

文章编号: 1004-7220(2022)06-1088-07

# 不同牵引正畸方式治疗烧伤爪形手的生物力学分析

吕 莹<sup>1</sup>, 郑清丽<sup>1</sup>, 侯春胜<sup>2</sup>, 安美文<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 生物医学工程学院, 太原 030024; 2. 浙江大学医学院附属杭州市第一人民医院 整形外科, 杭州 310006)

**摘要:** **目的** 研究烧伤爪形手畸形的形成及两种牵引正畸治疗中针对软组织的生物力学分析。**方法** 建立包含皮肤和瘢痕的手部有限元模型,对烧伤爪形手畸形的瘢痕挛缩-肌腱韧带挛缩-瘢痕切除并植皮-牵引正畸治疗全过程进行数值模拟,对相关软组织进行生物力学分析,并对比两种牵引方式的优劣。**结果** 瘢痕挛缩时,相关的屈肌和伸肌都被拉伸;掌指关节处背侧韧带松弛,多数侧副韧带紧张。手术治疗后,畸形有较大程度缓解;肌腱紧张或松弛程度减小;紧张的侧副韧带松弛,挛缩的背侧韧带被拉伸。牵引正畸治疗对手术治疗具有增益的效果。对于烧伤爪形手畸形,本文所设定的经过瘢痕松解后直接施加动态牵引的治疗方案安全有效,且对肌腱伸长有较好的促进作用;从牵引效果来看,拉长式牵引方法较拮抗式牵引更具有优势。**结论** 研究结果可以为临床介入和患者预后的改善提供参考。

**关键词:** 手模型; 爪形手; 牵引正畸治疗; 畸形

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2022.06.018

## Biomechanical Analysis on Different Traction Orthodontic Modes in the Treatment of Postburn Claw Hands

LÜ Ying<sup>1</sup>, ZHENG Qingli<sup>1</sup>, HOU Chunsheng<sup>2</sup>, AN Meiwen<sup>1</sup>

(1. College of Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Department of Plastic Surgery, Affiliated Hangzhou First People's Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310006, China)

**Abstract: Objective** To make biomechanical analysis on soft tissues in the formation of postburn claw hand deformity and during its two traction orthodontic treatments. **Methods** The hand model containing skin and scar was established, and the scar contracture-tendon and ligament contracture-scar excision with skin grafting-traction orthodontic treatment process for postburn claw hand deformity was simulated. Biomechanical analysis on relevant soft tissues was performed, and the advantages and disadvantages of the two traction modes were compared. **Results** The associated flexors and extensors were stretched when scar contracture occurred. The dorsolateral ligaments at the metacarpophalangeal (MCP) joints were relaxed and most of the lateral collateral ligaments were tensed. After surgical treatment, the deformity was largely relieved. Tension or laxity of the tendons was reduced. The tensed lateral collateral ligaments were relaxed and the contracted dorsolateral ligaments were stretched. Traction orthodontic treatment was gainful for scar removal surgery. For postburn claw hand deformity, the treatment protocol of dynamic traction applied directly after scar release set up in this study was safe and effective, and had a better promotion effect on tendon elongation. In terms of traction effect, the elongated traction method showed more advantages than the antagonistic traction. **Conclusions** The research results may provide references for clinical interventions and prognosis improvement of patients.

**Key words:** hand model; claw hand; traction orthodontic; deformity

收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-03-24

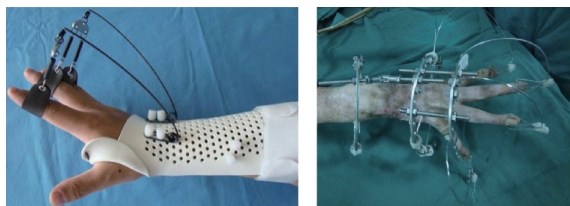
基金项目: 国家自然科学基金项目(11372208, 31870934, 11972243)

通信作者: 安美文, 教授, 博士生导师, E-mail: meiwen\_an@163.com

烧伤后手部挛缩畸形是手部严重烧伤后的常见情况,主要是由于后期瘢痕挛缩和继发的肌肉、肌腱、韧带等软组织废用性挛缩造成<sup>[1]</sup>。其中,烧伤爪形手畸形是受损后较难矫正的问题,主要涉及手部背侧皮肤和伸肌的直接热损伤,表现为腕关节和掌指(metacarpophalangeal, MCP)关节的过度伸展、指(interphalangeal, IP)关节的屈曲以及拇指的径向内收等<sup>[2]</sup>。

临床上治疗烧伤后手部挛缩畸形的主要步骤包括瘢痕松解、软组织覆盖和术后康复(防止挛缩复发)<sup>[3-4]</sup>。对于已经发生的挛缩畸形,手术治疗是最直接和有效的方法,其核心目的是切除瘢痕以及松解挛缩和组织黏连,为后续进一步的整形和功能恢复创造条件,例如瘢痕切除、植皮或皮瓣转移。邹同荣等<sup>[5]</sup>以手术切除或松解瘢痕并植皮,分二期手术分别进行 MCP 和 IP 关节纠正,对 52 例烧伤爪形手的治疗取得较好的效果,但对重症病例的对掌及握捏功能恢复较差。祁强等<sup>[6]</sup>以手术切除侧副韧带、松解背侧关节囊纠正 MCP 关节,同时以松解掌板和修补中央术矫正指间关节的方法治疗 25 例烧伤爪形手畸形,并以腹部带蒂皮瓣转移修复创面,辅助以弹性支架牵引、握力器和分支器锻炼,治疗效果较为满意。Brown 等<sup>[7]</sup>通过对常见各类皮瓣进行详细的研究发现,Z 形皮瓣可以使瘢痕长度延长 75%。此外,手部支具可分为静态支具和动态支具,在预防植皮回缩和瘢痕挛缩以及后续矫正畸形的治疗中发挥着越来越重要的作用。其中,静态支具将患指关节固定于一定的角度,可以提供微弱的牵引力,如石膏板、低温热塑板等<sup>[8]</sup>;而动态支具以橡皮圈或弹簧等提供较大的外源性牵引力,以增强或代偿关节活动功能<sup>[9]</sup>。多数支具都属于沿着患指的法向方向进行的拮抗式牵引,其中代表性的有高峻青等<sup>[10]</sup>研制的多功能牵引支具[见图 1(a)]。而侯春胜等<sup>[11-12]</sup>认为,烧伤后手部畸形本质是由瘢痕挛缩导致,软组织挛缩在先,骨关节畸形在后,于是将骨牵引技术应用到手部烧伤挛缩畸形的矫治中,进行拉长式牵引,取得较好的治疗效果[见图 1(b)]。

尽管临床实践中对于烧伤爪形手畸形的治疗积累了丰富的经验,并取得较为满意的治疗效果,但相关临床方案的确定很大程度上依赖于医生的个人经验,没有指导性的规范。研究烧伤爪形手畸形



(a) 拮抗式牵引

(b) 拉长式牵引

图 1 烧伤爪形手动态牵引

Fig. 1 Dynamic traction for postburn claw hands

(a) Antagonistic traction, (b) Elongated traction

的形成及其牵引正畸治疗阶段的生物力学机制,对于预防畸形形成、优化和规范治疗方案具有重要的指导意义,而目前鲜有关于此方面的报道。

本文在建立手部有限元模型的基础上,通过计算手背侧瘢痕挛缩-瘢痕松解切除后植皮-牵引正畸工况,研究烧伤爪形手畸形的形成、手术松解和牵引正畸治疗对软组织的影响,以期为临床治疗烧伤爪形手畸形方案的制定和优化提供必要的技术支持。

## 1 方法

### 1.1 手部有限元模型建立和验证

基于正常人手 CT 扫描图像文件,利用三维医学图像建模软件 MIMICS 19.0 和有限元软件 ABAQUS2017 建立手部有限元模型,包括 29 块骨、9 块肌肉及其肌腱,以及相关的韧带[见图 2(a)]。关节由左、右和后侧的 3 个弹簧单元连接,以保持关节稳定并提供关节阻尼。肌肉和肌腱连接的部分被定义为肌肉肌腱结(muscle-tendon junction, MTJ),并将肌肉残端设置为刚体,以其参考点施加 MTJ 位移荷载。采用 5 组屈指实验中指浅屈肌(flexor digitorum superficialis, FDS)、指深屈肌(flexor digitorum profundus, FDP)和伸指肌(extensor digitorum, ED)的 MTJ 位移-指尖力数据,完成模型参数确定和模型验证。其中,模型验证要求模型在由伸直状态屈曲至休息位时 FDS、FDP 和 ED 的 MTJ 位移荷载下,模型的变形与实验动作一致[见图 2(b)]。

### 1.2 皮肤和瘢痕模型的添加

在 MIMICS 19.0 中通过布尔运算得到初步的手部皮肤模型。皮肤模型分为皮肤和皮下组织两层。其中,表面的两层单元(2~3 mm)设置为皮肤的材料属性,其余的下层单元设置为皮下组织材料

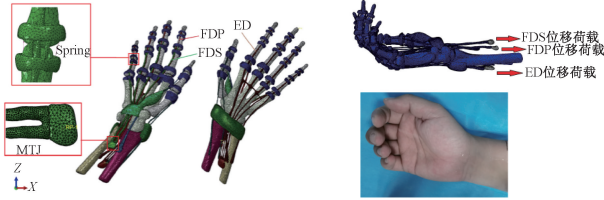


图2 手部模型及其验证  
Fig. 2 Hand model and model verification (a) Finite element model of the hand, (b) Model verification

属性。皮肤和皮下组织为不可压缩各向同性材料,其材料属性采用文献[13]中所验证的 Ogden 超弹性材料模型,肌腱、韧带及弹簧单元的材料参数由实验数据经多次反馈计算拟合得到。

烧伤后产生的瘢痕组织由于烧伤程度、产生部位等因素而具有不规则的几何尺寸,模型于手背处选取约  $86\text{ mm} \times 76\text{ mm}$  的六边形区域设置为手背侧瘢痕,厚度为手背皮肤全层厚度(见图3)。为简化计算,将瘢痕组织定义为各向同性的线弹性材料;并采用文献[14]中关于瘢痕组织的离体拉伸实验数据,将其弹性模量设置为  $43.68\text{ MPa}$ 。关节处模拟韧带的弹簧单元按照刚度相等原则替换为面积  $1\text{ mm}^2$  圆截面的桁架单元。皮肤模型与掌骨、尺骨和桡骨施加绑定接触,瘢痕模型与皮肤施加绑定接触。

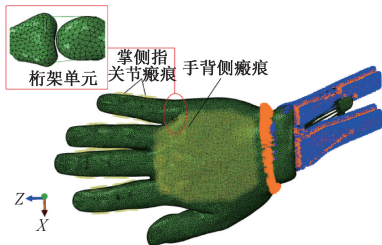


图3 包含皮肤和瘢痕手部有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of hand containing skin and scar

### 1.3 荷载工况

针对一般性的烧伤爪形手畸形的形成机制和治疗原则,进行如下的简化:① 烧伤仅在模型所设置的瘢痕组织范围内;② 肌腱和关节韧带的挛缩为适应性挛缩;③ 烧伤爪形手畸形的手术治疗仅考虑手背侧瘢痕切除并植皮;④ 牵引正畸治疗考虑拉长式牵引和拮抗式牵引两种方式。其中,拉长式牵引为各手指远节指骨的顶点处的  $Z$  方向的牵引;拮抗式牵引为各手指远节指骨的顶点处的  $Y$  方向的牵引。

基于以上简化,设置如下5个工况:① 瘢痕挛

缩工况(工况1)。将掌骨、尺骨和桡骨固定,将手腕处的皮肤末端截面固定,FDS、FDP、指伸肌、拇长屈肌和拇长伸肌末端自由。采用降温法给手背侧瘢痕模型和掌侧IP关节处的瘢痕组织分别施加20%和24%的收缩预应力场。② 肌腱韧带挛缩工况(工况2)。根据工况1的计算结果,将各个肌腱末端固定,给肌腱和韧带施加相应的温度场。③ 手背侧瘢痕切除并植皮工况(工况3)。将手背侧瘢痕的材料参数改为皮肤的材料参数,并取消其初始温度场,表示初始收缩量降低了100%。④ 拉长式牵引工况(工况4)。根据工况3结果中各手指远节指骨顶点的  $Z$  方向的位移,施加相应数值的  $Z$  轴正方向位移荷载。⑤ 拮抗式牵引工况(工况5)。根据工况3结果中各手指远节指骨顶点和近侧指间(proximal interphalangeal, PIP)关节的  $Y$  方向位移,施加相应数值的  $Y$  轴方向位移荷载。其中,工况2和3同时进行,计算与讨论时合并为肌腱韧带挛缩工况。

## 2 结果

### 2.1 各工况下变形和位移

如图4所示,正常手掌在手背侧瘢痕和掌侧IP瘢痕的挛缩作用下,MCP关节过伸,IP关节屈曲,形成爪形手畸形;随后,肌腱和韧带产生适应性挛缩或伸长,手术治疗后手背侧瘢痕组织被切除,挛缩的韧带以及掌侧IP关节瘢痕未被松解,手掌仍存在残余畸形;最后,采用拉长式牵引或者拮抗式牵引方法,将手掌牵引至正常状态。

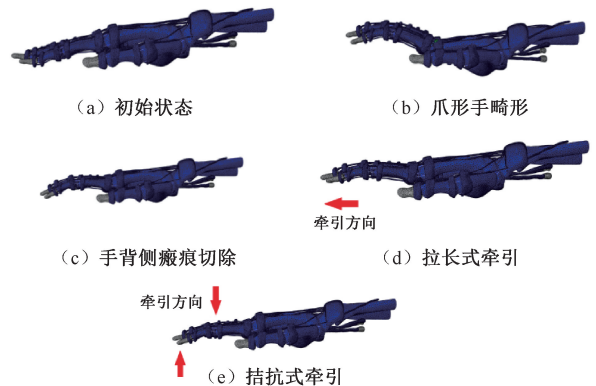


图4 各工况下模型变形  
Fig. 4 Deformation of the model under each working condition (a) Initial state, (b) Postburn claw hands, (c) Dorsal hand scar excision, (d) Antagonistic traction, (e) Elongated traction 注:模型未显示皮肤和瘢痕。

结果表明,在瘢痕挛缩工况下,FDS、FDP、ED、拇长屈肌和拇长伸肌的 MTJ 位移分别为 5.80、6.02、1.25、2.90、-5.36 mm(负值表示肌腱松弛)。由此可知,爪形手畸形产生时,对于食指、中指、无名指和小指,由于 IP 和 MCP 关节转动方向相反,导致相关联的屈肌和伸肌都被拉伸,肌腱紧张而适应性伸长;拇指各关节同向屈曲,拇长屈肌紧张,拇长伸肌松弛。

MCP 韧带附着点的间距变化如表 1 所示。爪形手畸形产生时,食指、中指、无名指和小指 MCP 关节处背侧韧带松弛,会产生适应性挛缩;拇指 MCP 关节处背侧韧带紧张而适应性伸长。对于各手指 MCP 关节处的侧副韧带,则由于指骨的 X 或 Y 方向的偏移,或松弛或紧张,从而产生情况不一的挛缩或伸长。

表 1 瘢痕挛缩工况下各 MCP 关节处韧带附着点间距变化  
Tab.1 Variation in spacing of ligament attachment points at each MCP joint under scar contracture working conditions

MCP joint under scar contracture working conditions					
单位:mm					
韧带	拇指	食指	中指	无名指	小指
桡侧副韧带	1.07	0.83	0.65	1.13	1.09
背侧韧带	1.31	-13.03	-9.79	-6.39	-10.38
尺侧副韧带	-0.88	-0.97	-0.76	0.09	1.01

注:间距变化的正值表示韧带紧张,负值表示韧带松弛。

肌腱韧带挛缩工况的温度场由各肌腱 MTJ 位移和表 1 中各 MCP 关节处韧带附着点的间距变化确定。同时,取消手背侧瘢痕组织的初始温度场,计算得到肌腱韧带挛缩(手背侧瘢痕切除并植皮)工况的结果。此工况下,各手指远节指骨顶点的位移如表 2 所示。其中, $U_x$  决定拉长式牵引工况的位移荷载, $U_y$  决定拮抗式牵引工况的位移荷载。

表 2 肌腱韧带挛缩工况下各手指远节指骨顶点位移  
Tab.2 Displacement of the apex on distal phalanges of each finger under contracture working conditions of tendon and ligament

手指	$U_x/mm$	$U_y/mm$	$U_z/mm$
拇指	1.33	1.54	-1.35
食指	5.55	1.45	-8.44
中指	-4.18	-0.68	-6.21
无名指	-4.99	1.23	-5.39
小指	-1.26	-4.60	-7.75

## 2.2 拉长式牵引和拮抗式牵引比较

在牵引正畸治疗阶段,对两种牵引方法的评估

指标,一是牵引力大小,二是牵引方法对肌腱和韧带的牵引效果。本文结果表明,拉长式牵引所需的牵引力稍大于拮抗式牵引所需的牵引力,但拉长式牵引方法只需在指尖处牵引,而拮抗式牵引方法需要在指尖和 PIP 关节处同时牵引(见表 3)。

表 3 不同牵引工况下各手指指尖和 PIP 关节处牵引力  
Tab.3 Traction forces at the fingertips and PIP joints of each finger under different traction working conditions 单位:N

手指	指尖	拉长式牵引	拮抗式牵引
拇指	指尖	1.72	—
	PIP	-1.08	—
食指	指尖	7.08	—
	PIP	-5.35	-9.80
中指	指尖	5.00	—
	PIP	3.33	-15.25
无名指	指尖	4.21	—
	PIP	-3.39	-5.65
小指	指尖	4.40	—
	PIP	2.02	-5.70

注:正值表示牵引力沿轴的正方向。

由图 5 可知,对于肌腱,在拉长式牵引时,FDS 和拇长屈肌紧张程度较肌腱韧带挛缩工况分别增加 448.9% 和 123.9%,FDP 紧张程度减小 9.9%;ED 由松弛变成紧张,拇长伸肌松弛程度减小 50.7%。在拮抗式牵引时,FDS 和拇长屈肌紧张程

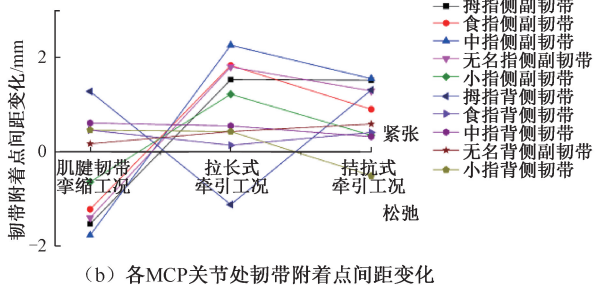
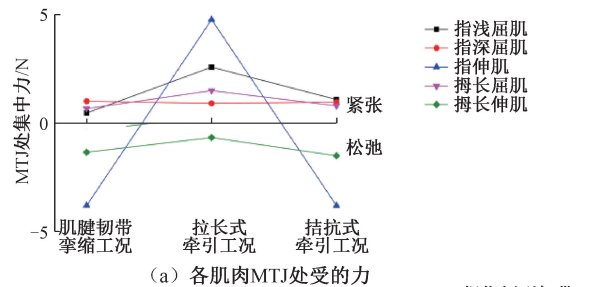


图 5 各工况下肌腱受力和 MCP 关节处韧带附着点间距变化  
Fig.5 Forces on the tendons and variation in the spacing of ligament attachment points at MCP joints under each working condition (a) Forces of each muscle in MTJ, (b) Variation in spacing of ligament attachment points at the MCP joints

度较肌腱韧带挛缩工况分别增加 131.9% 和 19.4%，FDP 紧张程度减小 4%；ED 和拇长伸肌松弛程度略有增加。对于韧带，在拉长式牵引时，所有侧副韧带由松弛状态变为紧张状态，背侧韧带（除拇指背侧韧带外）保持紧张状态；在拮抗式牵引时，所有侧副韧带由松弛状态变为紧张状态，背侧韧带（除小指背侧韧带外）紧张程度基本不变。由此可见，拉长式牵引方法对肌腱和韧带的牵引效果要优于拮抗式牵引方法，尤其是对背侧伸肌的牵引具有独特的优势。基于以上两方面因素，本文认为，对于烧伤爪形手畸形，拉长式牵引方法较拮抗式牵引更具有优势。

### 2.3 软组织最大应力

本文结果表明，植皮在两种牵引正畸工况下的最大应力较植皮手术时均有不同程度的下降。各肌腱最大 von Mises 应力均出现在关节处，FDS 的应力峰值最高。除 FDS 外，其他肌腱、韧带最大 von Mises 应力在各工况下较为稳定（见表 4、图 6）。

表 4 各个工况下软组织最大应力

Tab. 4 Maximum stress of soft tissues under each working condition				
单位: MPa				
组织	瘢痕挛缩工况	肌腱韧带挛缩工况	拉长式牵引工况	拮抗式牵引工况
皮肤	—	7.38	3.10	2.20
FDS	41.14	10.78	4.55	3.35
FDP	6.22	7.88	6.27	4.59
ED	13.57	26.09	19.88	28.59
韧带	2.62	2.55	4.51	3.03

### 3 讨论

烧伤爪形手畸形是损伤发育后最复杂和最难矫正的问题。一般而言，挛缩的瘢痕、肌腱或韧带被松解得越彻底，对烧伤爪形手畸形的治疗效果越好。因此，临床上多主张分期手术依次进行矫正手背瘢痕、切断或切除侧副韧带、松解背侧关节囊或延长伸肌肌腱等步骤，取得一定的效果。但多次手术会延长治疗周期、增加治疗成本，更增加了新伤口挛缩的风险。其中的取舍需要相关的生物力学研究提供数据支持。

本文以包含皮肤和瘢痕的手部有限元模型，对简化的烧伤爪形手畸形的瘢痕挛缩-肌腱韧带挛缩-瘢痕切除并植皮-牵引正畸治疗过程进行了定量分



图 6 不同牵引工况下肌腱和皮肤应力分布

Fig. 6 Distribution of the stress on tendons and skin under traction working conditions (a) Elongated traction, (b) Antagonistic traction

析。结果表明，手背侧瘢痕和掌侧 IP 瘢痕的共同挛缩会产生爪形手畸形。瘢痕挛缩时，多数屈肌、伸肌和侧副韧带被拉伸，MCP 关节处背侧韧带松弛。在瘢痕切除并植皮、肌腱韧带挛缩阶段，肌腱和韧带的变化与瘢痕挛缩阶段是相反的，但手掌仍保持一定的残余畸形。牵引正畸治疗对瘢痕切除手术治疗的效果是增益的，且两种牵引方法均能达到消除残余畸形，牵引挛缩组织的作用。

对比两种牵引方法，拉长式牵引方法对肌腱和韧带的牵引效果更好，尤其是对手背侧伸肌的牵引具有独特的优势。这是因为在爪形手畸形状态下，IP 关节（屈曲）与 MCP 关节（过伸）处于完全相反的畸形方向，拉长式牵引可以同时纠正两个方向的畸形，是最直接的牵引方法。拉长式牵引几乎可以使所有受爪形手畸形影响的屈肌、伸肌肌腱和韧带都被拉伸，这对后续的组织生长和功能恢复是有利的；而且会使长期受压的关节面得到缓解，有利于关节面的恢复。

细胞在机械应力作用下会发生形态、结构和功能的改变<sup>[15]</sup>,一定的应力刺激会促进细胞的增殖<sup>[16]</sup>,但应力过高反而会抑制细胞增殖<sup>[17]</sup>,增加疼痛等不适感,甚至引起组织损伤。研究表明,人体背部皮肤极限应力(ultimate stress, UTS)为 $(21.6 \pm 8.4)$  MPa<sup>[18]</sup>,肌腱 UTS 为 $50 \sim 150$  MPa<sup>[19]</sup>,拇指腕掌关节前斜韧带 UTS 为 $(6.23 \pm 0.97)$  MPa<sup>[20]</sup>。对比表 4 可知,皮肤、肌腱和韧带等软组织均处于极限应力范围内,不存在损伤风险。因此,对于不甚严重的烧伤爪形手畸形,经过瘢痕松解后直接施加动态牵引的治疗方案是可行的。此外,对于拉应力对组织重建的作用,舒茂国<sup>[21]</sup>研究发现,40%拉应变(对应本文模型为 $2.96$  kPa)对人体皮肤成纤维细胞增殖有促进作用;宋方龙<sup>[22]</sup>研究表明,10%周期拉应变(对应本文模型为 $6.8$  MPa)对白兔膝关节间充质干细胞和肌腱细胞增殖有促进作用。本文结果表明,本研究所选用的治疗方案,对肌腱伸长有较好的促进作用。

牵引正畸治疗过程中的疼痛会降低患者的依从性和体验感,尤其对幼儿患者。目前对疼痛阈值的研究主要为压痛阈值(pressure pain thresholds, PPT)。例如:Vanderweeen 等<sup>[23]</sup>用压力测量法得到 30 名肩部和手臂区域慢性单侧疼痛患者的肩部和手臂区域静息 PPT 为 $(0.3 \pm 0.27)$  MPa。Zhang 等<sup>[24]</sup>通过压痕试验测量小腿残肢软组织各区的 PPT,其中髌韧带区为 $(0.78 \pm 0.37)$  MPa。尽管本文计算得到各组织的拉应力,且不同部位软组织的 PPT 也不相同,但仍可根据文献中的数据和临床经验,倾向于本文牵引方案会引起疼痛的预判。与手部软组织相关的疼痛阈值,有待于测量以提供进一步的评估参考和优化依据。

在本研究的模型中,选取的瘢痕形状较为规则,未触近节指骨及拇指部分;而实际的烧伤病例中,掌背侧瘢痕与手指背侧瘢痕往往贯通,甚至烧伤直达肌腱和韧带,从而产生较为严重的挛缩畸形。若对此类畸形进行强制牵引,会给患者带来极大的痛苦和组织损伤。因此,对于此类较为严重的烧伤爪形手畸形,本文建议在进行必要的瘢痕切除或松解后,进行分步、分阶段牵引,在降低患者疼痛和避免组织拉伤的情况下,逐步将患手牵引至正常状态,以提高正畸治疗的安全性和体验感。

此外,本文认为,较佳的牵引方案应为在牵引力作用下,各组织均未达到极限应力而受到损伤,且大部分组织(比如应力中位值)处于可促进该组织细胞增殖的应力区域。然而由于不同的组织对应的可促进细胞增殖的最适宜应力(或应变)区间不同,几乎难以确定唯一最佳的牵引力数值。因此,周期性循环牵引,使各个组织在 1 个牵引周期内均可达到最适宜牵引应力;或分阶段牵引,使每个阶段均至少有一种组织在最适宜牵引应力范围内;此两种方案或许是较为优化的牵引力施加方法。而牵引力循环加载的幅值或者分阶段牵引力的确定,则需要更加细致的工况设计,以及更精确的对于每种组织可促进相应细胞增殖的最适宜应力(或应变)区间。相关问题值得在将来工作中做进一步的研究。

## 4 结论

本文建立包含皮肤和瘢痕的手部有限元模型,对简化的烧伤爪形手畸形的瘢痕挛缩-肌腱韧带挛缩-瘢痕切除并植皮-牵引正畸治疗过程进行模拟计算,分析该过程中瘢痕、皮肤、肌腱和韧带等软组织的影响,并对比两种牵引方法对于烧伤爪形手畸形的优劣。本文结合计算结果对牵引方案进行优化。结果表明,对于不甚严重的烧伤爪形手畸形,经过必要瘢痕松解后直接施加动态牵引的治疗方案具有可行性。对于较为严重的烧伤爪形手畸形,建议分步牵引。周期性循环牵引和分阶段牵引或许是更优化的牵引方案。

## 参考文献:

- [1] MOORE ML, DEWEY WS, RICHARD RL. Rehabilitation of the burned hand[J]. *Hand Clin*, 1990, 25(4): 529-541.
- [2] 张丕红,黄晓元,范鹏举,等. 烧伤后爪形手畸形的整复[J]. *中华烧伤杂志*, 2008, 24(4): 268-271.
- [3] SINGH V, HAQ A, SHARMA S, et al. Pre-operative scrutiny of late burned hand presentations: Crucial step for the improvement of results [J]. *Burns Open*, 2021, 5(3): 104-122.
- [4] LEVIS CM, WALTHO D, NEIDUSKI R. Chapter 23- Pediatric hand burn therapy chapter [M]//*Pediatric Hand Therapy*. USA: Elsevier, 2020: 321-330.
- [5] 邹同荣,杨俊臣. 52 例爪形手的治疗[J]. *华西医学*, 2002, 17(4): 539.

- [ 6 ] 祁强, 李永林, 林伟. 严重爪形手的手术和康复治疗[J]. 江苏医药, 2004, 30(2): 154.
- [ 7 ] BROWN M, CHUNG KC. Postburn contractures of the hand [J]. *Hand Clin*, 2017, 33(2): 317-331.
- [ 8 ] WARD RS. Orthoses in burn care: splinting, orthotics, and prosthetics in the management of burns [M]// *Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation (Fourth Edition)*. USA: Elsevier, 2020: 389-405.
- [ 9 ] 张小雪, 李立峰, 王喜太. 矫形器在烧伤病例中的应用[J]. 医用生物力学, 2011, 26(4): 379-381.
- ZHANG XX, LI LF, WANG XT. Application of the orthoses used for burn [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(4): 379-381.
- [ 10 ] 高峻青, 付记乐, 王朝辉, 等. 组合式可调节手部多功能牵引支具的研制及临床应用[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2010, 32(1): 59-56.
- [ 11 ] 侯春胜, 郝振明, 雷晋. 拉长式牵引矫治烧伤后爪形手畸形[J]. 中华整形外科杂志, 2011, 27(2): 107-110.
- [ 12 ] 侯春胜. 烧伤瘢痕治疗中支具的应用[J]. 中华烧伤杂志, 2013, 29(1): 90-92.
- [ 13 ] HARIH G, KALC M, VOGRIN M, *et al*. Finite element human hand model: Validation and ergonomic considerations [J]. *Int J Ind Ergon*, 2021, 85: 103186.
- [ 14 ] 戴跃. 瘢痕组织的生物力学特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [ 15 ] 柳柏梅, 刘阳, 王立, 等. 创伤愈合及压力治疗过程中瘢痕动物模型转录组水平的变化研究[J]. 医用生物力学, 2019, 34(4): 384-392.
- LIU BM, LIU Y, WANG L, *et al*. Transcriptome level changes in animal model of scars during wound healing and pressure therapy [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(4): 384-392.
- [ 16 ] 刘洋. 机械应力对表皮干细胞增殖、分化影响的研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2006.
- [ 17 ] 李波. 机械牵张应力对人根尖牙乳头干细胞增殖、分化的影响及机制研究[D]. 泸州: 西南医科大学, 2017.
- [ 18 ] ANNAIDH AN, BRUYERE K, DESTRADE M, *et al*. Characterization of the anisotropic mechanical properties of excised human skin [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2012, 5(1): 139-148.
- [ 19 ] GOODMAN HJ, CHOUEKA J. Biomechanics of the flexor tendons [J]. *Hand Clin*, 2005, 21(2): 129-149.
- [ 20 ] 田青业, 刘正津, 周军海. 拇指腕掌关节韧带的力学特性及其意义[J]. 中国临床解剖学杂志, 2002, 20(1): 68-70.
- [ 21 ] 舒茂国. 机械应力促进培养的人皮肤成纤维细胞增殖的相关研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2002.
- [ 22 ] 宋方龙. 机械应力对腱骨愈合的影响以及对细胞增殖、凋亡和分化的调节作用及机制[D]. 上海: 海军军医大学, 2018.
- [ 23 ] VANDE WEEEN L, OOSTENDORP R, VAES P, *et al*. Pressure algometry in manual therapy [J]. *Man Ther*, 1996, 1(5): 258-265.
- [ 24 ] ZHANG M, LEE WCC. Quantifying the regional load-bearing ability of trans-tibial stumps [J]. *Prosthet Orthot Int*, 2006, 30(1): 25-34.