

# 体位性斜头畸形力学治疗的研究进展

叶鑫, 杨宁, 刘震

基金项目: 佛山市重点领域科技攻关项目(编号:2020001005717); 广州市临床特色技术项目(编号:2023C-TS16)

作者单位: 广州医科大学附属第三医院康复医学科, 广东 510140

第一作者: 叶鑫, 在读硕士研究生, 住院医师, 研究方向: 3D 打印临床转化。E-mail: cinye1999@163.com

通信作者: 刘震, 医学博士, 主任医师, 硕士研究生导师, 研究方向: 3D 打印临床转化。E-mail: lzym3798@163.com

**[摘要]** 体位性斜头畸形(PP)是婴幼儿头颅形态异常疾病,可致患儿生物力线失常。该文基于婴幼儿 PP 的应力机制及远期危害,对婴幼儿头颅力学的有限元分析和各类力学治疗方式进行综述,寻找能够开展精准头颅矫形的依据,为未来拓展头颅矫形治疗技术拓宽思路。

**[关键词]** 体位性斜头畸形; 儿童康复; 力学; 矫形; 有限元分析

**[中图分类号]** R 726.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1674-3806(2024)03-0347-04

doi:10.3969/j.issn.1674-3806.2024.03.21

**Research progress in the biomechanical treatment of positional plagiocephaly** YE Xin, YANG Ning, LIU Zhen.  
Department of Rehabilitation Medicine, the Third Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangdong 510140, China

**[Abstract]** Positional plagiocephaly(PP) is a disease of abnormal cranial morphology in infants and young children, which can lead to abnormal biological force lines in the pediatric patients. Based on the stress mechanism and long-term hazards of PP in infants and young children, this paper reviews the finite element analysis of cranial mechanics in infants and young children and various mechanical treatment methods, seeking the basis for precise head orthopedics, and broadening the idea of expanding the treatment techniques of head orthopedics in the future.

**[Key words]** Positional plagiocephaly(PP); Pediatric rehabilitation; Mechanics; Orthopedics; Finite element analysis(FEA)

体位性斜头畸形(positional plagiocephaly, PP)是婴幼儿体位性头型异常的最常见类型之一。PP 患者头颅骨四周形态异常,轻则影响美观,重则影响脑部正常发育。头颅骨应力异常是引起大多数 PP 的主要因素。目前针对 PP 治疗的最佳方法是利用力学因素进行头颅矫形。研究证实,利用力学进行头颅矫形不会对个体的认知和智力发育产生不良影响<sup>[1]</sup>,但在矫形过程中存在一定风险,量化好施力方式、施力部位、施力面积、施力时长及预期形态,是开展生物力学头颅矫形的关键。本文检索了数据库相关文献,基于婴幼儿头颅矫形的应力机制以及 PP 的远期危害,对婴幼儿头颅力学的有限元分析(finite element analysis, FEA)和各类力学治疗方式进行综述,寻找能够开展生物力学精准头颅矫形的依据,为未来拓展头颅矫形治疗技术拓宽思路。

## 1 头颅矫形应力机制

### 1.1 头颅形变机制 婴幼儿头颅形变过程依赖于

颅缝和囟门在应力下的代偿变化以及颅骨在力学作用下的成骨与破骨。颅缝和囟门是颅骨间的可形变关节,由胶原纤维桥接形成,将其颅骨固定在一起,并允许机械应力传递和变形<sup>[2]</sup>。通过对患儿头颅施力,可使其头颅发育趋势向不受应力限制的区域进行。当受力点或面的边缘靠近颅缝和囟门这些结缔组织结构时,应力的分布难以预测<sup>[3]</sup>。向颅缝施加拉伸力时,在 1 周内可观察到缝合线宽度变化和新骨形成<sup>[4]</sup>。但力学设备向颅缝施加挤压力时,可引起代偿性的颅缝过早骨化愈合<sup>[5]</sup>,过早使用机械应力进行头颅矫形并非正面事件,选用合理的施力方式是头颅矫形的关键。在颅骨具有极大发育潜能的早期,应以牵拉力为主,以引导头颅骨生长作为治疗策略。对于 8 个月龄以上患儿,颅骨发育处于减慢阶段,则可施加挤压力开展矫形,增加短期获益。

### 1.2 应力的量化方式 从施力方式上看,用量级较低的高频振动力来调节颅缝结构,发现骨小梁数量和

骨小梁分离量增加,骨小梁厚度降低<sup>[6]</sup>。向颅缝施加拉伸力可使骨缝扩大,而连续的拉伸力比间歇的拉伸力更有效<sup>[7]</sup>,施加挤压力时,可使颅骨骨质发生变形、加速颅缝骨化以及骨吸收,使骨体积减少<sup>[8]</sup>。因此,从疗效上看,间歇的挤压力和连续的拉伸力是最佳的选择。Rasheed 等<sup>[9]</sup>基于自制的头颅约束带开展 FEA,对颞骨、额骨、顶骨、颧骨和枕骨进行力学干预和头颅形态分析,观察到垂直位移的变化较大,而水平位移的程度较小。该研究从力的大小上分析了头颅形变的情况,随着干预应力的增大,头颅按预期形态变化的程度越大。对于使颅缝发生最佳的形变力,Liu 等<sup>[10]</sup>发现颅缝的骨化量随着力的增加而增加,呈动态变化过程,说明头颅矫形过程中需根据颅骨变化对应力进行个性化调整。目前,通过添加应力干预婴幼儿头颅的临床研究较少,给患儿配置可施加应力的矫形装置尚停留在 FEA 模型上。目前可通过对手法医学的探究,积累利用应力治疗 PP 的临床经验,为未来制作智能化头颅矫形头盔做好铺垫。

## 2 婴幼儿头颅 FEA

婴幼儿头颅 FEA 用于研究颅骨在外力作用下的应力分布、变形情况以及骨结构稳定性等问题。有研究对 9 具不同月龄的婴儿尸体的顶骨和枕骨进行材料参数分析,发现弯曲模量随供体年龄的增加而显著增加;与枕骨相比,顶骨具有更高的模量和极限应力,这说明产生顶骨形变需要更大的力<sup>[11]</sup>。Cyganik 等<sup>[12]</sup>开展利用宏观尺度下骨密度与力学性能之间的关系预测骨小梁杨氏模量的研究,通过数学关系推算杨氏模量,说明数学关系预测骨骼材料属性是可行的研究方向。国内学者针对 1~2 岁幼儿的颅骨和颅缝进行力学的 FEA,发现额骨极限应力和弹性模量均高于顶骨,冠状缝合线和矢状缝合线在极限应力、弹性模量和极限应变方面无差异,额骨和顶骨的极限应力和弹性模量高于矢状缝合线和冠状缝合线,而极限应变结果与前者相反<sup>[13]</sup>。Remesz 等<sup>[14]</sup>研究发现,力学干预环境下二维变量模型和三维变量模型之间的位移和应变平均值相似,但考虑到空间变异性 and 局部机械应力反馈,仍需要建立三维模型开展复杂的预测。Gibbons 和 Chen<sup>[15]</sup>对几种常见的颅缝模型进行参数模拟,比对出不同颅缝结构的材料学特性。Li 等<sup>[16]</sup>开发出适用于 0~1 岁婴儿的颅骨动力响应模型,显示出良好的生物保真度,可用于快速预测 0~1 岁婴儿头部任何位置的动力响应。通用的 FEA 模型对精准化矫形十分重要。通过三维扫描获取颅骨外观数据,利用婴儿的月龄与体重参数换算成骨质材料参数,

快速获得患儿颅骨的虚拟参数;再将颅骨外观形态离散为许多小的有限元单元,根据换算而来的颅骨材料特性和外力条件,建立当前患儿颅骨的有限元动力响应模型;通过对模型进行数值计算,得到颅骨在不同外力作用下的应力、应变分布以及整体的变形情况,模拟出相应的矫形结局,最终用于修正矫形方案。开展应力治疗 PP,也需基于 FEA 模型考量不同体重和月龄的颅骨生物学特性,筛选出最佳的应力,从而提高疗效和降低临床风险。

## 3 PP 远期结局

目前已有较多学者观察到 PP 对患儿运动系统的影响,因此,探究 PP 的远期结局需从人体生物力线的角度切入。Fludder 和 Keil<sup>[17]</sup>的研究发现 PP 会引起患儿颈部运动受限和运动系统发育异常,寰枕关节活动受限与 PP 具有相关性( $P < 0.05$ )。Kreutz 等<sup>[18]</sup>研究发现 PP 可引起面部发育不对称,早期干预 PP 可改善面部发育不对称的问题。Kluba 等<sup>[19]</sup>研究发现 PP 可引起儿童乳牙咬合异常与颌骨不对称,虽然结果并不明显,但是仍可将其视为牙颌畸形的致病因素。Verdier 等<sup>[20]</sup>也证实 PP 患者在远期对口腔正畸的需求明显更大。Ma 等<sup>[21]</sup>的研究发现,颌面畸形可能会改变颞下颌关节窝内的髁突位置,从而减少关节间隙并增加颞下颌关节内压力,下颌骨不对称患者的颞下颌关节非偏斜侧将承受更大压力,PP 成为颞下颌关节紊乱病的远期危险因素。Hong 等<sup>[22]</sup>研究发现面部发育不对称与脊柱侧弯的弯曲度具有相关性( $P < 0.05$ ),说明 PP 在远期的不良影响可能下行至脊柱。Nakashima 等<sup>[23]</sup>的研究同样支持了此观点。PP 是影响人体生物力线正常发育的危险因素,在早期控制 PP 进展是规避面部发育不对称、牙颌畸形、颞下颌关节紊乱病和脊柱侧弯的一级预防策略。

## 4 头颅矫形方案

**4.1 矫形头盔治疗** 针对 PP 采取较多的治疗方式为矫形头盔治疗。随着初始治疗年龄的增加,治疗效果将呈现出不同程度的下降,其主要原因与颅缝和囟门的开放程度有关。虽然大龄婴幼儿仍可在矫形头盔治疗中得到改善,但是获益降低。国内学者刘震<sup>[24]</sup>在 3D 打印技术的基础上使用聚酰胺 12 热塑材料制作矫形头盔,在头盔外层制作圆形透气孔,内衬辅以亲肤纹路,保证使用的舒适度和支撑力;同时将头盔分为前、后两个部分,通过卡扣赋予头盔伸展功能,延长头盔使用寿命至头颅发育末期;3D 打印技术保证头盔的高效生产,解决了进口矫形头盔价格昂贵和舒适度低的问题。该技术具有轻便透气、

造价低、舒适度高和使用寿命长等优点。国外学者同样使用聚酰胺 12 热塑材料制作矫形头盔,头盔顶部呈镂空结构,头盔主体仅限制了枕骨、颞骨、蝶骨和额骨的生长,对顶骨并未做限制处理,虽然结构可减少打印材料的损耗,但是在矫形阶段易出现高颅顶的临床表现<sup>[25]</sup>。个性化设计的矫形头盔治疗已成为 4~8 个月龄婴儿头颅畸形的首选治疗方式,在矫形头盔中添加应力装置是克服年龄限制的重要途径,是矫形头盔迭代发展的关键;FEA 技术的发展是开发智能化矫形头盔的软件基础。

**4.2 手法治疗** 手法治疗是 PP 患者早期提升治疗效果的方法。Mills<sup>[26]</sup>鼓励使用手法早期干预 PP,同时指出此类手法不仅能解决 PP,还可解决患儿脊柱高张力、消化问题和吮吸障碍等问题。有研究认为对于此类患儿的手法治疗不能局限于颅骨,当范围扩展至脊柱、骨盆和下肢时,姿势管理不良的患儿的获益度大幅度上升<sup>[27]</sup>。Lessard 等<sup>[28]</sup>通过对 12 例中度、重度 PP 患儿进行整骨治疗,观察整骨手法对 PP 的治疗效果,婴儿每隔 2 周接受 4 次整骨疗法,其采用的手法技术有颅缝减压术、颅骶筋膜释放术、颅骨成形术等,结果显示整骨疗法能显著降低 6.5 个月以下婴儿的颅骨不对称指数( $P<0.05$ ),但该研究缺少对照组。随机对照比较整骨手法和抚触手法在健康教育的基础上对头颅形态的影响,纳入 96 例 PP 患儿,整骨手法组和抚触手法组各 48 例,年龄 3.1~3.2 个月,第 1 次干预在入组第 1 周,第 2 次和第 3 次分别在入组后的第 2 周和第 3 周进行,在第 3 次干预后每 3 周进行 3 次治疗,全套整骨手法每次需要 15 min 评估时间和 30 min 治疗时间,结果发现整骨手法的矫形效果更为显著( $P<0.05$ )<sup>[29]</sup>。一项随机对照试验选取年龄小于 7 个月龄、头颅对角直径差异大于 5 mm 的 34 例 PP 受试者,随机分为手法治疗组和对照组,在 10 周里手法治疗组接受手法治疗和体位健康教育,对照组仅接受体位健康教育。研究发现,手法治疗加体位健康教育对早期 PP 患儿治疗效果更为显著( $P<0.01$ ),且患儿家属反馈较好<sup>[30]</sup>。另一项手法治疗 PP 患儿的随机对照试验发现,手法治疗组主要采用颅骶手法,经过干预的患儿颈部活动度得到较大提升,手法治疗组颈部旋转增加 $[(29.68 \pm 18.41)^{\circ}]$ ,明显高于仅接受康复教育的对照组 $[(6.13 \pm 17.69)^{\circ}]$ ,差异有统计学意义( $P<0.01$ )<sup>[31]</sup>。有学者招募 24 例 PP 患儿接受运动疗法和手法治疗,疗程共 16 次,40 min/次,1 次/周,持续 4 个月,长期随访中发现手法治疗组头颅形态改善率较高<sup>[32]</sup>。也有学者将矫形头盔治疗和

物理治疗作对比,头盔治疗组的头颅不对称指数在最终评估中降至 4.07%,而物理治疗组降至 5.85%,两种疗法比较差异无统计学意义( $P>0.05$ ),两组头颅不对称指数均有明显改善<sup>[33]</sup>。有研究将 46 例重度 PP 患儿分为手法治疗组和对照组,手法治疗组在常规头盔矫形治疗的基础上附加手法治疗,结果证实手法治疗可缩短治疗时间,手法治疗组的治疗时间短于对照组 $[(109.84 \pm 14.45) \text{ d vs } (148.65 \pm 11.53) \text{ d}]$ ,差异有统计学意义( $P<0.01$ )<sup>[34]</sup>。矫形头盔治疗比手法治疗更具优势,但手法治疗可作为矫形头盔治疗的补充,缩短康复时间,避免二次配置矫形头盔的经济支出。目前,该手法技术仍处于临床试验阶段,循证数据较少,尚未形成统一的操作体系。

**4.3 其他方式** 除了矫形头盔治疗和手法治疗外,运动干预和体位限制对轻度、中度的 PP 有较好疗效。此类干预手段比头盔治疗更实惠、获取难度更低和可操作性更强。体位限制装置是根据患儿头型设计的矫形工具,可通过 3D 打印技术制作,根据婴儿仰卧位枕部生物力学关系,为患儿在睡眠时提供支撑力,从而达到预防和治疗 PP 的目的<sup>[24]</sup>。因此,将体位限制、运动干预与小儿整骨手法进行结合,亦可提升患儿康复质量<sup>[35]</sup>。

**5 结语**

综上所述,PP 的力学治疗有多种方式。对于 4~8 个月龄的 PP 患儿,矫形头盔治疗是首选方式。1~3 个月龄的 PP 患儿则应首选手法治疗和体位管理,过早配置头盔易对患儿家庭造成经济负担。大龄 PP 患儿虽可进行矫形头盔治疗,但疗效不佳。因此,矫形头盔治疗联合手法治疗或许是大龄 PP 患儿快速获益的关键。在基础头盔上增添施力装置可能是开展大龄 PP 患儿头颅矫形的重要技术,FEA 技术的发展可推动施力装置更精准。

**参考文献**

[1] Park KE, Chandler L, Ahmad M, et al. Neurocognitive outcomes in deformational plagiocephaly: is there an association between morphologic severity and results? [J]. *Plast Reconstr Surg*, 2023, 152(3): 488e-498e.

[2] Mousavi SA, Nazari MA, Perrier P, et al. Finite element analysis of biomechanical interactions of a subcutaneous suspension suture and human face soft-tissue: a cadaver study [J]. *Biomed Eng Online*, 2023, 22(1): 79.

[3] Ding Z, Li R, Duan Y, et al. A 3-D visualization technique for bone remodeling in a suture expansion mouse model [J]. *J Vis Exp*, 2023, 198: e65709.

[4] Wu BH, Kou XX, Zhang C, et al. Stretch force guides finger-like pattern of bone formation in suture [J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0177159.

- [5] Heller JB, Gabbay JS, Wasson K, et al. Cranial suture response to stress; expression patterns of Noggin and Runx2[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2007,119(7):2037–2045.
- [6] Amuk M, Gül Amuk N, Hacıoğlu Z. Effects of orofacial applications of low-magnitude, high-frequency mechanical vibration on cranial sutures and calvarial bones; a micro-computed tomography study in rats[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2022,162(4):459–468.
- [7] Liu SS, Kyung HM, Buschang PH. Continuous forces are more effective than intermittent forces in expanding sutures[J]. *Eur J Orthod*, 2010,32(4):371–380.
- [8] Liu Y, Song F, Sun J, et al. Suture compression induced bone resorption with intensified MMP-1 and 13 expressions[J]. *Bone*, 2012,51(4):695–703.
- [9] Rasheed AT, Biswas PP, Sreya MA. Effect of reciprocal headgear forces on the calvarium; a finite element study[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2023,163(3):347–356.
- [10] Liu SS, Opperman LA, Kyung HM, et al. Is there an optimal force level for sutural expansion? [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2011,139(4):446–455.
- [11] Metcalf RM, Comstock JM, Coats B. High-rate anisotropic properties in human infant parietal and occipital bone[J]. *J Biomech Eng*, 2021,143(6):061010.
- [12] Cyganik Ł, Binkowski M, Kokot G, et al. Prediction of Young's modulus of trabeculae in microscale using macro-scale's relationships between bone density and mechanical properties[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2014,36:120–134.
- [13] Wang J, Zou D, Li Z, et al. Mechanical properties of cranial bones and sutures in 1-2-year-old infants[J]. *Med Sci Monit*, 2014,20:1808–1813.
- [14] Remesz R, Khurelbaatar T, Grotski M, et al. Cranial suture morphometry and mechanical response to loading: 2D vs. 3D assumptions and characterization[J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2022,21(4):1251–1265.
- [15] Gibbons MM, Chen DA. Bio-inspired sutures; using finite element analysis to parameterize the mechanical response of dovetail sutures in simulated bending of a curved structure[J]. *Biomimetics(Basel)*, 2022,7(2):82.
- [16] Li Z, Ji C, Wang L. Development of a child head analytical dynamic model considering cranial nonuniform thickness and curvature—applying to children aged 0-1 years old[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2018,161:181–189.
- [17] Fludder CJ, Keil BG. Deformational plagiocephaly and reduced cervical range of motion; a pediatric case series in a chiropractic clinic [J]. *Altern Ther Health Med*, 2021,27(6):26–32.
- [18] Kreutz M, Fitze B, Blecher C, et al. Facial asymmetry correction with moulded helmet therapy in infants with deformational skull base plagiocephaly[J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2018,46(1):28–34.
- [19] Kluba S, Roßkopf F, Kraut W, et al. Malocclusion in the primary dentition in children with and without deformational plagiocephaly[J]. *Clin Oral Investig*, 2016,20(9):2395–2401.
- [20] Verdier C, Marangelli G, Gebeile-Chauty S. Does positional plagiocephaly affect the need for orthodontic treatment, and the mandibular and occlusal symmetry? [J]. *Orthod Fr*, 2022,93(2):169–186.
- [21] Ma H, Teng H, Li A, et al. The pressure in the temporomandibular joint in the patients with maxillofacial deformities[J]. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg*, 2023,124(1S):101285.
- [22] Hong JY, Suh SW, Modi HN, et al. Correlation between facial asymmetry, shoulder imbalance, and adolescent idiopathic scoliosis[J]. *Orthopedics*, 2011,34(6):187.
- [23] Nakashima A, Nakano H, Yamada T, et al. The relationship between lateral displacement of the mandible and scoliosis[J]. *Oral Maxillofac Surg*, 2017,21(1):59–63.
- [24] 刘震. 基于3D打印技术的康复辅具数字化设计、材料优化和智能制造研究[D]. 广州:南方医科大学,2019.
- [25] Kropla F, Hoffmann M, Winkler D, et al. Development of an individual helmet orthosis for infants based on a 3D scan[J]. *3D Print Med*, 2023,9(1):22.
- [26] Mills MV. Osteopathic manipulative treatment in a general pediatric setting; an account of reflective practice[J]. *Complement Ther Clin Pract*, 2021,42:101265.
- [27] Amiel-Tison C, Soyec-Papiernik E. Cranial osteopathy as a complementary treatment of postural plagiocephaly[J]. *Arch Pediatr*, 2008,15(Suppl 1):S24–S30.
- [28] Lessard S, Gagnon I, Trottier N. Exploring the impact of osteopathic treatment on cranial asymmetries associated with nonsynostotic plagiocephaly in infants[J]. *Complement Ther Clin Pract*, 2011,17(4):193–198.
- [29] Bagagiolo D, Priolo CG, Favre EM, et al. A randomized controlled trial of osteopathic manipulative therapy to reduce cranial asymmetries in young infants with nonsynostotic plagiocephaly[J]. *Am J Perinatol*, 2022,39(S 01):S52–S62.
- [30] Pastor-Pons I, Lucha-López MO, Barrau-Lalmolda M, et al. Efficacy of pediatric integrative manual therapy in positional plagiocephaly: a randomized controlled trial[J]. *Ital J Pediatr*, 2021,47(1):132.
- [31] Pastor-Pons I, Hidalgo-García C, Lucha-López MO, et al. Effectiveness of pediatric integrative manual therapy in cervical movement limitation in infants with positional plagiocephaly: a randomized controlled trial[J]. *Ital J Pediatr*, 2021,47(1):41.
- [32] Di Chiara A, La Rosa E, Ramieri V, et al. Treatment of deformational plagiocephaly with physiotherapy[J]. *J Craniofac Surg*, 2019,30(7):2008–2013.
- [33] González-Santos J, González-Bernal JJ, De-la-Fuente Anuncibay R, et al. Infant cranial deformity: cranial helmet therapy or physiotherapy? [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020,17(7):2612.
- [34] Cabrera-Martos I, Valenza MC, Valenza-Demet G, et al. Effects of manual therapy on treatment duration and motor development in infants with severe nonsynostotic plagiocephaly: a randomised controlled pilot study[J]. *Childs Nerv Syst*, 2016,32(11):2211–2217.
- [35] 何爽,刘振玲,陈芳. 儿童急性淋巴细胞白血病的运动康复研究进展[J]. *中国临床新医学*, 2021,14(2):143–148.

[收稿日期 2023-10-26][本文编辑 韦颖]

#### 本文引用格式

叶鑫,杨宁,刘震. 体位性斜头畸形力学治疗的研究进展[J]. *中国临床新医学*, 2024,17(3):347–350.