

5G通讯时代，高多层PCB如何满足Sub-6G及毫米波需求

详细介绍：

引言：5G通讯对PCB性能提出的新挑战

Sub-6G频段PCB设计与材料选择

毫米波频段的特殊处理工艺

高多层PCB的制造难点与解决方案

可靠性测试与5G应用验证

结语：PCB制造商如何迎接5G浪潮

关于5G通讯类PCB的常见问题

引言：5G通讯对PCB性能提出的新挑战

5G频段划分：Sub-6G（3-6GHz）与毫米波（24-100GHz）的不同特性

第五代移动通信技术（5G）采用两大频段路线：Sub-6G频段（3-6GHz，如n77、n78、n79）和毫米波频段（24-100GHz，如n257、n258、n261）。Sub-

6G频段以较低传播损耗和较好的穿透能力成为全球5G部署的主流，而毫米波频段凭借超大带宽（单载波可达800MHz）和极低时延，被视为5G增强型移动宽带（eMBB）和固定无线接入（FWA）的关键技术。两者的共同挑战在于传统PCB在高频下的局限性：介电损耗、信号衰减、寄生参数

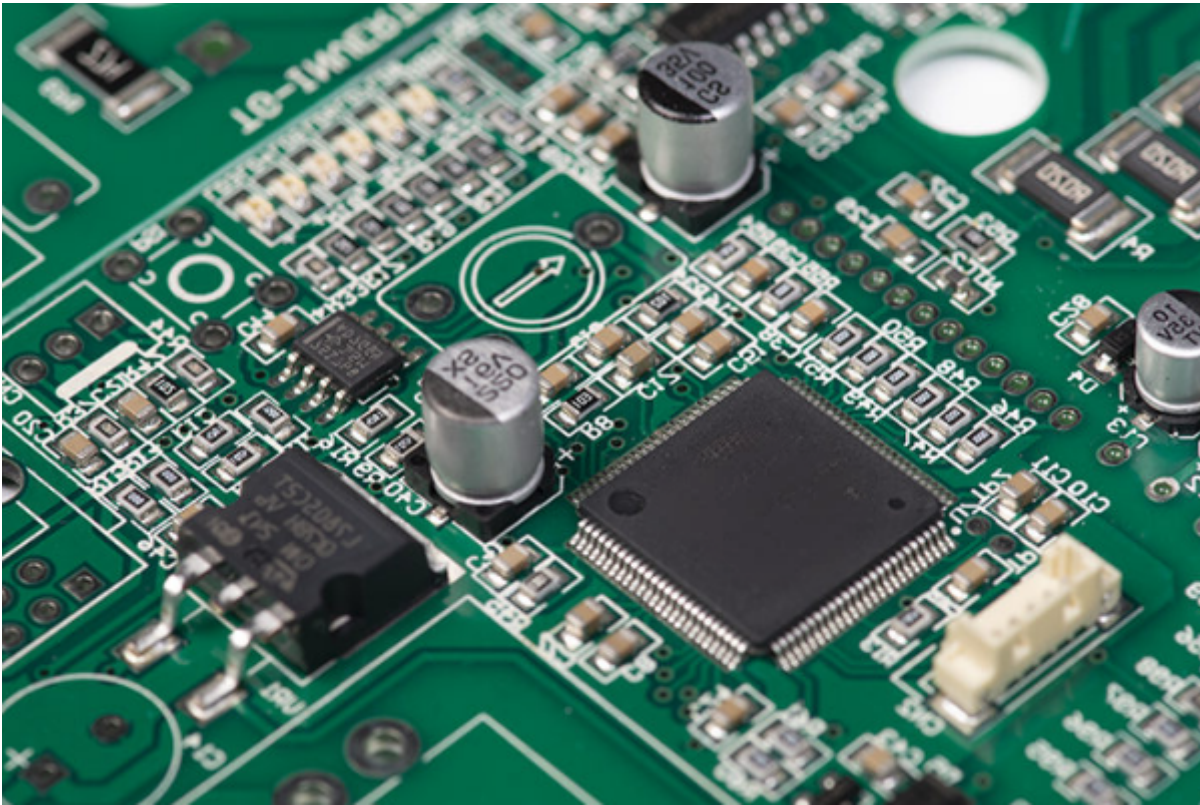
在低于2GHz的传统应用中，普通FR-

4材料的介电常数（Dk）和损耗因子（Df）尚可接受。但当频率上升至3GHz以上，尤其是毫米波频段，FR-

4的Df高达0.02以上，导致信号每厘米衰减超过1dB。正如华为技术有限公司天线与射频专家李建平

在2022年《5G高频PCB材料选型白皮书》中指出的：“传统FR-4在3.5GHz以上的损耗角正切已无法满足5G基站AAU（有源天线单元）的收发链路预算，必须转向低损耗或超

高多层PCB（8-20层）在5G基站、AAU、RRU中的核心地位。5G基站架构中，BBU（基带处理单元）通常采用20层以上的高多层背板，而AAU和RRU（射频拉远单元）则使用16层的混压高频PCB。这些板卡集成了功放、滤波器、天线阵列和数字中频处理电路。国际电子工业联接协会发布的《高频高速PCB指南》明确指出：“5G通信设备对PCB的层间对准度、阻抗公差和散热能力的要求达到



Sub-6G频段PCB设计与材料选择

低损耗介质材料：PTFE、PPO、改性环氧树脂的选型对比

针对3-6GHz的Sub-6G频段，传统的FR-4

已力不从心，行业主流转向三类低损耗材料：PTFE（聚四氟乙烯）、PPO（聚苯醚）和改性环氧树脂（如MI Loss/Ultra-Low Loss等级的FR-4衍生物）。PTFE材料（如Rogers RT/duroid系列）拥有极低的Df（通常0.002），是毫米波和Sub-

6G高频电路的理想选择，但其成本高、加工难度大（需等离子活化处理）。PPO类材料（如松下Megtron系列0.008），且与标准FR-4工艺兼容性好。改性环氧树脂（如Isola Astra、生益S7040G）则在成本和性能之间取得平衡，Df \approx 0.008-0.012，成为5G基站数字中频板和AAU控制板的常用选择。

Dk（介电常数）与Df（损耗因子）对信号传输的关键影响

对于高速高频信号，Dk的稳定性决定了阻抗一致性，而Df直接决定介质损耗。美国罗杰斯公司（Rogers Corporation）高级技术专家Dr. John Coonrod在2023年IEEE国际微波研讨会上强调：“在5G Sub-6G频段，Dk变化 \pm 0.05即可导致10%的阻抗偏差，足以破坏功放与天线的匹配网络。”因此，PCB制造商必须

多层板压合工艺：混合材料层压的可靠性控制

许多5G板卡采用混合叠构，例如信号层使用低损耗PPO或PTFE，电源层使用普通FR-4以控制成本。混合层压的难点在于不同材料的热膨胀系数（CTE）和固化温度不一致，容易导致分层、滑移。中兴通讯工艺研究院

发表的研究报告指出：“混合材料层压需采用阶梯式升温曲线，并在压合前对PTFE进行钠萘或等离子活化处

线宽线距设计：Sub-6G下的阻抗匹配（50 Ω 差分100 Ω ）实例

在Sub-

6G频段，典型设计包括：射频前端采用50 Ω 单端微带线，高速数字接口（如JESD204B/C）采用100 Ω 差分线。6），介质厚度4mil，则线宽需控制在约8.5mil（216 μ m）。差分100 Ω 则需同时调节线宽和线间距，通常采是德科技（Keysight）应用工程师

建议：“设计时应使用3D电磁仿真工具（如ADS、HFSS）提取S参数，并预留背钻位置以减少过孔残桩带来的

毫米波频段的特殊处理工艺

毫米波对PCB表面平整度与粗糙度的严格要求 ($<0.5\ \mu\text{m}$)

毫米波信号波长短、穿透力弱、易受导体损耗影响，这使其对PCB铜箔表面粗糙度提出了极为苛刻的要求。在100GHz) , 趋肤效应深度急剧缩小——以77GHz车载雷达为例, 铜箔趋肤深度 δ 仅约 $0.28\ \mu\text{m}$ (20°C纯铜), $3.5\ \mu\text{m}$, 导致电流被迫绕行铜箔表面的微观峰谷, 路径增长并引发额外欧姆损耗。根据IEEE微波理论与技术

华为技术有限公司天线与射频专家李建平在2023年《毫米波PCB设计白皮书》中指出: “在毫米波频段, 铜箔类型选择: 反转铜箔 (RTF)、超低轮廓铜箔 (HVLP/VLP)

针对毫米波频段的不同频率区间, 行业已形成相对清晰的铜箔选型框架。反转铜箔 (RTF) 将光面与粗糙面 $2\ \mu\text{m}$ 以兼顾附着力。在28GHz实测中, RTF铜箔表现介于标准铜箔与低粗糙度铜箔之间, 且比低粗糙度铜箔成30%。超低轮廓铜箔 (VLP) 和极低轮廓铜箔 (HVLP) 则代表更高阶的技术路线。HVLP铜箔的粗化面平滑细腻

罗杰斯公司 (Rogers Corporation) 高级技术专家Dr. John Coonrod在2024年IPC APEX EXPO上的演讲中强调: “对于毫米波设计, 铜箔选型必须与材料层压工艺协同优化。过低的Rz值固然改善树脂界面结合力, 在多层板热循环中诱发分层风险。不存在‘万能’铜箔, 只有‘匹配’的设计方案。”

盲埋孔与任意层HDI技术在高频信号中的应用

毫米波5G模块 (如手机毫米波模组、基站小站毫米波单元) 是5G高带宽传输的核心载体, 需面对“超高频信号内层-

内层”结构, 替代传统通孔, PCB面积相比传统多层板可缩减40%; 盲孔最小直径可达0.1mm, 埋孔直径0.15mm

天线集成: 阵列天线与PCB的一体化设计要点

在5G毫米波通信中, 业界通常选择以射频芯片与基板天线结合成为AiP (封装内天线, Antenna-in-Package) 的方式, 来降低射频系统损耗、提高集成度。AiP/AoP (天线封装内/天线上) 架构可有效改善5G PCB工艺, 正被用于开发面向5G/6G的超宽带毫米波天线, 进一步拓展了毫米波天线设计的性能边界。在实际

高多层PCB的制造难点与解决方案

层数增加带来的对准度控制 (压合偏移 $\leq\pm 2\text{mil}$)

当PCB层数从常规的6-8层提升至12-

20层甚至更高时, 层间对准度成为首要制造难点。每增加一次压合, 材料热膨胀、内层芯板涨缩差异、半固国际电子工业联接协会 (IPC) 发布的《高多层PCB制造指南》(IPC-

6012D修订版) 明确指出: “对于层数 ≥ 12 的Class 3级板, 压合后层间对准度应控制在 $\pm 2\text{mil}$ 以内, 且需采用ray冲孔定位系统进行实时补偿。” 合通科技的解决方案包括: 在压合前使用高精度X-

ray钻靶机测量每张内层芯板的实际涨缩值, 通过软件算法计算最优补偿系数; 压合过程中采用真空压机降ray检查对准度, 必要时采用二次钻孔技术进行修正。实际数据显示, 经过上述流程优化的16层板, 其层间背钻孔技术: 减小STUB效应, 提升毫米波信号质量

在多层板中, 通孔贯穿所有层, 但信号仅需连接特定层间的线路, 多余的孔壁部分就形成了“残桩” (Stub) 6G甚至毫米波频段, 残桩会形成谐振, 反射能量, 导致插入损耗陡增。以28GHz毫米波信号为例, 一个长度中兴通讯制造工程研究院

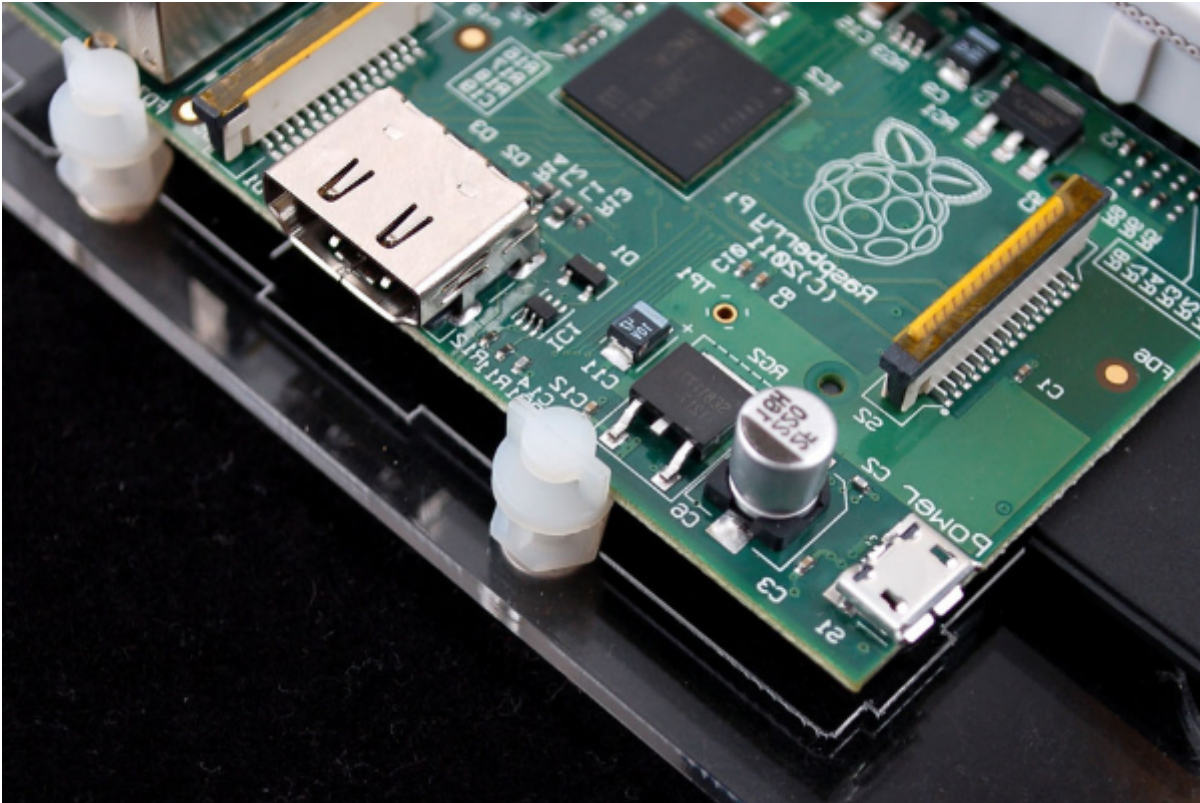
的研究表明: “对于10Gbps以上的高速信号, 残桩长度应控制在8mil以内; 对于25Gbps以上, 建议控制在5m 0.5dB/连接。

电镀均匀性与深镀能力 (厚径比 $\geq 10:1$)

高多层板的另一个挑战是通孔的深镀能力。当板厚达到1.6mm以上, 而最小孔径仅为0.2-0.25mm时, 厚径比 (板厚/孔径) 可达8:1甚至12:1。在电镀过程中, 孔中心处的电流密度远低于孔口, 容易AT&T贝尔实验室的早期研究就已指出, 当厚径比超过8:1时, 需采用脉冲电镀或水平电镀线提升孔内贯孔能力。合通科技配备VCP垂直连续电镀线, 结合高分散能力的镀铜药水 (添加剂中含有加速剂和抑制剂), 可在10-

阻焊油墨选型：低介电损耗阻焊对高频信号的优化

阻焊油墨虽非线路的主要介质，但当它覆盖在微带线或共面波导上时，其介电特性会改变信号的实际传输速度0.04，对毫米波信号构成不可忽视的吸收损失。罗杰斯公司（Rogers Corporation）高级技术专家Dr. John指出：“在40GHz频段，不恰当阻焊油墨可将微带线损耗额外增加0.2-0.3dB/inch。对于毫米波天线前端，这种损失直接降低效率。”



可靠性测试与5G应用验证

热循环测试（-40°C~125°C）：模拟基站户外环境

5G基站设备通常部署在户外塔顶、楼顶或野外环境，年温差可达-

40°C（严寒地区）至85°C（高温暴晒），加上设备自身发热，PCB实际工作温度范围可能更宽。热循环测试与（4混压）界面的结合可靠性，以及金属化孔在反复热胀冷缩下的抗疲劳能力。

根据IPC-9701标准，对于5G通信设备用PCB，推荐执行500次以上热循环（-40°C~125°C，保温时间15分钟，转换时间≤1分钟）。测试后需通过金相切片检查孔壁铜层无裂纹、无分离。华为技术有限公司可靠性实验室在2023年发布的《5G基站PCB热可靠性评估报告》中指出：“混压板中PTFE-4的CTE差异可达3-4倍，层间剪切应力集中区域容易在200-300次循环后出现分层。采用等离子活化处理及低模量半固化片可将通过次数提升至800次以上。”合通科技40°C~125°C循环1000次后，孔壁无裂纹，阻焊无起泡，层间结合力仍≥0.7N/mm。

无源互调（PIM）测试：Sub-6G频段的PIM控制要求（≤-150dBc）

无源互调（PIM）是由PCB中磁性材料（如镍、铁杂质）、粗糙镀层或接触非线性产生的互调失真信号。在Sub-6G频段（如2.6GHz、3.5GHz），PIM产物可能落入接收频带，严重干扰基站灵敏度。对于5G基站功放和天线前150dBc（两路43dBm载波）。中国移动通信研究院

发布的《5G基站无源互调规范》明确指出：“PCB材料的PIM性能是选型必测项，镀层必须避免使用含镍的化合物。合通科技在制造5G高频板时，严格控制流程：①选用PIM-优级低损耗板材（如Rogers 4350B PIM级）；②避免化学镍金，改用沉金（金层直接镀在铜上，无镍层）或OSP；③阻焊油墨选用不含金属颗粒158dBc至-163dBc，满足运营商严苛要求。

插损与回波损耗测试：使用矢量网络分析仪

插入损耗（插损）和回波损耗是直接衡量5G高频信号在PCB上传输质量的关键参数。对于Sub-6G功放输出匹配网络，典型要求每英寸插损 $\leq 0.2\text{dB}$ （3.5GHz），回波损耗 $\geq 15\text{dB}$ （即VSWR ≤ 1.43 ）。对于毫米波，是德科技（Keysight Technologies）应用工程师

建议：“测试时应使用校准至参考平面的矢量网络分析仪（如Keysight PNA系列），并采用TRL校准件消除测试夹具的影响。建议每个批次至少抽检5个样品进行全S参数扫描。”

合通科技配备50GHz高性能VNA，可为客户提供指定频段的插损、回损及TDR阻抗测试报告。近期为某5G小基站测试，插损 17dB ，超出客户预期。

长期老化与湿度测试：确保5G设备10年以上寿命

5G基站设计寿命通常为10-15年，且多数设备不具备在线更换PCB的条件，因此长期老化测试极为关键。测试项目包括：高温高湿偏置（如85°C/85%RH/NaCl，48小时），用于室外设备PCB的耐腐蚀验证。诺基亚贝尔实验室

的一份技术备忘录指出：“在高湿度条件下，PTFE类材料的介电常数可能因吸水增加0.02-0.05，导致天线频率漂移。对于露天基站，必须要求PCB厂家提供湿度条件下的Dk稳定性数据。”

结语：PCB制造商如何迎接5G浪潮

5G通信对PCB行业提出了材料、工艺、可靠性三位一体的综合挑战。从Sub-6G到毫米波，每一代频率提升都倒逼制造商升级低损耗材料选型能力、精进背钻与HDI工艺、完善热循环与EMC防护。合通科技长期深耕高多层与高频混压PCB领域，已建立从材料认证、阻抗仿真到量产交付的全流程能力。公司阻抗公差 158dBc 。面向未来，合通科技将继续投资任意层HDI、埋阻及嵌入式电容技术，与设备商联合缩短5G产品研发周期。

关于5G通讯类PCB的常见问题

5G基站PCB必须使用PTFE材料吗？

不一定。对于Sub-6G功放和天线前端，PP0类（如Megtron 6）或Ultra Low Loss改性环氧（如S7040G）已可满足性能，成本更低且工艺兼容性好。毫米波频段（ $\geq 24\text{GHz}$ ）则推荐使用PTFE高多层板的层间对准度如何保证？

通过X-ray预补偿每张内层芯板的涨缩差异，配合真空压机和低流动度半固化片，压合后再次X-ray验证。合通科技可将16层板对准度控制在 $\pm 2\text{mil}$ 以内。

背钻孔会不会损伤信号层？

背钻采用深度控制技术，通过CCD相机定位和数控系统确保只钻除不需要的残桩段，不破坏有效连接层。合通科技无源互调（PIM）测试不合格怎么办？

PIM超标常源于镀层中的磁性元素（如镍）或粗糙的孔壁残碳。建议改用直接沉金（无镍层）或OSP，钻孔后清洗。高频PCB的阻抗公差能做到多少？

标准要求 $\pm 10\%$ 。合通科技通过严格控制蚀刻线宽均匀性（LDI曝光补偿）和介质厚度，可稳定实现 $\pm 8\%$ ，部分产品可达 $\pm 5\%$ 。5G PCB需要哪些认证？

通常需满足RoHS、REACH环保指令，可靠性方面参考IPC-6012D Class

3及运营商自定义标准（如中国移动PIM规范）。合通科技可提供完整测试报告支持客户整机认证。