

Study on the Protective Method for Pregnant Occupant

Libo Cao¹, Huiqing Xiao²

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, China, 410082

Email: ¹hdclb@163.com, ²xhq114@163.com

Abstract: Based on the analysis of abdominal anatomy of pregnant female and injury mechanism of fetus, protective system for pregnant passengers was investigated, an enwrapped pregnant safety belt with leg belt was presented. Pregnant occupant model and safety belt model were developed by using the pregnant model with gestational age of 30-weeks validated, pregnant passenger with enwrapped pregnant safety belt and without enwrapped pregnant safety belt simulations at different frontal impact speed were conducted. According to the results, enwrapped pregnant safety belt combined with the traditional 3-pt belt can protect the mother effectively, at the same time, relative motion of uterus was reduced, and then the strain at UPI and the possibility of placental abruption were decreased significantly, the fetus was better protected.

Keywords: frontal impact; pregnant occupant; uterine strain; pregnant safety belt

孕妇乘员保护措施研究

曹立波¹, 肖慧青²

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙, 中国, 410082

Email: ¹hdclb@163.com, ²xhq114@163.com

摘要: 在对孕妇产道解剖学结构和胎儿损伤机理进行分析的基础上, 对孕妇乘员的保护措施进行了研究, 提出了一种结合传统三点式安全带使用的带有腿带的包裹式孕妇安全带。利用已经过有效验证的怀孕30周的孕妇乘员模型, 建立了孕妇模型和安全带有限元模型, 在不同的正面碰撞车速下, 对孕妇乘员有无佩戴包裹式孕妇安全带进行了仿真对比分析。仿真结果表明, 包裹式孕妇安全带与传统三点式安全带结合使用, 不仅能实现对母体的有效保护, 还能减小子宫相对运动, 从而有效减小UPI处应变, 降低孕妇乘员胎盘早剥的可能性, 更好地保护胎儿。

关键词: 正面碰撞; 孕妇乘员; 子宫应变; 孕妇安全带

1 引言

据国外的统计资料显示, 交通事故和犯罪是造成处于生育年龄女性死亡及胎儿伤亡的主要原因^[1]。根据交通事故数据和出生率统计, 在美国约有6~7%孕妇在孕期受外伤, 而其中约2/3发生在交通事故中, 然而相关的统计数据在中国还没有。

世界各国对普通乘客及儿童乘客的保护措施研究都已经取得了很大的成功, 但对孕妇这一特殊群体的保护研究还处于起步阶段。这主要是由于孕妇这一群体的生理结构特殊性、损伤形式复杂性以及事故数据局限性等, 加上目前难以进行孕妇尸体实验, 所以对于事故中胎儿损伤的预测和研究的难度大大增加。在上世纪60年代末70年代初, 国外的研究学者就在怀孕的狒狒和猴子身上进行了安全带作用的测试研究^[2-4], 开始了最初的对孕妇安全的研究; 2001年Rupp et al.曾建立简化的计算机模型以研究汽车碰撞中孕妇

腹部的响应^[5]; 2003年Moorcroft et al. 建立孕妇乘员计算机模型来研究不同约束条件下孕妇损伤风险^[6]; 2006年B.S. Acar建立了孕期38周的MADYMO孕妇模型^[7]。日本Dokkyo医科大学曾用怀孕30周的5百分位女性机械孕妇假人分析碰撞过程中孕妇腹部压力^[8]。国内关于孕妇乘员保护研究起步于2007年, 湖南大学针对孕妇乘员保护提出了一系列的保护措施^[9]。

由于目前国外关于孕妇保护的研究主要针对的是驾驶员侧, 而中国妇女怀孕后一般不会自己开车, 因此, 本文主要研究正面碰撞过程中如何对前排乘员侧孕妇实现有效的保护。

2 孕妇产道解剖学结构及胎儿损伤机理

2.1 孕妇产道解剖学结构

孕妇腹腔在怀孕30周时基本被子宫所占据, 是胎儿发育及成长部位, 故需对子宫的解剖结构、作用特

点进行深入了解。足月的孕妇腹部子宫解剖学结构见图1。成年女性子宫位于盆腔中央，膀胱与直肠之间，子宫底位于小骨盆入口平面以下，朝向前上方，子宫颈的下端在坐骨棘平面的稍上方。子宫主要包括胎儿及其附属物（胎盘、胎膜、脐带和羊水），其主要依靠子宫韧带与人体连接^[10]。胎盘通过指状凸出的绒毛来实现和子宫的连接。据统计，在妊娠的后三个月，80%的胎盘位于宫底^[11]。

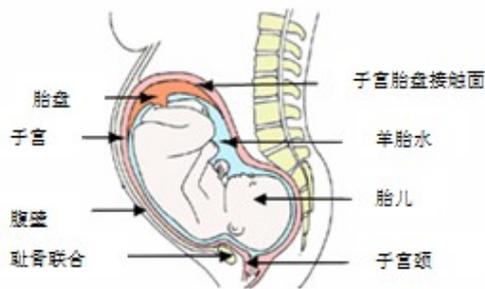


Figure 1. Anatomy of pregnant abdomen
图1. 孕妇腹部子宫解剖图

2.2 胎儿损伤机理

对孕妇除了研究母体的损伤准则，对于整个子宫的损伤机理的研究也是至关重要的。在汽车碰撞事故中导致胎儿受伤或死亡的孕妇损伤类型包括：胎盘早剥(Placental abruption)、子宫破裂(Uterine rupture，指子宫体部或子宫下段于妊娠期发生破裂)、直接的胎儿受伤和母体死亡^[12]。胎盘早剥最常发生，据统计约占汽车碰撞事故中胎儿死亡原因的50%~70%^[13]。

胎盘与子宫接触面UPI(Uterus Placental Interface)是子宫最薄弱的部分。Ashton-Miller et al.曾对胎盘、子宫和完整无损的UPI进行了准静态测试，以此来研究UPI的失效准则。研究数据显示，当UPI处子宫壁应变达到60%时，UPI失效，从而造成胎盘早剥^[14]。

在正面碰撞过程中，导致乘员侧孕妇UPI失效以致胎盘早剥的原因主要有以下几个：

(1) 乘员侧孕妇由于不受转向盘等部件影响，故腹部主要受惯性力作用向前运动，导致羊胎水和胎儿的惯性引起的压力梯度作用于UPI上，使UPI承受拉力负载而失效。

(2) 在碰撞过程中佩戴传统三点式安全带，腰带易沿着腹部上移，腹部在承受直接负载的情况下引起子宫局部弯曲变形导致UPI失效。

此外，胎儿头部也可能因与母体骨盆等较硬的结

构碰撞而受到直接的损伤，但这种损伤是不能完全预测及避免的。

3 孕妇模型建立

利用CATIA建立了孕期为30周的子宫模型，并用Hypermesh对其进行了网格划分，孕妇子宫模型的详细尺寸和材料特性参数根据湖南大学2010年建立的孕妇子宫模型来进行定义^[15]。将建立的子宫有限元模型导入MADYMO人体库中5百分位女性人体模型腹部，根据孕妇腹部解剖学结构确定子宫相对于骨盆的位置，定义子宫与骨盆的接触，并将子宫韧带靠近子宫壁一端的节点与子宫壁上对应的节点通过CONSTRAINT约束，限制其在X、Y、Z方向的自由度；韧带另一端的节点通过SUPPORT与骨盆对应节点连接，以实现子宫与人体的连接、固定。子宫在模型中定位后见图2。

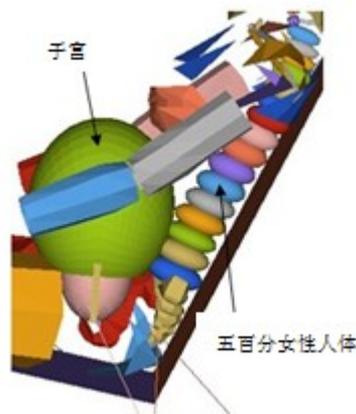


Figure 2. Uterine position
图2. 子宫定位后

Table 1. Definition of contact pair for pregnant model
表1. 孕妇模型各接触对定义

接触对	主面	从面	接触特性
1	子宫	羊胎水	CONTACT.FORCE_CHAR
2	胎盘	羊胎水	CONTACT.FORCE_CHAR
3	子宫	脂肪	CONTACT.FORCE_CHAR
4	皮肤	脂肪	CONTACT.FORCE_CHAR
5	骨盆	子宫	CONTACT.FORCE_CHAR
6	子宫	韧带	CONTACT.FORCE_CHAR
7	皮肤	韧带	CONTACT.FORCE_CHAR
8	脊柱(MB)	脂肪	CONTACT.FORCE_KINEMATIC

孕妇模型自身各结构之间的接触包含有限元之间的接触和有限元与多体之间的接触，孕妇模型各接触对定义见表1。

本文所建立的怀孕30周孕妇仿真模型，已经经过了刚性冲击器腹部响应实验和安全带负载下腹部响应实验的有效验证^[13]，具有较高的仿真度，可用于进一步的仿真研究。

4 包裹式孕妇安全带模型建立

带腿带的包裹式孕妇安全带正视图和侧视图分别如图3、图4所示。用Hypermesh对所建的包裹式孕妇安全带模型进行网格划分，并将其导入已建孕妇MADYMO模型中。

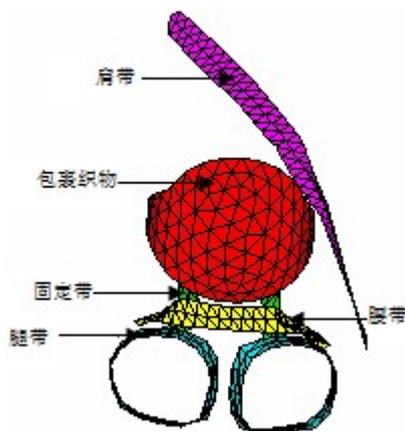


Figure 3. Frontal view of enwrapped pregnant safety belt
图3. 包裹式孕妇安全带正视图

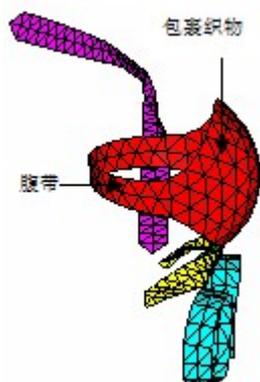


Figure 4. Lateral view of enwrapped pregnant safety belt
图4. 包裹式孕妇安全带侧视图

包裹式孕妇安全带中间包裹织物通过固定带与腰带相连包裹腹部，并通过腹带系于腰后，有利于减小前碰撞中胎儿与子宫的相对运动，降低胎盘早剥的可能性。腰带通过固定带与腿带相连，其目的是为了防止在碰撞过程中腰带上移，从而使腹部承受直接负载，造成UPI失效。由于不同女性其胖瘦程度不同，故腹

带设计比较长，可以根据自身体型调整系于腰部，且不与三点式安全带产生干涉，方便、简单。

5 仿真

5.1 模型定位

根据国内某量产车型建立了正面碰撞仿真模型，该模型包括座椅、地板、内饰、安全带和孕妇，没有建立安全气囊模型是由于本文主要考虑惯性对乘员侧孕妇的影响。调整孕妇模型位置，定位后的孕妇在没有佩戴包裹式孕妇安全带和佩戴包裹式孕妇安全带两种情况下的正面碰撞仿真模型分别如图5、图6所示。

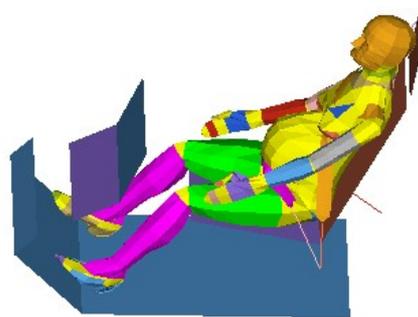


Figure 5. Pregnant model without enwrapped pregnant safety belt
图5. 无包裹式孕妇安全带模型

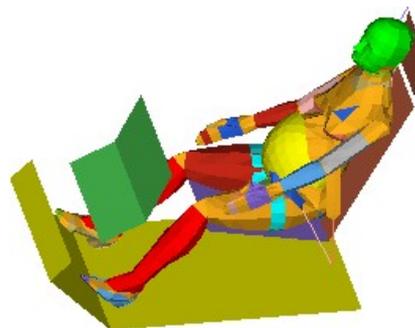


Figure 6. Pregnant model with enwrapped pregnant safety belt
图6. 有包裹式孕妇安全带模型

5.2 仿真结果对比分析

在佩戴包裹式孕妇安全带和没有佩戴包裹式孕妇安全带两种情况下对孕妇模型进行了碰撞车速分别为20km/h、30km/h、40km/h、50km/h的正面碰撞仿真，如表2所示。

图7、图8、图9、图10是有无包裹式孕妇安全带在正面碰撞车速分别为20km/h、30km/h、40km/h、50km/h时孕妇UPI处子宫壁应变随时间变化曲线。从图7中可

可以看出，由于碰撞车速比较小，碰撞过程中子宫向前的相对运动比较小，从而羊胎水和胎儿的惯性引起的压力梯度导致子宫上的应变很小，UPI处子宫壁应变随时间变化曲线在没有使用包裹式孕妇安全带与使用包裹式孕妇安全带的情况下的走势基本一致，且子宫壁应变值都小于60%。但是使用包裹式孕妇安全带相对于没有使用包裹式孕妇安全带时的孕妇产子宫壁应变值略有减小。从图8可知，没有使用包裹式孕妇安全带的孕妇产UPI处子宫壁应变值在约58ms 时最大，为54.34%，比相同车速下使用包裹式孕妇安全带的孕妇产子宫壁处应变值41.8%大约13%。而对比分析图9和图10，没有使用包裹式孕妇安全带的孕妇产UPI处子宫壁应变值分别在约68ms和57ms时刻出现最大值，为65.12%和68.6%，均超过UPI失效值60%；使用包裹式孕妇安全带的孕妇产UPI处子宫壁应变峰值在这两种碰撞车速下分别为44.74%和52.03%，出现时刻约为47ms和52ms，峰值时刻比没有使用包裹式孕妇安全带均有所提前，UPI处子宫壁应变峰值均小于没有使用包裹式孕妇安全带时的相应值，且都在UPI失效值60%范围之内。

Table 2. Matrix of simulations
表2. 仿真分组

碰撞车速 (km/h)	仿真序号	有无佩戴包裹式孕妇安全带
20	仿真一	无
	仿真二	有
30	仿真三	无
	仿真四	有
40	仿真五	无
	仿真六	有
50	仿真七	无
	仿真八	有

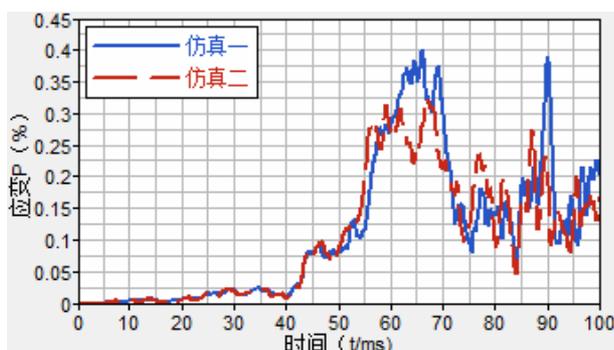


Figure 7. Strain of uterine wall at speed of 20km/h
图7. V=20km/h UPI处子宫壁应变曲线

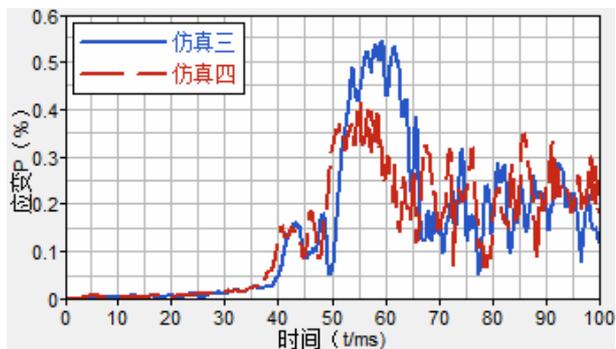


Figure 8. Strain of uterine wall at speed of 30km/h
图8. V=30km/h UPI处子宫壁应变曲线

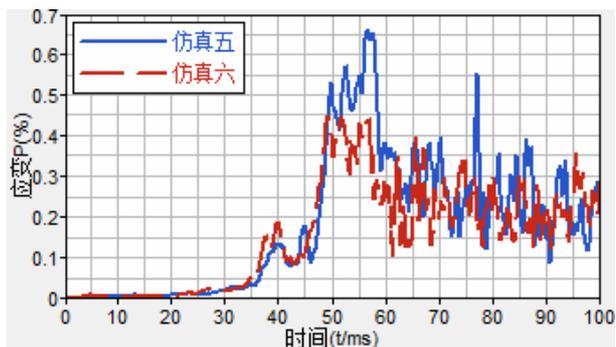


Figure 9. Strain of uterine wall at speed of 40km/h
图9. V=40km/h UPI处子宫壁应变曲线

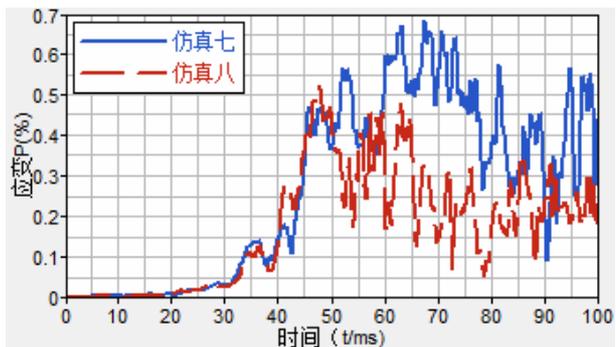
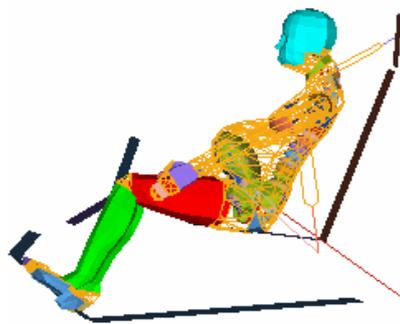


Figure 10. Strain of uterine wall at speed of 50km/h
图10. V=50 km/h UPI处子宫壁应变曲线

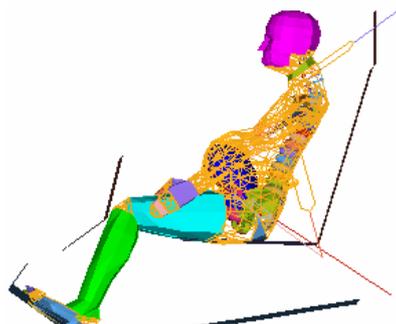
由以上对比分析知，UPI处子宫壁应变在V=20km/h、两类约束类型时值都比较小，但没有使用包裹式孕妇安全带的孕妇产UPI处子宫壁应变值在V=30km/h、V=40km/h和V=50km/h时都比较大，使用包裹式孕妇安全带孕妇产在V=30km/h、V=40km/h和V=50km/h时应变峰值时刻分别约为52ms、47ms和52ms，这三个时刻下两类不同约束模型在V=30km/h、V=40km/h和V=50km/h时的孕妇产运动姿态对比图分别如图11、图12、图13所示。



无包裹式孕妇安全带



无包裹式孕妇安全带



有包裹式孕妇安全带



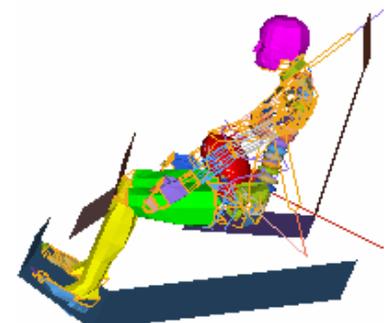
有包裹式孕妇安全带

Figure 11. Kinetic status during 30kph impact at 52ms
图11. V=30km/h t=52ms运动姿态对比图

Figure 13. Kinetic status during 50kph impact at 52ms
图13. V=50km/h t=52ms运动姿态对比图



无包裹式孕妇安全带



有包裹式孕妇安全带

Figure 12. Kinetic status during 40kph impact at 47ms
图12. V=40km/h t=47ms运动姿态对比图

分析图11、图12和图13孕妇运动姿态对比图可知，同一时刻，使用包裹式孕妇安全带的子宫变形量小于没有使用包裹式孕妇安全带。

本文根据仿真结果得出了孕妇假人基本损伤参数及UPI处子宫壁最大应变值，如表3所示。

对表3进行分析，UPI处子宫壁最大应变值随着车速的增加也在不断增大，且在使用包裹式孕妇安全带情况下，所有UPI处子宫壁最大应变值均小于UPI失效值60%，而没有使用包裹式孕妇安全带的孕妇UPI处子宫壁最大应变值在碰撞车速V=30 km/h时比使用包裹式孕妇安全带在车速V=50 km/h时的UPI处子宫壁最大应变值52.03%大约2%，且在碰撞车速V=40 km/h时就已超过60%。这主要是由于传统三点式安全带只能限制孕妇胸腔和骨盆的运动，可以对孕妇母体起到很好的保护作用，但是不能限制孕妇腹部的运动。在正面碰撞过程中，孕妇由于惯性作用向前运动，胎儿在母体内也向前运动，导致羊胎水和胎儿的惯性引起的压力梯度作用于UPI上，使UPI失效。而带腿带的包裹式孕妇安全带不仅防止了碰撞中腰带上移造成对腹部的直接负载，还在一定范围内限制了胎儿在母体内的自由运动，减小子宫的相对变形，大大降低了羊胎水

和胎儿惯性所引起的压力梯度,显著减小了UPI处子宫壁最大应变值,降低了胎盘早剥的可能性,对胎儿起到了很好的保护作用。

Table 3. Injury parameters of pregnant dummy
表3. 孕妇假人损伤参数

仿真序号	最大应变值	HIC36	VC(m/s)	胸部压缩量 (mm)
仿真一	40.06%	19.6	0.12	31.25
仿真二	32.4%	18.66	0.09	25.71
仿真三	54.34%	78.2	0.23	36.8
仿真四	41.8%	64.2	0.186	34.14
仿真五	65.12%	287.54	0.33	43.32
仿真六	44.74%	201.83	0.26	41.2
仿真七	68.6%	394.42	0.447	54.28
仿真八	52.03%	296.71	0.417	52.14

由表3同样可知,同一类型约束条件下,车速增加,HIC值、VC值和胸部压缩量也在不断增加。但是所有数值都远小于我国CMVDR294和EEVC规定值(HIC < 1000,胸部粘性指标VC < 1m/s,胸部压缩量 ≤ 75mm)。

6 结论

通过以上对比分析可知,使用了包裹式孕妇安全带的孕妇假人的基本损伤参数值比没有使用包裹式孕妇安全带要低。证明不论是传统三点式安全带还是包裹式孕妇安全带都能对孕妇起到很好的保护作用,但传统三点式安全带不能对胎儿起保护作用,而包裹式孕妇安全带不仅保护胎儿,还加强了传统三点式安全带对孕妇的保护作用。

由于目前关于孕妇损伤的评价标准和损伤机理有限,且对于子宫模型的定义比较粗糙,针对的只是怀孕30周的乘员侧孕妇模型,故本文所设计的包裹式孕妇安全带对孕妇乘员的保护效果需要更高仿真度的、不同怀孕周期的、不同座椅位置乘员的孕妇模型来进一步进行验证。

References (参考文献)

- [1] The eleventh global meeting agenda of overall planning during 2006-2015, W.H.O, 2006.
2006-2015 年第十一个工作总体规划全球会议议程.世界卫生组织, 2006.
- [2] Snyder RG, Snow CC, Crosby WM, Hanson P, Fineg J, Chandler R. Impact injury to the pregnant female and fetus in lap belt restraint. Proceedings of the 10th International Stapp Car Crash Conference, 1966, 249:259
- [3] Crosby WM, Snyder RG, Snow CC, Hanson PG. Impact injuries in pregnancy. American Journal of Obstetrics and Gynecology, 1968, 101(1), 100
- [4] King AI, Crosby WM, Stout LC, et al. Effects of Lap Belt and Three-Point Restraints on Pregnant Baboons Subjected to Deceleration[J]// Society of Automotive Engineers 710850. Detroit: Stapp Car Crash Journal, 1971, 15: 68-83.
- [5] Rupp JD, Schneider LW, Klinich KD, et al. (2001). Design, Development and testing of a new pregnant abdomen for the Hybrid III small female crash test dummy. UMTRI-2001-07
- [6] Moorcroft, D.M., Duma, S.M., Stützel, J.D. Duma G.G. 2003a. "Computational Model of the Pregnant Occupant: Predicting the Risk of Injury in Automobile Crashes." American Journal of Obstetrics and Gynecology, 189, No. 2: 540-544
- [7] B.S.Acar, A.M.Weekes. Pregnant Driver Seating Position. ICash 2006, Athens Greece, July 2006
- [8] Cao Libo, Ge Anna, Su Jiali, et al. Modeling and Application of a Pregnant 5th Percentile Female Occupant[C]//2007 Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference, Oakland University, Rochester, USA: Washington, SAE, 2007:01-2492
- [9] Yasuki Motozawa .Masahito Hitosugi. An experimental analysis of the abdominal pressure of the pregnant occupants during automotive collision using AF5 pregnant dummy. Department of Legal Medicine, Dokkyo Medical University School of Medicine Japan.2007:07-0094
- [10] Liao Qiping. Obstetrics and Gynecology[M].Beijing: Peking University Medical Press, 2004
廖秦平.妇产科学[M].北京:北京大学医学出版社, 2004
- [11] Fried AM. Distribution of the bulk of the normal placenta. Review and classification of 800 cases by ultrasonography [J]. American Journal of Obstetrics and Gynecology, 1978, 132(6): 675-680
- [12] Kissinger DP, Rozycki GS, Morris JA, et al. Trauma in pregnancy-Predicting pregnancy outcome. Archives of Surgery, 1991, 126, 1079-1086
- [13] Pearlman MD, Tintinalli JE, Lorenz RP. Blunt trauma during pregnancy [J]. New England Journal of Medicine, 1990, 323, 23: 1613-1690
- [14] Manoogian, SJ, McNally, C, Calloway, B.R Duma, S.M. 2007b. "Methodology for Dynamic Biaxial Tension Testing of Pregnant Uterine Tissue Biomedical Sciences Instrumentation 43
- [15] Cao Libo, Xiao Kaiyan, Xiao Huiqing. Study on the protection performance of a new kind of safety belt for pregnant occupant [J]. China Mechanical Engineering, 2010vol, 21(15): 1879-1884.
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, 2010vol, 21(15): 1879-1884.