

• 综 述 •

颅脑钝性冲击伤的生物力学

王守森 综述 钟世镇 孙 博 审校

(第一军医大学解剖学教研室临床解剖生物力学实验室, 广州 510515)

颅脑钝性冲击伤在航天、交通、施工和生产有关事故中占有相当比例, 半个世纪来, 许多学者采用生物力学的研究方法, 在理论机制上取得了不少成就, 对指导临床诊治、防护具设计和法医学检验有所裨益。现将有关问题介绍于后。

一、颅骨损伤

(一) 影响因素

1. 形态学特征 颅受冲击时的应力分布与打击点的曲率以及颅型有关^[1,2], 颅顶的外形近似于“薄壳结构”, 能分散外力。颅的厚度变化影响应力的传播特性^[1,3]; 颅骨较厚处外板也较厚, 板障较宽, 骨小梁较粗, 网眼较小, 载荷能均匀地传播到整个板障结构上, 承担较大的力。在颅底有许多孔和窝状结构, 它们构成了工程上的“应力集中”部位, 受到打击时易达到屈服应力而破坏^[1,3]; 枕骨大孔等周围的密质骨较薄, 相连的骨小梁较细, 也是其薄弱的原因。干颅的骨缝能阻碍骨折线的传播, 而湿颅则相反, 因为湿颅骨连结牢固^[3]。

2. 颅受力时的运动状态 头在静止时受冲击, 速度增加, 称为加速性冲击^[3-5]。若有颈部摆动以缓冲外力, 损伤程度较轻, 且多限于颅盖的着力处; 若头已被固定, 将吸收更大比例的能量, 损伤较重^[6]。头在运动中撞击较大的物体, 速度迅速下降, 称为减速性冲击^[7-9], 从高处坠下又以头首先着地者, 冲击力很大, 可致颅前、中窝或枕骨大孔周围的对冲性骨折^[7,9]。

3. 打击物的能量和速度 Evans^[8] (1958)观察到, 颅骨的有关损伤与冲击加速

所持续的时间有关; 打击物的硬度越小, 产生骨折所需的能量就越大。川濑^[6]认为, 打击物的速度对骨折有重要作用, 如果打击物的能量非常大而速度却非常小, 即使能量很大也不易发生骨折。

(二) 对冲性颅骨骨折

这种骨折远离着力部位, 但不是着力部位原发骨折的直接延伸, 在着力部位可以没有骨折。Gurdjian^[11] (1947)在用脆漆法研究颅的应变时, 观察到了大量的对冲性裂纹。Hirsch和Kaufman^[7] (1975)报道了9例对冲性骨折, 呈颅前、中窝的单一的或成群的细小线性骨折, 以眶板和筛板等薄弱处多见, 并认为是由冲击力通过颅骨和脑传向对冲部位所致。直接冲击头部或者其它部位, 可在枕骨大孔周围出现环形骨折^[9]。在眼科学界有一种眶底爆裂骨折 (blowout fracture of the orbital floor)^[10], 它是指眶缘没有错位 (无骨折或无有错位的骨折), 而眶壁骨片向远离眼球方向移位的骨折。骨折成因到底是眼球受力致眶内压力升高还是眶缘受力沿骨传导, 仍有争论。

(三) 颅骨损伤的应力分析

1. 颅盖骨应力的产生与传播 Gurdjian^[11,31]的脆漆法实验显示, 在冲击力作用点颅骨向内弯曲, 骨内板受力处出现辐射状裂纹; 在外板内弯区的周围有环形的外弯区, 由于颅骨各处厚度不同, 外弯是有选择地发生在某些部位; 冲击力一解除, 内弯区就反弹, 使原受力中心产生最大拉伸主应变, 起始于外弯区的外板辐射样裂纹因应力梯度的存在而难以跨越受力中心。这些裂纹与最大拉伸主应力的方向垂

直,所以只能反映拉应力效应。于颅盖的冲击实验表明^[6],各部位受力产生的骨折线各有规律,其结果与前述繁杂的裂纹差别很大;额部和枕部受力主要产生纵向骨折,额顶部受力多为斜向骨折。为此,脆漆法结论的准确性颇令人怀疑。

2. 颅底骨折与颈椎的关系 文献资料多数是围绕枕骨大孔的环形骨折^[9]。Sances^[11]通过头颈动态拉伸实验认为,寰枕关节有大量韧带加强,而枕骨大孔周围的骨强度较小,所以颅底环形骨折常不伴有寰枕关节的破坏。

(1) 颅底被颈椎顶入颅腔。见于头撞地或其它部位被冲击使力上传至颈,致颈椎冲击颅底。

(2) 颅底被颈椎拔出。见于头与颈椎相互牵拉而产生颅底环形骨折,其骨片的外板较内板宽得多。

(3) 颅底的剪切或杠杆效应。见于额部等处受冲击,在颅底产生与颈椎方向垂直的力,使颅底同颅的其余部位分离。

(4) 颈椎的过度后伸。强度较低的蝶枕软骨联合首先破坏,这里也含有拔出和剪切两种效应。

二、脑膜及其血管损伤的有关研究

赵以成^[12](1964)的临床病例统计表明,硬脑膜外血肿发生于骨折部位者较多,硬脑膜下血肿发生于对冲性部位者较多。Miller和Jennet^[13](1968)的400例凹陷性颅骨骨折统计分析,49.2%以上有硬脑膜撕裂,11.5%有硬脑膜静脉窦损伤,另有少数的有脑膜中动脉撕裂。Ommaya^[14](1971)的恒河猴钝击伤实验指出,冲击前额或枕正中部位,所出现的硬脑膜下血肿均主要位于顶颞区,在枕部的最少,并且与骨折的关系不大。颅骨受击后的弹性变形产生硬脑膜剥离,致使有关血管拉伤,出现硬脑膜外血肿;有骨折时,颅内的一些软组织可在骨折边缘反弹时嵌于骨缝中,发生血管撕裂或者形成动脉瘤^[15]。高速摄影表明^[4,5],

头部受冲击时,颅与脑界面间有相对运动,将损伤汇入上矢状窦等处的血管,出现对冲性硬脑膜下出血和蛛网膜下腔出血。

三、脑损伤的有关研究

在整个颅脑损伤中,脑损伤对预后的影响最为关键,受到研究学者们的重视,但由于人脑的复杂性和模拟上的困难,其研究进展十分缓慢。

(一) 线性运动/空腔理论

Gross^[16](1958)、Kopecky^[17]和Gurdjian分别测量了充满液体的薄壳容器和尸颅受冲击时的液压,认为,头受到足量的冲击后产生线性加速度,进而引起在冲击方向上的颅内压力梯度,在对冲部位出现负压,当负压达到一个大气压时就产生对冲性空腔;着力处颅骨内凹后的反弹产生冲击性空腔;颅骨的辐射性振荡导致其它部位的负压而形成共振性空腔;局部负压使血管内外压力差增大而致破裂出血;空腔泡破裂时释放大量的能量,加剧损伤的程度。后来,Lobock和Goldsmith^[18]观察了充满液体的人颅,证明上述三种空腔均与负压瞬变值相符。Nahum^[19]和Nusholtz^[5,20]也用人尸和猴证实了冲击处有正颅内压,对冲处有负颅内压,用以说明头线性运动对脑伤的作用。但是,用该理论推测的损伤部位与临床以及一些动物实验的结果并不完全一致^[14],Gurdjian等认为空腔现象在活人脑中也可能是罕见的^[15],可临床上多数人还沿用这一理论解释冲击伤与对冲伤。

(二) 颅变形/头旋转理论

Holbourn(1943)首先提出这一理论,认为颅变形或头旋转导致脑的剪切而产生损伤,其程度与头的角加速度成正比^[21]。Ommaya^[22]在猴的挥鞭伤实验中观察到了头旋转所致的硬脑膜下和蛛网膜下损伤,后来又指出^[14],颅变形主要产生冲击伤,头的快速旋转使脑滞后于颅并碰撞粗糙的骨面而破坏。有实验证实了头在旋转中颅与脑运动的不同步^[4,5]。临床

观察表明,头外伤时,无论着力点在额部还是枕部,均不易产生枕叶损伤,因为它紧贴光滑又富有弹性的小脑幕;枕部冲击的对冲伤多位于额、颞叶底部,而不在其凸面或前极,因为颅底骨面粗糙。目前,这一理论颇受人们重视。

(三) 弯曲/拉伸理论

Ommaya^[22]在猴的挥鞭伤试验后解剖,发现脑干和上颈髓的表面有出血;又在猴的额部冲击^[14]后,见脑干在穿过枕骨大孔处有蛛网膜下腔的点状出血。这些还不能用枕骨大孔骨缘的直接损伤来解释。对猴行颈部动态牵拉会迅速出现诱发电位的改变^[11]。上述脑与脊髓交界处的损伤可能是由神经块被弯曲或拉伸引起的,此即“弯曲/拉伸”学说,已有人试图用它来解释原发性脑干损伤^[23]。

(四) 脑损伤的有关指标

1. 加速度 自从Gross(1958)提出直线加速度导致颅内压力梯度,人们就注意到了脑损伤和加速度的关系。Ommaya由动物实验推论,人产生脑震荡50%的概率是在1800rad/Sec²^[21]。头加速度的测量,可作为颅内反应和损伤的预测指标。目前,角加速度已被用来分析头受冲击时的三维运动^[4,5],并且远较直线加速度应用广泛。

2. 颅内压 头的冲击部位产生正压,对冲部位产生负压,导致脑损伤^[16,17]。Nahum^[19](1980)的尸颅侧向冲击表明,在对冲侧有一个压力限制机制,颅内压难以超过16psi(合1.10×10⁴mmH₂O),可能是因为蛛网膜下腔的破坏或血液的流动使能量消散了。Ward^[24]的有限元模拟显示,脑伤的严重程度与高峰颅内压有关,超过34psi(合2.34×10⁴mmH₂O)时就发生严重的或致死的脑损伤。颅内压已成为确立脑损伤界限的良好指标。

3. 损伤标准 为了确定人对头部冲击的耐受性和生存界限,已出现了八个损伤标准^[25],现介绍有代表性的两个:

(1) 伽德严重指数(Gadd Severity Index, GSI)。1966年由Gadd针对直线加速度提出公式:

$$GSI = \int_{t_1}^{t_2} a(t)^{2.5} dt$$

以GSI=1000为损伤界限。

(2) 头部损伤标准(Head Injury Criteria, HIC)。1969年由美国交通部根据GSI,取a(t)为三维量而提出,公式:

$$HIC = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5}$$

以HIC=1000为损伤界限。

这些标准还只是经验性的,Newman(1980)已对此提出异议,认为GSI和HIC只考虑了线性运动,很不完善,建议因不同的打击部位、打击方向和损伤水平而制定不同的标准,但Lockett^[26]认为,GSI和HIC是有根据的,对防护具的设计较为适用。

4. 脑损伤与颅损伤的关系 头部受冲击时,颅骨的局部变形拍击脑面可致脑挫裂伤^[6,15];颅骨凹陷性骨折可直接刺伤脑组织^[13];由于颅与脑运动的不同步^[4,5],致颅内出血压迫脑组织。

四、临床意义

颅脑损伤的有关理论已被临床医生所采用。在我国六十年代即有赵以成^[12]以线性运动/空腔理论为基础,用冲击伤和对冲伤的概念来解释颅脑损伤。后来,又有人综合运用线性运动/空腔理论和颅变形/头旋转理论来分析枕部冲击伤,重视了粗糙的骨面和硬脑膜结构对脑的剪切效应,提出对枕部冲击伤病人注意作额颞部探查,强调探查位置要低。创伤性颅内血肿的发生机理对早期手术探查也有指导作用。

五、颅脑钝性冲击伤的研究方法

(一) 颅骨损伤的有关研究方法

1. 冲击实验 四十年代, Gurdjian^[1,3]

在人尸颅内外表面各喷上一层脆性较大的涂料,然后行加速性或减速性冲击,借这层涂料的裂纹来判断颅骨的应变,这叫脆漆法,它直观性强,可观察到全场应力分布。后来,人们直接对人尸全颅^[8]和干颅盖^[9]等进行冲击,大都使用冲击实验机,虽是逼真了些,“工程味”仍然较浓。

2. 法医学检验 颅损伤的病理资料主要来于法医学检验^[2,7,9,27]。Мищенко^[2]建议采用测颅术来研究颅骨损伤的机理。颅骨骨折断面的微细结构观察^[27]有助于其断裂力学分析。

3. 临床观察 临床上很少专门观察颅骨骨折,多伴随脑伤的观察进行^[12],因为颅内容物的损伤才是致命的。

(二) 脑膜及其血管损伤的有关研究方法 已有的结果主要来于病例统计^[12,13]、脑损伤的动物实验^[5,14]以及尸检报告^[23],是附属于颅与脑损伤理论的一些推论。

(三) 脑损伤的有关研究方法

1. 实验研究

(1) 人体材料实验。Nahum^[19,28]用未防腐尸体行头的前后向或侧向一次性或反复冲击,观察加速度和颅内压等的瞬态变化,比较戴头盔和不戴头盔时对冲击的反应。Nusholtz^[5,29]用冲击实验机对尸头行上下方向和后前方向冲击,观察了头的运动、颅内压变化和颅脑损伤的情况。尸体在结构上比动物逼真,但因组织降解,不能测量病理生理反应,所以有人^[30]选用志愿者,分别从几个方向行安全范围内的冲击,观察动态响应,但活人的实验局限性较大,不易深入,新鲜未防腐尸体仍不失为良好的实验对象。

(2) 动物实验。Ommaya^[14,22]用恒河猴作单纯的挥鞭伤实验和直接冲击实验,观察了转动加速度对脑的致伤作用,为颅变形/头旋转理论提供了有力的证据。有实验表明,猴的活脑反应较快,对加速度等指标的反应量

高,颈髓与脑的反应相互影响,而死脑反应迟钝,脑与颈髓相互孤立^[15,20],并且,死脑和用甲醛固定的脑弹性模量明显增高^[31]。近来,有人用小型重物落下装置冲击小鼠头部,测量了冲击后不同时间脑的比重,确立了鼠的脑水肿进程^[32]。利用活的动物观察冲击后的生理变化,这是无生命动物无法比拟的。

(3) 非生物模型实验。起初,人们用装满液体的椭球^[16]和圆柱^[17]等作冲击实验,把加速度和液体压力梯度联系起来,为线性运动/空腔理论的产生奠定了基础。后来,Lobock和Goldsmith^[18]在完整人颅上用透明的树脂取代枕骨和顶骨,作成半生物材料模型,内装液体,以高速摄影观察到了冲击时的空腔现象。在美国的交通工程界,十余年来有大量人力投入人头颈部物理模型的研制,最完善的要数Deng和Goldsmith^[33](1987)制作的。这些模型的优点是稳定性好,避免了生物材料的个体差异,对于理论研究有所帮助,但有很大局限性,不适于作临床应用研究。

2. 理论研究 由于实验模拟头部冲击的困难性,有不少研究者用一些数学方法对颅脑冲击行纯理论分析。

(1) 集总参数法。此法相当于解一个多数目的超静定问题,是基于实验模型的数值方法。Roberts^[34]建立了一个数学弹性动力学模型,对头受冲击时的局部效应和力——时间曲线等进行了参数动态研究。Deng和Goldsmith^[35]运用三维集总参数模型分析冲击性损伤。

(2) 有限差分法。Liu^[36]用该法分析了刚性球壳内粘弹性物质对角加速度的反应,指出:无维的(nondimensional)粘弹性参数假定值轻微的变化会大大改变耐受曲线。但此法不宜于解决复杂的问题。

(3) 有限单元法。现有的头部冲击有限元模型,都涉及一个充满液体的、几何上简化的球壳,该球壳又是由均质的、线性和粘弹性

的物质构成的。Ward²⁴模拟了在动物和人尸体实验中以及飞行事故中的头部冲击,计算了脑的运动、应变和颅内压,提出了脑的损伤标准。

3. 观察

(1) 临床观察。自六十年代以来就有许多神经外科医生^[12,13]从生物力学角度观察颅脑损伤,验证了一些理论,对脑损伤理论的发展起了一定作用。

(2) 法医学观察。徐庆中²³对重型颅脑伤死者进行解剖,为脑损伤的机理研究提供了资料。

六、结束语

颅脑钝性冲击伤的临床生物力学研究对于预防和治疗都有重要的现实意义,这项研究工作在我国刚刚起步,有待研究的课题很多。由于研究的手段和理论涉及学科较多,跨度较大,希望我国有志于此的数理工程学界、航天医学界、外科学界、法医学界和解剖学界通力协作,将这一领域的科研工作推向新的发展阶段。

参 考 文 献

- Gurdjian ES, et al. Surg Gyn Obst 1947; 85; 195.
- МИЩЕКО ЖД. СУД МЕД ЗКСПЕРТ 1977; 4; 18.
- Gurdjian ES & Lissner HR. Surg Gyn Obst 1945; 81; 679.
- Stalnacker RL, et al. Proc. 21st Stapp Car Crash Conf. 1977; 305.
- Nusholtz GS. Proc. 28th Stapp Car Crash Conf 1984; 152.
- 川瀬千雄. 日法医志 1965; 19; 284.
- Hirsch CS & Kaufman B. J Neurosurg 1975; 42; 530.
- Evans FG, et al. Surg Gyn Obst 1985; 107; 593.
- Mizoi Y, et al. Jpn J Legal Med 1982; 36; 562.
- Kersten RC. Am J Ophthalmol 1987; 103; 215.
- Sances A, et al. Proc. 24th Stapp Car Crash Conf. 1981; 149.
- 赵以成, 等. 天津医药杂志 1984; 6; 269.
- Miller JD & Jennet WB. The Lancet 1968; 2; 991.
- Ommaya AK, et al. J Neurosurg 1971; 35; 503.
- Gurdjian ES & Gurdjian Edwin S. Surg Gyn Obst 1975; 140; 845.
- Gross AG. J Neurosurg 1958; 15; 548.
- Kopecky JA & Ripberger EA. J Biomech 1969; 2; 29.
- Lubock P; Goldsmith W. J Biomech 1980; 13; 1041.
- Nahum AM, et al. Proc. 24th Stapp Car Crash Conf. 1980; 43.
- Nusholtz GS & Ward C. Aviat Space Environ Med 1987; 58; 9.
- Sances A, et al. CRC Crit Rev Bioeng 1981; 5; 79.
- Ommaya AK, et al. JAMA 1968; 204; 285.
- 徐庆中. 中华神经精神科杂志 1980; 13; 205.
- Ward C, et al. Proc. 24th Stapp Car Crash Conf 1980; 161.
- 王幼复, 马和中. 北京生物医学工程 1983; 3; 51.
- Lockett FT. J Biomech 1985; 18; 217.
- 左芷津, 祝家镇. 中国法医学杂志 1988; 3; 156.
- Nahum AM, et al. Proc. 25th Stapp Car Crash Conf 1981; 241.
- Nusholtz GS, et al. Proc. 25th Stapp Car Crash Conf 1981; 197.
- 刘振田; 全国第二届生物力学学术会议论文集汇编. 1985; 123.
- Metz H, et al. J Biomech 1970; 3; 453.
- Shapira Y, et al. Crit Care Med 1988; 16; 258.
- Deng YC & Goldsmith W. J Biomech 1987; 20; 471.
- Roberts SB, et al. J Biomech 1969; 2; 397.
- Deng YC & Goldsmith W. J Biomech 1987; 20; 487.
- Liu YK, et al. J Biomech 1975; 8; 285.