

头颈部 生物力学



Toujingbu Shengwu Lixue

王以进 张云然 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

头颈部生物力学

主 编 王以进 张云然

副主编 吴桂荣 李 伟 李建辉

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

头颈部生物力学 / 王以进, 张云然主编. —北京:
国防工业出版社, 2015. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 09917 - 1

I. ①头... II. ①王... ②张... III. ①航空航天医学
- 颈部损伤 - 生物力学 - 研究 IV. ① R856. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 119131 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 9 1/8 字数 257 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

编 委 会

主	编	王以进	张云然		
副	主	编	吴桂荣	李 伟	李建辉
编	者	丁少峰	马亚良	马和中	王以进
(以姓氏笔画为序)		王公林	王幼复	王玉清	王守森
		由广兴	卢海俊	刘广安	朱青安
		邵宝良	刘孝敏	刘炳坤	孙麟治
		李 伟	李 强	李永丰	陈志眩
		苏建良	李建辉	吴桂荣	陈福兴
		原 林	周一昌	张云然	欧阳钧
		俞大年	钟世镇	夏沪生	顾建辉
		翁盛隆			

前 言

在军事航空飞行中,应急弹射所造成的飞行员头颈部损伤很早以来就是国内外关注的问题。为保障飞行员的飞行安全,提高部队战斗力,国防科工委在我国“七五”计划中将此作为国防科技预研重点研究项目之一。经过上海大学和航天医学工程研究所,以及其他 23 家单位多年来的努力,终于在 2009 年圆满地完成了此项研究任务,起草了国家军用标准《人耐受高速气流吹袭限值》(GJB 6751—2009),该标准已于 2009 年 5 月 25 日发布,2009 年 8 月 1 日实施。在这项研究中,我们对人头颈部的生物力学特性也进行了广泛深入的研究、探讨,进行了大量的志愿者、人尸和动物实验,本书就是主要介绍在这项研究中我们对其中的人头颈部生物力学特性的研究方面所取得的成果。

虽说 1970—1979 年美国海军飞机失事伤亡人数 3263 人,受伤者的 60% 是头部或颈部受伤,损伤所造成的后果严重,乃至每年海军飞行员的训练费用就损失 3000 万美元左右,自那时以来,弹射座椅和个体防护救生装备有了长足的进步,但到目前为止,弹射损伤率依然较高,重伤率一般在 15% ~ 25%,西班牙空军高达 66.9%,澳大利亚和德国空军均为 35%。弹射发生时 G 值越大,头向下的移位越大,造成头颈部损伤越严重。目前,颈部损伤已成为我军飞行员的常见病与多发病,飞行员的颈部损伤已影响到日常的飞行训练,且随着歼、强击机飞行员的飞行载荷及飞行训练强度的增加,飞行员的颈部损伤还会呈上升趋势。除此之外,据不完全统计,世界上每年因头颈部颅脑损伤死亡超过 1500 万人之多。颅脑撞击损伤的发生率在交通事故中高达 54%,是伤后致死、致残的首要原因。头部创伤在所有人体创伤中的比例约 34%,在导致死亡的创伤中比例更高达 68%。在美国,每年大约发生 200,000 例脑部创伤,脑部创伤的治疗费用高达 90 亿 ~ 100 亿美

元。我国从 20 世纪 80 年代末交通事故年死亡人数首次超过 5 万人,至今,每年交通事故 50 万起(未包括港澳台地区),因交通事故死亡人数均超过 10 万人,已经连续十余年居世界首位。其中头颈部是交通事故创伤最易累及的部位,颅脑损伤的发生率亦很高。所以头颈部损伤尤其是颅脑损伤的研究一直是国内外所关注和重视的重大研究课题,它对航天、航空、交通事故、潜水冲击、战争、地震、刑事案件研究具有重大意义,目前仍为国家的空白领域,也是当今世界各国正在探索研究的项目。

目前国内外对颅脑损伤的研究基本上处于损伤模拟研究,极少有对头颈各部进行系统的生物力学性质和力学参数、损伤机制的深入研究。本书全面系统总结了我们在人体头颈部、颅脑损伤生物力学研究中的成果;对颅脑损伤机制、动态响应、脑损伤理论、人体头颈部撞击后的生存界限和颅脑损伤的建模、仿真、三维有限元分析、头颈部的生物力学性质实验研究及其防护问题进行了深入的研究。

我和张云然研究员编写本书的宗旨是强调科学性、实用性和新颖性,突出理论与实践相结合的原则。

本书的出版多蒙国防工业出版社和上海生物力学工程研究所鼎力协助,在此感戴莫名。另外,在本书编写过程中得到上海大学领导的关心和支持,特此致谢!

本书由张云然和上海大学王以进主笔并对全书进行了统稿。王以进教授根据张云然提供的初稿重新拟定了全书编写大纲,并补充、完善、修订了部分内容。张云然按编写大纲重新组织、撰写、完善、补充了部分内容。吴桂荣、李伟参与了初稿大部分内容的撰写,李建辉对全书图稿进行了加工、编辑,其余编者则参与了初稿相应内容的撰写。

由于编写时间仓促,加之经验与水平所限,深信书中存在不足之处,诚恳希望专家与同道不吝指正,以臻完善。

王以进 张云然
2015 年 8 月 13 日

主要符号与术语

主要符号

v —— 气流速度; 飞行速度; 飞机速度; 运动速度 (m/s)

ρ —— 大气密度; 气流密度 (kg/m^3)

P —— 气流压力; 自由流静压; 载荷 (N)

q —— 气流动压; 动压力 $q = \frac{1}{2}\rho v^2$

q_c —— 压缩性修正后的气流动压 (N/m^2)

D —— 气动阻力 (N)

Y —— 气动升力 (N)

Z —— 气动侧力 (N)

C_p —— 气动压力系数; 定压比热

C_D —— 气动阻力系数

C_Y —— 气动升力系数

C_Z —— 气动侧力系数

C_{DL} —— 低速不可压流的气动阻力系数

C_{YL} —— 低速不可压流的气动升力系数

C_{ZL} —— 低速不可压流的气动侧力系数

C_{pL} —— 低速不可压流的气动压力系数

Ma —— 马赫数

α —— 迎角 ($^\circ$)

β —— 侧滑角; 激波斜角 ($^\circ$)

θ_1 —— 偏航角 ($^\circ$)

θ_2 —— 俯仰角 ($^\circ$)

θ_3 —— 滚转角 ($^\circ$)

W —— 重量 (N)

S —— 迎风面积 (m^2)

G —— 过载值, $G = \frac{D}{W}$

k ——气流绝热指数

K ——压缩性修正系;气流的驻点压力系数;穿衣与不穿衣的气动力比值

σ ——应力 (N/mm^2)

ε ——应变 (μ)

V_E ——当量空速 (m/s)

V_H ——真空速 (m/s)

ρ_H ——弹射高度的标准大气密度 (kg/m^3)

ρ_0 ——海平面标准大气密度 (kg/m^3)

γ ——等熵指数, 对空气 $\gamma = 1.4$

$\varepsilon, f(\varepsilon)$ ——根据实验结果选取的修正因子

主要术语

矢状面——从前后方向沿人体的长轴将人体切为左右两部分的切面。若将人体沿正中中线切为左右完全对称的两半,该切面则称为正中矢状面。

冠状面——从左、右方向上将人体切为前、后两部分的切面,又称额状面。

矢状轴——矢状面与水平面的交线。

冠状轴——水平面与冠状面的交线,也称额状轴。

垂直轴——矢状面与冠状面的交线,也称纵轴。

近体端——四肢靠近与躯干相连接的部分为近体端。

远体端——四肢远离与躯干相连接的部分为远体端。

内侧——接近身体正中面为内侧。前臂的内侧叫尺侧,小腿的内侧叫胫侧。

外侧——远离身体正中面为外侧。前臂的外侧叫桡侧,小腿的外侧叫腓侧。

迎角 α ——迎面气流速度矢量 ν 在躯干矢状面上的投影与矢状轴的夹角;矢量 ν 斜向上时夹角为正;斜向下时夹角为负。

侧滑角 β ——迎面气流速度矢量 ν 在水平面上的投影与矢状轴的夹角;矢量 ν 斜向右时夹角为正;斜向左时夹角为负。

当量空速——根据气流动压换算出的海平面标准大气条件下的空速,换算公式如下

$$V_E = V_H \times \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho_0}}$$

速度限值——人体受到的气动力达到不同损伤值时的当量空速。

目 录

第 1 章 头颈部的功能解剖	1
1.1 头部结构与功能解剖	1
1.1.1 头颈部的分界与结构	1
1.1.2 头部的功能解剖	2
1.2 颈部结构与功能解剖	5
1.2.1 头颈部的分界与结构	5
1.2.2 颈部的功能解剖	6
1.3 弹射实践中的头颈部损伤分析	11
1.3.1 与头靠碰撞	11
1.3.2 头颈部的旋转	13
1.3.3 头盔的丢失	14
参考文献	16
第 2 章 头颈部静力学	17
2.1 头颈部的三维有限元分析	17
2.1.1 颅脑力学模型的建立	17
2.1.2 三维有限元计算结果与讨论	20
2.1.3 颈椎三维有限元素模型建立与分析	22
2.2 人头颈部组织的生物力学性能	31
2.2.1 颅骨的各向异性性质	31
2.2.2 颅骨的动态力学性质	36
2.2.3 颅腔软组织材料强度	44
2.2.4 颈椎椎间盘黏弹性的实验研究	49

2.3	猕猴颅骨的生物力学性质	53
2.3.1	材料和方法	53
2.3.2	应变电测技术	54
2.3.3	实验结果与讨论	54
2.4	人与猕猴头颈部组织生物力学特性的比较	57
2.4.1	实验方法	58
2.4.2	实验结果	60
2.4.3	讨论	71
2.4.4	结论	72
2.5	头颅的压缩应力与损伤	72
2.5.1	头颅骨的结构特点及其生物力学性质	72
2.5.2	压缩实验研究	73
2.5.3	实验结果与结论	74
2.6	人体脑膜的力学模型	75
2.6.1	人体脑膜的力学模型	75
2.6.2	脑膜的生物力学实验	77
	参考文献	82

第3章 头颈部运动学 84

3.1	头颈部的运动	84
3.1.1	人体各部位置关系	84
3.1.2	头颈部的运动范围和各部的运动关系	86
3.2	颅脑冲击响应的三维有限元分析	88
3.2.1	颅脑生理与解剖	90
3.2.2	分析方法	95
3.2.3	结果与讨论	102
3.2.4	结论	105
3.3	颅脑损伤生物力学	107
3.3.1	颅脑的解剖与损伤原理	107
3.3.2	颅脑损伤的实验研究	109
3.3.3	颅脑损伤的理论分析	112

3.4	人头颈部高速气流吹袭耐限	116
3.4.1	猴头颈部对模拟气动阻力载荷耐受限度	116
3.4.2	损伤分级的载荷规律	127
3.4.3	人体头颈部阻力生理和损伤耐受限值的 确定	128
3.4.4	人头颈部的升力限值	129
3.4.5	人头颈部气动侧力限值的确定	131
3.4.6	人体头颈部对高速气流吹袭的速度耐限	131
	参考文献	143

第4章 头颈部动力学

4.1	头颈部冲击损伤的力学原理	145
4.1.1	头颈部冲击损伤机制	145
4.1.2	颅脑损伤机制	147
4.1.3	人体头部冲击后的生存界限	152
4.2	颅脑损伤的理论研究	154
4.2.1	颅脑的力学模型和损伤理论分析	154
4.2.2	模拟头部创伤的力学模型	156
4.3	猕猴在高速冲击载荷下颅内压的变化	161
4.3.1	实验材料和方法	162
4.3.2	实验结果分析与结论	166
4.4	人与猕猴下颌骨受冲击时的应力状态分析	174
4.4.1	下颌骨的功能解剖	174
4.4.2	下颌骨的力学模型	175
4.4.3	下颌骨的理论分析	176
4.4.4	理论计算结果	179
4.4.5	猕猴下颌骨的冲击实验结果与结论	181
4.5	颈椎损伤与稳定性实验研究	183
4.5.1	材料和方法	183
4.5.2	实验结果与讨论	185
4.5.3	结论	192

4.6	猕猴颈椎在冲击载荷下的损伤	193
4.6.1	材料和方法	193
4.6.2	实验结果与讨论	195
4.7	猕猴颈肌对拉伸冲击力的响应	196
4.7.1	材料与方法	196
4.7.2	实验结果与讨论	198
4.8	人与猴的头颈部损伤特性比较	199
4.8.1	实验结果比较	200
4.8.2	下颌骨的应力、应变和位移值比较	204
4.8.3	颈椎、颈肌静动态载荷作用下的应力、 应变值比较	205
4.8.4	讨论与结论	208
	参考文献	209
第5章	颅脑损伤的实验研究	212
5.1	人颅骨脑冲击损伤动力学实验	213
5.1.1	材料与方法	214
5.1.2	结果和分析	216
5.1.3	讨论与结论	220
5.2	猕猴颅脑冲击下的动态响应	222
5.2.1	实验材料和方法	223
5.2.2	实验力学模型	225
5.2.3	实验结果与结论	227
5.3	头颈部损伤的诊断和防护	232
5.3.1	颅脑损伤的诊断	232
5.3.2	颈部损伤的诊断	238
5.3.3	头颈部损伤的防护	240
5.4	颅脑损伤冲击实验机的研制	241
5.4.1	脑损伤冲击实验机工作原理	242
5.4.2	脑损伤冲击实验机结构和性能指标	242
5.4.3	电液施力伺服系统的设计原理	244

5.4.4 系统的调整与实验	266
5.4.5 颅脑损伤冲击实验机的应用和发展	272
参考文献	273

第 1 章 头颈部的功能解剖

1.1 头部结构与功能解剖

1.1.1 头颈部的分界与结构

头、颈部之间是以下颌体下缘、下颌角、乳突尖、上项线和枕外隆凸的连线为界。头部以眶上缘、颧弓、外耳门上缘和乳突尖的连线为界，分为上方的颅脑部和前下方的面部。颅脑部包括颅内结构及覆盖着颅骨的头皮。面部包括面浅部、面深部、眼眶、鼻腔和口腔。

1. 头部的骨骼结构

头部由 24 块骨骼组成，其中头盖骨 8 块，面部 16 块，除下颌骨能活动外，其他的骨架是固定的，形成一个坚固的颅腔（图 1-1）。眼眶以上为额骨，额骨以上为头盖骨，两侧向后与颞骨相连。颧骨上连额骨，下接颌骨，横接耳孔。上颌形成牙床，鼻骨形成鼻梁，眼眶围于颧骨，鼻骨于额骨之中。下颌骨像个马蹄形，上端与颞骨部分连接，通过咬肌的作用，可以上下活动，头颅骨本身是不能活动的。

2. 头部的肌肉结构

头部的肌肉解剖结构与头骨解剖结构一样，影响着外部的变化。头骨处于相对固定不变的状态，但依附在头骨上的肌肉却富有变化，呈现各种形状的起伏，牵动着人物的头部运动和脸部上表情的产生。面部肌肉分为运动肌和表情肌两大类，运动肌主理下颌骨的活动，如咬肌、唇三角肌、下颌骨肌、颞肌等；表情肌主理面部的表情，如额肌、皱眉肌、眼轮匝肌、上唇方肌、口轮匝肌、下唇方肌等。头部肌肉与颈部肌肉紧密相连。

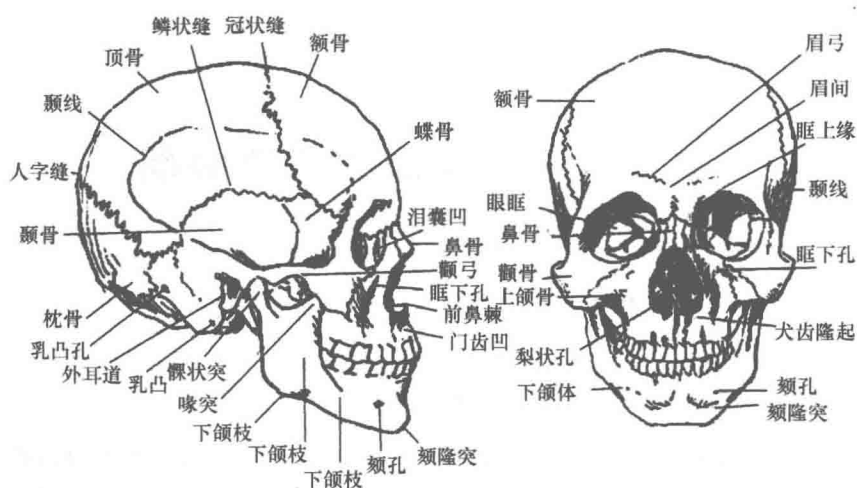


图 1-1 头部骨

1.1.2 头部的功能解剖

1. 头颅

头颅是一个密封的骨匣,外表近似于圆形。颅腔由额骨、顶骨、颞骨、枕骨、蝶骨组成。额骨位于颅前面,仅有一块。顶骨在颅顶部,位于额骨之后枕骨之前,左右各一块。枕骨位于颅后方,在顶骨和颞骨之后,仅一块。颞骨位于颅的侧面,左右各一块。蝶骨位于颅底,形如蝶,因此而起名。临床上将颅骨分成颅顶及颅底,在枕外粗隆和眶上缘连线以上为颅顶,此线以下为颅底。颅底的内面有 3 个呈阶梯状的颅窝,按其位置分别称为颅前、中、后窝。

(1) 颅前窝:容纳大脑半球的额叶,窝中央部较凹陷,中间为鸡冠,两侧为筛板,其上有许多筛孔,嗅丝从此处穿入颅构成嗅神经。颅前窝两侧凸凹不平,是额骨向颅底的延续部分,构成眼眶的顶。

(2) 颅中窝:位置比颅前窝低,两侧部容纳大脑半球的颞叶。窝中央高起,由蝶骨构成。体内骨质中的空腔称蝶窦,体的上面形状似马鞍,因此称蝶鞍,鞍的中央凹陷为垂体窝,容纳脑下垂体,鞍前有横行的视交叉沟,由此沟的两侧通视神经孔,视神经由此处入眶。蝶鞍的两侧

是海绵窦,窦内有动眼神经、滑车神经、外展神经、三叉神经第一枝和颈内动脉通过。所以海绵窦病损时可出现海绵窦综合症:眼睑下垂、瞳孔散大、额部皮肤感觉减退或消失、角膜反射消失。

(3) 颅后窝:位置最低,其两侧容纳小脑半球。窝中央是枕骨大孔,大孔前方平坦的斜坡承托桥脑和延脑。孔的前外缘有舌下神经管内口,舌下神经由此通过出颅。颅后窝后壁中部有十字形的隆起,其中点为枕内隆凸,自隆凸向两侧各有一条枕横沟,沟向前下接乙字形的乙状沟,为横窦和乙状窦的压迹。乙状窦外侧壁为乳突小房的内侧壁,相隔一层薄骨板,故乳突小房的化脓性感染可波及乙状窦,导致乙状窦栓塞。乙状窦末端接颈静脉孔,内有颈内静脉、舌咽神经、迷走神经和副神经通过。

2. 脑

脑是人体高级神经中枢。脑可简单分为大脑、小脑和脑干。

(1) 大脑:由两侧大脑半球组成。大脑皮质是覆盖于大脑半球表面的灰质层,厚2~3mm。大脑皮层是中枢神经系统发展最晚、而且是最完善的。大脑半球在外表上看,凸出的叫脑回,凹下去的叫脑沟,大而深的沟叫裂。以左侧大脑半球外侧面为例。大脑外侧裂、中央沟、顶枕裂的引线,将大脑半球分作额叶、顶叶、颞叶、枕叶4部分。在中央沟前面的为中央前回;中央沟后面的为中央后回;外侧裂下边有颞上回,围绕外侧裂尾端为缘上回,颞上沟尾端为角回,额下回后部、中央前回下部为布洛卡氏区。

(2) 小脑:位于后颅窝内,由一个中间的蚓部和两个半球构成。小脑是协调平衡、共济运动和肌张力的反射器官。损害时出现共济失调、平衡障碍。

(3) 脑干:包括中脑、脑桥和延髓,为节段性结构。脑干中有上下通达的神经纤维,还包含大量神经核。

3. 头皮

覆盖在颅顶部的软组织主要是头皮,由浅至深依次为:皮肤、浅筋膜、颅顶肌和帽状腱膜、腱膜下疏松组织和颅骨外膜。其中,前3层紧密相连,不易将其各自分开,临床上头皮撕裂伤时常一同被揭起,因此,常将此3层合称为“临床头皮”。头皮可分为5层。

(1) 皮层:头皮的皮层较厚实,甚为致密,有头发和丰富的皮脂腺和汗腺,血运丰富。

(2) 皮层下:又称浅筋膜层,有许多致密的短纤维索和填充在其间的脂肪粒所组成,因此它的伸缩性很小。头皮的主要血管和神经都分布于此层,血管壁与纤维组织粘连甚紧。

(3) 帽状腱膜层和枕额肌:帽状腱膜是一层坚韧的腱性纤维膜,前后分别连于额肌和枕肌,位于颅顶中部;两侧变薄在颞肌浅面与颞筋膜浅层相续。由于此层前、后有额、枕肌牵拉,张力较大。枕额肌属表情肌由面神经分支支配,能皱额、提眉。

以上3层由上述的纤维索紧密地结合在一起,彼此不易分离。

(4) 蜂窝组织层:又称腱膜下层,是由疏松的纤维组织所构成,它与上述的帽状腱膜层和它下面的骨膜层,都只有不牢固的联系。

(5) 颅骨外骨膜:薄而韧,覆盖于颅骨的外面。此层与颅骨易分离,但在骨缝处则粘连甚紧。

4. 头部肌肉

头肌分为面肌和咀嚼肌(图1-2)。

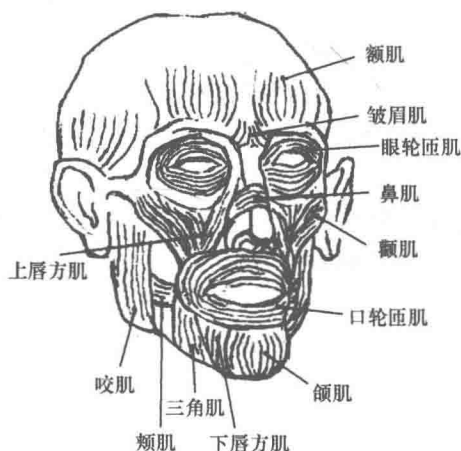


图1-2 头部肌肉

(1) 面肌:面肌又称表情肌,多在口裂和眼裂的周围,起自颅骨,止于皮肤。收缩时,可改变口裂和眼裂的形状,皮肤出现皱纹,从而表现