

挖矿机算力板PCB：超高铜厚与大电流散热方案

详细介绍：

引言：挖矿机算力板对PCB的特殊挑战

超高铜厚设计：从3oz到6oz甚至更高

散热方案：PCB层面的热管理技术

材料选择与可靠性要求

制造难点与工艺控制

典型算力板案例分析

结语：合通科技在挖矿机算力板PCB领域的核心竞争力

关于挖矿机算力板PCB的常见问题

引言：挖矿机算力板对PCB的特殊挑战

加密货币挖矿机（ASIC矿机）的工作原理与算力板的核心作用

加密货币挖矿（如比特币、莱特币等）依赖于高强度的哈希运算，而ASIC（专用集成电路）矿机是目前最高算力板（Hash Board），每块算力板上集成数十颗ASIC芯片，这些芯片并行执行SHA-256或其他算法的计算任务。算力板的性能直接决定了矿机的总算力（TH/s，每秒万亿次哈希），而算力板的

比特大陆（Bitmain）前硬件总监王伟

在2022年矿机技术峰会上指出：“算力板是矿机的核心，其PCB的设计水平直接影响芯片的供电质量和散热效率。算力板PCB面临的核心矛盾：超高功耗（数千瓦级）vs 有限空间

以比特大陆Antminer

S19系列为例，单台矿机功耗约3250W（110TH/s版本），其中90%以上的功耗集中在算力板上。每块算力板通常集成60颗ASIC芯片，每颗芯片在满负荷运行时消耗数十安培电流（典型值50-

80A@0.8V核心电压），整板总电流可达数百安培甚至上千安培。而算力板的物理尺寸受限于矿机机箱（通常由嘉楠耘智（Canaan）硬件工程团队

发表的技术白皮书显示：“在0.8V核心电压下，每平方英寸算力板面积需承载超过20A电流，这对PCB的铜厚要求远高于传统PCB。与传统PCB的差异：持续满负荷运行、极高电流密度、严苛散热要求

消费电子PCB通常间歇性工作，峰值功耗只是短暂的；而矿机一旦启动，往往7×24小时不间断满负荷运行，导致热累积效应：PCB长期处于高温状态（环境温度40-60℃，芯片结温可达120℃），加速材料老化和焊点疲劳；

① 电流应力：持续数百安培的电流通过PCB铜箔，产生显著的焦耳热和电迁移风险；② 散热紧迫性

：矿机内部风道有限，PCB本身必须承担部分散热功能。传统1oz或2oz铜厚的标准PCB在这种场景下会迅速过热。因此，超高铜厚（4oz、6oz甚至更高）和特殊散热设计。

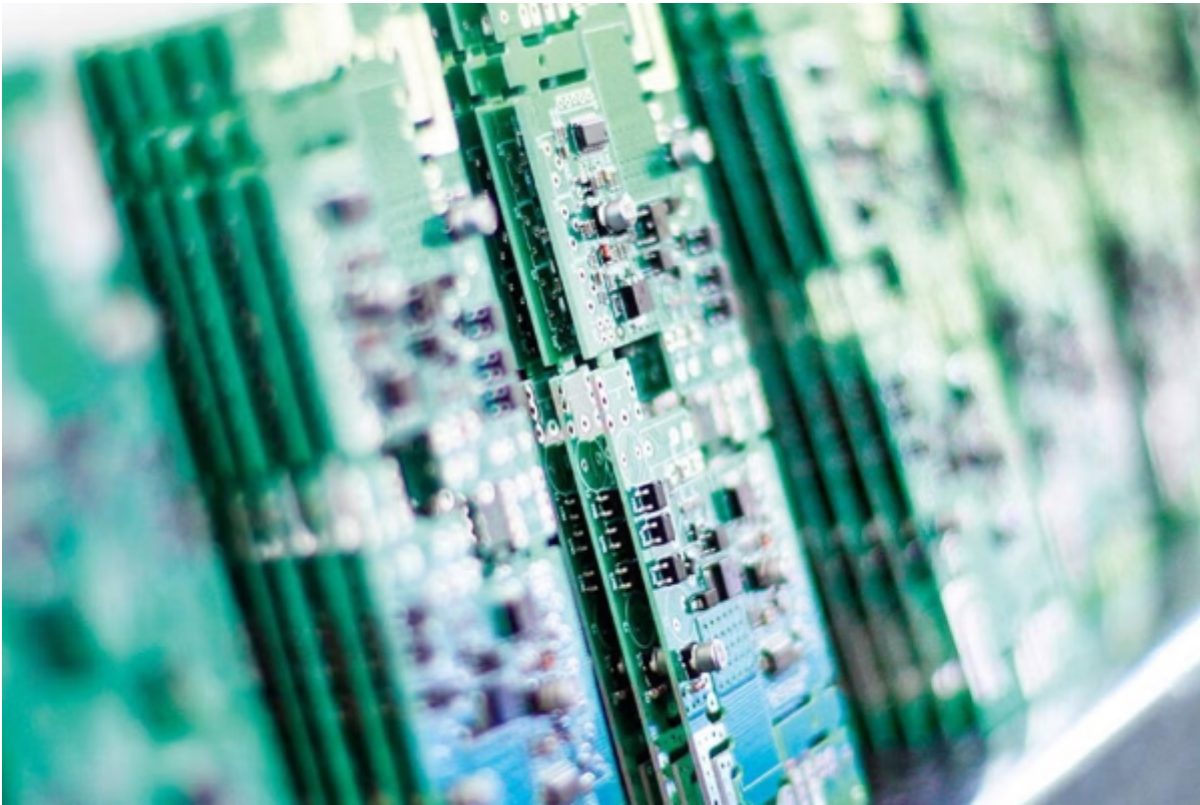
挖矿机算力板PCB的三大设计目标：超高铜厚、大电流承载、高效散热

综合以上挑战，行业将挖矿机算力板PCB的设计核心归纳为三个目标：超高铜厚

——通过增加铜箔厚度降低线路电阻和温升；大电流承载

——优化供电网络拓扑，确保每颗ASIC芯片获得均匀、稳定的电源；高效散热

——利用铜的高导热性和辅助工艺（导热过孔、开窗加锡等）将芯片热量快速导出。国际电子工业联接协会（IPC）在《高功率PCB设计指南》中强调：“对于每平方英寸功耗超过5W的应用，必须将铜厚作为首要设计变量，并



超高铜厚设计：从3oz到6oz甚至更高

挖矿机算力板的典型电流需求：每颗ASIC芯片数十安培，整板数百安培

在第一节中我们提到，挖矿机算力板需要在极其有限的空间内容纳高密度ASIC芯片阵列。以比特大陆Antminer S19系列矿机为例，一块算力板上通常部署45-60颗ASIC芯片，每颗芯片在满负荷运行时消耗50-80A电流（核心电压仅0.8-

1.2V），整板总电流可达数百安培。这种量级的电流密度对PCB供电网络的载流能力和热管理提出了严苛要求。铜厚选择依据：载流能力计算（IPC-2152标准）、温升限制（通常 $\leq 40^{\circ}\text{C}$ ）

挖矿机算力板的铜厚选择通常从3oz起步，主流方案为4oz-

6oz，部分高端方案甚至采用8oz以上的超厚铜设计。其核心依据是IPC-2152标准中的载流能力计算公式： $I = K \times A^{0.725} \times \Delta T^{-0.44} \times$

$A^{0.725}$ ，其中K为外层系数0.048，A为走线截面积， ΔT 为允许温升。在矿机设计实践中，为防止ASIC芯片过热，3oz铜厚（70 μm ）走线能安全承载50A直流电流；而6oz铜厚（210 μm ）走线则能安全承载70-

80A。捷配技术资料显示，当线宽为1mm时，3oz铜箔最大持续电流约9.8A（ $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ ），矿机设计中的供电网络需要承载数百安培电流，因此普遍采用超高铜厚（4oz/6oz）的设计。

制造4oz及以上超高铜厚的PCB面临三大核心难题。首先是蚀刻侧蚀效应：厚铜蚀刻时间长，侧蚀现象显著，可达30%，易导致线宽不足、边缘锯齿状，甚至细线无法成型。对此，行业已发展出多种应对方案，包括采用“少铜多层”替代方案：多层厚铜叠加（如2层2oz叠加等效4oz） vs 单层超高铜厚

在矿机算力板设计中，常见两种实现大电流载流的方案：多层厚铜叠加法和单层超高铜厚法。多层叠加法使用2-3层2oz铜箔，电流路径最短、直流电阻最低，但对蚀刻工艺和阻焊覆盖的要求明显更高。据多层PCB堆叠工艺专家合通科技的超高铜厚工艺能力（支持6oz以上，最小线宽0.25mm）

作为专业的全品类PCB制造商，合通科技在超高铜厚板领域积累了深厚的技术与经验。公司具备6oz以上超厚铜厚板制造能力，支持最小线宽0.25mm，最小孔径0.3mm，满足矿机算力板对高载流、高可靠性的严苛要求。

合通科技提供从设计到制造的全流程服务，确保每一块算力板都能稳定承载数百安培的电流，保障矿机的高效运行。

大电流路径设计：从芯片到电源接口

算力板上的大电流分布：ASIC芯片供电网络（VDD）、核心电压（0.8-1.2V）、数百安培电流

挖矿机算力板的大电流分布围绕ASIC芯片的供电网络展开。以比特大陆Antminer

S19系列为例，每块算力板搭载约120颗BM1362或BM1397 ASIC芯片，每颗芯片在满负荷运行时消耗约30-

50A电流，核心电压极低——据知名硬件逆向工程师Andrew “Bunnie”

Huang对S19算力板的实测分析，ASIC芯片的实际VDD低至约0.3-

0.8V之间。根据欧姆定律，极低电压意味着同等功耗条件下电流巨大，每颗芯片的VDD供电走线必须以极低阻

600A量级，需通过精心设计的供电网络实现电流从电源接口流向VRM区，再经PCB平面均匀分布至每一颗ASIC

电源输入接口：大电流连接器或直接焊接铜排

算力板需要从矿机电源获取数百安培的直流电流，传统PCIe 6针或8针连接器每个可承载约75-

150A，但矿机中通常采用多接口并联方案。以Antminer D3为例，每块算力板配备9个PCI-

e电源接口，由同一台电源供电以确保电流分配均匀。在更高功耗的型号中，标准电源接口已难以满足需求，

S19算力板在芯片串之间的铜箔走线上额外附加了铜母线，用于降低电源分配的电阻损耗。比特大陆前硬件

在矿机技术分析中指出：“大电流路径的接触电阻是挖矿机设计中最容易被忽视的效率杀手，一个毫欧级的

供电网络（PDN）设计：网格化供电、铜皮加窗露铜上锡、汇流条嵌入

算力板的供电网络（PDN）设计需要在大面积上以极低电阻均匀分配电流。网格化供电将内层2-

3层铜皮通过阵列式过孔缝合为一个三维低阻抗网络，电流可通过垂直过孔在内层分流，同时利用过孔实现

铜皮加窗露铜上锡是大电流路径设计中另一项实用技术。在铜皮表面选择性去除阻焊油墨并在SMT工序中加

7倍）和热容辅助承载电流并散热。ASIC芯片设计专家、前ASIC矿机公司技术负责人谭帅

在其技术文章中指出：“在极端大电流场景下，铜箔和焊锡的复合结构可以承受比单纯铜箔更高的电流密度

汇流条嵌入则是更高阶的大电流解决方案。铜汇流条被嵌入PCB内部或直接焊接于表层，承担主电流传输骨

电流均衡：确保每颗ASIC芯片获得相近的电流，避免局部过热

算力板上数十颗ASIC芯片并联在同一VDD网络上，由于芯片制造工艺差异、PCB走线阻抗分布不均以及温度系

现代矿机通过两种方式实现电流均衡。硬件层面，优化PCB供电网络的拓扑结构，采用“树形”分岔供电，

电压降（IR Drop）控制：仿真与实测验证

在0.3-

0.8V的核心电压下，微小的PCB电阻变化即可导致显著的百分比压降。以典型0.5V核心电压、400A整板电流

Drop即可造成80mV压降，占核心电压的16%，直接导致芯片工作异常。

IR Drop分析已成为矿机算力板设计中不可缺失的仿真环节。行业通行的做法是在投板前使用ANSYS

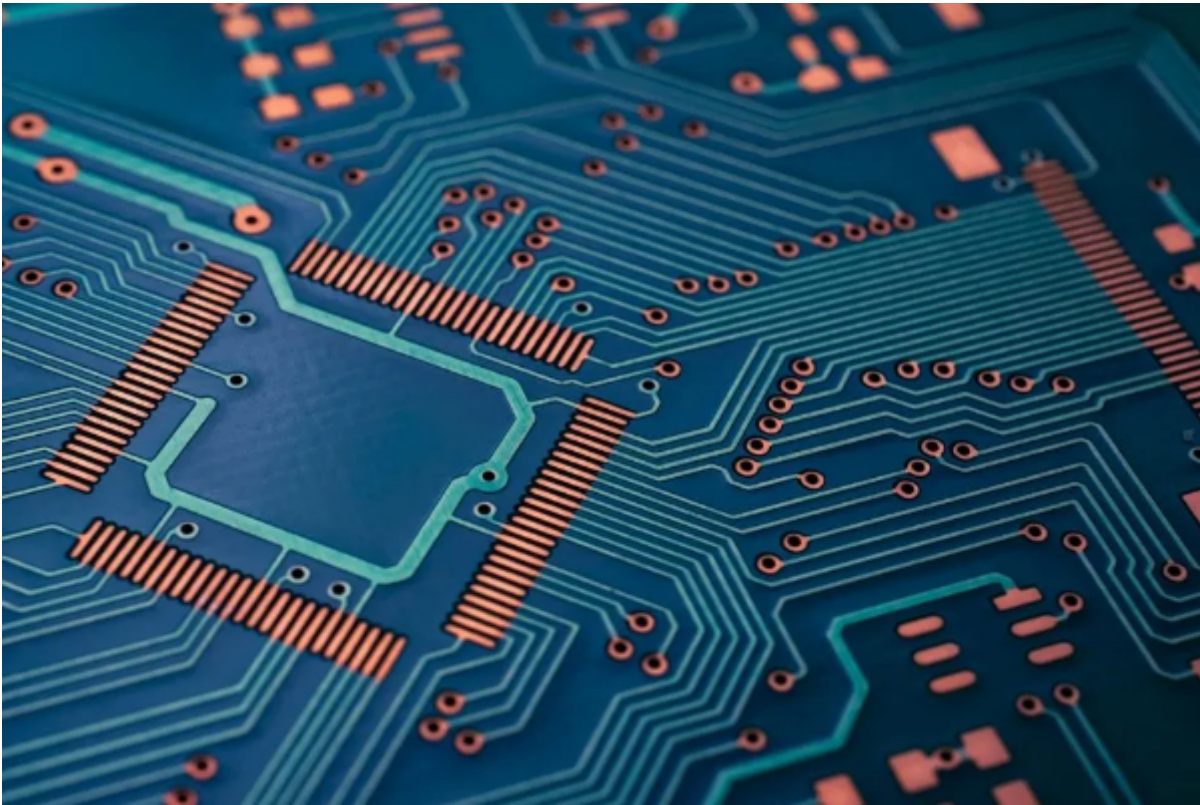
SIwave、Sigritty或CST等仿真工具进行直流压降分析。联合有限元方法与电路系统方法的组合已被成功应用

Drop，并优化PCB设计。仿真完成后，在实物验证阶段通过外接电流探头配合多通道电压记录仪实测各芯片

行业电源完整性专家的意见，

“优化的PDN可以实现更多功率从VRM传递到负载，并在窄带范围内保持恒定的电源电压，为ASIC芯片提供稳

。



散热方案：PCB层面的热管理技术

挖矿机的高温工作环境（环境温度40-60℃，芯片结温可达120℃）

挖矿机的热工况远超出一般电子产品：矿机通常部署于密集的数据中心或矿场，环境温度可达40-60℃；ASIC芯片在满负荷7×24小时连续运算中，结温（ T_{junction} ）往往飙升至100-120℃。传统FR-4板材在此温度下热膨胀系数（CTE）不稳定，长期运行存在焊点疲劳甚至板材分层风险。与此同时，高环境MDK（Mining Development Kit）算力板设计团队

指出：“为了最大化功率效率，挖矿ASIC在计算时必须保持冷却，高效热耗散（efficient thermal dissipation）是算力板设计的关键目标。”因此，仅靠外部风扇和散热器已不足以应对矿机的热挑战，PCB厚铜作为散热层：利用铜的高导热性（约380W/m·K）传导热量

铜的导热系数约为385W/(m·K)，是FR-

4基材（约0.3W/(m·K)）的1200倍以上，因此铜箔是PCB的主要热通道，铜箔厚度直接决定热传导效率。厚铜热阻 $R_{\text{th}} = \text{厚度} / (\text{导热系数} \times \text{面积})$ ，一块35 μm厚、1cm²的铜箔热阻约为0.93° C/W。

在实际计算中，铜皮散热所需的最小面积可估算为： $A_{\text{min}} (\text{cm}^2) = (500 \times P) / (\Delta T \times \text{铜厚因子})$ ，其中P为功耗（W），ΔT为允许温升（℃），铜厚因子：1oz=1.0，2oz=0.7。例如，散热1W、ΔT=50℃，所需铜箔面积约0.7cm²。Cadence系统分析团队

进一步指出，PCB的散热依赖热传导（从热源到散热片/外壳），铜箔是PCB的主要热通道，铜箔厚度直接决定散热效率。6oz表层铜厚方案，已验证可在环境温度50℃条件下将ASIC芯片周边温升控制在规格以内。

导热过孔（Thermal Via）：阵列式过孔将热量从芯片底部传导至背面或内层铜皮除厚铜横向扩散外，垂直方向的热传导同样关键。算力板上ASIC芯片的底部接地焊盘（die-attached pad）直接焊接于PCB顶层铜皮，热量需向下传导至内层地平面或底层散热铜区才能有效扩散。导热过孔（thermal via）是实现这一垂直热通路的核心手段——通过在高热元件下方密集排布镀铜通孔阵列，形成从元件焊盘至内层铜皮的垂直通道。Cadence系统分析团队将导热过孔形容为“经典的嵌入式铜结构”，可主动将热量传递至内部平面或背面散热片。

设计方面，导热过孔的核心规范包括：孔径推荐0.3mm（常用范围0.2-0.5mm），孔间距约1.0-1.5倍孔径（例如0.3mm孔按0.45mm间距阵列），孔壁铜厚≥25 μm（优选35 μm以上）。密集排布可降低热阻约2-5倍。IPC（国际电子工业联接协会）

发布的热通孔设计指南强调，过孔需贯穿至内部铜层或底层散热铜箔，并与内层铜平面充分连接，以防热量

铝基/铜基板在矿机中的应用场景与局限

单面铝基板将FR-4芯材替换为铝合金板（常规导热系数 $1.0\text{--}2.2\text{W/m}\cdot\text{K}$ ），绝缘介质层厚度仅为常规FR-4的 $1/5$ 到 $1/3$ ，可将ASIC芯片热量直接导入铝基板底板，大幅降低热阻。理论上铝基板较FR-4结构具有明显优势，铝基板的热导率约为普通FR-4材料的3-7倍，且铝基板制造工艺更简单，可降低单板成本。然而在实际应用中，铝基板暴露出严重问题。由于铝基板只有一个导电层（所有走线均位于单面），电路密度提升3倍，导致ASIC芯片下方焊球不断承受剪切力，在数百次热循环后极易引发芯片脱焊或焊点开裂。这一缺陷在FR-4多层板中难以复现。考虑到铝基板维修难度高、芯片难以安全拆卸和重贴，且故障后PCB整体报废率较高，综合权衡后，FR-4多层厚铜方案，铝基板仅在特定低成本机型中有局限应用。

铜基板热导率达 $380\text{--}400\text{W/m}\cdot\text{K}$

，远超铝基板，能够提供极低热阻（ $<0.2^\circ\text{C/W}$ ）。但铜基板密度大、成本高昂，尚未在消费级PCB领域实现。FR-4多层厚铜板的成熟工艺方案，即可兼顾矿机算力板对载流、散热和长期可靠性的严格要求。

散热辅助工艺：开窗加锡、贴散热片、风道设计与PCB布局的协同

大电流路径的散热还可通过辅助工艺进一步强化。在表层大电流铜皮区域进行阻焊层开窗，波峰焊或回流焊后贴装外部铝制散热片和导热界面材料（TIM）在矿机散热系统中扮演着不可或缺的角色——每个ASIC芯片表面通过高功率电子散热技术专家

曾在书中指出：“在大功率PCB设计中，厚铜、散热过孔与外部散热器三者必须协同优化，任何单一措施的效果都将大打折扣。将上述各种散热措施整合为一个协同系统需要全流程的严密配合——从前期的热仿真评估，到PCB布局规划、

散热方案	原理/实施方式	预期效果	主要挑战
厚铜层散热	使用 $\geq 4\text{oz}$ 表层铜箔进行横向热扩散	显著降低局部热阻，优化热量分布	增加制造成本
导热过孔阵列	芯片下方密集排布镀铜通孔，连通至内层	垂直方向热阻降低10-30%	占用布线空间
铝基/铜基板	替换FR-4芯材为金属底板	热导率提升至 $1\text{--}2\text{W/m}\cdot\text{K}$ （铝）~ $380\text{W/m}\cdot\text{K}$ （铜）	单面布线密度受限
开窗加锡辅助	去除阻焊层，波峰焊形成焊锡层	辅助增强顶层散热效果	单独使用效果有限
散热片+风道协同	TIM贴装散热片+风扇强制对流	芯片结温有效控制在规格范围	风扇功耗增加

材料选择与可靠性要求

高TG板材（ $\geq 170^\circ\text{C}$ ）的必要性：防止高温下板材软化变形

挖矿机算力板长期处于高温工作环境，ASIC芯片结温可达 120°C ，加上矿场环境温度 $40\text{--}60^\circ\text{C}$ ，PCB板材的玻璃化转变温度（ T_g ，即玻璃化转变温度，材料由刚性玻璃态转变为软化的橡胶态的温度）对于FR-4基材的机械强度和尺寸稳定性急剧下降——刚度降低、Z轴热膨胀加剧、孔壁铜层承受更大的应力，长期运行会导致PCB翘曲、孔壁铜层脱落。普通FR-4的 T_g 约为 $135\text{--}140^\circ\text{C}$ ，在矿机连续满负荷运行条件下极易接近甚至超过该临界值。对于挖矿机算力板，行业普遍要求选用的FR-4板材 $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 。代表性的高 T_g 材料如生益S1000-2M，典型 T_g 为 $180\text{--}185^\circ\text{C}$ ，专为多层板和高密度互连结构开发，具有更优的散热性能和热可靠性；IT-170GRA1TC的 T_g 达 180°C （DSC法），兼具高热可靠性和CAF抵抗能力。据资料， $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 、 T_d （热分解温度） $> 300^\circ\text{C}$ 、CTE（Z轴热膨胀系数）更低，过孔可靠性提升明显。一款高 T_g 无铅兼容FR-4

板材，在矿机连续满负荷运行条件下极易接近甚至超过该临界值。对于挖矿机算力板，行业普遍要求选用的FR-4板材 $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 。代表性的高 T_g 材料如生益S1000-2M，典型 T_g 为 $180\text{--}185^\circ\text{C}$ ，专为多层板和高密度互连结构开发，具有更优的散热性能和热可靠性；IT-170GRA1TC的 T_g 达 180°C （DSC法），兼具高热可靠性和CAF抵抗能力。据资料， $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 、 T_d （热分解温度） $> 300^\circ\text{C}$ 、CTE（Z轴热膨胀系数）更低，过孔可靠性提升明显。一款高 T_g 无铅兼容FR-4

板材，在矿机连续满负荷运行条件下极易接近甚至超过该临界值。对于挖矿机算力板，行业普遍要求选用的FR-4板材 $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 。代表性的高 T_g 材料如生益S1000-2M，典型 T_g 为 $180\text{--}185^\circ\text{C}$ ，专为多层板和高密度互连结构开发，具有更优的散热性能和热可靠性；IT-170GRA1TC的 T_g 达 180°C （DSC法），兼具高热可靠性和CAF抵抗能力。据资料， $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 、 T_d （热分解温度） $> 300^\circ\text{C}$ 、CTE（Z轴热膨胀系数）更低，过孔可靠性提升明显。一款高 T_g 无铅兼容FR-4

板材，在矿机连续满负荷运行条件下极易接近甚至超过该临界值。对于挖矿机算力板，行业普遍要求选用的FR-4板材 $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 。代表性的高 T_g 材料如生益S1000-2M，典型 T_g 为 $180\text{--}185^\circ\text{C}$ ，专为多层板和高密度互连结构开发，具有更优的散热性能和热可靠性；IT-170GRA1TC的 T_g 达 180°C （DSC法），兼具高热可靠性和CAF抵抗能力。据资料， $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 、 T_d （热分解温度） $> 300^\circ\text{C}$ 、CTE（Z轴热膨胀系数）更低，过孔可靠性提升明显。一款高 T_g 无铅兼容FR-4

板材，在矿机连续满负荷运行条件下极易接近甚至超过该临界值。对于挖矿机算力板，行业普遍要求选用的FR-4板材 $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 。代表性的高 T_g 材料如生益S1000-2M，典型 T_g 为 $180\text{--}185^\circ\text{C}$ ，专为多层板和高密度互连结构开发，具有更优的散热性能和热可靠性；IT-170GRA1TC的 T_g 达 180°C （DSC法），兼具高热可靠性和CAF抵抗能力。据资料， $T_g \geq 170^\circ\text{C}$ 、 T_d （热分解温度） $> 300^\circ\text{C}$ 、CTE（Z轴热膨胀系数）更低，过孔可靠性提升明显。一款高 T_g 无铅兼容FR-4

4板材同样拥有优秀的机械加工性能和耐CAF（导电性阳极丝）性能，可在持续高温的矿机环境支撑ASIC芯片

耐CAF材料：防止高电压（12V/24V供电）下的离子迁移

导电性阳极丝（CAF, Conductive Anodic Filament）是指PCB内部的绝缘体在一定温度、湿度及偏压条件下，铜离子沿玻璃纤维增强材料与环氧树脂

IPC-6012DA标准已明确将CAF测试列入高可靠性PCB的必要验证项目。该标准包含的温度冲击耐久试验、高温耐久

TM-650

2.6.25, 样品需进行596小时环境测试并持续施加偏压。针对矿机算力板的耐CAF材料选型，行业普遍推荐具

FR-4板材。IT-170GRA1TC明确标注具有高热可靠性和CAF抵抗能力，MCL-E-679FG系列也以卓越的钻孔加工性和耐CAF性能著称，适用于高密度布线规则。采用这类耐CAF板材可显著降

低CTE（热膨胀系数）材料：减少热循环中过孔和焊点的疲劳失效

挖矿机7×24小时连续运行的功耗波动和矿场昼夜温差变化，在PCB上引发反复的热循环应力。焊点疲劳失效

6 ppm/°C）与FR-4基板的CTE（X/Y方向约14-18 ppm/°C，Z方向约50-70 ppm/°C）存在显著差异，在-40°C至125°C热循环中焊点承受周期性的剪切应力。据IPC-6012 Class 3标准统计，未做热优化的PCB在高低温循环1000次后故障率超过35%，其中布线相关失效（铜箔脱落、过孔

4在50-260°C范围的Z轴总膨胀约4.0-4.5%，过高Tg材料则可降至2.8%以下。铜层与FR-4基材的CTE差值（约18 ppm/°C vs 18-22 ppm/°C）在多次热循环中持续累积应变。选用Z-CTE较低的高Tg FR-4材料可从根源上降低热循环应力，显著延长过孔和焊点的疲劳寿命，保障挖矿机在数万小时服役周期内的

表面处理选型：ENIG（化学镍金）或OSP（有机保焊膜）——对比插拔力、可焊性与成本

矿机算力板常用的表面处理方案包括ENIG（化学镍金）和OSP（有机保焊膜），二者各有优势和局限。ENIG通过化学沉积在铜箔表面形成一层镍磷合金层（通常3-6 μm）后再覆盖薄金层（0.05-0.125 μm）。金层化学惰性高，可长期防止镍层氧化，储存期长达一年左右；表面平整度极佳，适用于ASIC

OSP在铜箔表面形成一层超薄有机保护膜（0.2-0.5 μm），焊接时高温分解露出新鲜铜面与焊料结合。成本远低于ENIG，表面平整度同样优异。但有机膜在6个月），对矿机的生产和装配管控要求更高。

ENIG对多次热循环的耐受能力更强，适合装配环节存在多道回流焊工序的算力板；OSP则以成本优势在大批量

矿机7×24小时不间断运行的可靠性测试：热循环、高温高湿、振动

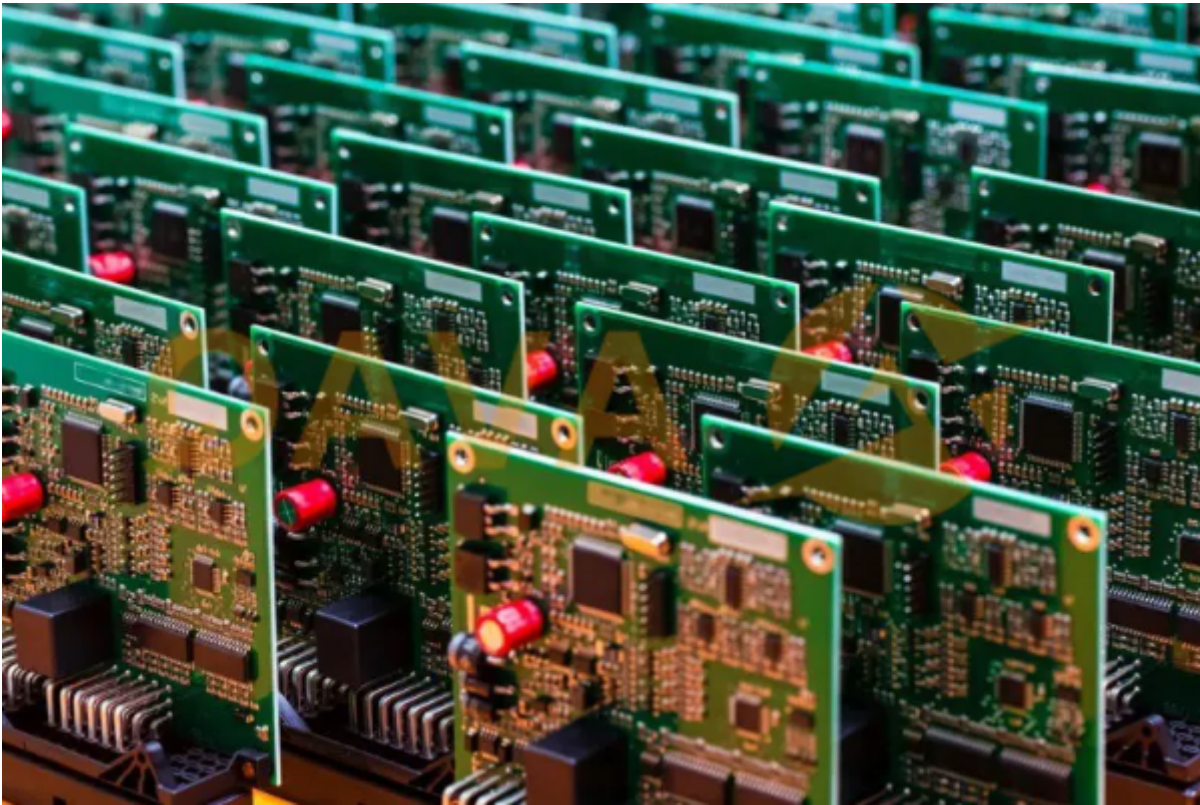
矿机算力板需通过一系列严苛的可靠性测试，确保设备在矿场恶劣环境中长期稳定运行。

热循环测试依据IPC-6012标准执行：温度范围-40°C至125°C，保温时间1小时，循环次数500-1000次。测试后需测量电阻变化率不超过10%，并通过金相切片检查镀覆孔完整性。

高温高湿偏置测试用于模拟矿机在高湿环境（如沿海地区）中长时间运行的绝缘可靠性。IPC-6012DA标准将高温高湿储存试验、阳极细丝导通试验（CAF）和表面绝缘电阻试验（SIR）明确列入车规级刚

振动测试参照ISO 16750-3《道路车辆电气和电子设备的环境条件和试验》中对电气设备的环境要求和试验方法执行，频率范围5-2000Hz，加速度峰值10-50g。矿机中的大功率风扇和ASIC芯片的固定频率会产生机械振动，可能导致焊点疲劳、元件脱落或板级应

综合上述，挖矿机算力板PCB的材料选择和可靠性测试需围绕高Tg板材（≥170°C）、耐CAF特性、低Z-CTE、适用表面处理（ENIG/OSP）及完整的热-湿-振动验证展开。只有经过系统性测试和认证的PCB，才能在矿机7×24小时不间断运行中维持算力稳定。



制造难点与工艺控制

钻孔：超高铜厚下的钻头磨损与孔壁质量（钉头控制）

挖矿机算力板采用4-

6oz甚至更高铜厚，钻孔工序面临两大核心挑战：钻头磨损和孔壁质量。铜的延展性和粘附性远高于玻璃纤维。日立工具（Hitachi Tool）钻孔应用实验室的数据显示，对于4oz铜箔，钻头寿命约为常规1oz铜箔的40%-50%；当铜厚达到6oz时，钻头寿命进一步降至25%-30%。

为控制钉头长度，行业标准规定钉头延伸不得超过铜厚的1.2-

1.5倍（例如4oz铜厚约140 μm ，钉头应 \leq 210 μm ）。实现这一目标需采取多项措施：① 降低进给速率：高铜厚板材的进给速率应降至常规板的60%-75%，以减少瞬时切削载荷。② 采用啄钻（Peck Drilling）：钻头每钻入一定深度（如0.5-1.0mm）后退刀排屑，避免切屑堆积加剧磨损。③ 使用超硬涂层钻头：如AlTiN或DLC涂层钻头，可显著降低摩擦系数和切削温度。④ 控制叠板数量：厚铜板通常叠1-2块/叠，以减小钻头负荷。合通科技

建立了针对不同铜厚（2oz至10oz）的钻孔参数矩阵，批量生产前先进行钉头切片验证，确保孔壁质量符合IPC 2/3要求。

压合：多层厚铜板的填胶均匀性与层压参数优化

算力板虽多为2层板（单面或双面），但当采用多层厚铜叠加结构时（例如内层2oz+表层2oz等效4oz），压合生益科技工艺研究中心

的实验表明，对于线路残铜率低于40%的区域，标准1080半固化片的胶量可能不足以填充铜线间隙，需改用更厚胶层。压合参数方面，厚铜板需要更长的加压时间和更高的温度来确保树脂充分流动。压合过程中的温升速率应控制在2.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，避免过快导致树脂提前凝胶而无法填满深腔。真空压合可显著减少气泡残留。合通科技对于厚铜多层板采用阶梯式压合曲线：低压预热 \rightarrow 中压填胶 \rightarrow 高压固化，并根据铜厚和残铜率调整半固化片。ray检查层间偏移和超声扫描确认无分层。

蚀刻：超高铜厚线路的侧蚀补偿与线宽公差控制

厚铜蚀刻是制造难度最高的工序之一。蚀刻液与铜发生反应时，不仅向下侵蚀，也同时向侧面侵蚀（即侧蚀）。侧蚀率可达30%，导致设计线宽0.5mm蚀刻后可能仅剩0.35-0.4mm，且边缘呈梯形而非矩形。罗门哈斯（Rohm and

Haas) 电子材料部门的研究指出, 侧蚀速率与铜厚、蚀刻液类型、温度、喷淋压力以及线路密度密切相关。

解决方案包括: ① 线宽补偿

: 在设计时预先增加线宽, 补偿值为侧蚀量的预估。合通科技通过试产确定不同铜厚下的补偿系数(例如4oz 0.15mm, 6oz补偿0.18-0.22mm)。② 高分辨率曝光

: 采用LDI(激光直接成像)替代传统底片曝光, 消除底片涨缩误差, 使线宽一致性更好。③ 酸性蚀刻液优化

: 使用氯化铜或氯化铁体系, 加入专用侧蚀抑制剂, 同时控制蚀刻温度($50\pm 2^{\circ}\text{C}$)和喷淋压力, 使蚀刻因子

二步蚀刻法: 先快速蚀刻掉70%铜厚, 再换用低浓度蚀刻液精细蚀刻剩余部分, 可获得更垂直的线壁。合通科技在批量生产中对厚铜板每批次抽取首件进行线宽测量, 确保公差控制在 $\pm 10\%$ 以内。

阻焊: 厚铜表面阻焊覆盖的平整度与附着力

厚铜线路表面高低差明显(4oz铜线高出基材约 $140\mu\text{m}$), 阻焊油墨印刷时易出现“盖顶”现象: 油墨在铜线转角处油墨覆盖偏薄, 可能在后工序被擦破, 导致露铜; ② 线间凹处油墨未完全填充

, 形成气泡针孔, 影响绝缘性能。太阳油墨(Taiyo Ink)技术指南

建议, 对于铜厚 $\geq 3\text{oz}$ 的板, 应采用“二印二烤”工艺——先丝印第一层阻焊, 低温烘烤固化, 再丝印第二层

外形加工: 铣刀磨损与毛刺控制

挖矿机算力板的外形加工(V-

cut或数控铣边)同样因厚铜而难度陡增。铣刀切割厚铜箔时, 铜屑容易粘附在刀刃上, 导致切削刃钝化, 精度下降。LPKF激光切割技术应用报告指出, 对于3oz以上厚铜板, 传统碳化钨铣刀的寿命缩短50%-60%, 需要每加工20-30块板即换刀。

控制毛刺的方法包括: ① 采用分段铣切: 先粗铣去掉大部分余量, 再精铣修边, 每刀深度不超过1.0mm。②

使用单刃下切铣刀: 减少铜箔卷曲倾向。③ 铣切方向优化: 从板边外侧向内侧走刀, 使毛刺向外翻。④

最后化学去毛刺: 将铣好的板通过微蚀液槽, 短时间溶解毛刺尖峰。合通科技

针对厚铜板的外形加工积累了丰富的参数数据, 可保证板边毛刺长度 $\leq 0.1\text{mm}$, 满足自动插件和SMT要求。

典型算力板案例分析

蚂蚁矿机(Antminer S19系列)算力板PCB的层叠与铜厚方案

比特大陆的Antminer S19系列是加密货币矿机市场最具代表性的产品之一。以S19j Pro为例, 矿机整机功耗约3068W, 每块算力板搭载126颗BM1362

ASIC芯片(整机3块算力板, 共计378颗芯片), 每颗ASIC芯片核心电压极低——硬件逆向工程师Andrew “E-Huang”的实测分析表明, 芯片实际VDD低至约0.3-

0.8V。极低电压意味着同等功耗下电流巨大, 典型单芯片电流达数十安培, 整板总电流超过300A。

S19系列算力板采用双层厚铜PCB结构

, 对外层铜厚为4oz($140\mu\text{m}$)或更高。供电网络采用“铜母线辅助供电”方案——在芯片串之间的铜箔走线处设置电压Drop。散热设计上, ASIC芯片表面对应铝制散热片配合高导热性导热膏(如Fujipoly SPG-

30B), 形成“芯片—导热膏—散热片—风扇”的经典风冷散热链路。大面积厚铜层和导热过孔阵列将芯片产生的热量快速导出。神马矿机(Whatsminer M50系列)的散热设计对比

MicroBT的Whatsminer M50系列同样采用5nm制程ASIC芯片, 整机功耗约3306W, 算力114TH/s, 效率约29 J/TH。其算力板采用了具有特色的“热力学进阶散热架构”, 被评价为“WhatsMiner系列中最先进的散热架构”。

在PCB层面, M50在供电网络的物理实现上采用了与S19类似的“厚铜+铜排”方案, 维修指南明确要求“连接不同铜厚方案(3oz vs 4oz vs 6oz)的温升实测数据对比

对于算力板PCB设计而言, 铜厚选择直接决定载流能力与温升水平。根据PCB行业权威测试数据, 以2.5mm线宽换算到算力板数百安培整板电流的场景, 上述数据的工程意义清晰显现: ① 采用3oz方案设计

: 需将供电网络线宽加大25%以上才能维持与4oz相同的温升, 否则核心走线区温度极易突破 85°C 阈值, 引发性能下降; ② 采用4oz方案设计: 在常规风冷条件下可将总温升控制在可接受范围, 是目前成熟矿机的主流选择。③ 6oz

：配合大尺寸散热片和主动风冷，局部热点温升可比4oz再降低20%以上，在超频矿机或高温矿场环境中优势明显。实测数据还揭示了厚铜板设计的“非线性效应”——当环境温度从40℃升至55℃时，相同电流下的稳态温升仅增加12℃，对焊点疲劳寿命的延长效果可达翻倍以上。捷配针对不同铜厚铜板的仿真与实测偏差数据分析也印证了厚铜板的优势，20%的温升裕量，使载流能力核算进一步趋向严格。

从设计到量产：合通科技为矿机客户提供的优化案例

某挖矿机头部厂商在设计新一代算力板时，面临芯片电流密度大幅增加所带来的供电网络瓶颈。原案采用常规2oz铜厚，导致大电流路径电压降过大，局部过热。合通科技通过优化铜厚、线宽和散热设计，成功解决了这一问题。

结语：合通科技在挖矿机算力板PCB领域的核心竞争力

挖矿机算力板PCB的设计与制造，是超高铜厚、大电流承载与高效散热三大技术的深度整合。从ASIC芯片数值的精准匹配到散热风道的协同设计，合通科技作为全品类PCB制造商，在挖矿机算力板领域已建立完整的技术能力：超高铜厚工艺支持6oz以上批量生产，最小线宽0.25mm，侧蚀控制与线宽补偿经验成熟；大电流设计支持

涵盖供电网络仿真、铜排嵌入方案和IR Drop优化；散热管理提供导热过孔、开窗加锡、风道协同设计建议；可靠性保障执行IPC标准下的热循环、高温高湿、CAF及振动测试。同时，合通科技提供从Gerber评审、打样验证到大批量生产的全面服务。

关于挖矿机算力板PCB的常见问题

关于挖矿机算力板PCB的常见问题

挖矿机算力板使用6oz铜厚时，最小线宽能做到多少？

6oz铜厚（约210 μm）条件下，常规蚀刻工艺可稳定实现最小线宽0.3mm（300 μm），合通科技经过线宽补偿工艺优化，可实现0.25mm。如何计算挖矿机PCB的载流能力和温升？

依据IPC-2152标准，载流能力计算公式为： $I = K \times \Delta T^{0.44} \times A^{0.725}$ （K为外层系数0.048，内层0.024；A为走线截面积，单位mil²；ΔT为允许温升，单位℃）。同时可

使用IPC-2152 PCB Toolkit）或仿真软件（ANSYS SIwave、Q3D Extractor）进行校核。设计时通常将温升限制在40℃以内，并预留10%–20%的裕量。

导热过孔的设计密度和孔径如何选择？

导热过孔典型孔径为0.3–0.5mm，过孔中心间距通常为1.0–

1.5倍孔径（例如0.3mm孔按0.45mm间距阵列）。密度越高，热阻越低，但会挤占布线通道。设计时建议在AS

0.6mm。过孔内壁铜厚应≥20 μm（优选25–35 μm），且孔内需填锡或树脂以增强导热。

如何降低大电流路径的电压降（IR Drop）？

降低IR

Drop的方法包括：①增加铜厚（如从2oz提升至4oz或6oz）；②加宽关键供电路径的线宽；③采用多层并联供电；④优化过孔设计。进行IR Drop分析，确保压降控制在核心电压的5%以内。

挖矿机PCB是否需要做阻抗控制？

需要。算力板上的高速通信接口（如ASIC芯片之间的菊花链、与主控板的SPI/I²C总线）以及时钟信号线，都需要做阻抗控制。

挖矿机算力板常见的可靠性测试有哪些？

至少包括：①热循环测试（–40℃~125℃，500–

1000次，检查过孔裂纹和分层）；②高温高湿偏置（85℃/85%RH，1000小时，检查CAF和绝缘电阻）；③振动测试（16750–

3，模拟矿场风扇振动和运输冲击）；④可焊性与老化测试（模拟多次回流焊后焊盘润湿性）；⑤高压绝缘测试（模拟矿场环境中的静电放电）。