

猪皮对球形弹丸阻滞作用的仿真研究

汤成莉, 刘苏苏, 杨玉萍, 房佳恒

(南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 为了明确皮肤对球形弹丸的阻滞作用机理, 建立了模拟皮肤的3层结构模型。基于拉伸及压缩力学特性曲线, 利用 MATLAB 对皮肤模型进行参数识别。基于冲击实验得到的皮肤穿透阈值速度验证了皮肤模型的准确性。利用 LS-DYNA 仿真模拟了 $\Phi 4.5$ mm 铅球侵彻皮肤过程, 从球形弹丸速度衰减、皮肤鼓包方面分析了皮肤对球形弹丸的阻滞作用。仿真模拟了相同动能不同密度条件下, 直径为 $\Phi 4.5$ mm 的弹丸侵彻皮肤的过程和相同动能不同直径条件下, 铅球侵彻皮肤的过程, 结果表明, 建立的皮肤3层结构模型可以用于模拟皮肤的真实伤害, 作为皮肤的数值仿真模型; 在初始动能相同的情况下, 球形弹丸密度越小, 体积越大, 能量耗散比越大, 皮肤阻滞作用越明显, 为后续研究投射物对真实人体的伤害奠定了基础。

关 键 词: 球形弹丸; 阻滞作用; 速度衰减; 能量耗散; 皮肤

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2020020283

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2020)02-0283-05

Simulation study on the blocking effect of pig skin on spherical projectile

TANG Cheng-li, LIU Su-su, YANG Yu-ping, FANG Jia-heng

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China)

Abstract: In order to clarify the blocking mechanism of skin on spherical bullet, a three-layer structural model of simulated skin was established. Based on the mechanical curves of tensile and compression experiments, the parameters of the skin model were identified by MATLAB. Based on the skin penetration threshold velocity obtained from the impact experiment, the accuracy of the skin model was verified. Then, the penetration process of $\Phi 4.5$ mm shot into the skin was simulated by LS-DYNA simulation, and the blocking effect of skin on spherical projectile was analyzed from the aspects of velocity attenuation and skin bulging. The penetration process of $\Phi 4.5$ mm projectile into the skin under the condition of the same kinetic energy and different density, together with the process of shot put into the skin with the same kinetic energy and different diameter, was numerically simulated. The results show that the three-layer structural model of skin can be taken as a numerical simulation model to simulate the real damage of skin. Furthermore, with the same initial kinetic energy, the smaller the density of spherical projectile is, the larger the volume is, the larger the energy dissipation ratio is, and the more obvious the skin blocking effect is. Such finding slay a foundation for the future study of the harm of the projectile to the real human body.

Keywords: spherical bullet; blocking effect; velocity attenuation; energy dissipation; skin

收稿日期: 2019-10-09; 定稿日期: 2019-11-22

基金项目: 南通市2018-基础科学研究项目(JC2018098)

第一作者: 汤成莉(1995-), 女, 安徽六安人, 硕士研究生。主要研究方向为创伤弹道学。E-mail: 1109584472@qq.com

通信作者: 刘苏苏(1988-), 男, 江苏南通人, 讲师, 博士, 硕士生导师。主要研究方向为创伤弹道学。E-mail: liususul006@139.com

目前, 创伤弹道学研究中主要采用肌肉仿生靶标或肌肉-骨骼复合仿生靶标。温垚珂等^[1]利用明胶代替肌肉, 分析了明胶应力应变场、压力波和能量转换的规律。黄玲等^[2]建立了 9 mm 手枪弹侵彻肌肉-骨骼复合仿真模型, 分析了弹丸速度、不同章动角等因素对复合模型致伤效应的影响。ZHANG 等^[3]建立了 7.62 mm 步枪弹侵彻明胶-骨骼复合仿真模型, 通过数值模拟分析了空腔膨胀情况对骨骼间接损伤的影响。皮肤对投射物阻滞作用的研究较少。DIMAIO 等^[4]通过向人体下肢皮肤射击不同口径的子弹进行皮肤阻滞作用实验, 得到了 3 种子弹侵彻皮肤的穿透阈值速度。JUSSILA 等^[5]计算并修正了 $\Phi 4.5$ mm 铅球侵彻皮肤的穿透阈值速度, 并通过实验进行验证。BREEZE 和 CLASPER^[6]对投射物穿透皮肤的穿透阈值速度进行综述性研究, 提出“未来的皮肤仿真材料模型必须与穿透阈值速度相匹配”。

数值模拟能够直观地观察更多细节, 比实验更有助于阐明皮肤阻滞作用。然而皮肤有限元模型的应用主要停留在临床医学方向, 普遍采用超弹性模型作为皮肤的材料模型。FLYNN 等^[7]采用 Mooney-Rivlin 超弹性模型模拟人体皮肤, 建立了体内张力作用下的人脸有限元模型, 用于模拟人脸面部表情。SWAIN 和 GUPTA^[8]使用 Varga 超弹性模型建立了皮肤伤口愈合阶段的生物力学模型, 强调在愈合过程中皮肤会出现应力和皱纹。LI 和 LUO^[9]基于 Odgen 超弹性模型, 提出了一种新的皮肤损伤模型。在投射物侵彻皮肤过程中, 其产生大应变行为, 表现出应变硬化现象^[10]; 投射物完全穿透皮肤后, 其产生塑性变形, 留下弹道伤口, 而单一的超弹性模型不能描述冲击过程中皮肤的应变硬化现象和弹道伤口。本文建立了可以应用于冲击研究的皮肤 3 层结构模型和球形弹丸侵彻皮肤有限元模型的过程, 为后续建立更真实的肢体(皮肤、肌肉、骨骼、血管等)复合仿真模型奠定了基础。

1 皮肤模型建立及参数识别

1.1 皮肤模型建立

皮肤分为表皮层、真皮层和皮下组织层^[11]。真皮层的厚度决定了皮肤的厚度。胶原纤维是真皮层可以经受大应力、大变形的的主要原因, 但胶原纤维只占真皮的 60%~80%^[12]。本文设想皮肤为 3 层: 上下两层采用双线性各向同性硬化模型

(bilinear isotropic hardening constants), 可以描述皮肤的大应变行为和在大应变情况下的硬化现象, 占皮肤材料模型的 40%; 中间一层采用 Mooney-Rivlin 超弹性模型, 可以描述材料在 30%~200% 的应变行为, 占皮肤材料模型的 60%, 皮肤的 3 层材料模型如图 1 所示。

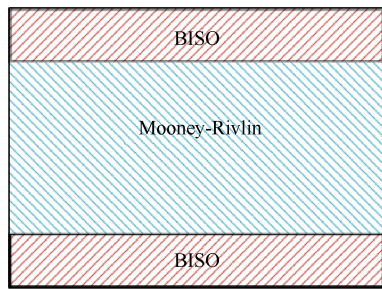


图 1 皮肤材料模型

Mooney-Rivlin 超弹性模型的应变势能 W 为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \quad (1)$$

初始 d 和 Mooney-Rivlin 模型的杨氏模量 E_1 可表示为

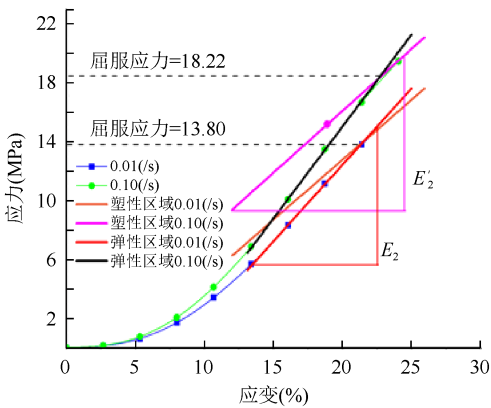
$$E_1 = 6 \times (C_{10} + C_{01}) \quad (2)$$

$$d = \frac{2 - 1 \times \mu}{C_{10} + C_{01}} \quad (3)$$

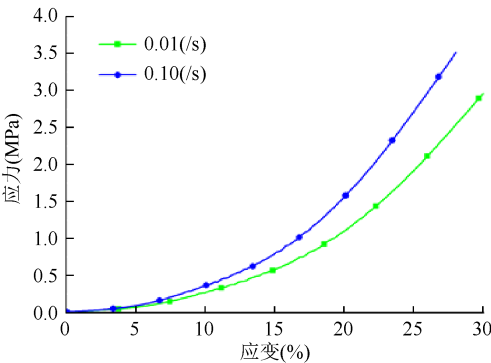
其中, C_{10} , C_{01} , d 为由实验确定的材料常数; I_1 , I_2 为 Green 张量不变量; μ 为泊松比。

1.2 参数识别

ANKERSEN 等^[13]研究了猪腹部皮肤比背部皮肤更贴近于人体腹部皮肤; SHERGOLD 等^[14]通过对比发现猪腹部皮肤(平行于脊柱方向)与人体腹部皮肤的力学特性曲线相似。因此, 本文选取健康长白猪的腹部皮肤(平行于脊柱)作为实验材料, 用手术刀小心地剔除皮下脂肪组织, 并保持猪皮的平滑性, 通过多次测量取平均值得到猪皮厚度为 2.5 mm。分别对长方体猪皮(长×宽: 40 mm×15 mm)和圆柱状猪皮($\Phi 20$ mm)进行拉伸及压缩实验, 得到皮肤在 0.10/s 和 0.01/s 应变率下的拉伸及压缩力学特性曲线, 如图 2(a)所示, 求得 BISO 模型所需材料参数 E_2 (杨氏模量, 弹性区间的斜率)、 σ_s (屈服应力, 应力-应变曲线的弹性区域及塑性区域曲线外推的交点)、 E_{tan} (切线模量, 屈服极限和强度极限之间的斜率)。结合压缩力学特性曲线, 如图 2(b)所示, 运用 MATLAB 对曲线进行基于最小二乘法的非线性拟合得出 Mooney-Rivlin 模型的参数 C_{10} 和 C_{01} , 皮肤的材料参数见表 1 和表 2。



(a) 拉伸力学特性曲线及 BISO 模型参数识别



(b) 压缩力学特性曲线

图 2 不同应变率下皮肤力学特性曲线及参数识别

表 1 BISO 模型参数	
参数	取值
E_1 (MPa)	100
μ	0.48
ρ (kg/m ³)	1.03
σ_s (MPa)	14
E_{tan} (MPa)	81

表 2 Mooney-Rivlin 模型参数	
参数	取值
E_2 (MPa)	7.642
μ	0.480
ρ (kg/m ³)	1.030
C_{10} (MPa)	0.689
C_{01} (MPa)	0.585
d (MPa)	0.031

2 冲击实验验证

2.1 冲击实验

利用 $\Phi 9\text{ mm}$ 一级轻气炮进行皮肤冲击实验, 炮管中用弹托固定 $\Phi 4.5\text{ mm}$ 铅球。选取健康长白猪的腹部皮肤, 其弹道冲击的有效尺寸为 $100.0\text{ mm}\times 100.0\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$, 利用夹具将猪皮固定在靶室中(图 3)。通过测速光幕靶来测量铅球速度、数据采集处理系统来记录铅球速度, 如图 4 所示。经过多次冲击实验统计后得到皮肤的穿透阈值速度约为 94 m/s 。

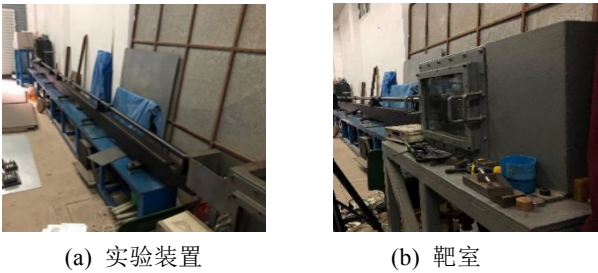


图 3 冲击实验

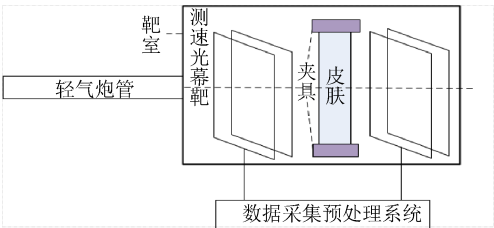


图 4 实验装置示意图

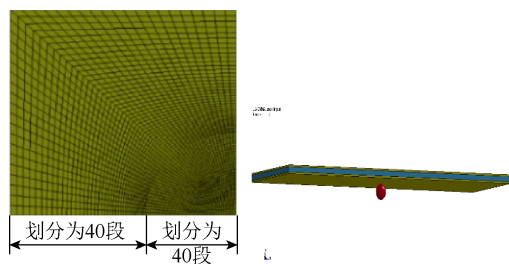
2.2 结果分析

在建立 $\Phi 4.5\text{ mm}$ 铅球侵彻皮肤(长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $100.0\text{ mm}\times 100.0\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$)有限元模型时, 铅球采用 JOHNSON_COOK 模型, 材料参数见表 3。弹丸与皮肤之间采用面面侵蚀接触(*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE)。对弹丸赋予垂直于皮肤表面的初速度 V_{TH} 为 94 m/s , 对皮肤模型的边缘面给与固定约束。根据有限元网格划分的一般原则, 对弹丸侵彻皮肤的附近地区进行网格加密, 保证仿真结果的精度和可信度。而对距侵彻中心较远的地区的网格进行放大, 以减小网格数来提高计算速度。对于皮肤模型, 将半径为 20 mm 的侵彻中心圆分为 40 段, 侵彻中心圆以外分为逐渐稀疏的 40 段, 厚度方向分为 25 段, 如图 5(a)所示。弹丸沿半径方向分别划分为 8 段, 通过设置粘性的沙漏系数为 0.01, 避免沙漏对数值仿真结果可靠性的影响。建立的弹丸侵彻皮肤有限元模型如图 5(b)所示。

表 3 铅球材料模型	
参数	取值
ρ (g/cm ³)	11.34
G (GPa)	7
T (K)	293
T_m (K)	600
A (MPa)	14.0
B (MPa)	17.6
n	0.685
C	0.035
m	1.68

仿真模拟了初速度为 94 m/s 的铅球侵彻皮肤

过程, 得到弹丸速度衰减曲线, 如图 6 所示。与实验数据对比发现, 仿真结果与实验结果基本吻合, 验证了皮肤模型的正确性。



(a) 皮肤网格划分方式 (b) 有限元模型

图 5 弹丸侵彻皮肤有限元模型

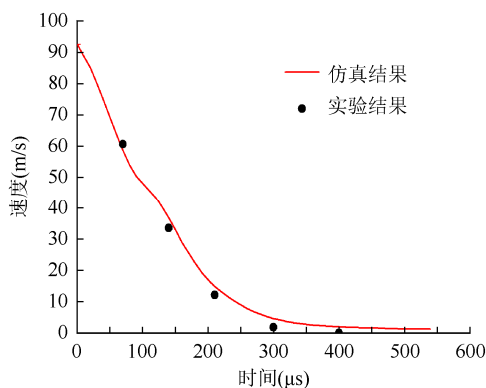


图 6 铅球速度衰减曲线

3 皮肤阻滞作用机理研究

3.1 侵彻过程分析

由图 7 可以看出, 随着铅球的逐渐深入, 由于铅球大部分能量传递给皮肤, 使得最大应力集中在铅球侵彻的前方。在 $110 \mu\text{s}$ 时, 皮肤所受应力超过皮肤第 1 层的抗拉强度, 达到第 1 个应力峰值, 皮肤第 1 层断裂; 在 $240 \mu\text{s}$ 时, 皮肤所受 Von Mises 应力达到最大值, 皮肤 3 层全部断裂, 最大应力开始集中在伤口处; 在 $500 \mu\text{s}$ 时, 弹丸侵彻完成, 留下星型伤口。

结合图 6 速度曲线图可发现, 在 $0 \sim 90 \mu\text{s}$ 之间, 铅球处于侵彻初期, 速度快速衰减。在 $90 \mu\text{s}$ (皮肤第 1 层开始断裂) 时, 速度进入衰减缓慢期, 皮肤鼓包的直径只有 $\Phi 14 \text{ mm}$ 。在 $110 \mu\text{s}$ 时, 铅球侵彻皮肤的第 2 层, 由于皮肤第 2 层没有发生严重变形及第 3 层几乎没有变形, 速度衰减慢。直到 $120 \mu\text{s}$ 时, 皮肤第 2, 3 层发生明显变形, 速度进入快速衰减阶段。在 $110 \sim 120 \mu\text{s}$ 内, 速度衰减较慢, 皮肤鼓包直径几乎没有变化, 近乎为 $\Phi 16.7 \text{ mm}$ 。随着铅球深入侵彻皮肤模型, 在 $240 \mu\text{s}$ 时皮肤 3 层

全部断裂, 皮肤形成的鼓包范围增大至 $\Phi 39.1 \text{ mm}$ 。 $240 \mu\text{s}$ 后铅球速度衰减降低直至 $500 \mu\text{s}$ 停止衰减, 此时皮肤鼓包直径为 $\Phi 58.2 \text{ mm}$ 。

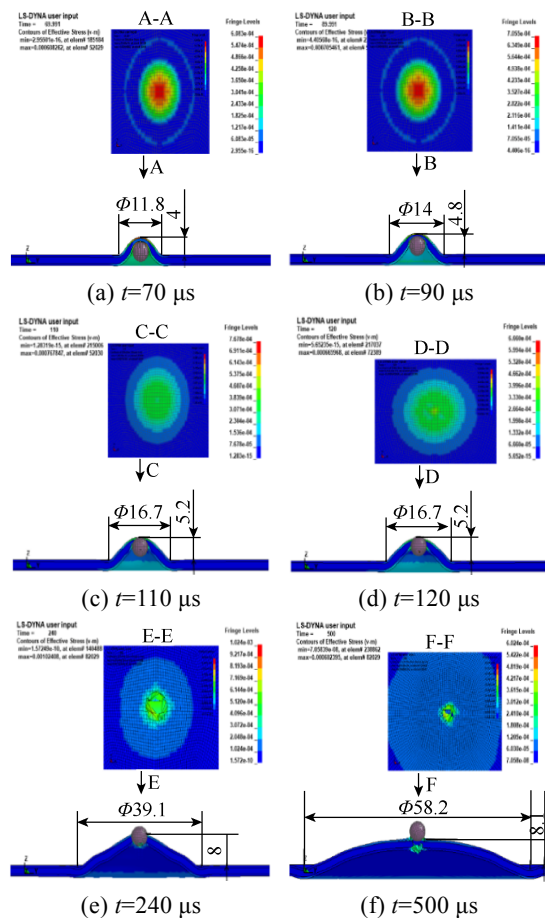
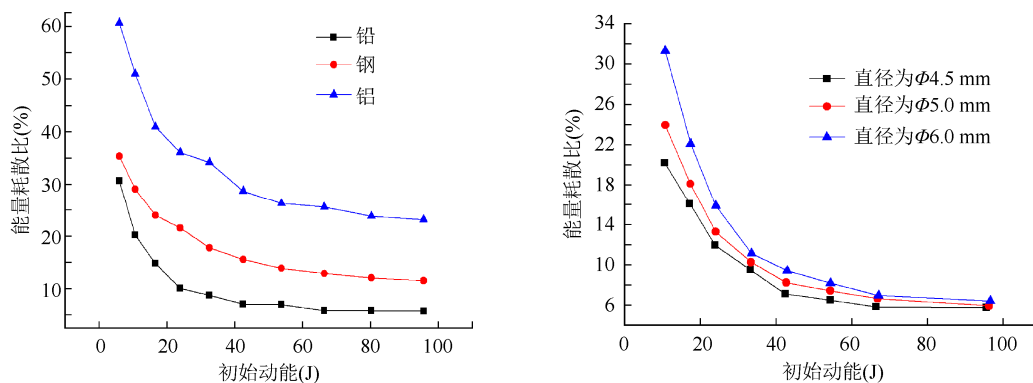


图 7 典型时刻铅球侵彻皮肤过程图

3.2 弹丸不同因素对皮肤阻滞作用的影响

为了研究弹丸不同因素对皮肤阻滞作用的影响规律, 仿真模拟了相同动能不同密度下 $\Phi 4.5 \text{ mm}$ 铅球、钢球和铝球侵彻皮肤的过程和相同动能不同直径铅球侵彻皮肤的过程。通过仿真模拟得到弹丸能量耗散比 (耗散能量与初始能量之间的比值) 与初始能量之间的定量关系曲线, 如图 8 所示。随着初始动能的增加, 弹丸能量耗散比快速降低, 但是皮肤的阻滞作用是有限的, 随着冲击动能的增大, 其耗散比接近于一个定值。在初始动能相同的情况下, 球形弹丸密度越小, 尺寸越大, 能量耗散比越大, 受到的皮肤阻滞作用越明显, 如当初始动能为 32.517 J 时, 相同大小的铅球能量耗散比为 8.76% , 钢球为 17.80% , 铝球为 34.16% ; 当初始动能为 10.619 J , 相同密度条件下, 直径为 $\Phi 4.5 \text{ mm}$ 铅球能量耗散比为 20.19% , 直径为 $\Phi 5.0 \text{ mm}$ 铅球为 21.95% , 直径为 $\Phi 6.0 \text{ mm}$ 铅球为 31.33% 。



(a) 初始动能相同时不同密度弹丸能量耗散比曲线 (b) 初始动能相同时不同尺寸弹丸能量耗散比曲线

图8 弹丸能量耗散比曲线

4 结束语

(1) 本文建立了应用于冲击的皮肤3层结构模型和球形弹丸侵彻皮肤有限元模型,并通过冲击实验验证了皮肤模型的正确性。

(2) 基于 $\Phi 4.5$ mm铅球侵彻皮肤有限元模型,发现铅球速度在皮肤第1层结构破裂时由快速衰减逐渐转变为缓慢衰减,在皮肤第2,3层结构发生大变形后再次进入快速衰减阶段,在皮肤3层结构全部破裂后衰减越来越缓慢直至侵彻完成时停止;皮肤鼓包范围从皮肤鼓包出现时增大,直到侵彻完成时停止,皮肤留下星型伤口。

(3) 模拟了相同动能不同密度下 $\Phi 4.5$ mm铅球、钢球和铝球侵彻皮肤的过程和相同动能不同直径铅球侵彻皮肤的过程,得出在初始动能相同的情况下,球形弹丸密度越小,体积越大,能量耗散比越大,皮肤阻滞作用越明显。

参考文献

- [1] 温焜珂,徐诚,陈爱军,等.球形破片高速侵彻明胶靶标的数值模拟[J].弹道学报,2012,24(3):25-30.
- [2] 黄玲,刘艳,徐诚,等.手枪弹对骨骼间接作用的数值模拟及致伤力学响应研究[J].弹道学报,2013,25(2):95-99.
- [3] ZHANG X Y, XU C, WEN Y K, et al. The experimental and numerical study of indirect effect of a rifle bullet on the bone[J]. Forensic Science International, 2015, 257: 473-480.
- [4] DIMAIO V J M, COPELAND A R, BESANT-MATTHEWS P E, et al. Minimal velocities necessary for perforation of skin by air gun pellets and bullets[J]. Journal of Forensic Sciences, 1982, 27(4): 894-898.
- [5] JUSSILA J, LEPPÄNIEMI A, PARONEN M, et al. Ballistic skin simulant[J]. Forensic Science International, 2005, 150(1): 63-71.
- [6] BREEZE J, CLASPER J C. Determining the velocity required for skin perforation by fragment simulating projectiles: a systematic review[J]. Journal of the Royal Army Medical Corps, 2013, 159(4): 265-270.
- [7] FLYNN C, STAVNESS I, LLOYD J, et al. A finite element model of the face including an orthotropic skin model under in vivo tension[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2015, 18(6): 571-582.
- [8] SWAIN D, GUPTA A. Interfacial growth during closure of a cutaneous wound: stress generation and wrinkle formation[J]. Soft Matter, 2015, 11(32): 6499-6508.
- [9] LI W G, LUO X Y. An invariant-based damage model for human and animal skins[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2016, 44(10): 3109-3122.
- [10] NICOLLE S, DECORPS J, FROMY B, et al. New regime in the mechanical behavior of skin: strain-softening occurring before strain-hardening[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 69: 98-106.
- [11] WILDNAUER R H, BOTHWELL J W, DOUGLASS A B. Stratum corneum biomechanical properties I. influence of relative humidity on normal and extracted human stratum corneum[J]. Journal of Investigative Dermatology, 1971, 56(1): 72-78.
- [12] 卢天健,徐峰.皮肤的力学性能概述[J].力学进展,2008,38(4):393-426.
- [13] ANKERSEN J, BIRKBECK A E, THOMSON R D, et al. Puncture resistance and tensile strength of skin simulants[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 1999, 213(6): 493-501.
- [14] SHERGOLD O A, FLECK N A, RADFORD D. The uniaxial stress versus strain response of pig skin and silicone rubber at low and high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(9): 1384-1402.