

文章编号: 1004-7220(2021)03-0402-05

弯曲参数对软组织缝合过线器弯钩力学性能的影响

肖善社¹, 袁施挺¹, 谷雪莲¹, 赖卫国², 陈智²

(1.上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2.上海博进凯利泰医疗科技有限公司, 上海 201712)

摘要:目的 探究弯钩偏转角和弯钩倾斜角对软组织缝合过线器弯钩力学性能的影响。方法 以远离针尖端端面(端面1)为研究对象,建立以力矩大小为因变量,弯钩偏转角和倾斜角为自变量的数学模型。探究偏转角和倾斜角为 0° 、 10° 、 20° 和 30° 时的力矩,并用数学模型求解出力矩。基于有限元分析法,使用SolidWorks软件建立偏转角和倾斜角为 0° 、 10° 、 20° 和 30° 的16种弯钩三维几何模型,导入ANSYS Workbench有限元分析软件进行应力分析,在相同穿刺力作用下,求解出各弯钩最大等效应力和远离针尖端端面的反作用力矩。结果 理论分析与数值模拟分析结果均表明,端面1反作用力矩随着偏转角的增大而增大,随着倾斜角的增大而减小。当弯钩偏转角为 0° 、弯钩倾斜角为 30° 时,端面1的反作用力矩最小。有限元分析结果显示,当偏转角为 0° 时,弯钩最大等效应力最小,且不随弯钩倾斜角的变化而变化。结论 所建数学模型可以准确说明弯钩端面1处力矩与弯钩偏转角和倾斜角的关系。研究结果为软组织缝合过线器弯钩几何结构的设计提供理论依据,提高了软组织缝合过线器在手术过程中的安全性。

关键词:缝合过线器;弯钩;软组织;有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.03.017

The Influence of Bending Parameters on Mechanical Properties of Soft Tissue Suture Passer Hook

XIAO Shanshe¹, YUAN Shiting¹, GU Xuelian¹, LAI Weiguo², CHEN Zhi²

(1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai BJ-KMC Medical Technology Co., Ltd., Shanghai 201712, China)

Abstract: Objective To explore the influence of hook deflection angle and inclination angle on mechanical properties of the soft tissue suture passer hook. **Methods** Taking the end face far away from the tip of the needle (end face 1) as the study object, a mathematical model was established with the moment as dependent variable and the hook deflection angle and inclination angle as the independent variable. The moment was solved by the mathematical model with the deflection angle and inclination angle of 0° , 10° , 20° and 30° . Based on the finite element analysis method, 16 three-dimensional geometric hook models with deflection angle and inclination angle of 0° , 10° , 20° and 30° were established by SolidWorks. The stress analysis was carried out by ANSYS Workbench. Under the same puncture force, the maximum von Mises stress of each hook and the reaction moment of end face far away from the tip of the needle were calculated. **Results** The results from theoretical analysis and numerical simulation showed that the reaction moment of end face 1 increased with the increase of deflection angle, and increased with the decrease of inclination angle. The hook with deflection angle of 0° and

收稿日期:2020-05-13; 修回日期:2020-07-07

基金项目:上海市生物医学工程研究生示范实践基地(1017308011)

通信作者:谷雪莲,副教授,E-mail:guxuelian@usst.edu.cn

inclination angle of 30° had the minimum reaction moment. The finite element analysis results showed that with the deflection angle of 0° , the maximum von Mises stress of the hook was the smallest and did not change with the inclination angle of the hook changing. **Conclusions** The established mathematical model can accurately explain the relationship between the moment at the end face of the hook and the deflection angle and inclination angle of the hook. This study provides the theoretical basis for designing hook geometry of the soft tissue suture passer, and improves the safety of the soft tissue suture passer in operation process.

Key words: suture passer; hook; soft tissues; finite element analysis

肩关节是人体最灵活的关节,属于典型的多轴球窝关节。这种结构使得肩关节具有较大的灵活性,但也降低了关节的稳固性。肩关节主要靠肩袖、孟唇、关节囊及其周围韧带维持稳定性。肩关节脱位是肩关节最常见的疾病,在人群中发生率约为2%,在运动员中发生率为7%,军事训练中此类损伤也较为常见^[1]。肩关节脱位常伴有孟唇损伤或肩袖撕裂^[2]。孟唇损伤中 Bankart 损伤最为常见,占孟肱关节创伤性不稳中 5.4%~70%^[3]。在正常人群中,肩袖损伤占肩关节疾病 5%~40%,在60岁以上人群中占 17%~40%^[4]。

肩关节镜下 Bankart 修复是处理肩关节不稳定的方法之一。与开放型 Bankart 修复术相比较,关节镜下 Bankart 修复术可以减少术后疼痛以及运动范围的丧失,避免影响肩胛下肌的功能^[5]。在 Bankart 修复手术过程中,医生需要对肩关节内撕裂的孟唇组织进行精准的过线,从而缝合或固定撕裂部位。过线所用装置对过线的精准性和效率起到关键性作用。现有过线装置均为进口产品,存在由于穿刺力的作用导致过线装置弯钩部分发生断裂的现象,势必增大了手术风险^[6]。因此,探究弯钩在穿刺力作用下的受力状态,优化几何结构,设计出更加安全的弯钩显得尤为重要。

市场上流通的软组织过线装置均为进口产品,主要有锐适(Arthrex)的 SutureLasso™、施乐辉(Smith & Nephew)的 Accu-Pass 和康美(Commed)的 Spectrum® II。3种品牌的过线装置均有多种类型的弯钩,复杂的弯钩形状便于达到肩关节内部的任何部位,但由于复杂的弯型工艺,造成弯钩弯曲处产生了应力集中现象,降低了弯钩的强度。一些学者针对管的弯曲变形对其力学性能的影响开展研究。结果表明,圆管在弯曲过程中由于应力作用会发生自身的相对形变,即弯曲部分横截面会变成椭

圆形,外侧管壁受拉伸应力的作用而变薄,内侧管壁受压缩应力的作用而变厚^[7-8]。对于弯管的研究多为油气管道或其他大型管件,相对于缝合过线装置弯钩,此类管件直径大(20~100 mm),管壁厚(2~6 mm),与缝合过线装置弯钩的几何结构(直径 1.7 mm,壁厚 0.3~0.4 mm)相差较大。但有关缝合过线装置弯钩的相关研究,目前鲜有文献报道。

本文重点研究在穿刺力作用下弯钩偏转角(θ)和倾斜角(φ)对弯钩力学性能的影响。分别采用构建数学模型和有限元分析的方法进行验证分析,分析方法和结论为缝合过线装置弯钩几何参数的优化设计提供理论依据。

1 材料与方法

缝合过线装置由手柄和弯钩组成,弯钩前端带有针尖和特定的弯形结构[见图 1(a)]。在手术过程中,针尖需要穿过缝合部位,特定的弯形结构需要有足够的刚度和强度提供所需穿刺力。弯形结构影响弯管本身的受力状态。为优化弯钩几何结构,进一步提高弯钩的安全性以及力在弯钩处的力传递效率,本文分析弯钩 θ 和 φ 分别为 0° 、 10° 、 20° 和 30° 时对弯钩自身受力状态的影响。

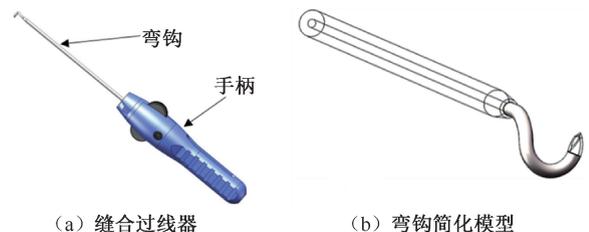


图 1 缝合过线器和弯钩结构

Fig.1 Structure of suture passer and hook (a) Suture passer, (b) Simplified model of hook

1.1 弯钩几何结构及数学模型建立

1.1.1 研究变量建立 由于研究对象为弯钩的弯

曲结构,针尖对弯曲结构处仅有压力作用,而弯曲结构的另一端为直的空心圆管,为简化计算,取其简化模型[见图1(b)]。靠近针尖端取至针尖下 endpoint,远离针尖端取至弯曲段与直管交界面 3 mm 处。弯钩远离针尖的端面为端面 1,靠近针尖的端面为端面 2。固定参考面与端面 1 平行, θ 为固定参考面与变动面在上视基准面内的夹角; φ 为固定参考面与变动面在前视基准面内的夹角,变动面为弯钩第 2 段中轴线所在平面[见图 2(a)]。

1.1.2 力学方程建立 为求得在针尖压力(F)作用下端面 1 处的力矩,现取弯钩中轴线为分析对象,并在求解点处建立笛卡尔直角坐标系。则 F 在求解点处产生的力矩可表示为:

$$M_x = Fd\cos\varphi\cos\theta \quad (1)$$

$$M_y = Fd\sin\varphi\cos\theta \quad (2)$$

$$M_z = F\cos\varphi(l + d\sin\theta) \quad (3)$$

则求解点处的力矩为:

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (4)$$

把式(1)~(3)代入式(4)得:

$$M = F\sqrt{r^2\cos^4\varphi + 2r(b + d\sin\theta)\cos^3\varphi + \sqrt{(b + d\sin\theta)^2\cos^2\varphi + d^2\cos^2\theta}} \quad (5)$$

式中: $r=3\text{ mm}$, $b=3\text{ mm}$, $d=5\text{ mm}$, $F=4\text{ N}$ 。

1.2 弯钩受力有限元分析

1.2.1 弯钩几何模型建立 所建弯钩有限元模型为三维空间弯管,通过 SolidWorks 2016 三维建模软件,建立如图 2(b)所示三维空间曲线。第 1 段弯曲半径 $r=3\text{ mm}$,第 2 段弯曲直径 $d=5\text{ mm}$,弯曲角度为 180° ,第 1 段和第 2 段的曲线始终保持相切状态。弯钩内径为 0.95 mm ,外径为 1.7 mm 。在保持以上参数不变条件下,建立 φ 和 θ 分别为 0° 、 10° 、 20° 和 30° 的 16 种几何模型,导入 ANSYS Workbench 有限元分析软件进行应力分析。

1.2.2 材料属性 弯钩所用材料为 304 不锈钢,在 ANSYS Workbench 中赋予材料属性:密度 $\rho = 7.93\text{ g/cm}^3$,弹性模量 $E = 194.02\text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.31$,屈服强度 $\sigma_s = 205\text{ MPa}$,抗拉强度 $\sigma_b = 520\text{ MPa}$ 。

1.2.3 网格划分 为增加求解的精确性,选取带有中节点的 20 节点六面体网格,在管壁厚度方向上划分 4 层网格单元,根据 Workbench 中所显示的

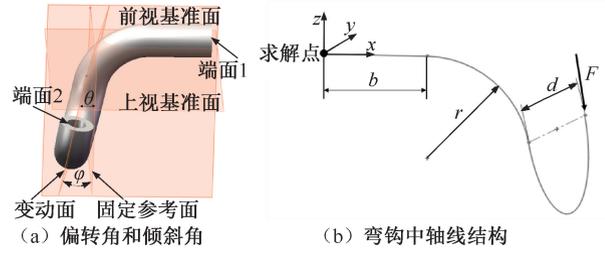


图2 弯钩几何参数

Fig.2 Geometric parameters of the hook (a) Deflection and inclination angle, (b) Structure of hook central axis

网格质量大小,调节弯管圆周方向上的网格分割数量,使得网格质量取得最大值。

1.2.4 边界条件设置 弯钩在穿刺过程中仅受到手柄所传递的旋转动力和针尖所传递的压力,故限制端面 1 的 6 个自由度,在端面 2 上沿端面 2 的法向施加 2.5 MPa 均布压力载荷,均布载荷为穿刺力与弯钩管壁横截面积的比值。

2 结果

图 3(a)所示为通过数学模型求解所得力矩随着 φ 、 θ 的变化趋势,可见力矩随 θ 增大而增大,随着 φ 增大而减小。图 3(b)所示为有限元分析法所得力矩随 φ 、 θ 的变化趋势,可见力矩随着 θ 增大而增大,随着 φ 增大而减小。

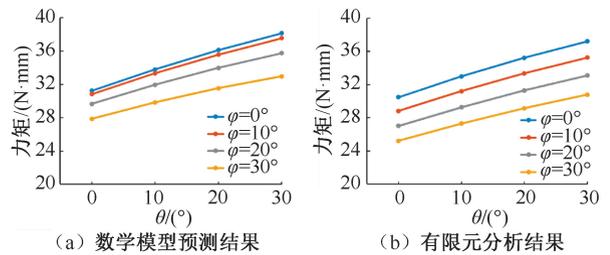


图3 力矩随倾斜角和偏转角度变化曲线

Fig.3 Variation of the moment with inclination angle and deflection angle

(a) Prediction result of the mathematical model,

(b) Results of finite element analysis

由图 4 力矩关于 θ 、 φ 的有限元分析和模型预测结果可知,数学模型预测结果与有限元分析结果在力矩关于弯钩 θ 和 φ 的变化趋势上具有一致性。当 $\varphi = 30^\circ$ 时,有限元分析结果与模型预测结果有最大相对误差为 9.9% 。当 $\varphi = 0^\circ$ 时,有限元分析结果

与模型预测结果的相对误差为 2.5%, 从而说明此数学模型的准确性。

弯钩最大等效应力随 θ 增大而增大, 随 φ 增大而减小 [见图 5(a)]。当 $\theta=0^\circ$ 时, 弯钩最大等效应力不随倾斜角变化而变化, 且此时应力最小 (62.759 MPa)。在穿刺力作用下, 弯钩应力等

效力沿弯钩中轴线对称分布, 最大等效应力出现在弯钩弯曲中部和远离针尖的端部 [见图 5(b)]。构件发生断裂的条件为构件所受应力达到材料的断裂极限, 本文所用最大等效应力可以准确反映弯钩各部分材料在受力后所达到的应力状态。

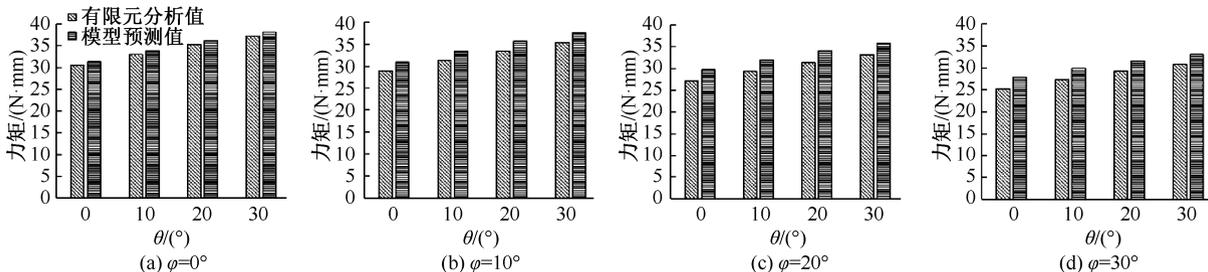
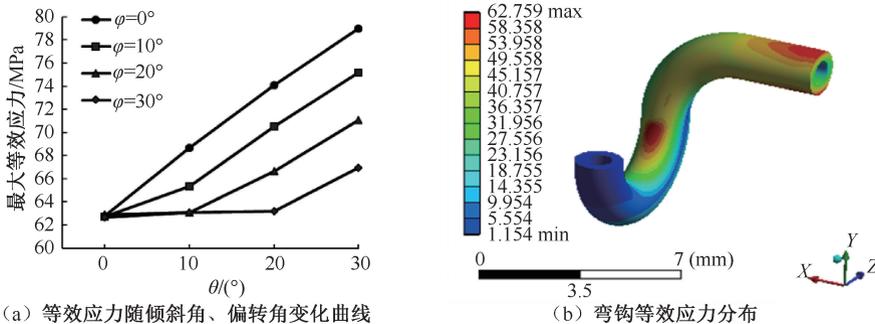


图 4 力矩关于倾斜角、偏转角的有限元分析和模型预测结果对比

Fig.4 Comparison for finite element analysis and model prediction results of the moment with respect to inclination angle and deflection angle θ (a) $\varphi=0^\circ$, (b) $\varphi=10^\circ$, (c) $\varphi=20^\circ$, (d) $\varphi=30^\circ$



(a) 等效应力随倾斜角、偏转角变化曲线

(b) 弯钩等效应力分布

图 5 等效应力变化曲线及分布

Fig.5 Variation and distribution of von Mises stresses (a) Variation of von Mises stress with inclination angle and deflection angle, (b) Distribution of von Mises stress on the hook

3 讨论

目前软组织缝合过线装置广泛应用于关节镜手术中缝合软组织, 但国内外对缝合过线器弯钩的研究鲜有报道。因此, 本文以弯钩偏转角和弯钩倾斜角为对比因素, 基于数学模型法和有限元分析法, 建立弯钩几何模型以及端面 1 处力矩大小的数学模型, 以最大等效应力、端面 1 处力矩为评价参数, 对比分析弯钩偏转角和弯钩倾斜角对弯钩自身受力状态的影响。

由分析结果可知, 在相同穿刺力作用下, 弯钩偏转角越小, 弯钩所承受的应力以及端面 1 处的反作用力矩越小。弯钩倾斜角越小, 弯钩最大等效应

力和端面 1 处的反作用力矩越大。在穿刺力作用下, 弯钩中部和近端面 1 的位置出现了较大的应力。由于弯钩几何形状的原因, 弯钩中部产生较大应力处距针尖的垂直距离较大, 故穿刺力在此处产生的力矩较大。弯钩受到针尖的反作用力在端面 1 处转化为了扭矩, 并且端面 1 处相对于针尖的垂直距离最大, 故相同大小的针尖反作用力, 在端面 1 处产生的力矩最大, 导致端面 1 处产生最大等效应力。此结果与 Hyun 等^[6]在临床中发现的弯钩断裂部位相一致。对弯钩整体受力分析, 端面 1 处受到的力均为端面 2 处的载荷在端面 1 处产生的力矩, 故力矩可以准确地反映出端面 1 处的受力大小。

由式(5)可知, 远离针尖的端面反作用力矩随

着直管长度的增加而增加。在满足手术所需长度的前提下,减小直管长度可有效减小反作用力矩,进而更有效地传递手柄所施加的力。另外,在保证缝线可以顺利穿过软组织缝合过线器的前提下,增大弯钩壁厚;在满足手术需求的前提下,尽量减小端面1和端面2间的垂直距离,可以作为过线器弯钩可能的改进方案。

本文分析结果可以作为软组织缝合过线器弯钩几何结构设计的理论依据。在以后的设计过程中,弯钩偏转角和倾斜角作为影响弯钩应力状态的参数被考虑其中,将此数学模型作为理论依据,可对弯钩几何形状做出优化设计。由于弯钩在实际穿刺过程中所受力的大小随穿刺过程而变化,对于在变力作用下弯钩的应力状态可做进一步的研究。

4 结论

弯钩最大等效应力与端面1的反作用力矩随偏转角的增大而增大,随倾斜角的增大而减小。所建数学模型可以准确地说明弯钩端面1处力矩与弯钩偏转角和倾斜角的关系。本研究结果为软组织缝合过线器弯钩几何结构的设计提供理论依据,提高了软组织缝合过线器在手术过程中的安全性。

参考文献:

[1] 敖英芳.关节镜外科学[M].北京:北京大学医学出版社,

2012: 372.

- [2] OUNTZOULAS K, HASSAN S, KHORIATI A, *et al.* Arthroscopic stabilisation for shoulder instability [J]. *J Clin Orthos Trauma*, 2019, 11(3): 402-411.
- [3] JIANG CY, ZHU YM, LIU X, *et al.* Do reduction and healing of the bony fragment really matter in arthroscopic bony bankart reconstruction? A prospective study with clinical and computed tomography evaluations [J]. *Am J Sports Med*, 2013, 41(11): 2617-2623.
- [4] 曹晓艳,方宁,田娜,等.定向拉伸工艺对可吸收肩袖补片力学性能的影响[J].*医用生物力学*, 2020, 35(1): 27-34. CAO XY, FANG N, TIAN N, *et al.* Influences of unidirectional stretching process on mechanical properties of absorbable patch for rotator cuff repair [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 27-34.
- [5] SCHEIBEL M, NIKULKA C, DICK A, *et al.* Structural integrity and clinical function of the subscapularis musculotendinous unit after arthroscopic and open shoulder stabilization [J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(7): 1153-1161.
- [6] HYUN YS, SHIN WJ. Advantages of scorpion suture passer and 70 degrees arthroscope in arthroscopic bankart repair: Usefulness for inferior labral repair [J]. *Clin Shoulder Elbow*, 2017, 20(4): 201-207.
- [7] SOROORA S, SHAZLYA M, MEGAHEM M. Limit load analysis of thick-walled as-fabricated pipe bends under in-plane moment loading and internal pressure [J]. *Int J Pres Ves Pip*, 2019, 174: 1-12.
- [8] SELLA Kumar S, GNANAVEL BK, VENKATASAMY R. Analysis of ovality effect in a non-linear stand alone pipe bend [J]. *J Balk Tribol Assoc*, 2019, 25(3): 651-664.