

文章编号:1003-7837(2005)01-0026-04

阴极电弧沉积类金刚石膜在电声中的应用^{*}

——高保真 DLC/Ti 高音扬声器振膜的研发和生产

袁镇海, 林松盛, 侯惠君, 朱霞高, 李似聪

(广州有色金属研究院材料表面工程技术研究开发中心, 广东 广州 510651)

摘要: 阐述高保真类金刚石/钛高音振膜的研发和生产。在制备品质及外观兼优的纯钛振膜的基础上, 利用阴极电弧沉积技术在钛膜上沉积类金刚石(DLC)膜层。结果显示各项物理性能及主观听感明显改善, 并实现了批量生产, 进入市场。

关键词: 类金刚石膜; 高音振膜; 阴极电弧沉积; 扬声器

中图分类号: TB383 **文献标识码:** A

类金刚石(DLC)膜具有密度低、弹性模量与导热性高、声传播速率快的物理特性, 是电声器件扬声器高音振膜理想的材料。20世纪70~80年代, 人们实现了人工低温合成类金刚石膜, 使它应用在声学振膜上成为可能。1986年日本住友电气公司首先批量生产 DLC/Ti 复合振膜, 随后日本及美国等多家知名电声公司都花大力气研发 DLC/Ti 复合振膜, 并先后推出 DLC/Ti 复合振膜扬声器产品, 特别是在广场与舞台用的大口径专业高音号筒式扬声器, 采用 DLC/Ti 复合振膜成为主导潮流, 其特点是提升了频响高端, 声音清脆亮丽。

国内开发 DLC/Ti 高音振膜产品较迟, 参与开发工作的单位也不多。广州有色金属研究院在20世纪90年代初开始这方面的研究与开发。近几年来, 一直努力了解市场, 寻找适销对路产品, 逐一解决各生产环节中的技术难题, 努力解决扩大装炉量、缩短生产周期、提高成品率等问题, 以降低生产成本。经过几年的努力, 开发出家庭音响、汽车音响、专业音响扬声器 DLC/Ti 振膜。新开发的多款专业扬声器振膜, 频响达 18~20kHz, 用户评价“听音清脆明亮”;“效果接近或达到国外最新产品水平”。多款振膜已生产供应市场, 填补了国内空白。

1 DLC/Ti 复合振膜的制备

DLC/Ti 复合振膜是中高档次扬声器的核心部件, 要求具有高的品质。实现批量生产, 需要解决以下技术问题: 品质与外观兼优的纯钛振膜的制备技术; 优质的 DLC 膜的沉积技术; 在钛振膜基体上沉积 DLC 膜的工艺; 扩大装炉量, 成品率高, 周期短, 生产成本低廉的 DLC/Ti 振膜镀 DLC 的生产技术。

1.1 品质与外观兼优的纯钛振膜的制备技术

DLC/Ti 振膜是在纯钛振膜上镀 DLC 膜, 纯钛振膜是基体, 也是基础。纯钛振膜是用 0.03~0.05 mm 的纯钛箔经冲压变形加工而成, 其质量评价包括外观和声音两方面。

图1为高音扬声器的结构示意图, 表示出球顶振膜与其他构件的装配关系。特别是专业用高音扬声器, 振膜的球顶形状、尺寸与相位塞的匹配要求十分精确, 它对发声起着举足轻重的作用。

国内有些振膜生产厂家从日、德、美等国进口钛箔, 他们生产的振膜产品的外形平整、尺寸精确, 且一致性好, 但音质有好有差, 大部分振膜声音较沉。

收稿日期: 2003-10-23

^{*} 基金项目: 广东省高新技术产业发展基金(成果转化)(98FF04)

作者简介: 袁镇海(1939-), 男, 广东东莞人, 教授级高级工程师, 研究生。

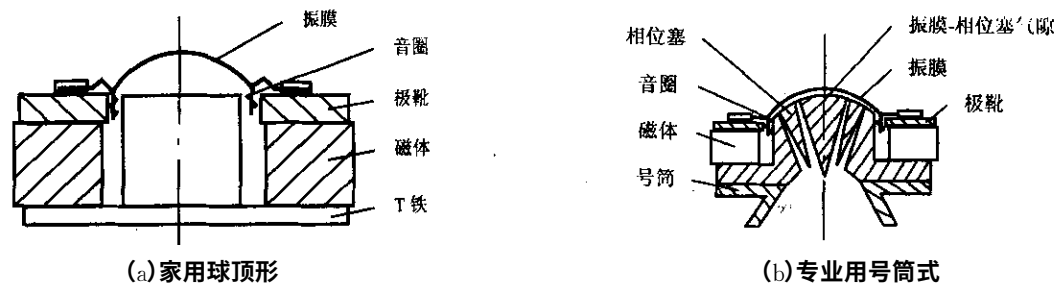


图 1 高音扬声器结构示意图
Fig.1 Structure scheme of tweeters

为改善振膜质量,我们采取如下措施:(1)控制原材料钛箔的杂质元素和含量.尤其控制对振膜性能影响最敏感的杂质元素,如 H、O、Fe、C 等的含量范围,它们对振膜的加工硬化和刚性影响至关重要.(2)控制钛箔的热处理状态,既保证较高的可成型性,又保证成型后有足够的硬度和刚性,使振膜发声更清脆.(3)与电声专家合作,改进振膜几何形状和节环图案设计,使之有最好的声效.(4)按积累的经验,预留变形回弹量,合理设计模具,采用精加工手段,保证模具形状尺寸精度和图案清晰度.(5)根据模具的不同部位,选用硬度相匹配的材料制模,变形到位又不伤模.(6)采用分区仿型法,一方面使材料变形流变合理和变形到位,另一方面使材料受力变形均匀,减少振膜的不平整性.

采取以上措施之后,广州有色金属研究院生产的振膜得到很大改善,生产的多款振膜已被厂家认可.

1.2 阴极电弧沉积优质 DLC 膜的制备技术

1.2.1 理想的高音振膜材质

高音振膜材料应具备密度低、杨氏模量高、声速快、热传导率高及适度的阻尼.表 1 列出了一些材料的物理性能.由表 1 可知,人工合成的 DLC 膜是较理想的高音振膜材料.

表 1 材料的物理性能

材料	密度 /(g·cm ⁻³)	杨氏模量 /Pa	声速 /(km·s ⁻¹)	热传导率 /(w·m ⁻¹)
铝	2.7	7.4×10 ¹⁰	5.2	238
钛	4.5	1.1×10 ¹¹	5.2	16
铍	1.8	2.8×10 ¹¹	12.3	180
DLC	1.8	3.1×10 ¹¹ ~ 6.0×10 ¹¹	18.3	1100
金刚石	3.5	11.5×10 ¹¹	18.5	2000

1.2.2 阴极电弧沉积 DLC 膜的技术难点与对策

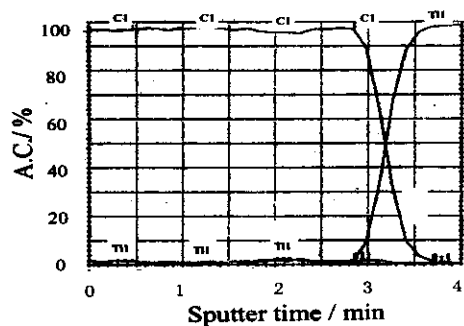
真空阴极电弧离子镀是比较普及的设备,比较容易推广和实现批量生产.一般采用高纯高密度的石墨作靶,用高纯 H₂ (99.99%) 作气源,进行镀膜.主要技术难点:其一是真空石墨电弧不稳定.石墨是多孔性材料,弧斑在石墨靶面上易钻入石墨孔洞驻留,不易游动,这样容易导致熄弧及烧蚀不均匀,且会恶性循环,越来越严重.技术对策是改进弧源结构,调整磁场强度与分布,及时平整石墨靶面.其二是难以成膜.阴极电弧石墨(碳)气化并等离子化,在合适的能量下,C 键重组,合成类金刚石膜.如果石墨靶材的成分结构和能量条件、环境气氛不合适就不能生成 DLC 膜,而是石墨颗粒的堆积或云絮状的碳沉积物.技术对策是筛选合适的石墨材质制靶,调节合适的靶功率和偏压,注意氢气的流量或分压,让氢有效地抑制石墨相的生成.其三是 DLC 膜与基体结合不良,易崩落.DLC 膜与基体热膨胀系数的差异、弹性模量的差异及晶格失配都会产生应力,DLC 膜的生长应力和热应力都会导致膜与基结合不良,使膜崩落.技术对策是建立梯度过渡层,减少应力的突变.我们采用的是 Ti/TiC/DLC 多过渡层方案.图 2 为过渡层的 Auger 谱图.

1.2.3 DLC 膜的性能

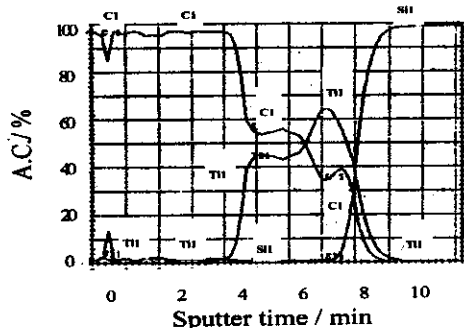
在采取有效的技术措施并对沉积参数进行优化之后,可以得到膜/基结合良好、光滑、性能优越的 DLC 膜.其硬度(DLC/Ti)为 Hv_{0.01,15} 3000~5000.图 3 为划痕仪声发射曲线,临界强度 6~8 kg.图 4 为 DLC/Si,DLC/Ti 和石墨的喇曼谱线.所沉积的膜具有典型的 DLC 特征.

1.3 在纯钛膜上沉积优质 DLC 膜的技术

在品质与外观优良的纯钛振膜上沉积 DLC 膜,目的是改善纯钛振膜的音频效果.但需解决两方面技术问题:其一,在镀膜时变形.钛振膜一般只有 0.03 mm 厚,象顶草帽,镀膜时受离子轰击,各部位



(a) 无过渡层样品



(b) 有过渡层样品

图 2 过渡层的 Auger 成分深度分布

Fig. 2 Auger spectra of interlayer elements in depth distribution

因受热不均,必然产生变形、卷曲、翘边等,甚至局部过热退火失去刚性。拟用小弧流进行沉积,控制连续沉积时间,以降低整体炉温和等离子束流沉积温度,同时采用专用的夹具装卡工件限制其变形。其二,在钛振膜上镀 DLC 膜的最佳区域和膜厚分布。DLC 膜如何与钛振膜相匹配,目前还没有理论的分析借鉴,我们通过大量的试验摸索出了具有比较好的声效的膜层厚度和分布。双面镀 DLC 一般厚 $0.8\mu\text{m}$ 左右,膜覆盖节环以内区域。

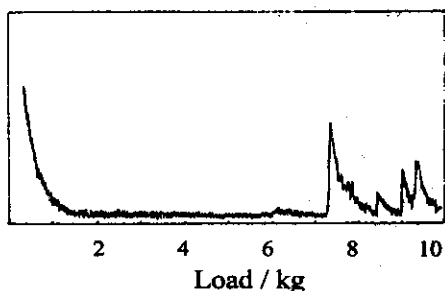


图 3 DLC 膜划痕仪声发射曲线

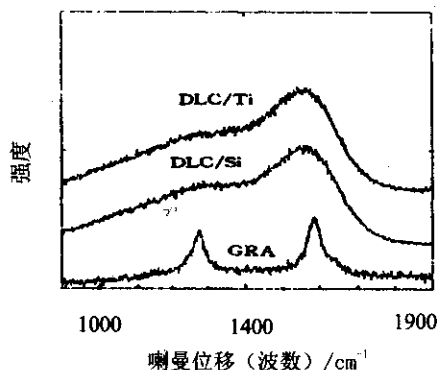
Fig. 3 Acoustic emission curve of scratch tester for DLC films
万方数据

图 4 DLC 膜激光喇曼谱

Fig. 4 Raman spectra of DLC films

2 DLC/Ti 复合振膜的生产及开发应用

2.1 低成本的 DLC/Ti 振膜的生产技术

把新型的 DLC 膜应用在商品上,优质廉价才有竞争力。这样在保持高质量的情况下必须尽量降低成本,因此扩大产量和提高成品率是提高市场竞争力的有效途径。

我们采用 D-900 八弧源生产型设备进行生产,镀膜区面积为 $D600\text{ mm} \times 650\text{ mm}$,为充分利用镀膜区,必须解决均匀性问题。其一,因为该设备是 $D60\text{ mm}$ 小靶电弧源和螺旋上升的靶位分布,所以必须合理调节各靶位电弧的工作参数和开启时间,以保证各区间等离子体浓度的均匀性。同时根据各区间的等离子体浓度,适当调整吊挂工件的位置和数量与之相匹配,使各区的工件膜层趋向均匀。其二,采取工件公-自转和正-反转等措施,克服阴-阳面和遮挡效应,提高镀膜的均匀性。通过采用以上方法,扩大了装炉量, $D25\text{ mm}$ 音圈的振膜(外径 38 mm)可装载约 300 片/炉。

提高成品率的对策:其一,从清洗工件开始,各生产环节都加强技术质量管理,保证合格品入炉镀膜。其二,及时清理炉壁和工件架上的不导电沉积物,以降低闪弧、打火的几率。其三,监控靶面弧斑的运动情况,避免强等离子弧柱的产生,防止弧柱高热烧蚀膜层。其四,控制工件出炉温度,防止镀层崩落。通过采取以上措施,成品率得到很大提高,稳定在 95% 以上。

2.2 DLC/Ti 振膜的开发应用

我们已成功地开发出 6 款 $D25\text{ mm}$ 家用高音 DLC/Ti 振膜(3 款全金属型和 3 款硬球顶软边复合型)、十多款 $D32 \sim 72\text{ mm}$ 专业扬声器 DLC/Ti 振膜

和一款 D25 mm 汽车音响 DLC/Ti 振膜. 图 5 为 DLC/Ti 复合振膜扬声器音频响应曲线,其频响上限达 30~33 kHz,听感高音清脆亮丽.

对于大尺寸的音膜,其球顶跨度大,刚性相对较低,镀上 DLC 膜可加强球顶刚性. 我们开发的 DLC/Ti 专业音响振膜,一般频响高限可从 15 kHz (未镀膜)提升到 18 kHz,高端声压值可提高 3 dB,

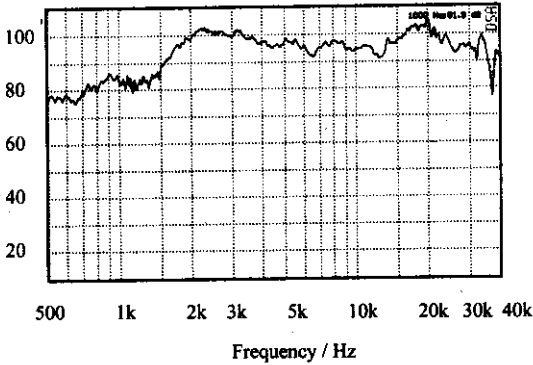


图 5 D25 mm DLC/Ti 振膜扬声器的频响曲线

Fig.5 Frequency - response curve of D25mm DLC/Ti diaphragms

见图 6. 由图 6 可知,DLC/Ti 振膜高频谐波失真降低,瞬态特性改善,主观听感声音清脆,穿透力强,层次丰富.

我们开发的 D25mm DLC/Ti 汽车音响振膜,频响达 25 kHz 以上,产品出口德国.

近年来,我们所开发的 DLC/Ti 振膜已有十多款转入生产,并已向用户提供数万片产品.

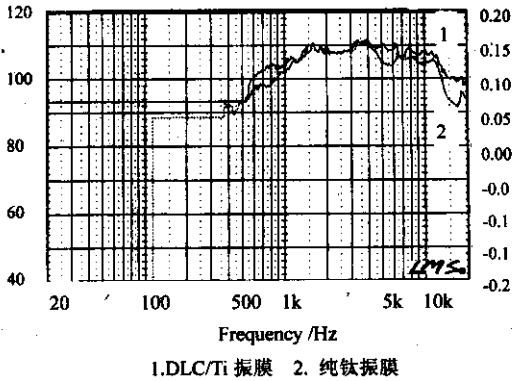


图 6 DLC/Ti 振膜与纯钛振膜频响特性比较

Fig.6 Comparison of frequency response curves of DLC/Ti diaphragms and pure Ti diaphragms

Electro-acoustic application of
diamond-like carbon films by cathodic arc deposition technique
——Development and production of DLC/Ti high-fidelity tweeters diaphragms

YUAN Zhen-hai, LIN Song-sheng, HOU Hui-jun, ZHU Xia-gao, LI Si-cong
(Research and Development Center for Materials and Surface Engineering Technique, Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510651, China)

Abstract : This paper describes the development and production of diamond-like carbon(DLC)/titanium high-fidelity tweeters diaphragms. DLC films are deposited onto pure titanium diaphragms of excellent quality and appearance by cathodic arc deposition technique. The results show that physical properties and sound effect of DLC/Ti high-fidelity tweeters diaphragms are obviously improved. They have been put into market and mass production has been realized.

Key words : DLC films ; tweeters diaphragms ; cathodic arc deposition ; loudspeakers