

科技自立自强之路

在会议大厅,人们希望语音流畅、清晰可闻;在音乐厅,人们希望余音绕梁、三日不绝;到了剧院影院,人们希望声效逼真、身临其境……

不同的建筑场所需要不同的音质设计,相应的就需要与之匹配的吸声设计。而提到吸声结构,

就绕不开中国现代声学的重要开创者和奠基人——中国科学院院士、中国科学院声学研究所(以下简称声学所)研究员马大猷。

1966年,马大猷提出微穿孔板吸声结构的设想,后来将其理论分析发表在《中国科学》期刊上。这

一理论后来在国际上掀起了一场吸声材料革命,无数研究者纷纷加入微穿孔板的研究与应用中。这也成为了中国现代声学迈向国际的关键一步。

如今,在人民大会堂等重要建筑中,随处可见微穿孔板结构的身影。

微穿孔板:解决世界声学难题的中国方案

■本报记者 刘如楠

1 火箭发射噪声问题亟待解决

11月的戈壁滩,寒风凛冽、沙砾漫天。在甘肃酒泉卫星发射中心,年已半百的马大猷带着3位年轻科研人员,拉起被冻硬了的电缆线,小心布设着一台户外传声器,将其安置在距发射架50米外的地方。

随着“点火”的一声令下,火箭起飞,轰鸣声不绝于耳。同时,整个发射试验过程的声音都被录音机记录下来。

1965年,研制我国第一颗人造卫星的计划得到中央专门委员会批准,称为“651工程”,中国科学院负责卫星和地面跟踪系统的研制。因为马大猷此前曾参与中国科学院卫星研制“581任务”,所以这次的卫星声环境实验工作由他承担。

发射人造卫星离不开运载火箭,而火箭的噪声又不可避免。发射时,高声强的噪声会造成火箭皮声疲劳,损坏仪器设备。当时,国外已有不少由此引发事故。马大猷等人这次西行,正是为了分析研究火箭发射噪声,并找到改善办法。

在发射基地工作期间,马大猷了解到,当时发达国家的战略火箭部署已从地面转入地下,发射方式由地面发射改为地下竖井发射,由此带来的噪声问题更加严重。为了长远部署,需要提前研究井下噪声的控制方法。

这是一项全新的研究任务,既没有现成样品可供参考,也没有现场资料可查。国外竖井发射本身就是为了隐蔽,因此里面什么样无从知晓。

“发射基地邀请我们参加不久后的下一次发射,可马先生急于开展研究工作,于是在测得声级做好录音后,就决定立即返京。”当时与马大猷同去的声学所研究员张家驷回忆说。

理论构想有了,接下来就需要实验验证。

大家首先在每片10平方米、约1毫米厚的铝板上,用打磨尖锐的钢钉一个一个地钻孔,速度缓慢。后来,研究室一位金工师傅想到,可以用修鞋的缝纫机一行一行地扎,这才使速度有了较大提升。

每当做好了不同孔径和穿孔率的微穿孔板,马大猷就会根据不同声音环境,先在驻波管中测量,然后拿到混响室测量。

戴根华回忆:“当年在混响室做实验时,至少需要3平

3 “没想过要任何回报,这是中国科学院的传统”

方米到4平方米的微穿孔板样品。利用信号发生器产生声信号,经放大器放大后构成一个混响场,而后用电容传声器拾取声信号,再由记录仪记录下来,最后通过计算得到样品的吸声量和吸声系数。”

后来,马大猷索性带着团队成员在声学所院内挖了一个约4米见方、2.5米深的简易模型井,用水泥将井壁固化,装上不锈钢微穿孔板。通过测量装上微穿孔板前后的混响时间,计算出吸声系数。

就这样,马大猷等人分别测试了铝板、硬纸板、胶木

板、不锈钢板等板材在孔径0.75毫米,板材厚度1毫米、0.5毫米,每平方米穿3万个、8万个孔时的吸声效果。

他们最终发现,当不锈钢板厚1.5毫米、孔径1毫米、穿孔率为1%到2%时吸声效果最佳,能够耐瞬时高温、耐潮湿、耐强气流冲击。而为了达到“三耐”,他们还在微穿孔板前加装了孔径4毫米至5毫米、穿孔率15%的保护性大穿孔板。

后来,马大猷将其理论分析和实验验证形成总结报告,并对微穿孔板制造过程提出具体建议,交给相关部门。微穿孔板吸声结构投入实际应用后,换了特殊板材同样获得成功。

1975年,马大猷将多年成果撰写成论文《微穿孔板吸声结构的理论和设计》,发表在当年复刊的第一期《中国科学》上。

即便推迟了近10年论文才得以正式发表,微穿孔板理论依然是领先世界的吸声理论。这一理论的确立,使人们在应用时不必进行大量实验和计算,只需要掌握3个常量,通过一定的公式,便可计算出其他变量。为了便于工程应用,马大猷还把这些计算公式转换成简易图表,方便设计工程师查阅,免去反复运算的麻烦。

“当时我们没有专利保护意识,公布了原理和做法后,国内有许多企业和工厂生产微穿孔板。”戴根华说。

“我们当年对微穿孔板吸声结构进行技术攻关时,根本没想过要任何回报,这是中国科学院的传统。”马大猷曾说,“对于国家战略需求,我们不仅会全力以赴提供技术支持,还会无偿提供应用样品。国家战略需求能够想到我们,就是对我们最大的厚爱。”

马大猷(右)指导其博士生田静进行噪声分析工作。



马大猷(右)进行噪声测量试验。



孔径0.25毫米、不同孔距的微穿孔板。

2 大道至简

当时,国内外普遍采用穿孔板加吸声材料进行降噪处理。人们在板材上均匀地开一些厘米级的孔,将玻璃棉、矿渣棉等纤维性和多孔性材料固定在穿孔板背后,形成普通穿孔板吸声结构。

其实,穿孔板本身是一种共振吸声结构,具有一定的吸声能力,但在实际应用时往往需要依靠吸声材料增强吸声效果。

由于空气具有黏滞性,当声波经过穿孔板的孔时,空气产生阻力,消耗部分声波能量。其余的声波通过大孔进入纤维材料,多孔材料,撞击到其不规则表面,产生散射作用,孔洞和孔壁也会引起声波多次反射和折射,在材料内部进行多次传播和耗散。同时,声波与孔洞壁面及材料内的骨架发生摩擦,将声能转化为热能,这会再次消耗部分声波能量。两者结合,能够有效降低声波的反射,起到吸声降噪、改善声学环境的作用。

而到了火箭发射的地下竖井中,这种办法完全行不通。发射伴随着高温、烈焰、高压、高湿和腐蚀性气体,顷刻间就会使这些吸声材料化为乌有。此外,针对实际应用中的不同需求,具体加多少吸声材料也没有理论指导,只能凭经验试错。

从酒泉回京后,马大猷急于开展吸声结构研究。一有时间,他就思考:多孔性材料本身就是宽频带吸声材料,何必多此一举,再加穿孔板?穿孔板有时只是发挥保护面板的作用。能否一反常规,使穿孔板本身解决吸声问题?

马大猷认为,这在理论上完全可行。如果穿孔板结构的声阻抗和大气中的声阻抗相匹配,不需要另加吸声材料,也能获得较好的吸声效果。同时,为了加宽吸声频带,须尽量降低穿孔板结构的声质量。

研究证明,穿孔板结构的孔径越大,声阻抗越小,反之声阻抗越大,它的声质量就大致和穿孔率有关。因此,通过控制孔径大小和穿孔率,就可以控制其声阻抗和声质量,进而控制穿孔板的吸声效果。

经过反复的理论推理,马大猷提出,如果把孔径减小到微米(1丝米等于0.1毫米)级,就可以获得足够的声阻抗,使其成为良好的宽频带吸声结构,不需要另加多孔性材料。这就是微穿孔板的概念。

他判断,在任何板材上打出微孔,都能达到吸声的目的。

“马先生常对我们说,‘处理问题要抓住问题的实质’‘大道至简’。”曾跟随马大猷长期工作的声学所研究员戴根华表示,“虽然穿孔板的概念早已有之,但孔径比较大、板材比较厚。看起来他只是将大孔变成了小孔,但实际上,如果没有对声学本质问题的长期研究和创造性思维,那么是无法想到的。”

4 改造人民大会堂声学设计

提出微穿孔板理论后,马大猷并未就此止步。后来的几十年,他都在不断探索,将其发展深化。

1983年,马大猷提出一种直接、简单测量微穿孔板声阻抗的方法,比已有方法更为简便、准确,方便人们准确估计微穿孔板吸声结构的工作性能;1988年,他又进一步提出穿孔率阻抗公式,简化微穿孔板结构设计。

在强声环境中,穿孔内的质点速度与声速相比,可以达到相当高的数值,因而会影响微穿孔板的声阻抗和其他特性。1996年,马大猷基于强声环境下微穿孔板的应用研究,提出了改进方法。

最初提出微穿孔板结构理论时,为了打破穿孔板在实际应用中机械加工条件的限制,马大猷对基本方程中的超越函数做了近似处理。随着其应用越来越广泛,1997年,他进一步发展了微穿孔板吸声结构的准确理论和设计,使其应用潜力进一步提升。

2000年,马大猷根据吸声材料靠声波通过孔隙与其固体骨架摩擦而损失能量的原理,将微穿孔板吸声理论进一步发展为微缝吸声理论,使其构造更加多样化。

2003年,马大猷进一步讨论了微穿孔板吸声体的吸收带宽极限……

“马先生1975年发表理论,几十年来对其不断深入研究,直到80多岁时,他还在不断发展、深化理论研究。”马大猷的学生、声学所研究员李晓东说,“尽管当年马先生发表的是中文论文,但在2000年后其引用率不断上升。国际声学大会还设立专题讨论微穿孔板理论。”微穿孔板理论在我国各类工程实践中得到应用,其

中以人民大会堂最为闻名。

1999年,人民大会堂管理局拟对人民大会堂万人大礼堂进行维修改造,其中建筑声学设计是整体方案的一个重要组成部分。早在人民大会堂建造之初,马大猷就曾负责其音质设计工作,这次维修改造的声学设计任务,自然落在了声学所的肩上。

万人大礼堂不仅容积大,而且接近椭圆,又是穹顶,使原大礼堂混响时间偏长,回声现象严重,语言清晰度偏低。当时,中央领导同志对大礼堂的维修改造有明确指示,要求“大礼堂改造必须保持其原有建筑风貌”。这就意味着,大礼堂容积不变、形体不变、内墙与顶“水天一色”风格不变。

因消防要求,改造使用的材料也有明确规定,即表层材料必须为金属,内层材料必须一级防火。同时,为保证“水天一色”,作为吸声结构表层金属穿孔板的穿孔率必须一致。

“这要求我们选用的材料必须以消防安全为中心,而音质要比改造前有所改善。这无疑给音质设计工作带来了相当大的难度。”李晓东说。

在马大猷穿孔板理论基础上,他的学生、声学所研究员田静、李晓东等经过一年多的声场模拟、吸声材料与结构测试、理论计算,正式确定了万人大礼堂改建音质设计方案。

后来,经过会议、大型文艺演出活动等3年多的检验,人民大会堂维修改造工程指挥部认为,改造后的万人大礼堂音质有很大改善,原有过长混响时间变短、严重回声现象基本消除,语言清晰度大幅提高。

人民大会堂万人大礼堂声学所供图 郭刚制版



5 挽救德国议会大厅

马大猷没有想到,他的微穿孔板理论设计提出17年后,由于帮助德国挽救了一项重要工程,在国外引发了微穿孔板研究与应用的热潮。

那是1992年12月,两德统一后,兴建一座新的议会大厦。为了充分体现开会的透明度,大厦四周全部采用透明玻璃。远远看去,大厦的中央议会厅就像个巨大的圆柱形玻璃罩。

“女士们,先生们!”举行第一次会议时,议长刚说了一句话,会议厅里的扩音喇叭就没了声响。会议在全国进行实况转播,人们看到,662位议员愤然离席,回到原议会厅继续开会。

要知道,这座新的议会大厦耗资2.7亿马克(约合人民币13.5亿元),检修人员也未发现电源、音响设备、麦克风的任何问题。这震动了德国工程界,一度成为德国的丑闻。

原来,这座用玻璃围起来的圆形大厅,有严重的声聚焦现象。在议会厅里讲话时,声音被四周密度极大且表面光滑的玻璃墙壁不断反弹回来,又集中到大厅中央——设置讲台、话筒、喇叭的地方,使计算机控制的扩声系统自动锁闭。

后来,相关部门找到了德国弗劳恩霍夫建筑物理研究所。当时,恰逢查雪琴等几位中国学者在该研究所访问交流。查雪琴想到马大猷关于微穿孔板吸声结构的论文,随即将该理论付诸实践,在铝板上钻孔做实验,最终发现,测量得到的数据与马大猷公式给出的理论计算吻合。

查雪琴等经过几个星期的研究和测量工作,在本地一家小厂支持下,拿出了样品——在每平方米5毫米厚的有机玻璃上,打出3万个孔径为0.8毫米的微孔,形成透明的微穿孔板。他们最终解决了议会大厅的声学难题,在德国工程界被传为佳话,德国《图片报》等媒体对此进行了专题报道。

后来,为表彰马大猷在建立微穿孔板吸声结构设计理论方面取得的成就,德国弗劳恩霍夫协会授予马大猷金质奖章,并由弗劳恩霍夫建筑物理研究所颁发阿尔法(AL-FA)奖和1万马克奖金。

2021年,国际噪声控制工程大会评选出7项百年噪声控制发展史上的里程碑式工作,微穿孔板结构的理论与设计就是其中之一。

如今,声学所的科研人员们,站在马大猷等前辈的肩膀上,潜心研究,勇于创新,不断拓展着微穿孔板结构的理论与应用边界。

李晓东说:“我们已经在微穿孔板理论研究与工程设计中取得多项成果,到现在还在不断激发它的应用潜能,相信未来会取得越来越多的原创性突破!”