

# 骨折愈合与应力的适应性假设

## 兼论小夹板固定的优越性

钱民全 陶祖莱 盛家宁

(中国科学院力学研究所)

张长江 孟和 丁龙

(中医研究院骨伤科研究所)

### 引言

骨折愈合的机理的研究是骨伤科中一个共性的科题。讨论这个问题自然是很有兴趣的事情。

骨的形状各不相同,粗略地说,长骨的解剖结构可以看作是外层的密质骨和内部的松质骨组成的。

许多实验已经证明,所有的骨的压缩强度极限和应变极限都比拉伸时大,拉伸时的弹性模量比压缩时大;弯曲强度极限又比剪切强度极限大许多等等。骨的强度随着人或动物的年龄或老幼,性别或雌雄,骨的位置,载荷的方向,应变率,实验的取样(如新鲜与陈旧骨,干与湿骨,是否进行过防腐处理)等等不同而变换<sup>[1,2,3]</sup>。但是就骨本身而言,其强度的差异的本质在于骨的结构非均匀性,而骨的结构又与骨受的应力有关。因此如果将骨的结构与应力,生长与应力,骨折愈合与应力关系联系起来,当然是很有意义的事情。

### 二功能适应性原理

骨的结构非均匀性追其究竟,Julius, Wolff<sup>[4]</sup>首先提出骨的功能适应性概念,即活骨接其所受应力和应变而改变。

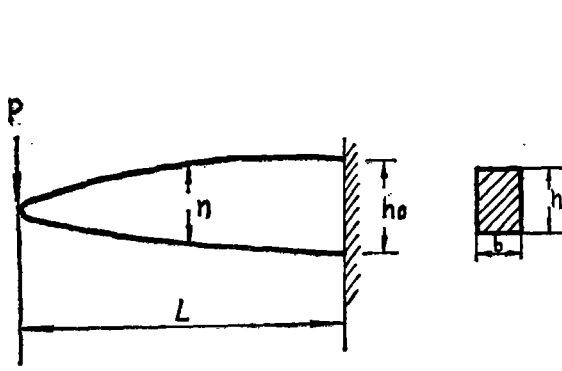
就一般器官而言,Roux<sup>[5]</sup>曾系统地阐明了功能适应性原理。其意思是说,一个器官对于其功能的适应性是由实践进化而来的。并提出最小最大设计原则,即天然进化的趋向,是用最小的结构材料来承受最大外力。他假定,经过生长和吸收过程,骨已经本能地适应了动物生存条件,并且符合最小最大设计原则,后来的研究证实了Roux的想法<sup>[6,7]</sup>。

应该指出,骨或器官的功能适应性,不是只能适应某一种功能,只符合一种功能状态的优化设计,而是要适应多种功能,其结构是“符合综合优化设计”的。我们从梁弯曲的功能来看,从材料力学(例如<sup>[8]</sup>)知道,对于矩形截面的梁的弯曲的等强度设计,应该是图1所示的形状,其符合结构最小重量设计准则。梁的高度 $h = h_0 \sqrt{\frac{X}{L}}$ ,等强度应力 $\sigma = \frac{M}{S} = \frac{6M}{bh^2}$

$= \frac{6Px}{bh^2}$ (其中宽度 $b$ 保持不变, $M$ 为力矩, $S$ 为截面模量, $P$ 为作用力。)然而对于动物骨骼

来说,它不是只受一种应力状态,例如人的股骨(图2),我们看到它的形状是很复杂的,它当然不会对受弯矩来说是等强度的,然而股骨(其他骨也如此)可以适应多种功能,不管是冲击力还是持续力或者周期力,而且可以是拉伸、压缩、剪切、扭转、弯曲等综合作用的形式。骨或器官的功能适应性应该是就其多种功能而言的,它是符合综合优化设计原理的。

Roux(5)曾经提出松质骨最优的结构应是桁架形式。Pauwels<sup>(9)</sup>证实了这一看法。Kummer(10)研究出了人体股骨端部的三维桁架模型与实物照片相比较两者非常相似。



图一 等强度弯曲梁



图二 人的股骨

对于密质骨，Ham(11)根据显微镜观察，认为骨可以看作一个复合体。他提出密质骨的基本结构，基本单元为Havers系统或成骨单元，骨单元的中心是一根动脉或静脉，这些血管由Volkman管连接，其外层有一层层地接同心圆柱方向排列的胶原纤维簇组成。其中骨单元主要依骨长轴方向排列。我们没有看到有关密质骨的结构分析，但是我们可以预计，密质骨也应该是某种形式的优化设计结构。

### 三 骨折愈合与应力的适应性假设

Evans<sup>(12)</sup>在综合前人关于控制骨生长的应力现象的研究基础上，得出结论说，从临床和实践证明，压应力能刺激新生骨的生长，这对骨折的愈合是一个重要因素。

许多研究者对人和动物在不同受力状态下研究了骨的生长。

Dietrick等<sup>(13)</sup>，研究了运动对人体骨再造的影响，将志愿者从腰部以下用石膏固定6-8周，分析结果表明，身体在固定期间的骨的钙、磷含量降低，正常活动能力恢复6周后才会复原。

Mack等<sup>(14)</sup>，研究了宇航员做长期失重实验，探讨骨失钙与X光黑度降低的关系。指出若宇航员做体操，使骨上承担与地球上正常活动产生的类似应力，钙的损失就很少。

许多动物实验(15.16.17)也有类似的情况，其结论是：应力低于正常值，使骨的强度降低，X—光射线图的黑度降低，尺寸减小；而周期性的应力对骨的功能适应性是一个促进因素<sup>(15)</sup>。

这些情况似乎表明与拉马克提出的用进废退学说相类似；不过在骨的生长过程中，应力起的作用可以在不太长的时间内显示出来罢了

我们在骨生长与应力的功能适应性原理的基础上，提出骨折愈合与应力的适应性假设，即骨的再造过程与应力相适应。尽管看起来后者似乎是前者的自然延续。然而，要在理论上加以分析，在实验上加以验证；还不是一件容易的事。这是因为骨折愈合的过程是骨的再造过程，是一个复杂的生化过程。我们讨论的仅是应力在骨再造过程的作用。

我们的设想是骨折以后，骨折伤口间仍然处在应力作用下生长。这是因为骨折整复以

后, 不管是用石膏固定, 或小夹板固定, 或固定架固定, 或加压钢板固定; 甚至处于无外力固定状态, 但它还是受周围肌肉韧带等组织的牵拉力的作用的。

在一定的应力作用下, 调节着骨的愈合过程, 我们认为每一个骨折的愈合过程都有一个最佳的应力状态相适应, 即不同的愈合时期, 应有不同的最佳的应力状态相适应。应力过低和过高都不利于骨的愈合。最佳的应力状态使骨折愈合快, 质量好。

我们在前面讲述, 松质骨的最优结构是桁架形式; 而密质骨的结构预计也应该是某种形式的最优结构。我们认为其骨单元的排列必须适应这种最优结构; 这是因为人和动物在长期生长过程中, 骨单元的排列顺从了人和动物在自然状态下承受多种形式载荷的结果。

在骨折愈合过程中, 不是在最佳的应力状态作用下, 就不可能产生最优的结构愈合, 有时甚至使骨折延迟愈合或不愈合。

如果我们在理论上和实验上弄清楚骨折愈合过程的最佳应力状态, 那么, 我们就可以人为地通过不同的方式(比如体育锻炼, 不同形式的施加应力方式, 固定架自动加压等等), 就达到理想的状态, 从而达到理想的骨的再造, 达到完善的骨折愈合。

我们在这里还想简单讨论一下骨再造过程的控制机理。这又是一个很有兴趣的科题。一般认为压电效应是骨感受应力并引起骨再造的机理。安田<sup>(18)</sup>和深田荣一<sup>(19)</sup>发现了骨的压电效应, 并确认这是由胶原纤维引起的。Bassker和Maray<sup>(20)</sup>, 指出电场能够激活蛙成骨细胞中蛋白质结合体, 在聚合中的变性胶原纤维附近的电场, 将使纤维定向使之与力线垂直。Bassett和Dowlick<sup>(21)</sup>发现, 如果将一块金属板植入有生命的骨附近, 负的电场将会使新生骨质材料沉积于电极。这些都说明压电效应是骨再造的机理<sup>(22)</sup>。应该指出一点, 外加电场能使骨痂的生长加激, 但是由于电场能使纤维定向, 所以使用外加电场促使骨痂的生长加激必须慎重。因为按照我们的观点, 骨单元的排列应该与应力相适应, 所以说, 长得快, 不一定长得好。

至于骨再造过程的其他生化过程的可能机理, 如钙吸收、激素的作用等等。我们就不再在这里讨论了。

#### 四骨折小夹板固定法优越性探讨

骨折小夹板固定法已有很久的历史, 它是我国劳动人民对世界医学宝库的一大贡献。解放以后, 又经过不少医学工作者的努力探索, 在已经长期积累经验基础上, 更丰富了这个宝库(如见[12])。

这里, 我们想根据上面提出的骨折愈合与应力的适应性假设, 即骨的再造过程与应力相适应来探讨其优越性, 我们不去讨论小夹板取材容易, 携带轻便, 易为患者所接受和合作, 医疗费用低, 病人痛苦少等优点。

我们认为小夹板固定法的优越性, 从有利于骨折愈合而言, 可以说它客观上符合了再造过程与应力相适应。

因为小夹板可因人塑形, 包扎松紧度可随时调整。从长期临床实践经验中, 人们已经摸索出骨折愈合过程适合的加力大小。如固定后若因肿胀增减而造成压迫和松脱, 可及时得到纠正, 除了保持血液循环外, 而主要是使加适当的应力有利于骨的生长。

小夹板不象别的超关节固定方法; 而是局部固定, 它一般不超过关节或短时间超关节固定。即使如此, 也是仅为关节的两面或三面接触。这样有利于肌肉的收缩的活动和功能锻炼, 使关节功能恢复良好, 避免关节僵硬及肌腱粘连等不良后遗症。

小夹板采用加压垫方法, 可增加局部约束力, 这一方面可以防止骨折移位, 固定板可紧

贴骨折部,因而固定牢靠;另一方面,因为加压垫的侧向力的分力也部分地起压应力的作用,上面提到临床和实践证明,合适的压力能刺激新骨生长,对骨折的愈合是一个有利因素。

小夹板的固定遵循动静结法治疗的原则,使骨折两断面产生持续或波动性的挤压作用力,使骨折端紧密接触,加速骨痂形成,骨折愈合加快,减少骨折延期或不愈合的并发症。

总之,小夹板固定法,有可能施加的应力近于人的多种受力的自然状态,这样的应力作用,有可能接近骨折愈合的最佳应力状态,这样当然也就使骨折愈合得较好。

小夹板固定时,骨在愈合过程中,应力有可能比较接近最佳应力状态,那么与应力相适应的骨单元的排列也可能处于最佳排列状态,从而达到最优化的结构,即可以适应多种受力的自然状态下的结构。

人们可以打个比喻:学徒工焊接有裂缝的器件时,可以焊得很多,但却一击裂缝又出现了,器件又折断了,而老师付尽管焊得不多,但却焊得很牢。这是否可以用来比作不合理的骨折固定方法与小夹板固定方法得到不同骨折愈合结果呢?

不合理的骨折固定方法,由于愈合过程不适合人的多种受力的自然状态,虽然骨痂有时候也长得很多,但其骨单元的排列可能是随机的,或者是在非适应的应力状态下排列的,所以骨折愈合就不好。而小夹板由于作用的应力可能接近人的自然受力状态,骨单元生长排列可能接近于人的自然受力状态,骨单元生长排列可能接近于优化结构。即使骨折初期(如水肿期,以固定为主,应力不完全适合人通常的最佳状态,但由于小夹板固定的松紧可以改变,很快可以使应力改变得较好。而这可能是与人们长期摸索的经验相符合的。所以骨单元的再造或骨单元之重排的时间就很短。不象不适合的固定方法再造成或骨单元重排时间较长。我们曾经设想,如果找到合适的应力状态,又以合适的应力作用于骨折过程可使骨折愈合一次成型也不一定是空想。

## 五、小结

本文讨论了骨伤科中一个共性的问题:骨折愈合机理问题。从骨的强度的差异本质在于骨的结构的非均匀性追其究竟,有Woeff首先提出的骨的功能适应概念,即活的骨按其所受应力和应变而改变。其结果又符合综合优化设计原则。在这些基础上,我们提出骨折愈合与应力的适应性假设,即骨的再造过程与应力相适应。讨论了控制骨的再造过程的可能机理的深田荣一等提出的压电效应是骨感受应力并引起骨的再造的。而我国的传统的骨折的小夹板固定法,有可能是在客观上符合骨折愈合与应力适应性假设,从而具有内在的优越性。

为证实我们提出的骨折愈合与应力的适应性假设,我们在理论分析和实验研究方面有许多工作要做。

※ ※ ※ ※ ※

文中许多内容取材于冯元桢教授的生物力学<sup>[22]</sup>。曾就骨折的小夹板固定方法求教于尚天裕教授,一些力学问题曾请教于谈镐生教授,对此,我们一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- (1) Yamada, H. (1970) Strength of Biological Materials Williaus and Will-  
ins Baltimore
- (2) Evans F G (1973) Mechanical Properties of Bone Charles C Thomas  
Springfield ■
- (3) Reilly D T and Burstein A H (1974) J Bone Joint Surg 56A 1001-1022

- (4) Wolff J ((1884) Sitz Ber Preuss Akad d Wiss 22 Sitzg physik math Kl
- (5) Roux W (1895) Gasammelte Abhandlungen uber Entwicklungsmechanik der Organiamen Iu II Engelmann Leikzig
- (6) Pauwels F (1965) Gesammelte Abhandlungen zur funktionetllen Anatomie der Bewegungsapparates Springer-Verlag New York
- (7) Kummer B K F (1972) In Biomechanics Its Foundations and Objective Fung Y C Perrone N and Anliker M (eds) Prentice Englewood Englewood Clifts N J pp 237-271
- (8) S 铁摩辛柯, J 盖尔 (胡人礼译) 材料力学1978
- (9) Pauwels F (1948) Z Anat 114 129-166
- (10) Kummer B K F (1922) In Biomechamcs Its Foundationsand Qbjectives Fung Y C Derrone N and Anliker M (eds) Prentice-ifall Englewood cliffs N J pp237-271
- (11) Ham A W (1969) Histalogy bth edn Lippiwatt Philadelphia
- (12) Evans F G (1957) Stress anb Strain in Bones Their ReIaion to Frac-tureo and Octogønenj C C Thoma Springfield III
- (13) Dietrick J E Whedon G and Shorr E (1948) Am J Med 4 3-36
- (14) Mack P B LaChange P A Vost G P anb Vogt F B (1967) Am J Roe-ntgend 100 503-511
- (15) Kazarian L E anb van Gierke H E (1969) Clin Orthopedics 65 67-75
- (16) Worber C C Briney S R Kral M and Skavgstad C (1960) Nature 188 151-152
- (17) Hert J A Liskova M and Landa J (1971) Folia Morphol 19 290-300 301-317 Hert J Sklenska A and Liskova M (1971) Foliu Morphol 19 378-387
- (18) 安田(yasuda, I) J Kyoto Med Soc 4 395 1953
- (19) 深田荣一 (Fukada E )& Yamada I J phys Soc Jpn 2 1158 1957
- (20) Becker R O and Marray D G (1970) Clin Orthopedces 732 169- 198
- (21) Basset C A L and Pawlock R J (1964) Nature 204 652-653
- (22) Fukada E Symposium on Mechanics ot Growth Control Clinlcal Appli-cation Sept 26-28 1979. Syraause U S A Piozoelectncity of Bone and Osteogenesis by Piezoclectvic Films “滑的压电性和压电膜对骨生长的影响” 译文见“北京生物医学工程”1983 1-2期 80-98
- (23) 福建省龙溪地区中医院编著 1975 “多层小夹板固定法”
- (24) Fung Y C (冯元桢) “生物力学”(待出)科学出版社,1983