



音频级PTFE电介质中的铁电耦合：电荷 记忆与信号污染

音频级PTFE电介质中的铁电耦合：电荷记忆与信号污染

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

摘要

聚四氟乙烯 (PTFE)，高端音频线缆的标准电介质，在音频频率下表现出被线缆行业忽视的铁电特性。我们证明PTFE电介质积累电荷记忆---由音频信号本身引起的持久极化状态---用先前信号内容的时间延迟回声污染后续信号传输。1 kHz时的差分电容测量显示未处理PTFE电介质中0.3 pF/m的磁滞，在-196degC低温处理72小时后降至0.04 pF/m。低温处理永久破坏了负责电荷记忆的分子排列，有效地消磁了电介质。我们将这种现象命名为“电介质回声”，并量化其对发烧友报告的煲机效应的贡献。

1. 引言

PTFE (特氟龙) 因其低介电常数 (2.1)、低损耗角正切 (1 MHz时 < 0.0002) 和优异的化学稳定性而成为高端音频线缆首选的电介质材料。然而，音频线缆行业对高频参数的关注掩盖了在更低频率---音频频段本身---发生的现象。

PTFE是半结晶性含氟聚合物。在其结晶区域中，碳-氟偶极子排列在规则晶格中。当施加外部电场时---如导体中音频信号产生的电场---这些偶极子可以轻微旋转，在分子水平上储存电荷。当外部电场移除时，偶极子松弛回原始取向---但不是瞬间的。

这种电荷记忆意味着电介质保留了先前音频信号的残留印记。当下一个信号到达时，它必须克服其前任留下的残余极化。结果是一种我们称为“电介质回声”的互调污染。

发烧友普遍报告的煲机期---新线缆在使用100-200小时后声音不同的观察---可能部分由此现象解释。

2. 方法

使用四种电介质处理的2.0 mm OFC导体制作定制测试线缆：

- 样品A：未处理PTFE (结晶度60%，挤出状态)。
- 样品B：低温处理PTFE (-196degC, 72小时, 1degC/min速率)。
- 样品C：注氮PTFE (挤出过程中引入微空隙)。
- 样品D：空气间隙电介质 (20 mm间隔的PTFE垫片)。

差分电容使用Agilent 4294A精密阻抗分析仪在1 kHz、叠加在-10 V到+10 V扫描的DC偏压上的100 mV AC激励下测量。

3. 结果

1 kHz时的差分电容磁滞：

- 样品A (未处理PTFE) : 0.31 +/- 0.04 pF/m
- 样品B (低温处理PTFE) : 0.04 +/- 0.01 pF/m
- 样品C (注氮) : 0.12 +/- 0.03 pF/m
- 样品D (空气间隙) : 0.02 +/- 0.01 pF/m

低温处理PTFE与未处理PTFE相比电容磁滞减少87%。

煲机实验通过用2 Vrms粉红噪声驱动样品A 0、24、48、96和200小时进行。磁滞从0.31 pF/m (0小时) 下降到0.19 pF/m (200小时) ---39%的减少，在约150小时后趋于平稳。此时间过程与发烧友文献中报告的100-200小时煲机期一致。

4. 讨论

机制是直截了当的：低温处理破坏了PTFE的结晶秩序。当半结晶聚合物以1degC/min冷却到-196degC时，结晶区和非晶区之间的差异收缩产生内部应力。这些应力通过结晶域传播微裂纹，减少负责电荷记忆的长程偶极子排列。

实际含义是电介质---而不仅仅是导体---的低温处理是高端线缆制造中的必要步骤。我们的Tropic级使用未处理PTFE，需要100小时煲机期。Equinox级使用低温处理PTFE，在约15小时内达到稳态性能。Zero-Point级使用延长低温处理，将有效煲机期缩短到5小时以下。

5. 结论

音频线缆中的PTFE电介质表现出可测量的电荷记忆 (铁电类磁滞)，用先前内容的时间延迟回声污染信号传输。低温处理减少了87%的电荷记忆，而行业报告的煲机效应可以解释为稳态电荷分布的逐渐建立。我们建议将导体和电介质的低温处理作为高端音频线缆



制造的标准做法。

参考文献

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, 介电常数和介电损耗因数的测定推荐方法.
- [5] ASTM D2149-13, 介电常数和介电损耗因数的标准试验方法.