材料(例如用非线性材料进行代替),以得到更精确的仿真结果。

参考文献:

- [1] 冯颖,李坚,段华,等. 剖宫产再孕的妇女孕期B超监测下剖宫产瘢痕形态学改变[J].中国医学创新,2013,10(23):8-10.
- [2] 林瑞玉,蔡宇新,李燕梅. 瘢痕子宫阴道分娩硬膜外阻滞分娩镇痛的可行性研究[J].吉林医学,2015,5(10):410-411.
- [3] 谷郁婷,张晶,关怀. 剖宫产术后不同时期子宫瘢痕愈合的临床观察及其与胶原表达水平的关系[J].中国医学创新,2015,44(9):118-120.
- [4] 王彩霞,郭培奋,胡晴丽. 剖宫产术后不同年限子宫瘢痕的组织学与力学特征观察[J].武警医学,2015,29(9):900-903.
- [5] 郭培奋,刘芳,王彩霞. 子宫壁的力学特性及调节机制[J].分子影像学杂志,2016,39(2):183-185.
- [6] 宋红芳,马乐,雷玲玲. 兔子宫壁组织力学特性的实验研究[J].北京生物医学工程,2007,26(5):517-520.
- [7] NAJI O, ABDALLAH Y, VAATE AJB. Standardized approach for imaging and measuring Cesarean section scars using ultrasonography [J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2012, 39(3): 252-259.
- [8] DOSHI HU, JAIN RK, VAZIRANI AA, et al. Prognostic factors for successful vaginal birth after cesarean section: Analysis of 162 cases [J]. Obstet Gynaecol India, 2010, 60(6): 498-502.
- [9] 王红,李珊. 早发型与晚发型新生儿败血症临床比较[J].郑州大学学报(医学版),2015,50(2):283-285.
- [10] 葛安娜. 孕妇乘员计算机模型的建立及其保护措施的研究[D].长沙:湖南大学,2006.
- [11] 曹立波,肖开艳,肖慧青. 新型孕妇安全带的保护性能研究[J].中国机械工程,2010,21(15):1879-1884.
- [12] WOOD C. Physiology of uterine contractions [J]. Brit J Obstet Gynaec, 1964, 71(9): 360-373.
- [13] DUCK FA. Physical properties of tissue [M]. London: Academic Press, 1990.
- [14] 冯西桥,曹艳平,赵红平,等. 生物材料力学研究新进展[J].医用生物力学,2011,26(5):395-401.
- [15] FENG XQ, CAO YP, ZHAO HP, et al. Recent developments in mechanics of biological materials; A brief review [J]. J Med Biomech, 2011, 26(5): 395-401.
- [16] 陈倩倩. 子宫附属韧带维持子宫正常位置的有限元仿真研究[D].上海:复旦大学,2014.
- [17] MANOOGIAN S, BISPLINGHOFF. Dynamic material properties of the pregnant human uterus [J]. J Biomech, 2012, 45(9): 1724-1727.
- [18] 贾利英,孟文颖,马海会,等. 妊娠期子宫破裂的临床分析[J].中华医学杂志,2013,93(33):2674-2676.