

脉冲热管中的热力型脉动现象及实验测量*

徐进良 张显明 施慧烈

中国科学院广州能源研究所, 广州 510070

摘要 分析了脉冲热管产生热力型脉动的原因, 采用高速动态数据采集系统, 以 FC-72, 乙醇及去离子水为工作介质测量了脉冲热管的热力型脉动曲线, 获得了脉动周期、脉动幅度等. 实验发现由于 FC-72 具有较小的表面张力及汽化潜热, 具有较短的脉动周期及较小的脉动幅度. 而以水为工质的热力型脉动曲线极不规则, 脉冲热管在低功率下存在时而停滞, 时而脉动的现象. 建议在低功率下采用 FC-72 和乙醇, 而在高功率下采用水. 为未来脉冲热管的数值模拟提供了可以定量比较的数据, 同时为其设计、制造和运行提供了科学依据.

关键词 脉冲热管 热力型脉动 工质 脉动周期 脉动幅度

近年来, 由于信息产业的迅速发展, 电子元件发热量及单位面积上的热流密度大大增加, 因此研制新型的电子元件冷却技术十分必要^[1]. 热管技术从 20 世纪的 60 年代诞生以来, 以其独特的优势在工业界获得了广泛的应用. 脉冲热管(pulsating heat pipe, PHP)的概念由 Akachi^[2]在 1990 年提出. 脉冲热管之所以被称为热管, 是因为它具有普通热管所具有的一切优点, 如属非能动式冷却技术等, 但其工作原理与普通微热管存在本质的区别. 普通热管中发生静态的界面蒸发或冷凝过程, 而 PHP 中依靠热诱发的自激振荡产生动态过程的界面相变现象. 从提出 PHP 的概念到 1999 年的近十年间, 脉冲热管的研制十分缓慢, 几乎未见到这方面的研究报告. 1999 年在日本举行了第 11 届国际热管会议, 有关脉冲热管研究的报道, 引起与会者极大的兴趣^[3]. 文献[3]采用毛细玻璃管制作了 PHP 的模型, 采用可视化技术定性地观察到了汽弹和液弹在玻璃管内上下振荡. 从那次会议以后, 文献[4, 5]对脉冲热管进行了数值模拟并提供了其主要结果. 本文测定了 PHP 在不同运行参数下的热力型脉动周期和幅

度, 并在理论上分析了 PHP 产生热力型脉动的原因. 另外, 针对不同的功率参数, 提出了采用具有不同物性参数工质的观点.

1 PHP 工作原理

设想将一根长的毛细管抽真空, 然后在毛细管内充入部分液体, 如果毛细管内径尺寸 $d \leq 1.83 \sqrt{\sigma / [g \cdot (\rho_l - \rho_g)]}$, 则管内就会间歇地形成汽弹和液弹, 它们处在对应于室温下的平衡状态并随机地分布在毛细管内. 将毛细管弯制成多圈蛇形结构, 就形成了 PHP. 在 PHP 的概念设计中, 从总体上可分为开式和闭式两种, 本文研究的是闭式 PHP.

图 1 为我们研制的 PHP 模型及实验装置. 由于汽弹和液弹在毛细管内的随机分布, 加热段吸收热量后, 在某个时刻 t , 相邻平行毛细管内形成的压力膨胀效应是不同的, 相邻平行管间的压力差引起汽液工质在平行毛细管内的运动, 使热量从加热段传输到冷凝段. 这种运动又瞬时改变了加热段毛细管内的汽液分布, 从而改变汽液介质的运动方向. 以上效应引起脉冲热管内汽液工质的脉动.

2003-07-22 收稿, 2003-09-25 收修改稿

* 广东省自然科学基金资助项目(批准号: 32700)

E-mail: xujl@ms.giec.ac.cn

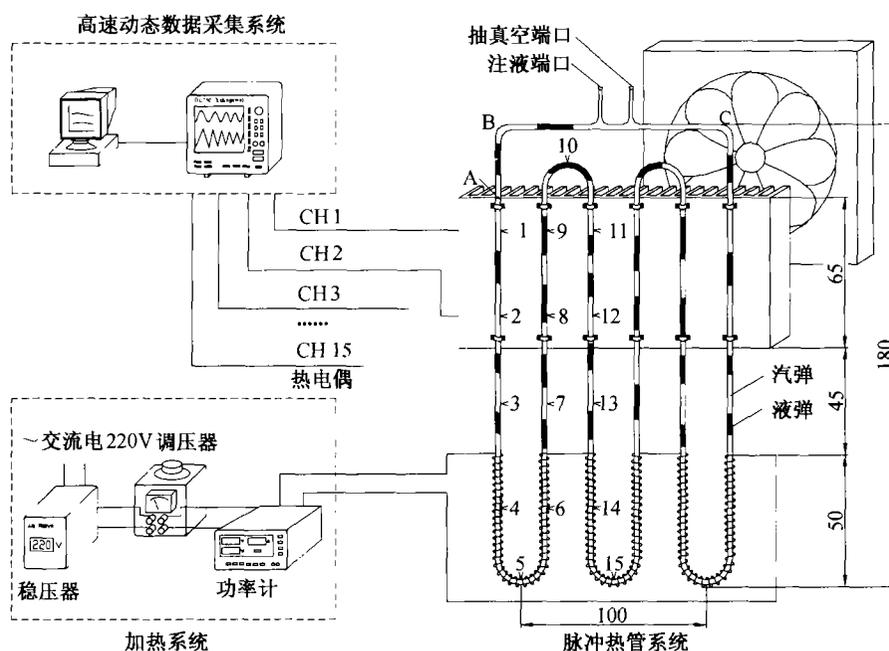


图1 PHP实验模型及装置

2 PHP模型及实验装置

图1表示研制的PHP模型及其实验装置, 主要由3部分组成: 脉冲热管、高速动态数据采集系统及加热系统. 通过调节加热系统获得不同的加热功率, 功率计直接显示施加在加热段的电压、电流及功率.

高速动态数据采集系统采用日本横河(Yokogawa)公司的高分辨率、高精度数据采集系统, 其采样频率可高达 $100 \times 10^3/s$, 对于本研究, 采样频率采用 $500/s$.

PHP由加热段, 绝热段及冷凝段组成. 如图1所示, PHP由外径2mm, 内径1.18mm的高质量紫铜管弯制而成, 弯曲半径为10mm, 形成6根首尾相连的并联毛细管束. 在加热段, 热源由镍-铬加热丝均匀地缠绕在毛细管外表面实现. 由于几何结构的对称性, 在紫铜管外表面共布置15对美国OMEGA公司生产的K型高灵敏度热电偶, 正好占据整个PHP的一半. PHP上部热沉为铝散热片, 与PHP紧密焊接在一起. 风扇与热沉安装在一起, 将最终热量直接释放到大气环境中去. 在热沉以下, 毛细管外表面包以厚的绝热材料, 形成加热段和绝热段. 热电偶从点1开始编号, 直到点15, 它们在

被展开的毛细管上的轴线位置如表1所示.

表1 热电偶在被展开的毛细管轴线上的位置(mm)

热电偶位点														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20	55	90	130	166	201	241	276	311	347	383	418	453	493	529

整个装置处于 24°C 的室温, 空调调节误差为 $\pm 1^\circ\text{C}$, PHP组件垂直放置. 抽真空、注液由我们研制的特殊设备完成. 充液比被定义为所注液体容积与PHP管内容积的比值. 分别采用FC-72, 乙醇及去离子水为工作介质, 其中FC-72为美国3M公司生产的专门用于电子冷却的冷却剂. 3种工质在常压沸点温度下的物性如表2所示.

表2 3种工质在101.3kPa沸点温度下的物性

工质	$T_{sat}/^\circ\text{C}$	$\rho_l/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho_g/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_{p,l}/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	$H_{lg}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
FC-72	56.6	1600	13.43	1102	94.8	8.35×10^{-3}
乙醇	78.3	757	1.57	2580	960.0	17.46×10^{-3}
水	100	958	0.60	4217	2256.7	58.91×10^{-3}

3 PHP热力型脉动

热力型脉动是由于相变系统中流量等参数的脉动, 引起壁面传热系数的变化, 从而引起金属温度有规律

的脉动。由于脉动,可能造成金属过热或疲劳损坏,所以在设备运行中应注意避免,文献中对大直径管的脉动现象做了大量的研究^[6]。但对于直径为2mm及以下的毛细管内相变传热的脉动流动,还未见文献报道。

由于采用薄壁紫铜管,具有极高的导热系数,经过简单的计算可知,内外壁温差极小,外壁温的测量值能很好代表内壁的温度值。以下分4种情况分析 PHP 热力型脉动产生的机理:

(i) 加热段金属壁面被汽弹冲刷(图2(a))

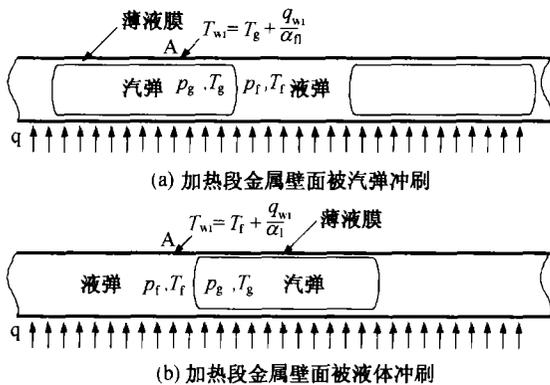


图2 PHP 金属壁面产生热力型脉动的机理

在毛细管中,汽弹和液弹共存,在汽弹区,管壁存在一液体薄层,将汽弹和管壁分隔开来。薄液层提供了非常高的传热系数,沸腾发生在汽液界面处。跨过汽液界面,汽侧与液侧压力差

$$p_g - p_l = \frac{2\sigma}{r}, \quad (1)$$

式中 r 为汽液界面的曲率半径, σ 为液体表面张力。汽侧温度 T_g 至少大于或等于对应压力 p 下的饱和温度。因为沸腾发生在汽液界面处,热量传递的方向是从液体传递到汽液界面,因而

$$T_l > T_g \geq T_{\text{sat}}(p_g). \quad (2)$$

局部点 A 处的金属温度为

$$T_{wi} = T_g + \frac{q_{wi}}{\alpha_{fl}}, \quad (3)$$

式中 q_{wi} 为内壁热流密度, α_{fl} 为薄液膜传热系数。

(ii) 加热段金属壁面被液体冲刷(图2(b))

此时,局部点 A 处的金属温度为

$$T_{wi} = T_l + \frac{q_{wi}}{\alpha_l}. \quad (4)$$

式中 α_l 是液体对流传热系数。因为 $T_l > T_g$, $\alpha_l > \alpha_n$, 所以对固定金属壁面的某个点 A, 被液体冲刷时,显示较高的温度值,而当该点被汽弹冲刷时,显示较低的温度值。当 PHP 工作时,局部点间隙地被汽弹或液体冲刷,所以局部点温度时而上升,时而下降,形成有规律的脉动。这就是 PHP 产生热力型脉动的原因。

在冷凝段,也会产生类似的热力型脉动现象,但由于热量是由汽液介质传递给外界环境,产生的过程与加热段相反,即当局部点被液体冲刷时,显示较低温度,而被汽弹冲刷时,显示较高温度。由于金属壁面间隙地被汽弹和液体冲刷,形成了冷凝段的热力型脉动现象。在绝热段,由于工质与外界环境几乎无热交换,因而,热力型脉动的幅度应较小。

4 不同工质对 PHP 热力型脉动的影响

图3表示 FC-72 及乙醇的热力型脉动曲线,其中点5和14位于加热段,点3和7位于绝热段,点9和2位于冷凝段。由图可见,所有温度均随时间围绕时均值作周期性脉动,其中时均值由图中的水平线表示,脉动周期非常均匀。对于 FC-72,点5,3及9的脉动周期相同,均为2.0s,其脉动幅度分别为1,0.1及0.3℃。其中脉动幅度被定义为脉动曲线峰值与时均值的差值。从以上数据可见,加热段热力型脉动的幅度要大于冷凝段的脉动幅度,这主要是因为加热段具有较高的内壁热流密度。而绝热段的热力型脉动幅度处于加热段和冷凝段之间。这和上节的理论分析完全吻合。对于乙醇(分析纯),其热力型脉动周期为3.16s,脉动幅度分别为3.5,1.75及0.5℃。比较 FC-72 及乙醇的脉动周期,可见 FC-72 的脉动周期要小于乙醇的脉动周期。本文认为脉动周期主要与汽化潜热有关,FC-72 的汽化潜热要小于乙醇的汽化潜热,导致在相同的加热量下,FC-72 产生的蒸汽质量要大于乙醇产生的蒸汽质量,较大的蒸汽产生量加剧了脉动流的剧烈程度,从而使 FC-72 的热力脉动周期较短(脉动频率较高)。

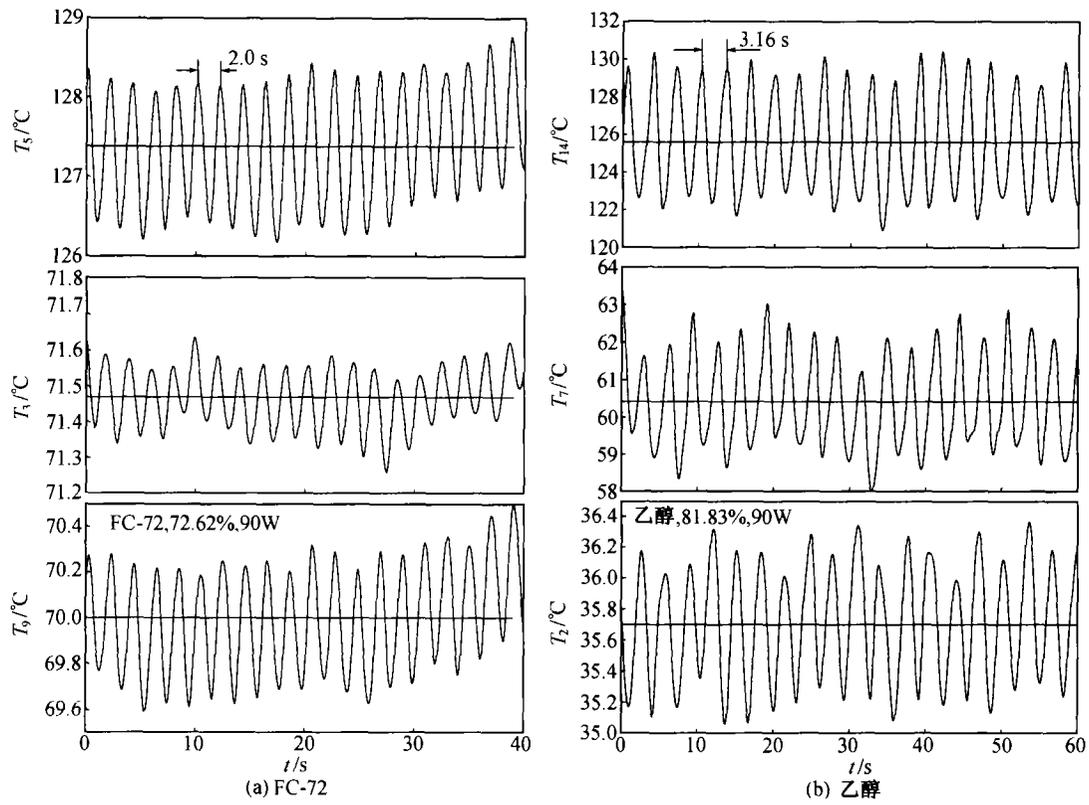


图3 高功率下 PHP 的热力型脉动曲线

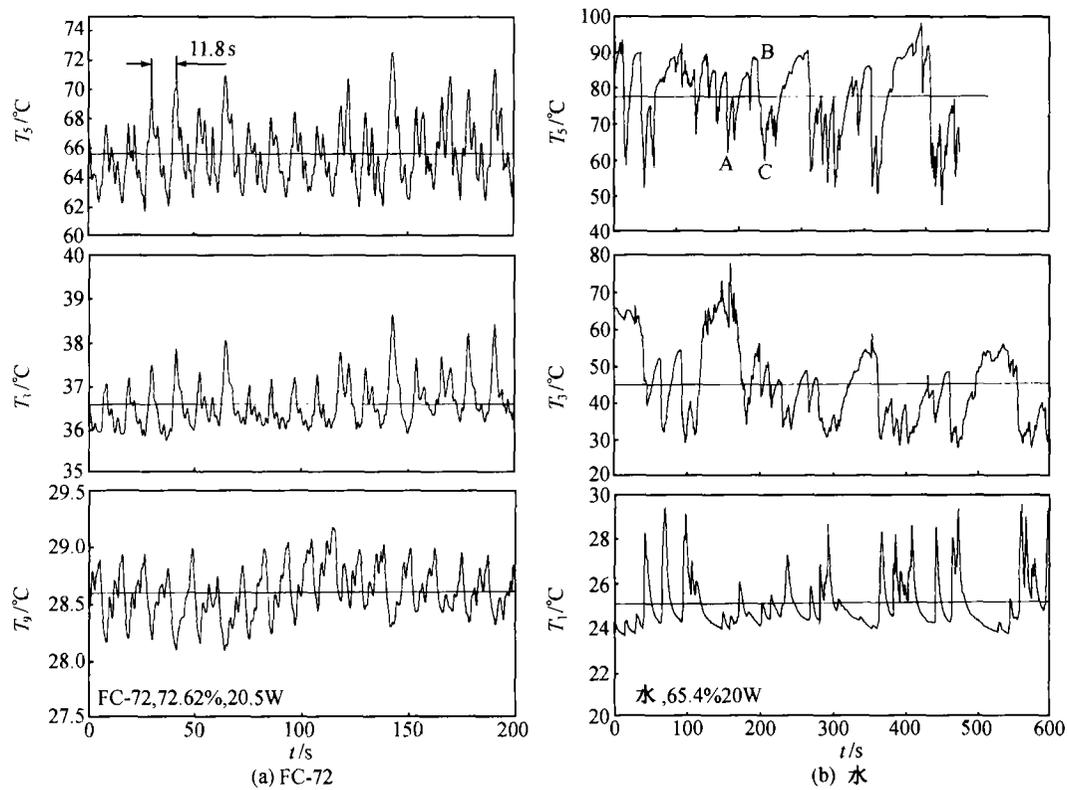


图4 低功率下 PHP 的热力型脉动曲线

另外,脉动幅度的影响因素主要是表面张力.由表2可见,FC-72的表面张力近似为乙醇的一半.表面张力小,汽液界面处的压力差减小(见(1)式),导致汽液界面处温差减小,从而使FC-72的脉动幅度要小于乙醇的脉动幅度.

图4表示功率20W下FC-72及水的热力型脉动曲线.由于加热功率较低,以FC-72为工质的热力型脉动周期为11.8s,加热段,绝热段及冷凝段的脉动幅度分别为3,0.5及0.35℃.

对于以水为工质的PHP热力型脉动,信号变得相当不规则.相邻温度脉冲的时间间隔非常的不均匀,且脉动幅度非常大.如加热段温度点5波动范围为50~90℃,平均脉动幅度达20℃.PHP工作的情况并不理想,如选定曲线AB段及BC段(见图4),在AB段点5近乎随时间直线上升,表明在这一段时间内PHP内的工质几乎处于停滞状态,加热几乎全部用于工质显焓的增加,从而使金属温度近乎成线性增加,而这一段时间间隔的量级为1min.但当金属温度升高到90℃左右时,温度突然急剧下降到55℃左右的C点,表明较高的金属温度激发了PHP内工质的运动,从而使温度陡降.另外,比较以FC-72及水为工质的PHP的同一点5的温度,以水为工质时点5温度要明显高于以FC-72为工质的温度.

5 PHP的温度分布

图5表示在功率30及100W下3种工质的温度沿被展开长度分布的比较,其中温度指的是各点的时均温度.对于 $q=30\text{W}$,以FC-72为工质的温度分布最低,以水为工质的温度分布最高,而乙醇则处于两者之间.这主要是由于低功率下,由于FC-72的汽化潜热仅为水的4.2%,小的加热量仍然使FC-72产生较多的蒸汽,这种强烈的蒸发非常有益于激发PHP内工质的脉动运动,从而使热量有效地从加热段传递到冷凝段,使加热段处于较低的温度.而水的汽化潜热非常大,较低的功率不益于激发PHP内工质的脉动运动,从而使加热段处于较高的温度.这一点也可以从图4中水的热力型脉动曲线中看出.

从图5中可以看出,对于 $q=100\text{W}$,情况正好与低功率下的情况相反,较高功率也足以使水在

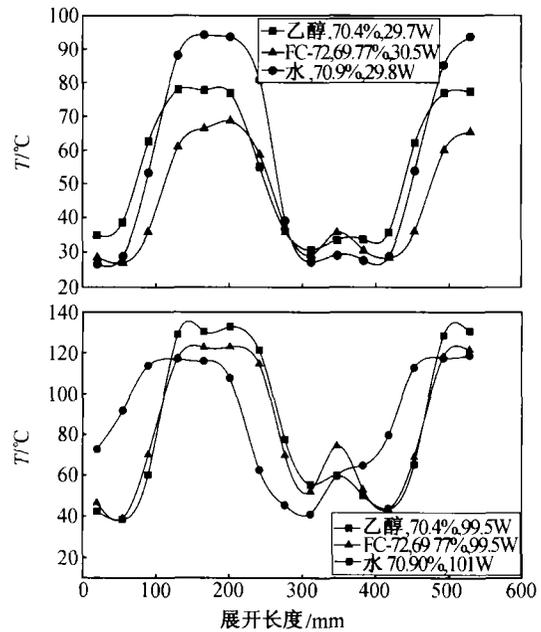


图5 低功率和高功率下3种工质PHP的温度分布比较

PHP内产生脉动流动,同时极大的汽化潜热使得蒸发和冷凝过程变得更为有效.也就是说,只有在较高功率下才能充分发挥水的汽化潜热大的优势,而在较低功率下,大的汽化潜热反而不利于工质在PHP中的脉动流动,表现出长的脉动周期等(如图4所示).

6 结论

研究获得如下结论:

(1) 对于FC-72和乙醇,PHP各点温度均随时间作有规律的脉动,且各点的脉动周期相同.总体上,加热段的脉动幅度最大,绝热段的脉动幅度较小.

(2) 对FC-72和乙醇的热力型脉动曲线的分析表明,在其他参数相同的条件下,FC-72具有较短的脉动周期和较小的脉动幅度,这主要是因为FC-72具有较小的表面张力和汽化潜热.

(3) 对水在低加热功率下的热力型脉动曲线的分析表明,由于水的汽化潜热很大,热力型脉动曲线很不规则,脉动幅度很大,脉动周期非常长,毛细管内工质有存在较长时间停滞的可能,工作性能不够理想.

(4) 在较低功率下,以FC-72为工质的PHP的

传热性能最好, 以水为工质的最差. 但在高功率下, 以水为工质的 PHP 的传热性能最好, 充分发挥了水具有大的汽化潜热的优势. 建议根据 PHP 运行的功率范围, 选择采用不同的工质.

参 考 文 献

- 1 Incropera F P. Liquid Cooling of Electronic Devices by Single-phase Convection. New York: Wiley-Interscience Publication, 1999. 1~20
- 2 Akachi H. Structure of a heat pipe. 1990, United States Patent, Patent No 4, 921, 041
- 3 Gik, et al. Flow visualization experiment on oscillating heat pipe. 11th International Heat Pipe Conference, Japan, 1999, 2. 149~153
- 4 Shafi M B, et al. Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes. ASME J Heat Transfer, 2001, 123: 1159
- 5 Shafi M B, et al. Analysis of heat transfer in unlooped and looped pulsating heat pipes. Int J of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2002, 12(5): 585
- 6 林宗虎. 汽液两相流与传热. 西安: 西安交通大学出版社, 1987. 149~168

内耳干细胞研究取得突破进展

复旦大学附属耳鼻喉科医院李华伟副教授与美国哈佛大学眼耳医院 Heller Stefan 博士合作, 经过艰苦努力, 在成年鼠内耳前庭分离出胚胎样具有多向分化潜能干细胞, 并将此干细胞经过体外细胞培养后移植到鸡胚胎并在发育的鸡胚胎内耳听囊中成功分化出毛细胞. 此项研究成果揭示了内耳毛细胞可能再生的根源, 意味着今后有望最终“用细胞移植”的方法实现耳聋病人的听力重建, 耳聋不再是不治之病. 该研究结果已于 2003 年 10 月在《Nature Medicine》(2003, 9(10): 1293~1299)上发表. 这一研究是在国家自然科学基金面上项目和美国国立健康研究院(NIH)的共同资助下完成的, 该论文已引起学术界广泛关注.

众所周知, 耳聋是严重影响人类生活质量的顽疾之一, 目前尚无根治方法. 在工业化国家, 约 5% 的人群罹患不同程度的听力障碍, 其中 80% 的患者是因为外源性损伤或自身衰老导致内耳听觉细胞逐渐消失所致. 传统观点认为, 人类内耳听觉毛细胞为特化终末细胞, 毛细胞的损伤是不可逆的, 不再具有再生修复能力. 干细胞是具有自我更新、高度增殖和多向分化潜能的细胞群体, 胚胎干细胞的发现, 为寻找内耳新细胞的前体细胞带来了希望.

(徐岩英 董尔丹)