

# 不同增压速率所引起的耳气压伤特征

胡正元<sup>1</sup>, 史秀凤<sup>1</sup>, 范静平<sup>2</sup>

(1. 海军医学研究所, 上海 200433; 2. 第二军医大学长征医院, 上海 200003)

**摘要:** 文章应用形态学检查、听觉诱发电位测定及铺片技术和扫描电镜观察, 研究了不同的增压速率引起的豚鼠听觉损伤特征。研究表明, 较低的增压速率主要引起鼓室和圆窗的病变以及内耳外毛细胞的损伤, 部分动物出现前庭功能障碍; 较高的增压速率主要引起鼓膜破裂, 而鼓室、圆窗及内耳的损伤均较轻。根据实验结果对不同的损伤机制进行了讨论。研究认为, 尽管增压速率低, 不致产生鼓膜破裂, 但也会引起较重的听觉损伤。

**关键词:** 耳气压伤; 听觉损伤; 增压速率; 豚鼠

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)01-0025-04

## Characteristics of aural barotrauma caused by different compression rate

HU Zheng-yuan<sup>1</sup>, SHI Xi-feng<sup>1</sup>, FAN Jing-ping<sup>2</sup>

(1. *Naval Medical Research Institute, Shanghai 200433, China;* 2. *Changzheng Hospital, The Second Military Medical College, Shanghai 200003, China*)

**Abstract:** Characteristics of hearing damage to guinea pigs caused by different compression rates were studied using morphological examination, measurement of auditory evoked potential, surface preparation technique and scanning electron microscopy. The results show that, at a lower compression rate pathological changes in tympanic cavity (TC) and round window (RW), damage to outer hair cell (OHC) of inner ear occurs more frequently, along with vestibular dysfunction in some of the tested animals. At a higher compression rate, however, rupture of tympanic membrane (TM) is particularly liable to happen, with slight damage to TC, RW and OHC. Based on these results different mechanisms responsible for the damage are discussed. This study shows that severe hearing damage can occur at lower compression rates, although no rupture of TM is found.

**Key words:** aural barotrauma; hearing damage; compression rate; guinea pig

## 1 引言

环境气压突然变动或快速增高不仅常见于航空和高气压环境, 而且在潜艇及现代化舰艇的舱室中均可出现。由于上述变化而引起的中耳及内耳气压伤目前已有较详尽的报道<sup>[1,2]</sup>。在以往的工作中我们曾对舱室快速增压引起的听觉损伤进行过研究。从研究中我们观察到耳气压伤的发生与损伤程度除压力因素外, 似与增压速率有关。然而, 有关增压速

率与耳气压伤的关系还鲜有报道。本研究的目的是在一定的压力条件下观察不同增压速率引起的耳气压伤特征。

## 2 实验方法

### 2.1 实验动物

选用白色短毛豚鼠, 雄性, 体重在 260g~350g 之间。动物随机分成 6 组, 每组 5 只计 10 耳。除 1 组为对照组外, 其余 5 组为快速增压组。动物在听觉诱发电位测试过程中, 由于麻醉死亡等因素, 有的组实测不足 10 耳(详见实验结果)。

### 2.2 加压方法

实验在压力舱内加压, 增压时间及压力(附加压)为 120kPa(346s)、100kPa(300s)、100kPa(6.4s)、

120kPa(3.5s)及100kPa(2.0s),相应的增压速率(kPa/s)为0.3、0.3、16、34及50。在高压下的停留时间除300s加压组为10s外,其余皆为5s,减压时间为1min(6.4s加压组)、5min(3.5s及346s加压组)及30min(300s及2.0s加压组)。实际上共计5组(批)动物,4种增压速率。各组动物在高压下的停留时间及减压时间均在人体“不减压潜水”的安全范围内,其目的是防止发生减压病。

### 2.3 测试指标

实验后48h进行下列各项指标的检测。

听阈及耳廓反射阈测定:动物在麻醉状态下用听皮层诱发电位技术测定听阈<sup>[3]</sup>,用中国科学院上海生理研究所研制的声刺激器测定耳廓反射阈。以上测试信号均为矩形波短声(0.125ms)。按实验组阈值减去对照组阈值计算各组的阈移。

中耳损伤观察:以上测试完毕后,取下听泡在解剖显微镜下观察鼓膜、鼓室及圆窗的损伤状况。

内耳损伤观察:待中耳损伤观察结束后,各组随机用2只动物(4耳)进行铺片技术制备,然后在扫描电镜下观察内耳损伤状况<sup>[4]</sup>。

## 3 实验结果

### 3.1 不同增压速率与中耳损伤的关系(表1)

当增压速率较低时(0.3kPa/s),主要表现为鼓室(TC)出血,并往往合并有圆窗(RW)出血或破裂,但损伤程度不一,存在明显的个体及双耳间差异,而鼓膜(TM)破裂的发生率较低;当增压速率逐渐增高时(16~34kPa/s),上述变化发生逆转,鼓室及圆窗病变的发生率逐渐减少,而鼓膜破裂的发生率则明显增高,当增压速率达50kPa/s时,绝大多数鼓膜呈现单纯性破裂及轻度出血,而很少伴有鼓室及圆窗的病变。以上鼓膜破裂多呈小孔或小缝状。经统计学处理(以机率P值<0.05作为显著性的标准),增压速率与鼓膜破裂的发生率呈明显的正相关(P<0.05),与鼓室及圆窗的损伤发生率呈明显的负相关(P<0.01)。

表1 不同增压速率下中耳损伤状况

速率(kPa/s)	耳数	TM 充血		TM 破裂		TC 出血 RW 出血、破裂	
		耳数	%	耳数	%	耳数	%
0.3	10	0	0	1	10	9	90
0.3	8	0	0	1	12.5	7	87.5
16	10	0	0	5	50	5	50
34	9	1	11.1	4	44.5	4	44.4
50	8	2	25	5	62.5	1	12.5

### 3.2 不同增压速率与内耳毛细胞损伤的关系(表2)

在较低的增压速率条件(0.3kPa/s)下,主要在耳蜗底转的外毛细胞(OHC)出现纤毛的紊乱及融合。在16kPa/s下仅底转第三排OHC具有上述变化,在34kPa/s下上述变化更轻微,而在50kPa/s下,OHC却未见明显损伤。总的趋势是,随着增压速率的增加,OHC的损伤逐渐减轻。

表2 不同增压速率下内耳外毛细胞(OHC)损伤状况

速率(kPa/s)	耳数	损伤状态
0.3	4	底转 OHC 纤毛出现紊乱、融合、部分 OHC 纤毛转位
16	4	底转第三排 OHC 纤毛有紊乱、融合
34	4	底转 OHC 纤毛稍有紊乱
50	4	未见明显 OHC 损伤
正常对照	4	OHC 排列整齐

### 3.3 不同增压速率与阈移的关系(表3)

当增压速率较低时(0.3kPa/s),听阈及耳廓反射阈阈移均较高。在总计18耳的测定中,不仅动物间存在个体差异,而且同一动物两侧耳阈移也往往有较大差别。虽然听阈阈移的平均值约为7dB,但其中有5耳(27%)的阈移在14dB以上(1耳为14dB,1耳为19dB,3耳为24dB)。同样耳廓反射阈阈移平均约为10dB,但其中有5耳均在29dB以上(1耳29dB,4耳>29dB)。在较高的增压速率条件下,无论是听阈或耳廓反射阈的阈移均无明显改变,而且上述个体及双耳间差异均较小,除3耳(16kPa/s)听阈阈移为9dB外,听阈及耳廓反射阈的阈移一般均在0~4dB范围内。统计学处理发现,增压速率与听阈及耳廓反射阈阈移呈明显负相关,相关系数的机率,听阈阈移P<0.05,耳廓反射阈阈移P<0.01。由此可以说明,随着增压速率的增高,听阈及耳廓反射阈阈移均呈下降趋势(耳廓反射阈测试完毕后动物因麻醉死亡,听阈测试时只有7耳)。

表3 不同增压速率下听阈及耳廓反射阈阈移

速率(kPa/s)	耳数	阈移(x±S,dB)	
		听阈	耳廓反射阈
0.3	10	7.0±9.9	9.8±12.2
0.3	8	7.5±9.2	11.8±14.2
16	8	4.8±3.7	3.3±1.3
34	9 <sup>a</sup>	1.1±1.9	0.4±1.3
50	6	2.0±2.1	0.7±1.6

### 3.4 不同增压速率与前庭功能障碍的关系(表4)

在较低的增压速率(0.3kPa/s)暴露后,部分动物出现明显的前庭功能障碍,表现为头部向一侧偏

转,同时眼球也向同侧呈慢向水平移动(眼球震颤的慢相成分),它与眼球震颤的快相成分的方向相反。此种自发性的头部偏转及眼球震颤持续 30s 至 1min,但在随后的观察中此种反应并未重复出现,动物的活动及行为均正常。在共计 9 只豚鼠中 5 只出现上述反应占 55%。但在其他较高的增压速率条件暴露后均未出现上述前庭障碍。

表 4 不同增压速率出现前庭功能障碍的动物数

速率(kPa/s)	动物数	前庭障碍动物数
0.3	5	3
0.3	4	2
16	5	0
34	5	0
50	4	0

### 3.5 在增压速率为 0.3kPa/s 时,动物听阈及耳廓反射阈移与头部及眼球偏转方向的关系(表 5)

前述出现前庭功能障碍的 5 只动物中,均可见不同程度的中耳损伤。但比较起来,动物的听阈与耳廓反射阈却能综合地显示出中耳与内耳的损伤程度。凡耳廓反射阈明显增加的一侧耳,其听阈也显著升高,两者的变化基本一致。不仅如此,在出现前庭功能障碍的动物中,均有一侧耳有较高的听阈及反射阈移,而且从前庭障碍的分析中可以看出,动物头部及眼球偏转的方向与较重损伤耳的方向是一致的。表中 L 为左耳, R 为右耳, > 29dB 指超过声刺激器的最高强度所计算的阈移(参见实验方法)。

表 5 在增压速率 0.3kPa/s 时,动物听阈及耳廓反射阈移

动物编号	听阈阈移 / dB		耳廓反射阈移 / dB		头部与眼球的偏转方向
	L	R	L	R	
18	24	0	29	4	左
19	0	14	4	24	右
22	24	0	> 29	0	左
23	0	9	0	> 29	右
26	0	19	4	> 29	右

## 4 讨 论

在我们的实验条件下,中耳及内耳气压伤有关的器质性及功能性变化几乎都能观察到。但是不同的增压速率引起的上述变化却呈现明显的差异。引起这种差异的主要因素是中耳结构及其调节功能的

变化。鼓膜是中耳的屏障,它对各种压力波的作用都非常敏感。但是,鼓膜损伤的压力耐受值范围较大,而且损伤的机制及个体差异也较复杂。从实验结果分析,当增压速率较低时(以 0.3kPa/s 为例),由于缓慢增压,鼓膜内、外瞬时的压差( $\Delta P$ )变化较小,对绝大多数豚鼠耳来说,此种压差变化均在鼓膜能耐受的压力范围内,因而鼓膜未产生破裂而且听骨链完好,但当咽鼓管不能正常调压时,鼓室内的相对负压状态却逐渐增加,于是形成鼓室内出血,严重时还会造成圆窗出血及破裂。由于鼓膜向听骨链和前庭窗不断增压,由此可引起耳蜗内部淋巴液压力增加,从而损伤内耳。实验中所观察到的内耳 OHC 损伤即是明证。当增压速率增高时, $\Delta P$  变化增大,逐渐达到鼓膜破裂的压力范围,而且咽鼓管的调压功能受限,因而破裂率增高,与此同时鼓室和圆窗的病变以及内耳 OHC 的损伤均呈减轻的趋势。这种改变说明,鼓膜一旦破裂鼓室与外界的压力趋于平衡,这在某种程度上减轻了鼓室及圆窗的损伤,同时也削弱了压力波通过听骨链对内耳的作用,使 OHC 的损伤减轻。这种现象我们在脉冲噪声与冲击波的实验中也同样观察到<sup>[5]</sup>。因此有人将这种现象称之为中耳传声系统对内耳的保护作用<sup>[6]</sup>。当然,这种保护机制只是相对的,在增压过程中,如果鼓室及圆窗在鼓膜破裂之前已产生病变,那么随后的鼓膜破裂就不可能起到前述的保护作用。

听阈及耳廓反射阈移可以从听力损失的角度综合评价中耳及内耳的损伤程度<sup>[7]</sup>。我们的实验显示,上述阈移的变化与不同增压速率下中耳及内耳的损伤状况及趋势基本一致。在较低的增压速率下,由于鼓膜及鼓室的损伤程度有别,个体及双耳间的差异较大,因此也相应地表现出阈移的个体及双耳间差异,显示出阈移的标准差大。随着增压速率增加,鼓膜破裂的百分率增高,而且损伤的机制及程度也相近,因此阈移的个体及双耳间差异呈现减少的趋势。在上述条件下,鼓膜多呈单纯性破裂,而且破裂面积较小。研究已证明,鼓膜破裂面积越大,听力损失越重,这种关系与损伤的部位无关<sup>[8]</sup>。我们所观察到的现象符合这种规律。

实验仅在增压速率为 0.3kPa/s 时观察到动物出现前庭功能障碍。显然,前庭功能障碍的出现同样与前述中耳损伤的机制有关。由于前庭器官(椭圆囊、球囊及半规管)的内、外淋巴液均与耳蜗的内、外淋巴液相连。因此,当压力波使耳蜗淋巴液增高时,必

然会使前庭器官的淋巴液压增高,这无疑会刺激前庭终末感受器出现与前庭功能障碍有关的颈部肌肉紧张与眼球震颤反应。由于此种反应仅出现在暴露后的短时间内,因而这只是暂时性的功能障碍。Makashima 等的研究也观察到类似现象<sup>[2]</sup>,他们认为,出现前庭功能障碍的主要因素是内耳液压增加,并进而影响到耳蜗及前庭器官的血流。以上这些认识都仅是一种推测,有关的机制可能还要复杂些。

综上所述可以得出这样的结论,在一定的压力条件下(100kPa),不同的增压速率可产生不同的损伤机制。尽管增压速率低,不致产生鼓膜破裂,但也会引起较重的听觉损伤。

### 参 考 文 献

[1] Farmer J C . Ear and sinus problems . In: Bove AA, ed. Bove and Davis' Diving medicine (3rd ed) [M] . London: WB company , 1997, 235-257.

- [2] Nakashima T, Itoh M, and Watanabe Y, et al. Auditory and vestibular disorders due to barotrauma[J]. Ann Otol Rhinol Laryngol , 1998, **97**(2) : 146-152.
- [3] 史秀风,魏晶,王云景,等.极低频强磁场对豚鼠听阈的影响[J].中华航海医学杂志,1994, **1**(2) : 74-78.
- [4] 范静平,陆书昌,胡正元,等.急性放射性损伤豚鼠耳蜗扫描电镜观察[J].第二军医大学学报,1992, **13**(1) : 47-49.
- [5] 胡正元,梁振福,郭连生,等.脉冲噪声与空气冲击波暴露后豚鼠中耳声阻抗的变化[J].声学学报,1981, **6**(2) : 103-109.
- [6] 梁之安.听觉感受和辨别的神经机制(第1版)[M].上海:上海科技教育出版社,1999. 224-225.
- [7] Jero J, Coling D E, and Lalwani A K . The use of Preyer' s reflex in evaluation of hearing in mice[J]. Acta Otolaryngol, 2001, **121**(5) : 585-589.
- [8] Voss S E , Rosowski J J, and Merchant S N, et al .How do tympanic-membrane perforations affect human middle-ear sound transmission[J]. Acta Otolaryngol , 2001, **121**(2): 169-173.

(上接第10页)

表2为采用DFE进行均衡处理后解调的结果。实验中取遗忘因子 $\lambda=0.97998$ ,误码率由原来的21%降至8.7%,这表明,在水声数据传输系统中应用DFE消除多径效应引起的干扰是很有效的。

表2 水声信道DFEFTF算法均衡后的误码点和误码率

误	5	18	27	37	44	57	67	80	91	103
码	117	129	142	151	164	176	187	202	213	222
点	235	246	257	273	281	290				

源码元数 300, 误码率 =  $26/300 = 8.7\%$

## 5 结束语

针对计算机模拟实现的多径传播的水声接收信号,采用判决反馈自适应均衡技术,消除多径效应引起的码间串扰,使传输系统的误码率降低了1.4倍。选用FTF算法实现DFE,在收敛速率、跟踪速率和计算量方面,均得到了令人满意的效果。

为了进一步降低误码率,可针对水声信道的时空变化特性,增加接收通道数量,在各接收通道进行自适应均衡。此外,还可以增加纠错编码措施。模拟实验表明,采用DFE,并配合具有一位纠错能力的(12,8)汉明编码,可使误码率进一步下降至0.95%。

因此,多通道DFE,配以优选的数据传输格式、编码方式、调制方式和接收方式,将会进一步提高整个水声数据传输系统的可靠性。

### 参 考 文 献

- [1] 高松龄,柴勤忠.多径传播的水声信号模拟研究[J].石油大学学报,1997,(6):96-98
- [2] 陈尚勤,李晓峰.快速自适应信息处理[M].北京:人民邮电出版社,1993.
- [3] John G Proakis. Adaptive Equalization Techniques For Acoustic Telemetry Channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, **16**(1) : 21-31.
- [4] Geir Helge Sandmark, Arne Solstad. Simulations of an Adaptive Equalizer Applied to High-Speed Ocean Acoustic Data Transmission[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, **16**(1): 32-41.
- [5] 倪晋平,马远良,张忠兵.一种强干扰下超弱水声信号自适应盲分离的快速算法[J].声学技术,2002, **21**(3): 141-144.
- [6] 王彦,马章勇,黄建人.一种采用两个相干累加器提高自适应谱线增强器性能的方法[J].声学技术,2003, **22**(1): 8-10.
- [7] 蒋卫跃.自适应线谱增强器在主动声纳中的应用研究[J].声学技术,1999, **18**(3): 175-178.