

文章编号: 1001-4888(2013)01-0001-09

仿生皮肤软材料大变形场的数字云纹实验

肖霞^{1,2}, 亢一澜^{1*}, 邓卫林¹, 李晓雷³, 仇巍¹, 谭晓华¹

(1. 天津大学, 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300072; 2. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387;
3. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

摘要: 软物质等大变形材料是近年来力学与材料科学关注的热点问题, 与之相关的实验研究也引起格外关注。本文将数字云纹实验技术应用于大变形材料力学实验, 研究了软材料大变形场的实验测量与表征技术; 以仿生皮肤材料缝线力学的应用为例进行实验分析, 通过坐标变换给出集中力作用下的大变形材料径向变形场 u_r 和环向变形场 u_θ 的全场分布, 并研究了缝线针口附近区域的变形场分布。分析结果表明, 大变形材料的变形场存在明显的扇区变形特征。本文还进一步讨论了两种不同缝合方式下针口周边区域的力学变形特征, 并初步分析了不同缝合方式对切口愈合产生的影响。

关键词: 大变形材料; 实验分析; 数字云纹技术; 扇区变形特征; 缝线力学

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-108

0 引言

随着生物与临床医学研究的深入开展, 软物质与仿生材料等大变形材料的研究近年来受到特别的重视, 自然界和生命科学中的生物与生命体大多具有软体大变形特点, 它们对外力作用特别敏感, 小应力会产生大变形。围绕大变形材料力学性能的研究也日益显出其重要性。

与普通固体材料相比, 大变形材料的本构关系十分复杂, 其中一类方法是力求从材料的微观结构来解释材料大分子的物理属性, 如基于材料分子网络结构的统计热力学方法^[1-7], 认为大变形橡胶类材料由很多共价键连接而成的长链分子交联构成, 每个长链分子的弹性应变能综合构成材料的应变能, 由此得到材料的宏观性质。该方法给出的应变能函数表达式复杂, 实际测量与工程应用具有难度。另一类是基于连续介质理论的唯一学方法^[8], 采用应变不变量或主伸长率为自变量, 以若干材料参数为系数表达应变能函数, 其中材料参数可通过拟合真实材料变形实验的数据确定。典型模型有 Neo-Hookean 模型^[9]、Mooney-Rivlin 模型^[10]和 Ogden 模型^[11], 等等^[12, 13]。高玉臣^[14, 15]从物体变形特点出发, 对大变形材料断裂问题提出了分区构形的理论, 在分区构形方法中, 依据形变特征划分为扩张区和收缩区两类分区。上述力学研究的目的是力图建立一个能够描述大变形材料在不同加载方式下的力与变形相互关系的理论模型, 围绕大变形材料的力学实验研究还相对较少。高玉臣等^[15]于 1997 年提出的大变形裂纹问题的扇形分区理论并没有得到实验证实。后来亢一澜、李晓雷、肖霞等人利用数字云纹技术, 通过极坐标表示实验变形场, 证明了在橡胶大变形材料裂纹周围 2mm~10mm 左右的中间区域存在扇区变形特征^[16-18], 并且发现载荷工况会影响扇区的角度与方向^[19]。

数字云纹技术是在传统几何云纹法基础上, 结合数字图像处理技术的一种实验方法。它不仅具有

* 收稿日期: 2012-09-03; 修订日期: 2012-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11127202, No. 11102134)

通讯作者: 亢一澜, 教授, 博士生导师。主要研究领域: 固体力学, 实验力学测试技术。E-mail: tju_ylkang@tju.edu.cn

云纹法的非接触、实时测量、条纹图像清晰、不受材料限制、对测试环境和设备要求简单等特点^[20-23],还兼备了数字图像的优点,通过数字图像处理技术大幅度提高了测试精度,并有效实现了不同坐标系下全场力学信息的图像显示,适用于大变形非均匀场的变形测量。在大变形材料力学实验研究中,橡胶与仿生皮肤都是比较典型的大变形材料,仿生皮肤具有柔软大变形特点,具有很好的强韧度,在其研究方面目前已经取得一些进展^[24, 25]。大变形材料变形场实验研究的背景之一是临床医学中的手术与整形外科医学,在手术中需要将皮肤切开,然后将切口缝合,切口与缝线部位的皮肤组织受力与变形情况直接影响伤口愈合与疤痕的形成^[26]。因此,有必要在集中力作用下大变形材料受力变形规律的实验研究基础上,对皮肤材料的缝线力学性能进行探究。

本文以仿生皮肤材料为测试对象,研究软材料大变形场的实验力学问题,采用数字云纹技术测量集中力作用下的大变形场,分析大变形材料的变形场力学特征,并进行实验表征。在实验基础上,进一步对仿生皮肤材料缝线力学进行应用研究,分析缝线针孔区域的力学场分布信息,讨论两种不同缝线方式下针孔周边区域的力学特征,初步探究不同缝合方式对于伤口愈合产生的影响。

1 仿生皮肤软材料的缝合试件

本文大变形材料选用主要医用于肢体部位的商用仿生皮肤材料。材料厚度为 1mm,制成长宽为 15mm × 4mm 的矩形拉伸试件,采用 Instron 3343 试验机进行单轴拉伸测试,加载速率为 10mm/min (图 1(a))。材料在单轴拉伸下的名义应力—应变曲线如图 1(b),实验得到材料的流动极限 0.96MPa,杨氏模量 1.9MPa,最大强度 2.9MPa,延伸率为 520%。集中力作用下大变形材料变形场实验测量试件设计中,考虑到材料大变形容易几何失稳的特点,采用了缝线加载与固定方式,试件背景是临床医学中的皮肤切口缝合。实验试件 I (图 2(a))为铅垂集中力作用试件,其制备方法为将两片 60mm × 30mm,厚度为 1mm 的试件材料用手术线对接缝合,参照临床外科手术中的缝线标准,集中力作用点距离缝合边缘的长度为 10mm,相邻缝合点距离为 15mm,选用直径 0.23mm 的 1 号手术线缝制,以被缝合的两片材料在缝合边缘区域平直对接且不皱褶、手术线平直为准。实验试件 II (图 2(b))为交叉集中力作用,交叉缝合的缝合间距为 7.5mm,其余与试件 I 相同。

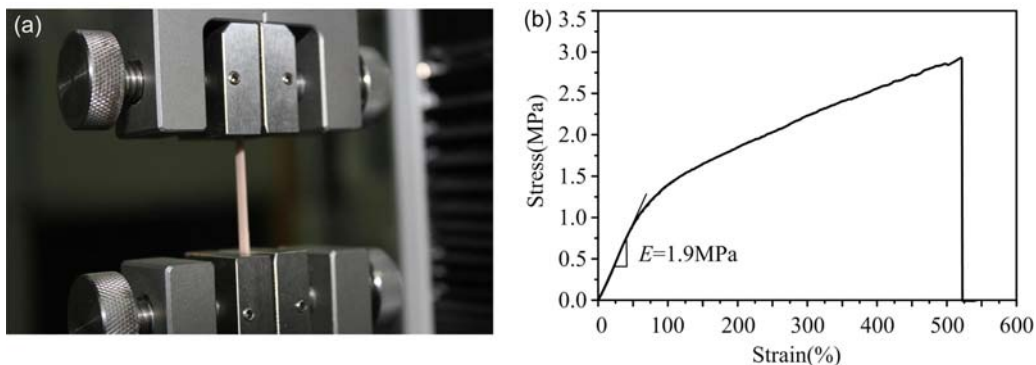


图 1 仿生皮肤材料的单轴拉伸实验(a)及其名义应力—应变曲线(b)

Fig. 1 (a) Uniaxial tensile testing of bio-skins and (b) its nominal stress-strain curve

在集中力作用点(缝线针口)周围区域采用复制色线制备黑白 3 lines/mm 的正交栅线,如图 2 中网格线示意图。在电子万能试验机 Instron 3343 上进行试件单向拉伸实验,载荷量程为 10N ~ 1000N,位移加载速度为 2mm/min,同时采用 BaslerA202K CCD 摄像机采集图像,分辨率为 1003 pixel × 1004 pixel。

2 大变形场的数字云纹实验

与传统几何云纹法一样,数字云纹需要两组栅线:由计算机生成的二值数字参考栅和实验给出的变形栅,通过如下数字图像处理技术得到数字云纹条纹和数字图像。

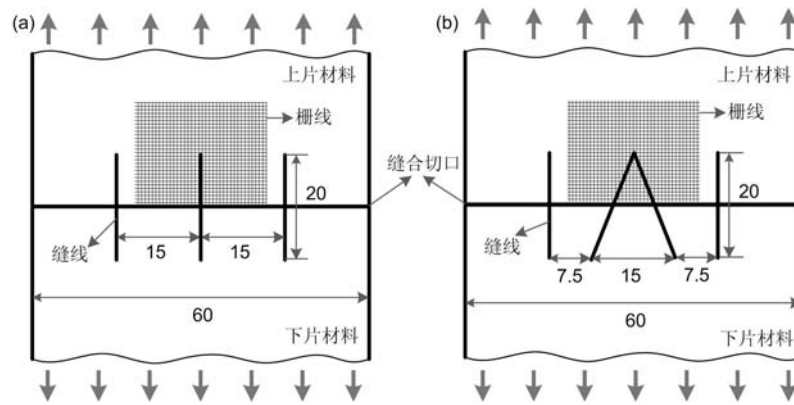


图 2 集中力作用下大变形材料变形场实验测量试件 (a) 平行缝合试件 I, (b) 交叉缝合试件 II

Fig. 2 Schematic of specimens used for the large deformation experiments under concentrated force,

(a) specimen I with parallel-suture technique and (b) specimen II with cross-suture technique

在数字图像处理系统中,周期性的栅线可采用其光强分布数学函数来表征。以水平栅线为例,沿其主方向,即垂直栅线的方向,理想栅线的光强分布可用余弦函数展开,表示为:

$$T_h(x, y) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n \left(\frac{2\pi}{p_h} y \right) \quad (1)$$

实际分析中,通常选取其前两项来表征水平栅线的光强分布:

$$T_h(x, y) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi}{p_h} y \quad (2)$$

其中: a_0 和 a_1 为常数; y 为直角坐标系中的纵轴; p_h 为给定的水平参考栅节距。

依据云纹条纹的形成原理,给定两组栅线节距不同的水平栅线,其节距分别为 p_{h1} 和 p_{h2} ,则栅线频率分别为 $f_{h1} = 1/p_{h1}$ 和 $f_{h2} = 1/p_{h2}$,两组栅线的光强分布函数分别表示为:

$$T_1(x, y) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi}{p_{h1}} y = a_0 + a_1 \cos 2\pi f_{h1} y = a_0 + a_1 \cos 2\pi l \quad (3)$$

$$T_2(x, y) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi}{p_{h2}} y = a_0 + a_1 \cos 2\pi f_{h2} y = a_0 + a_1 \cos 2\pi m \quad (4)$$

其中, l 和 m 分别是两组栅线线条的序号, $l, m = 0, 1, 2, \dots, 70$ 。

两组栅线叠合所形成的云纹条纹的光强分布函数为:

$$T = T_1 \cdot T_2 = a_0^2 + a_0 a_1 \cos 2\pi l + a_0 a_1 \cos 2\pi m + \frac{1}{2} a_1^2 \cos 2\pi(l+m) + \frac{1}{2} a_1^2 \cos 2\pi(l-m) \quad (5)$$

其中,第一项为背景光强;第二、三项为原来参考栅线和变形栅线的周期结构;第四项是和频项,其频率为两栅线频率之和,产生等和条纹;第五项是差频项,其频率为两栅线频率之差,形成等差条纹。通常可见条纹属于等差云纹,即条纹级数 $N = l - m$,且为常数。因此,包含变形位移信息的光滑清晰的数字云纹条纹为:

$$T = \frac{1}{2} a_1^2 \cos 2\pi(l-m) = \frac{1}{2} a_1^2 \cos 2\pi N \quad (6)$$

在栅线叠加产生的逻辑云纹中,包含背景光强、原始栅线周期光强以及等和条纹光强这些高频项信息,需要对图像进行低通滤波,消除高频噪声,进而构建出包含变形位移信息的数字云纹条纹。

数字条纹相位提取是关键环节之一,将测量条纹图像中的灰度信息转化为连续的相位信息,可实现全场云纹相位的数字提取。其优点在于:参考栅是由计算机生成的数字栅,可实现参考栅移动,使相移技术易于实现。实验中只需要一幅变形栅图像,就可以给出变形场信息。根据云纹的形成原理,条纹图像中某点的灰度即光强可以表示为:

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \{1 + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta_i]\} \quad (7)$$

其中, $I_0(x, y)$ 为背景光强; $b(x, y)$ 为交流光强分布; $\phi(x, y)$ 为该点位移相位函数; δ_i 为相位偏移量。

云纹法中相移通过参考栅每次移动 P/n , P 为参考栅栅距, n 为移动次数。根据 n 的取值定义有三步相移、四步相移和五步相移等方法, 本文采用四步相移方法。在四步相移中, 每幅图像之间的相位移动量为 $\pi/2$, 即当 $i=1, 2, 3, 4, \delta_i=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时, 根据式(7), 可得到被测点的相位值:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (8)$$

图 3(a) 给出了在实验采集载荷为 $\sigma=0.47\text{MPa}$ 时集中力载荷作用下大变形场的变形栅线实验图像。依据上述数字云纹实验的基本流程对变形栅线图像进行数字处理, 得到如图 3(b-c) 所示的代表铅垂方向和水平方向变形场的包裹相位图。

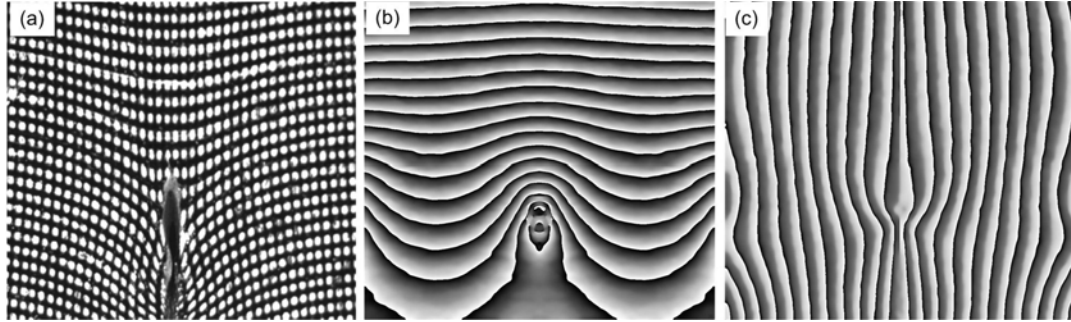


图 3 铅垂集中力作用下大变形材料云纹实验图像 (a) 光栅图像, 铅垂 (b) 和水平 (c) 方向变形场的包裹相位图

Fig. 3 Moiré patterns of the large deformation material under vertical concentrated force: (a) grating image, wrapped phase map of vertical (b) and horizontal (c) deformation fields

3 大变形材料变形场的实验力学分析

在图 3(b-c) 给出的包裹相位图的基础上, 经过去包裹处理可得到数字相位图, 即数字变形场, 由此给出测试区域内任意点的变形值。基于此, 可给出测试区力学信息的全场可视化图像, 并根据实验信息分析的需求进行坐标变换, 以及进一步给出变形场信息。

3.1 铅垂集中力作用下的变形场分析

为了形象地理解集中力作用下大变形材料变形场的变形特点, 本文对上述实验变形场采用极坐标显示并分析, 以集中力作用中心为坐标原点 O , 通过坐标变换公式(9), 将所得直角坐标系 (x, y) 下位移 u_x, u_y 转化为极坐标系 (r, θ) 下位移 u_r, u_θ :

$$\begin{aligned} u_r &= u_x \cos \theta + u_y \sin \theta \\ u_\theta &= u_y \cos \theta - u_x \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

图 4 为试件 I 在集中力作用下大变形材料变形场的极坐标变形场, 图 4(a)、(b) 分别是试件 I 的径向变形场 u_r 和环向变形场 u_θ , 并分别标出了 $u_r=0$ 与 $u_\theta=0$ 辅助线。在缝线集中力作用点处的材料变形复杂, 主要为缝线针孔被拉长, 因此将集中力作用点区域用环形辅助线标出。图 4(a) 径向变形场 u_r 清晰地显示出扇形分区特点, 以集中力作用点为原点, 四条 $u_r \approx 0$ 特征线上, 沿径向 r 方向变形为零, 整个变形场存在四个扇形区域。以 $u_r \approx 0$ 作为分区边界线, 上下两个扇形分区中存在负值位移, 即指向原点的径向变形。从图 4(b) 环向变形场可见, 存在四条 $u_\theta \approx 0$ 的位移线, 该 θ 方向上环向转动变形为零, 四条 $u_\theta \approx 0$ 的位移线大致位于变形场的上下与左右的中心位置, 同时也是径向变形场 u_r 中四个扇形区的中心线位置。以铅垂中心线为对称轴线, 上下两侧的环向位移相对转向水平中心线。

试件 I 变形场 $u_r \approx 0$ 的特征分析表明, 集中力作用下的大变形材料的变形存在扇形分区特征; 实验给出的四条特征线为扇形分区的边界线, $u_\theta \approx 0$ 为扇形区的中心线。拉伸载荷作用下, 上下扇形区内各点沿径向的位移是趋近原点, 即集中力作用点, 与此同时各点的环向位移是向外转动, 发生环向的扩张, 趋向变宽, 因此称其为扩张区。左右扇区内的变形特征为扇区内各点的径向位移背离原点, 同时环向位

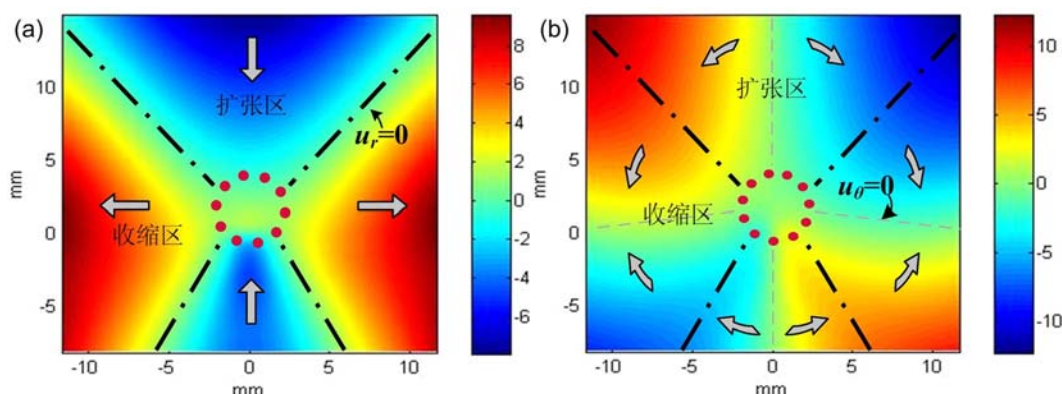


图 4 在铅垂集中力作用下仿生皮肤软材料缝合试件 I 变形场的极坐标显示(单位 mm)

(a) 径向变形场 u_r 和 (b) 环向变形场 u_θ 的等值云图及其扇区

Fig. 4 Deformation fields of specimen I under vertical concentrated force in polar coordinate:

(a) radial deformation u_r and (b) circumferential deformation u_θ distribution maps with distinct sectors (unit: mm)

移向内转动,相对转向水平方向,发生环向的收缩,称为收缩区。

3.2 交叉集中力作用下的变形场分析

图 5 给出的是试件 II 在交叉集中力作用下大变形试件的极坐标显示的变形场。与图 4 相同,图 5 (a-b)将缝线针孔中心区域用环形辅助线标出,并标出了 $u_r=0$ 与 $u_\theta=0$ 辅助线。从实验结果可以看到,交叉集中力下仍然清晰可见扇形分区特点。实验分析表明,交叉集中力作用下变形场存在三个扇形分区,以 $u_r \approx 0$ 特征线为扇形分区的边界线, $u_\theta \approx 0$ 特征线为扇形区的中心线。拉伸载荷作用下,上面扇形区内各点沿径向趋近原点,沿环向外转动趋向变宽,为扩张区。左右扇区内各点沿径向位移是远离原点,同时环向位移是向内转动,发生环向收缩,为收缩区。

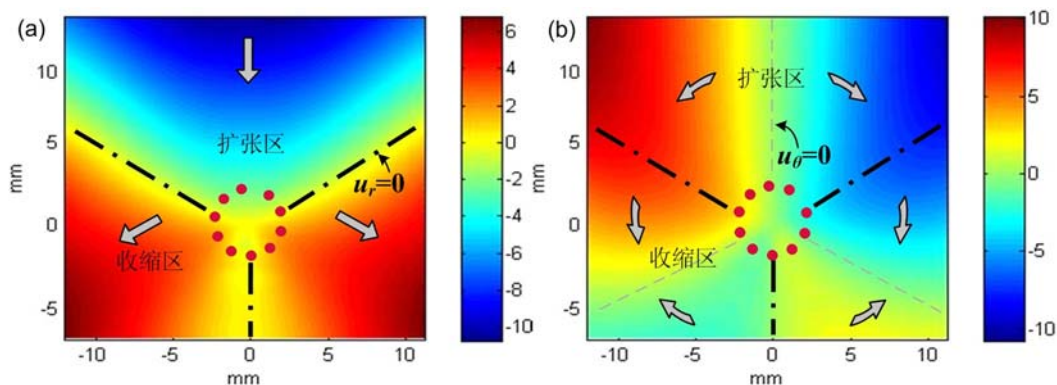


图 5 在交叉集中力作用下仿生皮肤软材料缝合试件 II 变形场的极坐标显示(单位 mm)

(a) 径向变形场 u_r 和 (b) 环向变形场 u_θ 的等值云图及其扇区

Fig. 5 Deformation fields of specimen II under cross concentrated force in polar coordinate:

(a) radial deformation u_r and (b) circumferential deformation u_θ distribution maps with distinct sectors (unit: mm)

比较试件 I 在铅垂集中力下与在试件 II 交叉集中力作用下的变形场,其相同点是两者都存在扇形分区;不同点在于交叉集中力作用存在三个分区,下面不存在扩张区。分析其原因,作者认为,在相同的位移载荷作用下,两个试件在原点处的铅垂方向等效集中力是相等的;在交叉集中力作用的试件 II 中,两个对称交叉集中力的铅垂方向合力会在作用点下端引起变形扩张区,但同时两个交叉集中力的水平分力会引起收缩区,并与交叉力的角度相关。因此,试件 II 的缝合点处的交叉力弱化或抵消了作用点

下端的扩张变形。

4 仿生皮肤材料缝线力学应用

集中力作用下大变形材料变形场研究的背景之一是临床医学中的手术与整形外科中的缝线力学问题。在手术中需要将皮肤切开,然后将切口缝合,缝线与切口部位的皮肤组织受力情况直接影响疤痕的形成与伤口愈合,为此本文将上述实验结果用于仿生皮肤材料缝线力学研究。在外科手术过程中,缝合伤口是必须的操作环节之一。根据缝线的位置,缝合方式有一线法、平行法、交叉法等,外科医生在手术中通常根据伤口的形状选择缝合方式。本文中受铅垂集中力试件 I 对应平行缝合线方式,受交叉集中力试件 II 对应交叉缝合线方式。两种缝合线方式对应的力学变形场特征已在上一节中讨论,本节重点从临床医学的角度讨论缝线力学应用。

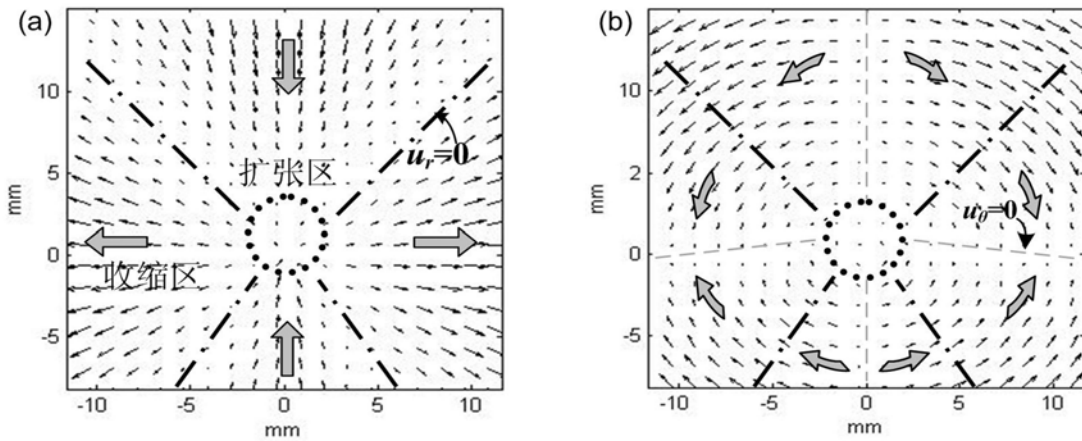


图6 受拉仿生皮肤平行缝合针口区域的径向 u_r (a)和环向 u_θ (b)变形场矢量图

Fig.6 Vector diagrams of (a) radial deformation field u_r and (b) circumferential field u_θ deformation of the suturing region of the tensile bio-skin with with parallel-suture technique

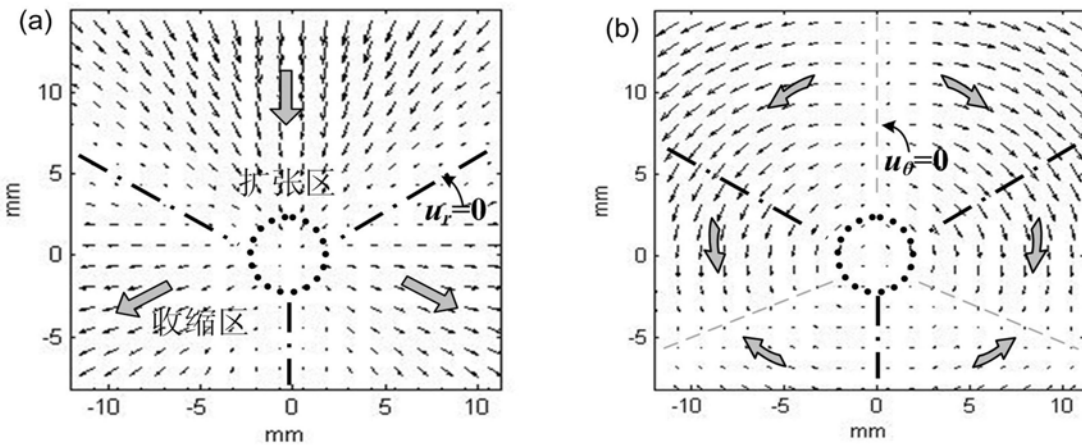


图7 受拉仿生皮肤交叉缝合针口区域径向 u_r (a)和环向 u_θ (b)变形场矢量图

Fig.7 Vector diagrams of (a) radial deformation field u_r and (b) circumferential field u_θ deformation of the suturing region of the tensile bio-skin with with cross-suture technique

图6和图7给出的平行、交叉两种缝合方式下的径向 u_r 和环向 u_θ 变形场矢量图进一步显示了扇形扩张区和收缩区的分区构形。两种缝合方式下针口上端扩张区和左右侧收缩区域的变形相似;不同的是平行缝合针口下有扩张区,而交叉缝合下端没有,并且两者缝合方式所对应的上端扩张区与左右侧收缩区所占据比例不同。在实际的缝合手术中,缝线针口下端是皮肤切口存在的位置。为了便于讨论

不同缝合方式下切口附近区域的变形特征及其对切口愈合的影响, 本文将皮肤切口附近区域划分为缝合针口上端和下端区域, 如图 8 所示。

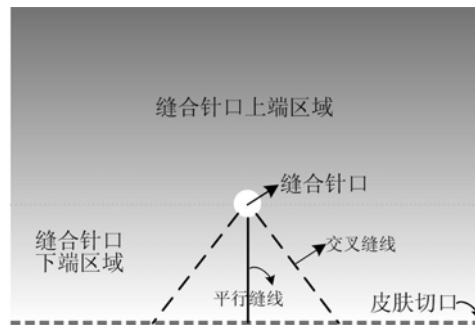


图 8 受拉仿生皮肤材料缝合切口上端和下端区域示意图

Fig. 8 Schematic of the upper and lower regions near the suture needle pinhole of the tensile bio-skin

不同缝合方式下切口近场区域的受力变形方式不同, 并对切口的愈合带来不同影响。平行缝合时, 缝合针口下端区域存在较高的负向位移分布, 不利于切口的恢复, 该区域会由于较大的压应力而形成疤痕; 并且平行缝合时上下切口边缘处的环向变形较大, 容易引起切口边缘平行错动, 也可能导致形成疤痕。交叉缝合中, 在针口下端缝线交叉的三角区域中, 径向与环向变形都相对比较均匀且数值很小, 切口几乎没有环向(水平)变形。因此, 交叉缝合能够较稳定地固定切口。由上述分析可以得知, 不同缝合方式对于切口的愈合与疤痕形成会产生不同的影响, 在临床手术缝合切口时, 需结合切口所在的部位及皮肤组织变形特点选择缝合方式。

5 结论

本文将数字云纹实验技术应用于集中力作用下的大变形场实验研究, 结果表明在集中力作用下大变形材料的变形场存在扇区变形特征。结合亢一澜课题组之前大变形断裂问题的研究^[16, 18, 19], 实验证明了大变形材料在裂纹周围区域同样存在扇区变形特征。断裂与集中力作用原本属于两类不同的力学问题, 但实验表明两者具有相似的扇形变形场分布。作者认为这两类问题存在共同的力学特征, 即大变形材料的应力集中问题。断裂问题属于几何不连续引起的应力集中, 而后者属于集中力引起的应力集中。本文给出的实验现象证明这一类问题的理论研究可以简化为采用分区本构关系进行力学建模, 在扇区的边界上径向位移与环向位移是连续的, 在对称轴上环向位移为零。

本文将上述实验分析用于受拉缝合仿生皮肤的缝合力学实验研究, 得到了缝线针口区域的变形场及其矢量分布信息。实验分析表明针口附近区域存在扩张区和收缩区的扇形分区, 不同扇区内受力变形的特点不同。最后, 通过对比两种不同缝合方式下扇形分区的异同, 分析了切口周围区域的受力变形特点, 初步讨论了缝合方式可能会对手术后切口的愈合以及疤痕的形成产生的影响。

致谢: 作者感谢国家自然科学基金委对本项目(No. 11127202, No. 11102134)的支持, 并感谢天津市天堰医教科技开发有限公司提供的仿生皮肤实验材料。

参考文献:

- [1] Kuhl E, Garikipati K, Arruda E M, Gosh K. Remodeling of biological tissue: Mechanically induced reorientation of a transversely isotropic chain network[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(7): 1552—1573.
- [2] Attard M M, Hunt G W. Hyperelastic constitutive modeling under finite strain[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(18-19): 5327—5350.
- [3] Besdo D, Ihlemann J. Properties of rubberlike materials under large deformations explained by self-organizing linkage patterns[J]. *International Journal of Plasticity*, 2003, 19(7): 1001—1018.

- [4] Spathis G. Non-Gaussian stress-strain constitutive equation for crosslinked elastomers[J]. *Polymer*, 1995, 36(2): 309—313.
- [5] Arruda E M, Boyce M C. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1993, 41(2): 389—412.
- [6] Treloar L R G. The Elasticity of a Network of Long-Chain Molecules. I[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1943, 16(4): 746—751.
- [7] James H M, Guth E. Theory of the Elastic Properties of Rubber[J]. *J. Chem. Phys.*, 1943, 11(455): 455—481.
- [8] Saccomandi G. Phenomenology of rubber-like materials[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004:91—134.
- [9] Rivlin R S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. VI. Further Results in the Theory of Torsion, Shear and Flexure[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1949, 242(845): 173—195.
- [10] Mooney M. A theory of large elastic deformation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1940, 11(9): 582—592.
- [11] Dorfmann A, Ogden R W. A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(7): 1855—1878.
- [12] Horgan C O, Saccomandi G. Constitutive Modelling of Rubber-Like and Biological Materials with Limiting Chain Extensibility[J]. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 2002, 7(4): 353—371.
- [13] Bedalov T, Chevalier Y. Hybrid continuum model for large elastic deformation of rubber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(4): 2701—2706.
- [14] Gao Y C. Elastostatic crack tip behavior for a rubber-like material[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1990, 14(3): 219—231.
- [15] Gao Y C. Large deformation field near a crack tip in rubber-like material[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1997, 26(3): 155—162.
- [16] Li X L, Kang Y L, Qiu W, Xiao X. Application of the digital moiré method in fracture analysis of a cracked rubber sheet[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2006, 19(3): 241—247.
- [17] Li X L, Kang Y L, Qiu W, Qin Q H, Xiao X. A study on the digital moiré technique with circular and radial gratings[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(7): 783—788.
- [18] Xiao X, Kang Y, Hou Z, Qiu W, Li X. Displacement and Strain Measurement by Circular and Radial Gratings Moiré Method[J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(2): 239—244.
- [19] Xiao X, Song H P, Kang Y L, Li X L, Tan X H, Tan H Y. Experimental analysis of crack tip fields in rubber materials under large deformation[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(2): 432—437.
- [20] 张海波, 伍小平, Asundi A. 二维相移逻辑云纹法一条纹图全自动处理的一种方法[J]. *实验力学*, 1994, 9(3): 181—191(Zhang Haibo, Wu Xiaoping, Asundi A. Two Dimensional Phase Shift and Logical Moiré—A fast and automatic method for whole field fringe pattern analysis[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1994, 9(3): 181—191(in Chinese))
- [21] 方岱宁, 刘战伟, 谢惠民, 李尚, 戴福隆, 邴歧大. 力电耦合载荷作用下铁电陶瓷破坏行为的云纹干涉方法研究[J]. *实验力学*, 2003, 18(2):156—160(Fang Daining, Liu Zhanwei, Xie Huimin, Li Shang, Dai Fulong, Bing Qida. Study on the Fracture Behavior of Ferroelectric Ceramics under Combined Electrical and Mechanical Load by Using a Moiré Interferometry Technique[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18(2): 156—160 (in Chinese))
- [22] 黄建永, 邢永明, 赵春旺. 用显微云纹干涉法研究 SiC/Ti-15-3 界面热残余应力场[J]. *实验力学*, 2006, 21(2): 177—182(Huang Jianyong, Xing Yongming, Zhao Chunwang. A Study on Interfacial Thermal Residual Stress in SiC/Ti-15-3 Composites Using Micro-moiré Interferometry[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, 21(2): 177—182 (in Chinese))
- [23] 谢惠民, 史航, 陈鹏万, 刘战伟, 戴福隆, 黄风雷. PBX 材料蠕变性能的云纹干涉法实验研究[J]. *实验力学*, 2005, 20(3):375—380(Xie Huimin, Shi Hang, Chen Pengwan, Liu Zhanwei, Dai Fulong, Huang Fenglei. An Experimental Study on Creep Behavior of PBX using Moiré Interferometry [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(3): 375—380 (in Chinese))

- [24] 权铁汉, 陆宏伟, 于起峰. 网格法及其在大变形测量中的应用[J]. 实验力学, 2000, 12(1): 83—91 (Quan Tiehan, Lu Hongwei, Yu Qifeng. The Application of Grid Method in Large Deformation Measurement [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(1): 83—91(in Chinese))
- [25] 谭晓华, 仇巍, 李晓雷, 黄干云, 肖霞, 亢一澜. 软材料接触力学问题的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(5): 509—515 (Tan Xiaohua, Qiu Wei, Li Xiaolei, Huang Ganyun, Xiao Xia, Kang Yilan. Experimental Analysis of Mechanics Problem within Soft Material Contact Field in Large Deformation [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(5): 509—515(in Chinese))
- [26] 黄志强. 外科手术学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005 (Huang Zhiqiang. Operative Surgery [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2005(in Chinese))

Digital Moiré Measurement of Large Deformation Field for Bionic Skin Soft Material

XIAO Xia^{1,2}, KANG Yi-lan¹, DENG Wei-lin¹, LI Xiao-lei³, QIU Wei¹, TAN Xiao-hua¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

3. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Large deformation material such as soft material is a hot issue of mechanics and material science in recent years. The associated experimental investigations also attract special attention. In this paper, digital Moiré technology was applied in large deformation material mechanical experiment. The measurement and characterization technique for large deformation of soft material was investigated. The suture mechanics of bionic skin was experimentally studied and the deformation distribution near suture needle pinholes was analyzed. Radial and circumferential deformation (u_r and u_θ) distribution maps of soft material subjected to concentrated force were given through coordinate transformation. Experimental results reveal that there are distinct sector deformation characteristics in the deformation field. The deformation characteristics near the needle pinholes of two different suturing techniques and the effect of different suturing techniques on the wound healing are also discussed in this paper.

Keywords: large deformation material; experimental analysis; digital Moiré technology; sector deformation characteristic; suture mechanics