

# 点接触固定器的发展

张一凡<sup>1,2,3</sup> 姚孟轩<sup>1,2,3</sup> 王海程<sup>1,2,3</sup> 张宇钦<sup>1,2</sup> 史泰龙<sup>1,2</sup> 吕红芝<sup>1,2</sup> 秦士吉<sup>1,2</sup>

**【摘要】** 在骨折治疗领域,点接触固定器(PC-Fix)是一种备受关注的新型内固定方法,它的出现彻底颠覆了传统骨折内固定方法的理念和方式。PC-Fix是早在20世纪90年代被Perren教授及其团队设计研发,其主要特点有点接触和锁定固定两个方面,其目的主要是为了保护骨折区域血运。PC-Fix解决了传统加压钢板与骨接触所造成的血运损伤以及应力遮挡问题,固定方式也由“加压固定”改为“锁定固定”,是锁定钢板的雏形。并且PC-Fix在保护血运和骨折固定稳定性方面的优越性,在动物实验和临床研究中也都得到了验证。本篇综述回顾PC-Fix的研发历史,总结PC-Fix的设计特点,以期对未来内固定系统的设计提供思路与借鉴。

**【关键词】** 点接触固定器; PC-Fix; 加压钢板; 锁定钢板

**Development of Point Contact Fixator** Zhang Yifan<sup>1,2,3</sup>, Yao Mengxuan<sup>1,2,3</sup>, Wang Haicheng<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yuqin<sup>1,2</sup>, Shi Tailong<sup>1,2</sup>, Lue Hongzhi<sup>1,2</sup>, Qin Shiji<sup>1,2</sup>. <sup>1</sup>Department of Trauma center, the Third Hospital of Hebei Medical University; <sup>2</sup>Hebei Orthopaedic Research Institute; <sup>3</sup>Hebei Key Laboratory of Orthopaedic Biomechanics, Shijiazhuang 050051, China

Corresponding authors: Qin Shiji, Email: 845247428@qq.com

**【Abstract】** In the field of fracture treatment, the Point Contact Fixator (PC-Fix) is a novel internal fixation method that has attracted much attention, completely overturning the concept and approach of traditional fracture internal fixation methods. PC-Fix was designed and developed by Professor Perren and his team as early as the 1990s, and its main features are point contact and locked fixation, with the aim of protecting the blood supply in the fracture area. PC-Fix solves the problems of blood supply damage caused by traditional compression plates in contact with bone and stress shielding, and the fixation method has changed from "compression fixation" to "locked fixation", which is the prototype of locked plates. Moreover, PC-Fix has been verified to have excellent performance in protecting blood supply and fracture fixation stability in both animal experiments and clinical research. This review retrospectively examines the development history of PC-Fix, summarizes its design features, and aims to provide ideas and references for the design of future internal fixation systems.

**【Key words】** Point contact fixator; PC-Fix; compression plate; locking plate

19世纪是医学和外科学发展的一个关键时期,内固定技术的出现在骨折治疗领域具有革命性的意义。在此之前,传统的骨折治疗方法主要是采用外固定,即使用石膏或其他材料固定断骨,然后等待骨折自然愈合。这种方法需要长时间的固定和康复过程,而且对于复杂骨折不适用<sup>[1-2]</sup>。内固定技术的出现为医学界带来了新的治疗方法。内固定技术是指在骨折部位使用钢板、螺钉、钢钉等器械将骨折断端处固定起来,使骨折部位保持稳定,促进骨折的愈合。这种技术的出现不仅缩短了骨折患者的康复时间,而且可以用于复杂的骨折治疗<sup>[3]</sup>。内固定技术的研究和发展是一个漫长而复杂的

过程,需要医学和工程技术的交叉融合。

Joseph Lister是内固定技术的先驱之一。他是英国的一位外科医生,提出了无菌手术的理念,即使用消毒器械和清洁伤口来消灭手术中的病菌,使手术成功率大大提高<sup>[4]</sup>。他使用石碳酸(苯酚)消毒手术器械和清洁伤口,成功完成了闭合髌骨骨折钢丝内固定手术治疗,并且术后未出现伤口感染和败血症<sup>[5]</sup>。无菌术的理念为内固定技术的发展奠定了基础。

随着时间的推移,一些欧洲外科医生开始尝试使用钢板和螺钉来固定骨折。Carl Hansmann、William Arbuthnot Lane和Albin Lambotte等<sup>[6]</sup>都是内固定技术的重要贡献者,他们

提出了使用钢板和螺钉来固定骨折的概念。这种方法可以有效地恢复骨骼的正常结构和功能,并减少骨折的愈合时间。在内固定技术发展的过程中,金属腐蚀问题一直是一个难题。随着研究的深入,研究者们开始引入钴、铬、钼、钛及其合金等惰性材料来制造内固定材料,解决了因金属腐蚀而导致的内固定失败问题。这些新材料不仅具有优良的力学性能,而且能够避免金属腐蚀导致的材料损坏和生物毒性<sup>[7-8]</sup>。除了材料的改进,优化骨折愈合过程也成为内固定技术发展的主要方向。

在20世纪末期至21世纪初期,对于如何优化骨折内固定技术的问题,发生了由加压钢板向锁定钢板理念的转变,或者说是由“绝对稳定固定”向“相对(弹性)稳定固定”理念的转变。而点接触固定器(point contact fixator, PC-Fix)的诞生就处于两种理念转变的过渡期,同时它也是锁定钢板的雏形。加压钢板的代表人物是Robert Danis(1880-1962)<sup>[9-11]</sup>。Danis是第一个在实验室中研究骨折加压后在愈合过程中生物学特性的人,并且证明:当骨折块被完美复位并通过加压保持在一定位置时,可以获得骨折的一期愈合,没有任何骨痂形成<sup>[12]</sup>。Danis否定了骨痂对骨折愈合至关重要的观点,他认为骨痂应该被看作是一种病理结构,可以通过内固定的方式来防止其形成<sup>[12-13]</sup>。他的革命性概念影响了后来所有的钢板设计,如众所周知的动态加压板(Dynamic Compression Plate, DCP)<sup>[14]</sup>。但是随着临床的广泛应用,研究人员发现与骨表面紧密接触的传统加压钢板会导致骨膜血供损伤、骨局部皮质缺血和骨质疏松等并发症,最终延迟骨折的愈合<sup>[15]</sup>。为了最大限度地减少钢板与骨表面接触面积以及避免这类医源性的损伤和伴随的不良作用,在20世纪末Perren教授和Tepic教授<sup>[16]</sup>设计研发了PC-Fix,应用了角稳定的概念,采用了锁定螺钉和点接触的设计,放弃了骨块间加压和双皮质固定。简而言之,PC-Fix的研发历程主要经历了三个阶段:“带动力加压螺钉孔的钢板”—动态加压板;再到有限接触动态加压钢板(Limited Contact Dynamic Compression Plate, LC-DCP);最终发展到PC-Fix,但DCP和LC-DCP仍保留了“加压”的概念,这是通过减少钢板与骨表面接触实现生物固定的第一步。

本篇综述回顾了PC-Fix的研发历史,总结了PC-Fix的设计特点以及其在动物实验和临床实验中的表现,展现了针对传统加压钢板破坏血运以及产生应力遮挡的问题以及PC-Fix的解决方案。以期让人们对于PC-Fix有一个更为全面的了解,为未来内固定系统的设计提供思路与借鉴。

### 一、传统加压钢板的力学特性及缺点

传统钢板和螺钉系统骨折固定的基本原理是通过解剖复位和稳定加压来促进骨折愈合<sup>[2]</sup>,即使用传统钢板和螺钉系统时需对术区进行广泛暴露,以便内固定进入骨折区域并提供良好视野,然后进行解剖复位和钢板固定。

传统内固定对骨折固定生物力学机制主要分为两种。首先,加压钢板固定骨折中,钢板需要预塑形,以匹配骨的解剖结构;螺钉通过轴向拉力将钢板固定在骨上,实际上是利用摩擦力提供稳定性包括钢板和骨之间的摩擦力和骨折断

面摩擦力<sup>[17]</sup>。加压钢板和骨之间的压力是通过螺钉的拧紧扭矩产生的,螺钉在骨中双皮质嵌合<sup>[18]</sup>。根据螺钉和钢板以及螺钉和骨之间的摩擦系数,2 Nm的拧紧扭矩可产生超过1 000 N的压力,相当于约100 kg断面轴向载荷,因此需要适当拧紧扭矩来产生足够的压力,以提供骨折固定足够的力学支持以及所需的稳定性<sup>[16]</sup>。

骨折块之间加压可以进一步增强骨折固定稳定性,骨折块间加压需要首先恢复骨的解剖力线,并通过外部加压装置、钢板预弯曲或钢板孔的特殊设计,在螺钉拧紧期间使骨折块相互滑行加压<sup>[19]</sup>。例如,DCP(Dynamic Compression Plate)是一种内固定系统,在钢板的螺孔内有一个斜面,螺钉头在钢板螺孔内下降过程中会沿斜面向下滑动,将螺钉扭矩转换为接骨板和骨之间的剪切力。由此产生的剪切力压迫骨折块,从而增加骨折的固定稳定性<sup>[20]</sup>。

多年来,随着固定骨折技术的不断研究和改进,外科医生逐渐意识到加压接骨板技术的生物学缺点。在骨折正常愈合过程中,骨折愈合区的充分血管化是骨愈合的先决条件<sup>[21]</sup>。许多研究报告称,血管损伤导致的血管生成减少会延迟甚至阻碍骨折愈合过程<sup>[22-23]</sup>。加压钢板的使用损伤了骨的血供,并且其应用需要良好的骨质和精确的解剖复位,往往难以实现<sup>[24]</sup>。同时为了保证钢板与骨面的贴合程度,常需要采用高侵袭性的手术入路,这就造成了骨膜及周围软组织血供的损伤<sup>[25]</sup>。此外,钢板在骨表面施加的压力会干扰骨皮质的血流灌注,并对钢板正下方的骨造成损伤,导致骨坏死和骨质疏松<sup>[26]</sup>,这反过来又增加了取出接骨板后后续骨折的风险<sup>[27]</sup>。Emanuel的荧光标记技术表明,这种坏死骨组织的重塑会导致骨形态和力学性能的长期改变,这会对骨的整体强度产生潜在的不良影响<sup>[28]</sup>。

Claes等<sup>[29]</sup>认为对骨折愈合组织施加适当的循环压缩应变会加速骨折的愈合。而传统加压接骨板的稳定结构还在骨内产生应力遮挡<sup>[2, 30]</sup>。当接骨板接管骨的承重功能时,会发生这种现象,导致骨承受的机械应力低于正常情况。随着时间的推移,这会导致骨吸收,削弱整体结构,损害其愈合和支撑自身的能力。

概括来讲,传统加压钢板主要存在三方面的缺点:1)加压的固定方式对血供的影响;2)广泛的手术暴露对血供产生影响;3)绝对稳定的固定导致的应力遮挡。总之,虽然加压钢板一直是固定骨折广泛使用的技术,但其生物学弊端不容忽视。外科医生应考虑到骨血供的潜在损伤和应力遮挡的可能性,并应考虑可将这些风险降至最低并改善患者愈合过程的替代技术。

### 二、PC-Fix的设计特点

#### (一)IPC-Fix保护血供的设计

鉴于以上提到的传统加压钢板对骨折区域血供的影响,为了减轻植入物对血管的损害,研究人员提出了“限制钢板与骨接触面积”的解决方法。最初,外科医生开发了具有扇形底面的钢板——LC-DCP, LC-DCP与DCP相比,钢板与骨的接触面积减少了约50%<sup>[31-32]</sup>。然而,LC-DCP未能显示预期受益,对改善血供<sup>[33]</sup>和避免骨坏死<sup>[2]</sup>的影响可以忽略不计<sup>[34]</sup>。这



是因为LC-DCP的固定方式并没有改变,加上与骨的接触面积的减小,反而使骨局部的应力进一步增加,所以LC-DCP仍然无法完全避免骨坏死。为了最大限度地减少钢板与骨的接触以及加压固定的方式,PC-Fix被设计研发出来。其与骨的接触面积减少到只有几个孤立的小点,并且通过将螺钉锁定在钢板上,来达到桥接式固定<sup>[35]</sup>。传统的长螺钉和双皮质螺钉也被单皮质螺钉所取代,单皮质螺钉锁定在钢板上的螺钉孔内,不与远处的皮质接触,这样可以进一步减少螺钉对于髓腔内血管的损伤<sup>[16]</sup>。

实际上,当初开发PC-Fix的主要目的就是为了保护骨折部位血供和预防感染。PC-Fix对于血供的保护和预防感染方面的作用,在后来的动物实验以及临床实验中也得到了验证。1997年Tepic等<sup>[36]</sup>进行了一项动物试验,比较不同植入物的骨折愈合情况,结果表明PC-Fix治疗简单骨干骨折的愈合要优于传统钢板。组织学评估表明,PC-Fix组中没有植入物相关的皮质骨坏死。1999年,Arens等<sup>[37]</sup>在一项动物试验中证明了PC-Fix有更高的抗感染性,DCP组的感染率为63%(12/19),PC-Fix组为26%(5/19)。Eijer等<sup>[38]</sup>也得出了相同的试验结果,他们比较了将细菌污染的DCP或PC-Fix固定在胫骨上4周后两组家兔的感染率。DCP组的感染率显著高于PC-Fix组:在评价的38只动物中,12只DCP组和5只PC-Fix组出现了局部感染。在关于感染的临床研究中,PC-Fix的抗感染性也得到了证实。1993年10月至1998年5月期间进行了四项前瞻性多中心临床研究,其中1172例可用于评估感染情况。总感染率为1.1%(13/1172)。开放性骨折后的感染率为1.6%(4/256),闭合性手术(包括闭合性骨折、截骨术和骨不连)后的感染率为1.0%(9/916)。与使用DCP和LC-DCP发表的感染率相比,PC-Fix的感染率较低<sup>[38]</sup>。另外,在促进骨折愈合强度方面,PC-Fix的效果显著。Tepic等<sup>[36]</sup>在一项动物实验中对DCP和PC-Fix的骨折愈合强度做了对比,结果显示:在术后3个月,所有DCP治疗的骨在受到相当于破坏完整骨所需强度的46%(±4%)时,通过原始骨折部位折断。在PC-Fix组中,原始骨折部位无骨折,所有骨折均位于最远端螺孔处,相对于完整骨,强度达到65%(±5%)。在临床上Hofer等<sup>[39]</sup>在研究中也发现,使用PC-Fix固定的患者骨痂的形成和牢固地结合会比传统的钢板更早发生。

总的来说,PC-Fix的设计几乎完美地解决了传统加压钢板破坏血供的缺点。传统的内固定系统,如加压钢板,会增加骨折部位与骨的接触面积,导致髓内血管受到压迫和损伤,从而影响骨的生长和修复。而PC-Fix的设计采用点接触设计,大大减少了与骨的接触面积,从而极大地减少了对于髓内血管的压迫和损伤,保护了血供。此外,PC-Fix还采用了单皮质螺钉的设计。与双皮质螺钉相比,单皮质螺钉在固定骨折时减少了对于髓内血管的损伤。因此,PC-Fix的设计对于血供的保护非常有效。除此之外,PC-Fix的固定方式也与传统的内固定系统不同,PC-Fix采用的是一种无需解剖复位的固定方式,只需要通过微创手术将PC-Fix插入到骨折部位即可,这种方式不仅缩短了手术时间,减少了手术的侵入性,而且也更加方便患者的康复和恢复。

## (二)2PC-Fix的机械固定特点

除了对于血供的保护,PC-Fix一个更为重要的特点则是锁定钢板的设计。PC-Fix固定的机械原理与传统的加压钢板有本质的区别,锁定钢板的设计极大地简化了内固定的力学传递。关于加压钢板的固定方式已在前文描述。PC-Fix的螺钉头在钢板螺孔内啮合,钢板内的螺钉锁定机制提供了从骨到接骨板的载荷转移,为了抵消轴向力,锁定螺钉会像单横梁结构一样产生弯矩<sup>[40-41]</sup>。锁定后的钢板在锁定螺钉头与钢板上的锁定孔的交界处实现成角和轴向的机械稳定,形成一个具有固定角度的装置。虽然锁定头螺钉具有高稳定性,但在插入角度上轴向偏移大于5度的时候,稳定性会显著下降<sup>[42]</sup>。建议使用瞄准装置以提供最佳角度稳定的固定。PC-Fix的骨折固定原理就是利用最小的钢板与骨面之间的间距,对骨折进行“外固定”。简而言之,PC-Fix的主要生物力学特征更像是一个外固定器,其螺钉的基本功能像是一个典型的外固定针,但针的长度很短。对于单皮质锁定螺钉的设计,PC-Fix在稳定性方面与传统加压钢板相当。Miclau<sup>[43]</sup>在一项羊胫骨力学试验的研究中指出LC-DCP和PC-Fix在固定简单的横向骨干骨折方面具有与DCP相当的扭转和弯曲性能。一项在人类尸体股骨上的生物力学试验,用于评估PC-Fix与LC-DCP在与骨交界处的机械力学差异,结果显示PC-Fix获得了更好的稳定性<sup>[44]</sup>。同样地,Leung等<sup>[45]</sup>、Grützner等<sup>[46]</sup>的临床研究结果均也证实了,PC-Fix的力学性能可以与传统钢板相媲美。

这种固定原理对钢板结构的机械稳定性和广泛临床应用具有重大影响,此时不再需要将接骨板压在骨上,而接骨板可以保持较小的距离远离骨,从而避免血液灌注恶化和防止应力遮挡,稳定性不再取决于钢板与骨表面的紧密贴合<sup>[41, 47]</sup>。虽然PC-Fix在当时并不是唯一采用锁定固定设计的内固定<sup>[48]</sup>,但PC-Fix的出现推动了锁定钢板的发展,使人们向弹性固定理念的转变。而这背后更为深层次的原因则是,人们对于骨痂理解的加深:固定后的间接愈合不再被认为是对愈合的干扰,相反骨痂的出现是一种在愈合过程中积极的反应。

## (三)PC-Fix的临床应用结果

PC-Fix是一种用于骨折治疗的内固定器,它具有显著的技术和机械优势。它可以在不影响轴向、旋转、长度恢复和术后功能治疗的前提下,能够满足生物骨折固定的要求。早在1993年和1994年,Hertel等<sup>[49]</sup>进行多中心临床试验,评估PC-Fix性能,并采用PC-Fix固定,结果显示所有患者骨折愈合良好,均未接受再次手术。

在一项在全球16家创伤中心进行的前瞻性多中心研究的研究中,使用PC-Fix固定前臂骨干骨折,其中21%为开放性骨折患者,25%为多发伤患者。结果显示355例骨折在4个月内顺利愈合,其中在骨愈合前有32例并发症发生,27例需要再次手术(27/387,7%),但随后均愈合。有15例延迟愈合或骨不连和7例植入物松动,其中2例与感染有关。306例闭合性骨折中发生2例浅表(0.6%)和2例深部感染(0.6%)。81例开放性骨折接骨术中有1例发生深部感染(1.2%)。取出固定器后平均3周发生7例再骨折(4.7%)。该研究表明,使

用内固定器的技术是固定前臂骨折的简单方法,与文献中报告的前臂骨折固定常规技术的数据相比,手术时间更短,并发症发生率更低<sup>[50]</sup>。

Fernández等<sup>[24]</sup>在一项前瞻性的临床研究中也指出PC-Fix的操作简单,并发症发生率低的特点。然而,Leung等<sup>[45]</sup>在一项前瞻性随机对照试验中,指出PC-Fix与LC-DCP在手术时间与并发症发生率方面并无差异。但该研究仅纳入92例前臂骨折患者,样本量较小,尚需要大样本多中心临床研究进一步证实。而Fernandez等<sup>[51]</sup>在一项临床实验中,对119例前臂骨干骨折患者进行长达5年的随访,未出现骨折不愈合或晚期感染等并发症。

此外,部分学者将PC-Fix固定器应用在其他部位骨折治疗中。例如,Baumgaertel等<sup>[52]</sup>发现,与传统加压钢板对比,PC-Fix固定器在股骨干骨折治疗中表现出良好的生物学性能。同时,Miclau等<sup>[43]</sup>发现,PC-Fix固定器在胫骨干骨折治疗中的临床治疗效果也非常显著。总的来说PC-Fix的整体效果令人满意,展现出了良好的生物学性能。

总的来说,截止到现在,文献报道的PC-Fix在临床上的应用超过了2000例,获得良好的临床效果,单皮质锁定螺钉技术也被临床验证有效。与传统的钢板比较,其潜在的优势包括:保护骨折血供、减少应力遮挡、降低术后感染风险进而提高骨折愈合率<sup>[28,43]</sup>。

#### 四、未来发展与展望

目前临床上治疗骨折的大部分内固定钢板均为钛合金材料,这种材料的优点在于与人体骨骼弹性模量相似,相容性高、不易发生免疫反应、能够通过核磁共振检查等优点<sup>[53]</sup>。然而金属内固定物的一些缺点限制了其应用范围,例如长期植入金属异物会引发电解腐蚀、材料断裂等并发症,并且在骨折愈合后金属钢板需要进行二次手术取出<sup>[53]</sup>。因此,在未来内固定钢板的发展中,可能会集中在探索和应用更先进的材料。

镁合金的应用展现出巨大潜力,作为一种生物可降解材料正逐步成为可替代传统钛合金钢板的内植物,特别是在骨折治疗的钉板系统和髓内钉系统。镁合金具有优异的生物相容性、适宜的机械性能以及可控的降解速率。镁合金的一个显著优势是其可生物降解性,这减少了患者进行二次手术移除植入物的需要,但同时降解速率的精确控制也至关重要,以保证骨折愈合期间的结构完整性。在一项研究中,Byun等<sup>[54]</sup>利用镁合金材料(WE43)制备了一种钉板系统,利用大动物评估其在体内的降解性能。实验结果表明,在24周时,钉板被全部吸收。此外,镁合金在促进骨愈合方面显示出优异表现,研究指出镁合金板植入能够显著促进骨痂的形成和骨形态发生蛋白-2的表达<sup>[54]</sup>。然而,镁合金在抗腐蚀性方面面临挑战,这促使研究者探索掺杂不同元素来提高其抗腐蚀性。一项研究中,研究人员通过在镁合金中添加钬和锶,Mg-Sc-Sr合金表现出最佳的力学性能和腐蚀速率<sup>[55]</sup>。综上所述,镁合金在内固定钢板的未来发展中扮演重要角色,其特性使其成为骨折治疗领域的有前途材料,尽管仍需克服

耐磨性和降解速率的挑战。随着未来研究的深入,镁合金有望为骨折治疗提供更高效、更安全的解决方案。

#### 五、总结

长期以来,钢板内固定是治疗长骨骨折的重要途径之一已经发展了100多年。将医源性的损伤降到最低以及使所有患者功能恢复最大化,一直是所有外科医生所追求的目标。PC-Fix由DCP、LC-DCP演变而来,具有点接触和锁定固定的设计特点,是通过减少钢板与骨表面接触实现生物固定的第一步,是锁定钢板的雏形。无论是在动物实验还是临床研究中,PC-Fix在保护血运和骨折固定稳定性方面都展现出了出色的结果,推动了锁定钢板的发展。

#### 参 考 文 献

- 1 Greenhagen RM, Johnson AR, Joseph A. Internal fixation: a historical review [J]. Clin Podiatr Med Surg, 2011, 28(4): 607-618.
- 2 Uthoff HK, Poitras P, Backman DS. Internal plate fixation of fractures: short history and recent developments [J]. J Orthop Sci, 2006, 11(2): 118-126.
- 3 Tukkapuram VR, Kuniyoshi A, Ito M. A review of the historical evolution, biomechanical advantage, clinical applications, and safe insertion techniques of cervical pedicle screw fixation [J]. Spine Surg Relat Res, 2019, 3(2): 126-135.
- 4 LISTER J. On the antiseptic principle in the practice of surgery [J]. Br Med J, 2(351): 246-248.
- 5 Lister J. An address on the treatment of fracture of the patella [J]. Br Med J, 1883, 2(1192): 855-860.
- 6 Augat P, von Rüden C. Evolution of fracture treatment with bone plates [J]. Injury, 2018, 49 Suppl 1: S2-S7.
- 7 Brettell J. A survey of the literature on metallic surgical implants [J]. Injury, 1970, 2(1): 26-39.
- 8 Hak DJ, Banegas R, Ipaktchi K, et al. Evolution of plate design and material composition [J]. Injury, 2018, 49 Suppl 1: S8-S11.
- 9 Frigg R. Development of the locking compression plate [J]. Injury, 2003, 34 Suppl 2: B6-10.
- 10 Frigg R. Locking compression plate (LCP). an osteosynthesis plate based on the dynamic compression plate and the point contact fixator (PC-Fix) [J]. Injury, 2001, 32 Suppl 2: 63-66.
- 11 Saikia K, Bhuyan S, Bhattacharya T, et al. Internal fixation of fractures of both bones forearm: Comparison of locked compression and limited contact dynamic compression plate [J]. Indian J Orthop, 2011, 45(5): 417-421.
- 12 PERREN SM, FERNANDEZ DELL'OCA A, REGAZZONI P. Evolution of AO fracture treatment part 1: the internal fixator [J]. Acta Chir Orthop Traumatol Cech, 2017, 84(6): 413-417.
- 13 DANIS R. Théorie et pratique de l'ostéosynthèse[M]. Masson & Cie, Éditeurs, Libraires de l'Académie de Médecine [Z], 1949.
- 14 Hernigou P, Pariat J. History of internal fixation with plates (part 2): new developments after World War II; compressing plates and locked plates [J]. Int Orthop, 2017, 41(7): 1489-1500.
- 15 赵玉峰, 邢叔星, 刘东北, 等. 新型锁定钢板与骨骼接触特征及其固定下的骨折愈合观察 [C]//第六届全国创伤外科学术研讨会暨第一届全国创伤急救与多发伤学术会议, 桂林, 2010-04-23, 2010: 134-137.



- 16 Tepic S, Perren S M. The biomechanics of the PC-Fix internal fixator [J]. *Injury*, 1995, 26: B5-B10.
- 17 Grzeskowiak RM, Wheeler C, Taylor E, et al. Biomechanical evaluation of peak reverse torque (PRT) in a dynamic compression plate-screw construct used in a goat tibia segmental defect model [J]. *BMC Vet Res*, 2019, 15(1): 321.
- 18 Field JR, Hearn TC, Caldwell CB. Bone plate fixation: an evaluation of interface contact area and force of the dynamic compression plate (DCP) and the limited contact-dynamic compression plate (LC-DCP) applied to cadaveric bone [J]. *J Orthop Trauma*, 1997, 11(5): 368-373.
- 19 Ristow J, Mead M, Cordeiro M, et al. Pre-bending a dynamic compression plate significantly alters strain distribution near the fracture plane in the mid-shaft femur [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2020, 234(5): 478-485.
- 20 Allgöwer M, Perren S, Matter P. A new plate for internal fixation--the dynamic compression plate (DCP) [J]. *Injury*, 1970, 2(1): 40-47.
- 21 HEPPENSTALL RB, GOODWIN CW, BRIGHTON CT. Fracture healing in the presence of chronic hypoxia [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1976, 58(8): 1153-1156.
- 22 Kokubu T, Hak DJ, Hazelwood SJ, et al. Development of an atrophic nonunion model and comparison to a closed healing fracture in rat femur [J]. *J Orthop Res*, 2003, 21(3): 503-510.
- 23 Lu CY, Mielau T, Hu DN, et al. Ischemia leads to delayed union during fracture healing: a mouse model [J]. *J Orthop Res*, 2007, 25(1): 51-61.
- 24 Fernández Dell'Oca AA, Tepic S, Frigg R, et al. Treating forearm fractures using an internal fixator: a prospective study [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2001 (389): 196-205.
- 25 黎伟凡, 吕猛, 张丽, 等. 微创技术皮下钢板对胫骨血供影响的实验研究 [J]. *医学理论与实践*, 2005, 18(7): 749-750.
- 26 Perren SM. Fracture healing: fracture healing understood as the result of a fascinating cascade of physical and biological interactions. Part II [J]. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*, 2015, 82(1): 13-21.
- 27 Yao CK, Lin KC, Tarng YW, et al. Removal of forearm plate leads to a high risk of refracture: decision regarding implant removal after fixation of the forearm and analysis of risk factors of refracture [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2014, 134(12): 1691-1697.
- 28 Tepic S, Bresina S. A biography of the point contact fixator (PC-Fix) [J]. *Eur Cell Mater*, 2021, 41: 633-647.
- 29 Claes LE, Meyers N. The direction of tissue strain affects the neovascularization in the fracture-healing zone [J]. *Med Hypotheses*, 2020, 137: 109537.
- 30 Zhao XW, Jing WS, Yun Z, et al. An experimental study on stress-shielding effects of locked compression plates in fixing intact dog femur [J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16(1): 97.
- 31 Gautier E, Perren S M. Limited Contact Dynamic Compression Plate (LC-DCP)--biomechanical research as basis to new plate design[J]. *Der Orthopade*, 1992, 21(1): 11-23.
- 32 Perren SM. Evolution of the internal fixation of long bone fractures. The scientific basis of biological internal fixation: choosing a new balance between stability and biology [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2002, 84(8): 1093-1110.
- 33 JAIN, PODWORNYY, HUPEL, et al. Influence of plate design on cortical bone perfusion and fracture healing in canine segmental tibial fractures [J]. *J Orthop Trauma*, 1999, 13(3): 178-186.
- 34 赵新文, 张栋, 井文森, 等. 两种钢板固定钢板下胫骨血运恢复情况的实验研究 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2013, 28(5): 440-443.
- 35 Perren SM, Buchanan JS. Basic concepts relevant to the design and development of the point Contact Fixator (PC-Fix) [J]. *Injury*, 1995, 26, Supplement 2: B1-B4.
- 36 Tepic S, Remiger AR, Morikawa K, et al. Strength recovery in fractured sheep tibia treated with a plate or an internal fixator: an experimental study with a two-year follow-up [J]. *J Orthop Trauma*, 1997, 11(1): 14-23.
- 37 Arens S, Eijer H, Schlegel U, et al. Influence of the design for fixation implants on local infection: experimental study of dynamic compression plates versus point contact fixators in rabbits [J]. *J Orthop Trauma*, 1999, 13(7): 470-476.
- 38 H, EIJER, AND, et al. PC-Fix and local infection resistance - influence of implant design on postoperative infection development, clinical and experimental results [J]. *Injury*, 2001, 32(1): 38-43.
- 39 Hofer HP, Wildburger R, Szyzkowitz R. Observations concerning different patterns of bone healing using the Point Contact Fixator (PC-Fix) as a new technique for fracture fixation [J]. *Injury*, 2001, 32 Suppl 2: B15-B25.
- 40 Gautier E, Perren SM, Cordey J. Effect of plate position relative to bending direction on the rigidity of a plate osteosynthesis. A theoretical analysis [J]. *Injury*, 2000, 31 Suppl 3: C14-C20.
- 41 Smith WR, Ziran BH, Anglen JO, et al. Locking plates: tips and tricks [J]. *Instr Course Lect*, 2008, 57: 25-36.
- 42 Kääh MJ, Frenk A, Schmeling A, et al. Locked internal fixator: sensitivity of screw/plate stability to the correct insertion angle of the screw [J]. *J Orthop Trauma*, 2004, 18(8): 483-487.
- 43 Mielau T, Remiger A, Tepic S, et al. A mechanical comparison of the dynamic compression plate, limited contact- dynamic compression plate, and point contact fixator [J]. *J Orthop Trauma*, 1995, 9(1): 17-22.
- 44 Borgeaud M, Cordey J, Leyvraz PE, et al. Mechanical analysis of the bone to plate interface of the LC-DCP and of the PC-FIX on human femora [J]. *Injury*, 2000, 31 Suppl 3: C29-C36.
- 45 Leung F, Chow SP. A prospective, randomized trial comparing the limited contact dynamic compression plate with the point contact fixator for forearm fractures [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2003, 85(12): 2343-2348.
- 46 Grützner PA, Haase W, Matschke S, et al. Vergleichende untersuchung zwischen einem winkelstabilen,monokortikalen implantat "PC-Fix" mit der konventionellen plattenosteosynthese bei unterarm-schaftfrakturen [J]. *Unfallchirurg*, 2003, 106(2): 121-126.
- 47 Miller DL, Goswami T. A review of locking compression plate biomechanics and their advantages as internal fixators in fracture healing [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2007, 22(10): 1049-1062.
- 48 Ramotowski W, Granowski R. Zespol. an original method of stable osteosynthesis [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1991 (272): 67-75.
- 49 Hertel R, Eijer H, Meisser A, et al. Biomechanical and biological considerations relating to the clinical use of the Point Contact-Fixator - evaluation of the device handling test in the treatment of diaphyseal fractures of the radius and/or ulna[J]. *Injury*, 2001, 32: 10-14.
- 50 Haas N, Hauke C, Schütz M, et al. Treatment of diaphyseal fractures of the forearm using the Point Contact Fixator (PC-Fix): results of 387 fractures of a prospective multicentric study (PC-Fix II) [J]. *Injury*, 2001, 32 Suppl 2: B51-B62.
- 51 Fernandez Dell' Oca AA, Masliah Galante R. Osteosynthesis of diaphyseal fractures of the radius and ulna using an internal fixator

- (PC-Fix). A prospective study [J]. Injury, 2001, 32 Suppl 2 B44-B50.
- 52 Baumgaertel F, Buhl M, Rahn BA. Fracture healing in biological plate osteosynthesis [J]. Injury, 1998, 29, Supplement 3: 3-6.
- 53 Tanoglu O, Say F, Yucens M, et al. Titanium alloy intramedullary nails and plates affect serum metal ion levels within the fracture healing period [J]. Biol Trace Elem Res, 2020, 196(1): 60-65.
- 54 Byun SH, Lim HK, Cheon KH, et al. Biodegradable Magnesium alloy (WE43) in bone-fixation plate and screw [J]. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2020, 108(6): 2505-2512.
- 55 Chaya A, Yoshizawa S, Verdelis K, et al. In vivo study of magnesium plate and screw degradation and bone fracture healing[J]. Acta biomaterialia, 2015, 18: 262-269.
- 56 Aboutalebianaraki N, Zeblisky P, Sarker MD, et al. An osteogenic Magnesium alloy with improved corrosion resistance, antibacterial, and mechanical properties for orthopedic applications [J]. J Biomed Mater Res A, 2023, 111(4): 556-574.
- (收稿日期:2023-05-27)  
(本文编辑:吕红芝)

张一凡, 姚孟轩, 王海程, 等. 点接触固定器的发展 [J/CD]. 中华老年骨科与康复电子杂志, 2024, 10(3):178-183.



中华医学会