IP68户外蓝牙耳机腔体密封结构设计研究

韦浩然
合肥影炬创新技术有限公司 安徽 合肥 230000

摘 要 当下户外应用场景越发丰富，蓝牙耳机得有更高防护性能来满足使用需求，IP68防护标准成为关键，此研究着重户外蓝牙耳机IP68防护达成的关键技术，深度分析它于结构、工艺以及声学平衡等方面的重点，意在给提高户外蓝牙耳机防护提供理论根据和实践指引。

关键词 IP68；户外蓝牙耳机；密封结构设计

Research on the IP68 Cavity Sealing Structure Design of Outdoor Bluetooth Earphones

Wei Hao-ran
Hefei Flame Innovation Technology Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui Province, China

Abstract As outdoor application scenarios continue to diversify, Bluetooth earphones require enhanced protective performance to meet user demands. The IP68 protection standard has become a critical factor in this regard. This study focuses on the key technologies for achieving IP68 protection in outdoor Bluetooth earphones, conducting an in-depth analysis of structural design, manufacturing processes, and acoustic balance. The research aims to provide theoretical foundations and practical guidance for improving the protective capabilities of outdoor Bluetooth earphones.

Key words IP68; Outdoor Bluetooth Earphones; Sealed Structure Design

伴随健康生活观念普及、户外运动热兴起，户外蓝牙耳机有便携和无线连接优势，成为运动爱好者必需装备，户外环境恶劣，耳机防护性能要求高，IP68防护标准作为国际公认的高防护等级，给耳机予以全方位保障[1]。“IP”就是Ingress Protection（防护等级），“6”表示完全防尘，防止电路故障和音质降低；“8”意味着特定压力下长时间浸水无损害，契合多样场景需要，腔体密封构造是达成IP68防护的关键，能够有效拦住水和灰尘进入，保护内部核心部件，提高耳机耐用性和可靠性、延长使用期限，保证它在复杂环境中性能稳定。无论是日常运动，仍是专业用户的特别需求，契合IP68标准的户外蓝牙耳机均可从容应对[2]。

1 户外蓝牙耳机腔体密封结构设计要点

1.1 结构设计与材料选择

1.外壳材质。户外蓝牙耳机外壳常采用高密度工程塑料，像PC/ABS合金材料，既有PC高耐冲击性，又有ABS优良加工性能以及表面光泽[3]。它密度高，分子结构紧密，能降低外壳接缝和孔隙，降低灰尘和水分侵入风险，轻量化、高刚性，可护住内部密封构造，符合便携需求，金属材料如铝合金在高端产品中应用广泛，有密度低、强度高、耐腐蚀等优点，结构致密，密封性极佳，还有金属质感良好、散热性能优异的特点，能提高产品质量和体验，但加工难、成本高，限制了广泛应用[4]。

2.内部密封腔体设计。设计独立密封腔是增强防水防尘性能的关键，把电池、电路板、扬声器等关键部件各自隔开，避免一处密封坏掉致使整个耳机损毁，例如，用注塑成型工艺做独立电池仓和电路板仓，还在仓体边缘设密封槽，装入密封材料，借此保障电气和声学性能。同时，密封腔体设计要考虑内部空间布局，保证部件彼此不干扰且利于组装修理，比如，把电池和电路板分开摆放，降低漏液腐蚀风险；优化扬声器安装位置，平衡声音传播与部件间距，避免振动干扰。此外，能在腔体内布置橡胶垫、海绵等缓冲结构，减小碰撞和振动给部件带来的损害，提升可靠性[5]。

在密封腔体密封性量化评估中，要考虑腔体内压力和外部环境压力的平衡关系，可通过密封比压计算公式（1）判定密封结构是否符合压力承载要求：

$$q=\frac{F}{A} \quad (1)$$

式中，q—密封比压（MPa），表示密封接触面上单位面积所承受的压力，需大于被密封介质的最大压力。对于IP68防水场景，介质压力需按1.5 m水深对应的静水压计算，即$p_{介质}=\rho gh$=1 000 kg/m³ × 9.8 N/kg × 1.5 m=14 700 Pa=0.014 7 MPa，通常取$q \geqslant 1.5\ p_{介质}$以预留安全余量；F—密封结构所受的总压紧力（N），由螺栓连接力、卡扣预紧力等提供；A—密封接触面的

有效面积（m²），需扣除密封槽、倒角等非接触区域的面积。

3.密封材料选用。硅胶、TPU等柔性密封材料在按键、充电接口等易生缝隙部位起到关键作用。硅胶耐老化，可以长时间维持稳定理化性质，弹性恢复力强，能紧密贴合不规则表面、填补缝隙，若在按键周边安装硅胶密封圈，可确保操作灵活度和密封成效，TPU有优异弹性、耐磨性与耐化学腐蚀性，能抵抗汗水、雨水侵蚀，充电接口处用TPU防水塞能防水分进到里面，还可注塑成多种形状密封件适配不同地方。此外，纳米密封胶等新型材料用更小分子结构填充更小缝隙，为提升防护性能提供了新方向。

1.2 生产工艺对密封结构的影响与控制

1.注塑环节。注塑过程直接影响耳机外壳质量和密封结构有效性，模具温度与压力精确掌控很关键。模具温度高会致使外壳成型后收缩不均、变形，让接缝和密封部位有缝隙出现；温度低就会让塑料熔体流动性下降，容易出现缺料、气泡这类缺陷，都会削弱密封性能，注塑压力控制不好同样会引发问题，压力太大会致使外壳壁厚不均匀、出现飞边，破坏密封结构；压力过小会造成产品尺寸不足或者内部有空洞。所以要依照外壳设计要求和塑料材料特性，精确调整模具温度和注塑压力，复杂形状外壳能用分段式参数控制办法，利用先进注塑设备和模具监测系统，监测生产过程的实时情况，发现并解决问题要及时。

注塑件尺寸精度对密封结构配合间隙影响明显，要借助尺寸偏差计算公式（2）把控关键尺寸加工误差：

$$\Delta d=\frac{d_{实际}-d_{设计}}{d_{设计}}\times 100\% \quad (2)$$

式中，Δd—尺寸偏差率（%），对于密封配合面，要求配合间隙≤0.01 mm（满足IP68防尘防水的最小间隙要求）；$d_{实际}$—注塑件关键尺寸的实际测量值（mm），需采用三坐标测量仪在（23 ± 2）℃环境下测量；$d_{设计}$—注塑件关键尺寸的设计值（mm）。

2.组装阶段点胶工艺。组装阶段点胶工艺均匀程度决定密封效果，胶水作为连接和填充关键材料，填充均匀程度与完整性对防侵入很关键。点胶不均会出现厚度不一样、局部少胶等情况，形成水和灰尘进入的通道，借助自动化设备是保证点胶质量的有效办法，它能借着预设程序精准把控胶水流量、速度和路径，实现高精度操作，部分先进装备配有视觉检测系统，能实时监测并及时调整异常，提高点胶均匀性和一致性，又提升生产效率，减少人为影响。此外，应选与外壳及其他部件能兼容，固化时间以及黏结强度合适的胶水，保证密封结构长久稳定，

1.3 声学与密封的平衡设计

1.倒相孔设计。倒相孔是平衡声学和密封常用办法，在腔体开小孔并连倒相管，让扬声器背面声波和正面声波在特定频率时相位相反、彼此叠加，增强低频响应，降低密封对音质的影响。完全密封腔体会限制扬声器振动，阻碍声音传播，导致低频沉闷，倒相孔给声波提供额外辐射通道，延长传播路径，提高音质丰富程度和层次感。

倒相孔设计要综合考量多方面因素，直径和长度直接影响谐振频率，太大或太小会致使低频增强过度、失真，过小或过长增强效果不显著，要依据声学设计需求跟扬声器特性精准计算调节，位置选择上，要离麦克风等敏感部件远点，躲开噪声干扰以及声波反射影响，兼顾外观和佩戴舒适度。

倒相孔关键参数（直径、长度）要借倒相管谐振频率计算公式（3）来设计，保证它跟扬声器低频特性相匹配：

$$f_0=\frac{c}{2\pi}\times\sqrt{\frac{S}{V\times L_{eff}}} \quad (3)$$

式中，f_0—倒相管的谐振频率（Hz），需与扬声器的固有谐振频率f_s接近（通常取$f_0\approx 0.8\sim 1.2f_s$），以实现低频增强；$c$—空气中的声速（m/s，23 ℃时，$c\approx 345$ m/s）；S—倒相孔的横截面积（m²）；V—耳机腔体的有效容积（m³），需扣除扬声器、电池等部件占用的体积；L_{eff}—倒相管的有效长度（m）。

$$S=\pi(d/2)^2 \quad (4)$$

式中，d—倒相孔直径（m）。

$$L_{eff}=L+0.8d \quad (5)$$

式中，L—倒相管实际长度（m）；$0.8d$—管口修正长度，用于补偿声波在管口的扩散效应。

同时，为避免倒相孔成为水和灰尘的侵入通道，需在倒相孔内侧设置防水透气膜，其透气性能需满足透气量计算公式（6），确保不影响声学效果：

$$Q=\frac{\Delta p\times A}{\mu\times L_{膜}} \quad (6)$$

式中，Q—防水透气膜的透气量（m³/s），为保证声波正常传播，要求$Q\geq 1\times 10^{-6}$ m³/s；Δp—膜两侧的压力差（Pa），声学场景下Δp通常为1 ~ 10 Pa；A—透气膜的有效面积（m²）；μ—透气膜的气流阻力系数（Pa·s/m），不同材质透气膜的μ值需通过实验测定，如PTFE材质透气膜$\mu\approx 1\times 10^5$ Pa·s/m；$L_{膜}$—透气膜的厚度（m），通常为10 ~ 50 μm。

2.压电陶瓷扬声器应用。压电陶瓷扬声器借压电效应开展

工作，凭借压电陶瓷材料在电场作用下的形变直接促使空气发出声音，不用依靠空气振动，和传统动圈式扬声器相较，在密封构造里有独特长处。它对空气振动的低依赖让它能在相对封闭环境中正常工作，不用大的声腔空间以及通风孔，为实现更优的密封结构创造条件，满足声学需求。

在高防护要求的户外蓝牙耳机中，用压电陶瓷扬声器能让腔体设计更紧凑密封，减少环境对内部元件的影响，该扬声器响应速度快、失真小，高频表现出色，但有低频响应弱、功率承受能力有限等缺点，实际应用要结合产品性能需求和目标用户群体，合理选择，并借与别的扬声器单元组合、采用数字信号处理技术等优化措施，弥补短板，实现密封与音质的平衡。

3.骨传导技术在密封结构中的应用。骨传导技术借颅骨传声音，把信号径直传导到内耳，绕过空气传导，在达成IP68防水和清晰音质方面优势明显，规避气密性矛盾。用这项技术的耳机不用考虑空气流通要求，能设计更严实腔体，发声单元贴合颅骨，密封状况下也能清楚传声。

市场上有名的骨传导耳机用牢固密封外壳和特别声学设计，没有传统发声以及通气孔，水和灰尘难侵入，达IP68等级，能用在游泳、潜水等场景中，音质上，优化颅骨振动传递与声学算法，给出清晰自然的音效，满足运动中音乐和通话需求。此外，它开放双耳可让用户感知周边声音，提高户外运动安全度，但有低频弱、漏音等情况，需持续改进。

2 结束语

本研究深入探究基于IP68防护标准的户外蓝牙耳机腔体密封结构设计，从IP68标准于此领域应用要求着手，分析防尘防水防汗指标给耳机性能带来的关键意义，明确密封结构需满足的条件。在设计要点上，从结构设计和材料选择、生产工艺影响及控制、声学与密封平衡设计等方面全面说明，研究外壳材料、内部密封空间、密封物料、注塑和组装工艺、倒相孔、扬声器以及骨传导技术运用等，为达成IP68防护标准提供系统设计思路和方法。这能提升户外蓝牙耳机在复杂环境下的耐用程度、可靠性能以及使用时长，确保稳定性能，契合用户多样需求，为行业发展提供技术支撑与理论依据，促使行业朝着更高防护标准、更优性能前行。

参考文献

[1]周凡.一种手环式蓝牙耳机：CN115842981A[P].2023-03-28.

[2]彭庭轩,陈明珠.一种耳机MIC密封结构：CN218473360U[P].2023-02-07.

[3]曾文龙,邱治军,曾庆胜.一种易装配的蓝牙耳机壳体结构：CN223219192U[P].2024-01-16.

[4]黄晓明,曾德强.一种蓝牙耳机的新型出音结构：CN215898200U[P]. 2022-02-25.

[5]陈泓冰.一种蓝牙耳机：CN206775695U[P].2017-12-19.

（本文编辑　杜宇琪）

