

碳毡在碳化硅晶体生长中的应用指南

1、碳化硅晶体重要性和应用领域

1.1 碳化硅晶体重要性

碳化硅是一种由碳和硅组成的宽禁带半导体材料。与第一代半导体硅相比，其核心优势源于其独特的物理和化学性质。

传统硅的禁带宽度约为 1.12 eV，碳化硅的禁带宽度约为 3.2 eV，禁带宽度是电子从价带跃迁到导带所需的最小能量。禁带越宽，材料越“坚固”，能在更高的温度、电压和频率下稳定工作而不被“击穿”或失效。这使得 SiC 器件的工作结温可达 200° C 以上，远高于硅器件的 150° C 左右。

碳化硅的高击穿电场强度比硅高约 10 倍。这意味着在相同的电压等级下，SiC 器件的外延层可以做得更薄，芯片面积可以做得更小，从而降低器件电容，提高开关速度。

碳化硅的热导率约为硅的 3 倍。优异的热传导能力意味着器件产生的热量能更快地散发出去，从而允许更高的功率密度，简化散热系统设计，使设备更轻、更紧凑。在高电子饱和和漂移速度方面，约为硅的 2 倍，这使得 SiC 器件可以在更高的频率下工作，开关损耗更低。

从以上方面来看，碳化硅材料将这些优异特性集于一身，使得基于它的电力电子器件能够实现“更高效率、更高功率、更高频率、更高温度、更小体积”的“五高”性能突破。这正是解决现代社会面临的能源效率、节能减排和功率密度等核心挑战的关键。

1.2 碳化硅晶体的应用领域

1.2.1 电力电子与能源转换领域

这是目前 SiC 产业化最成熟、市场规模最大的领域，主要替代硅基的 IGBT 和 MOSFET。

在新能源汽车行业，主驱逆变器是 SiC 的“杀手级应用”。采用 SiC MOSFET 后，逆变器效率可提升数个百分点，这意味着同样的电池容量下，续航可增加 5-10%。同时，其高频特性使得电机、电感等被动元件体积缩小，帮助电动车减重、增加空间。应用在车载充电机上，能够实现更快的充电速度和小型化，DC-DC 转换器使用后，可以高效地将高压电池电压转换为低压，为车内电子设备供电。

在新能源发电与储能行业，光伏逆变器使用后，能够提高太阳能光伏板的能量转换效率，降低系统成本和体积，应用到风电变流器后，可以提高可靠性和功率密度，适应恶劣环境，而储能系统可以提升充放电转换效率，延长系统寿命。

在工业与轨道交通方面，用于变频器，能够大幅降低工业电机的能耗，实现精准控制，应用于轨道交通牵引变流器，能够使高铁、地铁的牵引系统具备更轻量化、更高效特性，电源方面也可以实现不间断，提供更高效率、更可靠的电力保障。

在充电基础设施领域，SiC 是实现高功率（如 350kW 以上）快充桩的核心。它能减少充电桩内 30% 的能量损耗，缩小体积，降低运营成本。

1.2.2 射频电子领域

利用 SiC 的高频、高压、耐高温特性，制作射频微波功率器件。

5G 通信基站的基站功率放大器，与传统硅基 LDMOS 相比，SiC 基氮化镓器件具有更高的输出功率、更宽的带宽和更高的效率，是 5G 宏基站和未来 6G 的关键技术。

国防与航空航天相控阵雷达，用于有源相控阵雷达的 T/R 组件，提供更远的探测距离、更高的分辨率和可靠性。卫星通信应用后，在空间极端温度和高辐射环境下表现优异。

1.2.3 极端环境电子领域

利用 SiC 天生的耐高温、抗辐射能力。

航空航天与深空探测，用于发动机传感器、飞行控制电子系统等，无需复杂的冷却系统，可直接在高温环境下工作。核能与高能物理用于核反应堆内的监测传感器和控制系统，能在强辐射和高温中长期稳定运行。石油与地热勘探用于井下极端高温高压环境下的传感与电子设备。

1.2.4 其他特种应用

碳化硅晶体中的某些晶格缺陷可以作为发光中心，被研究用作固态量子比特，是量子计算和量子通信的潜在平台。

还可以作为氮化镓 LED 的衬底材料（但已被蓝宝石和硅衬底在成本上超越，主要用于高端或特殊波段产品）。

2、晶体生长方法概述

对于碳化硅而言，由于其在高温下不会熔化（在常压下约 2830° C 时会分解），因此无法使用传统的直拉法或区熔法，这催生了独特且具有挑战性的生长技术。

本次我们主要介绍三种生长方法：

2.1 物理气相传输法

物理气相传输法是商业化生产 4 英寸、6 英寸及 8 英寸导电型和半绝缘型碳化硅单晶衬底的唯一成熟方法，占据了超过 95% 的市场份额。

2.1.1 核心原理

利用高温下的升华-输运-再结晶过程。在密闭的石墨坩埚（生长室）内，通过感应或电阻加热产生极高的温度梯度。碳化硅源料（通常是高纯 SiC 粉末或多晶块）在高温区（约 2300-2500° C）升华分解为含硅、碳的气相组分（如 Si, Si

2 C, SiC₂ 等), 这些气相物质在温度梯度和惰性气体 (如氩气) 低压环境的驱动下, 被运输到温度较低的区域 (通常低 50-200° C), 并在预先放置的 SiC 籽晶上达到过饱和状态, 从而按照籽晶的晶体结构进行外延再结晶, 逐渐生长为单晶锭。

2.1.2 关键系统组件与作用

石墨坩埚: 作为生长反应腔体, 需使用高纯、高密度石墨。

保温系统: 通常由多层石墨毡/碳毡和石墨硬毡构成, 用于形成均匀、可控的温度梯度, 减少热损失, 保护外围设备。

加热系统: 射频感应线圈或石墨发热体。

籽晶: 高质量、同质 (通常是 4H 或 6H-SiC) 的单晶薄片, 固定在坩埚顶部 (生长面朝下)。

源料: 高纯度 SiC 粉末, 置于坩埚底部。

压力与气氛控制系统: 维持生长室内的低压 (通常 10-100 mbar) 和惰性/还原性气氛。

2.1.3 工艺流程简述

- 装料: 将籽晶固定在坩埚盖, 源料放入坩埚底部。
- 抽真空与加热: 系统抽真空并充入惰性气体, 开始加热至目标温度。
- 生长: 精确控制温度场和压力, 气相物质从源料区运输至籽晶区并结晶。生长速率缓慢, 约 0.1-1 mm/h。
- 降温: 生长完成后, 以极缓慢的速度 (可能需要数天) 降温至室温, 以避免晶体因热应力开裂。
- 取锭与加工: 取出晶锭, 经过定向、切割、研磨、抛光和清洗, 最终得到可用于外延的晶圆 (衬底)。

2.1.4 优势与挑战

优势：技术相对最成熟，可生长大尺寸、高质量的单晶，是目前唯一实现大规模产业化的方法。

挑战：

- 生长条件苛刻：高温、封闭、不可视，过程控制难度大。
- 缺陷控制难：微管、位错、多型夹杂等晶体缺陷的密度仍需进一步降低。
- 掺杂均匀性：尤其是氮掺杂的均匀性控制是技术难点。
- 原料利用率低：升华过程并非 100%转化。

2.2 高温化学气相沉积法

HTCVD 法主要用于生长极高纯度的碳化硅，或作为 PVT 法的补充技术，特别适合生长低掺杂、半绝缘的厚膜或体块材料。

2.2.1 核心原理

与 PVT 的“固-气-固”过程不同，HTCVD 是“气-气-固”过程。它将含硅和碳的前驱体气体（如三氯甲基硅烷，或硅烷+碳氢化合物的混合气体）直接通入高温（约 1800-2200° C）的生长腔室。气体在高温下发生热分解和化学反应，直接在加热的 SiC 籽晶表面上沉积，生长出 SiC 单晶。

2.2.2 特点与应用

- 高纯度：使用高纯气体源，可生长出杂质浓度极低 ($< 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) 的晶体。
- 掺杂可控：通过向气流中掺杂含氮或含铝的气体，可以精确控制掺杂类型和浓度。
- 适用场景：主要用于生长半绝缘 SiC 衬底，这是制造 GaN-on-SiC 射频器件的关键；也用于生长 PVT 难以实现的特殊掺杂结构或同质外延层。

- 挑战：气体消耗量大，生长速率与均匀性控制复杂，成本较高，目前尚未成为主流的大尺寸衬底生长方法。

2.3 溶液生长法

为了从根本上解决 PVT 法中固有的高密度位错问题，液相法被广泛研究。

2.3.1 核心原理

在高温（约 1500–2000° C）下，使用金属溶剂来溶解碳和硅源。通过降低温度或在籽晶处建立浓度梯度，使碳和硅在籽晶上过饱和析出，生长出 SiC 单晶。常用的溶剂有硅、铬、铁及多种合金。

2.3.2 优势与潜力

- 理论缺陷密度极低：生长在接近热力学平衡条件下进行，有望将位错密度降低数个数量级，生长出近乎完美的晶体。
- 可生长新型多型体：有潜力稳定生长出 PVT 法难以获得的新型 SiC 多型体。

2.3.3 挑战

- 碳溶解度低：在硅熔体中碳的溶解度极低，生长速率非常慢。
- 溶剂包裹与污染：容易将溶剂金属包裹进晶体，引入杂质。
- 工艺控制极端困难：高温、强腐蚀性熔体对坩埚材料（如石墨、钼）是巨大考验。
- 晶体尺寸限制：目前仅能生长出较小尺寸的晶体。虽然潜力巨大，但距离产业化仍有很长距离。

3、碳毡在晶体生长系统中的关键作用

与意义

在 PVT 法高达 2500° C 的极端高温系统中，碳毡（主要是石墨软毡和石墨硬毡）构成了生长炉的主体保温层和热场结构件。其多孔、轻质、耐高温、化学性质稳定的特性，使其成为近乎不可替代的核心耗材。

3.1 关键作用

3.1.1 热场构建与均匀化

这是碳毡最核心、最直接的作用。PVT 法成功依赖于从源料区到籽晶区精确、稳定的轴向温度梯度和径向温度均匀性。

- 轴向梯度控制：碳毡的厚度和密度直接决定了热量的纵向散失速率。通过设计不同区域碳毡的配置（如底部厚、顶部薄），可以精确塑造从高温源料区（~2300° C）到较低温籽晶区（~2200° C）所需的温度梯度（通常为 10-50 ° C/cm）。这个梯度是驱动气相物质运输的“引擎”。
- 径向均匀化：理想情况下，生长界面（晶体与气相接触面）应是一个完美的等温面。碳毡作为均匀的隔热体，能有效减少炉膛侧壁的热损失不均匀性，平滑由加热线圈、坩埚形状和材料本身带来的热场畸变，从而确保晶体径向生长速率一致。这是获得低应力、无裂纹、低缺陷（如多型夹杂）晶体的关键。反之，不均匀的热场会导致晶体弯曲、开裂或产生多型缺陷。

3.1.2 高效隔热与节能

- 降低能耗：PVT 炉功率常达数百千瓦。碳毡极低的热导率（尤其在真空或低压下，其多孔结构有效抑制了气体传导和对流）将热量最大限度地“锁”在生长腔内，大幅降低了维持高温所需的电能，直接降低生产成本。
- 保护外围设备：有效的隔热层将炉壳温度降至安全范围（通常 <100° C），保护了昂贵的感应线圈、水冷系统、观察窗、密封件和炉体结构，延长了整个设备的使用寿命和安全性。

3.1.3 热惯性缓冲与过程稳定性

碳毡具有较大的热容量和“热惯性”。

当电源功率出现微小波动或控制系统进行调节时，碳毡层能像“热海绵”一样吸收或释放部分热量，减缓核心区温度的急剧变化，为控制系统提供反应时间，从而维持生长界面的热稳定性。

生长结束后的降温过程需要极其缓慢（每天降几十度），以防止晶体因热应力而炸裂。碳毡良好的保温性能天然地“拖慢”了降温速度，是执行安全、可控降温程序的物理基础。

3.1.4 杂质控制与气氛调节

物理吸附与阻挡：碳毡多孔的巨大表面积，能够吸附系统中释放的微量杂质气体（如氧气、水分）。同时，它本身是超高纯石墨材料，在高温下化学性质稳定，不与SiC蒸气发生反应，不会引入额外的金属杂质。

创造稳定气流通道：其多孔结构并非完全密封，允许气体在设定的低压下缓慢渗透和流动。这种结构有助于建立稳定、层流的气相输运路径，减少湍流，从而避免因气流扰动导致的晶体生长不均匀或包裹物形成。

3.1.5 机械支撑与应力缓冲

支撑与定位：石墨硬毡常用于制作特定的支撑架和垫块，用于固定和定位内部的石墨坩埚、发热体等核心部件。

缓冲热应力：在升降温过程中，各部件（石墨、石英、金属）因热膨胀系数不同会产生巨大的应力。碳毡，特别是软毡，具有一定的压缩回弹性，可以作为一个柔性的缓冲层，吸收部分应力，防止硬质部件因挤压而破裂，也间接保护了脆性的SiC晶体本身。

3.2 战略意义

3.2.1 对晶体质量的直接影响：成本与性能的杠杆

碳毡的配置直接决定了热场质量，而热场质量决定了晶体缺陷密度（如微管、位错）。高质量、低缺陷的晶锭意味着更高的良品率和更厚的可用衬底切片层数。一个优化的碳毡设计，可以将晶体质量提升一个等级，其价值远超过碳毡本身的成本，是撬动产品价值和利润的关键杠杆。

3.2.2 对工艺可重复性与规模化的支撑

工业化生产要求每一炉次的结果高度一致。碳毡的标准化、模块化设计是实现工艺“配方化”的基础。一旦通过模拟和实验确定最优的碳毡配置（厚度、密度、形状组合），就可以稳定复制，确保不同批次、不同炉台生长出性能一致的晶体。这是实现从实验室到大规模量产跃迁的工程化核心。

3.2.3 连接理论与实践的桥梁：热场模拟的物理实体

现代晶体生长高度依赖计算机热场模拟。在模拟软件中，碳毡的热导率、比热容、发射率是关键输入参数。模拟结果最终需要通过实体碳毡的装配来实现。因此，碳毡是连接虚拟优化设计与实际物理世界的物质载体。对碳毡性能的精确表征，是提高模拟准确性、减少实验试错成本的前提。

3.2.4 技术壁垒与成本控制点

- 技术壁垒：顶级的晶体生长企业，其热场设计（核心即碳毡配置方案）是高度机密的核心技术。一个经过千锤百炼的碳毡包裹方案，是其长期工艺积累的体现，构成了实质性的技术护城河。
- 成本控制：碳毡是PVT生长中的主要消耗件，通常几十炉次后就需要更换。其采购成本、使用寿命（抗粉化、抗收缩能力）直接影响单片衬底的成本。优化其使用，是降本增效的重要环节。

4、碳毡的基本特性

4.1 材料与结构特性

4.1.1 微观与宏观结构

- 前驱体：通常由聚丙烯腈基碳纤维或沥青基碳纤维制成，前者强度更高，后者导热和石墨化性能更优。
- 形态：是一种非织造的柔性毡状材料，由无序或短切碳纤维通过针刺、粘结等方式交联而成，形成三维网络结构。
- 多孔性：这是其最核心的结构特征。纤维之间形成大量相互连通的、尺寸不一的孔隙。孔隙率通常高达 80%-95%。这种结构是其优异隔热性能的物理基础。

4.1.2 物理与机械特性

- 低密度：因其多孔结构，密度很低，通常在 $0.1 - 0.3 \text{ g/cm}^3$ 之间（作为对比，水的密度是 1 g/cm^3 ）。这使得它非常轻质，便于安装，并减少了系统的热容量。
- 柔软性与可加工性：具有良好的柔韧性和压缩回弹性，可以裁剪、包裹成复杂的形状，紧密贴合在炉体内壁和部件周围，减少热短路。石墨硬毡是经过高温硬化处理后的变体，具有一定刚性，可用于制作支撑件。
- 低机械强度：拉伸和抗压强度相对较低，这是由其多孔纤维结构决定的。它主要承受压应力，在安装和使用中需避免尖锐物体刺穿或过度拉伸。

4.2 热学特性

4.2.1 极低的导热系数

这是碳毡作为顶级隔热材料的根本原因。其导热系数在高温下通常介于 $0.05 - 0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ （随温度和密度变化），远低于大多数固体材料（例如，不锈钢约为 $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ）。

机理：

- 固相传导路径曲折：纤维之间的点接触使得热量通过固体骨架传导的路径非常长且低效。
- 气相传导被抑制：在 PVT 炉的低真空或低压惰性气氛下，孔隙内的气体分子稀薄，气体对流传热基本消失，气体分子热传导也大幅降低。
- 辐射传热的屏蔽：高温下 ($>1000^\circ \text{C}$)，辐射传热成为主导。碳毡内部大量的纤维表面和复杂孔隙结构，如同无数个屏蔽层，对热辐射进行反复的吸收、反射和再辐射，显著阻隔了辐射热流。

4.2.2 优异的高温稳定性

耐高温：在惰性或真空环境中，碳毡可长期稳定工作在 2000°C 以上，短期可承受接近 3000°C 的高温。其熔点（升华点）与石墨相近，约 3650°C 。

低热膨胀：热膨胀系数非常低（约 $(1-4) \times 10^{-6} /\text{K}$ ），在剧烈的温度变化下尺寸稳定，不会因热胀冷缩而开裂或挤压内部部件。

抗热震性：得益于低热膨胀和高孔隙率带来的弹性，能够承受剧烈的温度升降（即热冲击）而不破碎。

4.2.3 高热容与热惯性

具有相对较高的比热容，结合其整体质量，使其成为一个有效的“热缓冲体”。这有助于稳定炉内温度，减缓外部干扰引起的波动。

4.3 化学与纯度特性

4.3.1 化学惰性

- 在还原/惰性环境中：在 PVT 炉典型的氢气、氩气或真空环境下，碳毡化学性质极其稳定，不与 SiC 蒸气（Si, Si₂ C, SiC₂ 等）、石墨坩埚或发热体发生反应。
- 抗氧化性差：这是其主要弱点。在含氧气氛中，温度超过 400° C 就会开始显著氧化（烧蚀），生成 CO 或 CO₂ 。因此，系统必须在彻底除氧的环境下运行。

4.3.2 高纯度要求

- 杂质含量：用于半导体晶体生长的碳毡必须是高纯级。关键杂质如金属元素（Fe, Al, Ca, Na 等）、灰分、硫的含量必须极低（通常要求总灰分<100 ppm, 优质产品<50 ppm）。
- 影响：高温下，杂质可能挥发并迁移到生长区，掺入晶体中，成为电荷载流子散射中心或深能级缺陷，严重劣化晶体电学性能（如电阻率、载流子寿命）。高纯度是保障晶体本征质量的前提。

4.3.3 出气特性

吸附气体的释放：多孔结构会吸附空气中的水汽、氮气、氧气等。在高温真空下，这些气体会被释放出来，污染生长气氛。

预处理：因此，新碳毡或暴露于空气后的碳毡，在使用前必须进行严格的高温真空烘烤（预烧），以脱除吸附气体和部分易挥发杂质。

4.4 功能化特性

4.4.1 密度与厚度

这是两个最关键的工程设计参数，直接影响隔热效果和热场分布。

密度：通常有低密（如 0.1 g/cm³）、中密、高密（如 0.25 g/cm³）等规格。密度越高，机械强度越好，固态热传导增强，但辐射屏蔽能力也更好。实际应用

中常采用“梯度密度”设计，靠近热源用高密毡以抗高温冲刷和增强辐射屏蔽，外层用低密毡以进一步降低导热。

厚度：直接决定热阻。增加厚度可显著提升保温效果，但会占据更多炉内空间，减少有效容积。需要综合优化。

4.4.2 石墨化程度

石墨化程度即碳纤维在高温 (>2500° C) 下热处理，其无序的乱层碳结构向有序的三维石墨晶体结构转变的程度。它具有如下因素影响：

- 导热性：石墨化程度越高，沿纤维轴向的热导率越高（但毡的整体隔热性主要由孔隙结构决定，受影响较小）。
- 热稳定性：石墨化程度高的纤维更耐高温，高温收缩率更小，使用寿命更长。
- 纯度：高温石墨化过程能进一步驱除杂质，提高纯度。
- 成本：石墨化程度越高，生产工艺能耗越大，成本越高。

4.4.3 力学性能演变

长期在高温下，碳毡会发生缓慢的纤维脆化、结构松弛和轻微收缩。这会导致其保温性能缓慢下降，并可能影响热场稳定性。因此，它是定期更换的消耗品。

更多详细特性可以参考冠合的[碳毡](#)产品参数表。

5、碳毡在 PVT 法晶体生长系统中的应用

本文将聚焦于物理气相传输法，详细拆解碳毡在 PVT 晶体生长系统中的具体应用。

首先，通过一个简化的系统截面图，可以直观理解碳毡的布局：



核心位置解析：

- 侧向保温筒：包裹在石墨坩埚外围，是保温的主体，直接决定径向热损失和温度均匀性。
- 顶部保温盖：位于坩埚上方，控制轴向向上的热损失，与籽晶杆连接处有精密设计，既保证密封又减少热泄漏。
- 底部保温垫/支撑块：支撑整个热场组件，并控制向下的热损失。
- （可选）内部热场调节器：在坩埚与侧向保温层之间，有时会插入特定形状的石墨硬毡或碳毡圆筒，用于精细调节坩埚壁的温度分布。

5.1 热场设计与梯度控制

碳毡是热场设计的物理执行者。

轴向梯度塑造：通过调节顶部、底部和侧方碳毡的厚度与密度，可以精确控制热量散失的路径。例如：

增加底部保温厚度 → 减少底部热损失 → 底部（源料区）温度相对升高。

减少顶部保温厚度 → 增加顶部热损失 → 顶部（籽晶区）温度相对降低。

通过这种“上冷下热”的差异化设计，强化了驱动气相运输所需的轴向温度梯度。

径向均匀性保障：均匀包裹的碳毡层确保了石墨坩埚受热均匀，是实现生长界面等温性的关键。任何局部的碳毡破损、厚度不均或安装缝隙，都会造成“热短路”或冷点，导致晶体径向生长速率不均，引发应力、位错甚至开裂。

5.2 多级复合保温系统的构建

现代 PVT 炉普遍采用“梯度功能”复合保温设计，碳毡是核心材料。

- 内层（高温区）：使用高密度石墨软毡或石墨硬毡。密度高、结构更致密，能更好地抵抗高温气流冲刷，机械强度更高，且其更致密的纤维网络对高温热辐射的屏蔽效果更佳（辐射传热在 $>2000^{\circ}\text{C}$ 时占主导）。
- 外层（中低温区）：使用低密度碳毡。利用其更高的孔隙率，在更低的温度区间（热量经内层衰减后）实现极低的气相和固相导热，将热量进一步“锁住”。
- 优势：这种设计用最低的材料成本和空间占用，实现了最优的综合隔热性能，并针对不同温度区间的传热主导机制进行了优化。

5.3 气流与输运环境的调控

碳毡的多孔结构直接参与生长室内气氛环境的塑造。

渗透与流阻：碳毡层对气体流动构成一定的阻力，有助于在生长室内建立更稳定的、层流化的气流模式，减少湍流。湍流会导致源料蒸气的不规则输运，可能在晶体中形成包裹物或生长条纹。

压力缓冲：在快速抽真空或充气时，碳毡的孔隙可以起到微小的压力缓冲作用。

杂质吸附与释放管理：新碳毡是主要的放气源。规范的预烧工艺（在真空或惰性气氛中加热到高于工作温度并保持）就是为了让碳毡在装炉前彻底释放吸附的气体（ H_2O ， O_2 ， N_2 等），防止其在生长过程中缓慢释放，污染生长气氛。

5.4 机械支撑与系统保护

支撑与定位：石墨硬毡被加工成各种形状的垫块、支柱和圆环，用于精确支撑和定位内部的石墨坩埚、发热体等，确保其同心度和垂直度。

应力缓冲：在升降温过程中，石墨、石英、金属等部件膨胀系数不同。碳毡的柔软性和弹性可以吸收部分应力，避免硬性接触导致部件挤压破裂。这尤其保护了昂贵的石墨坩埚和脆性的 SiC 晶体。

保护感应线圈：有效的碳毡隔热层将线圈区域的温度降至安全范围，防止线圈过热、氧化或绝缘层失效，保障了电气安全和设备寿命。

6、碳毡的选型与设计指南

6.1 选型基本原则

SMART 原则：

Specific（针对性）：针对炉型、晶体尺寸、生长工艺特定要求

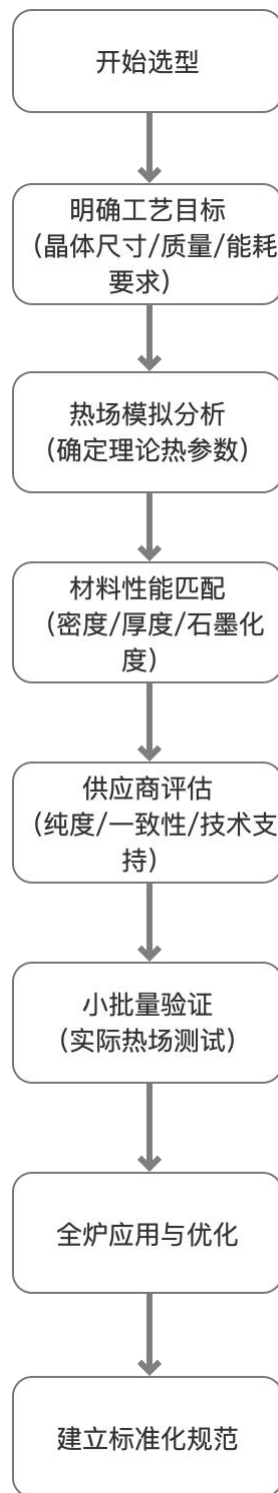
Measurable（可测量）：所有参数可量化检测

Achievable（可实现）：在现有技术和成本范围内

Relevant（相关性）：直接服务于热场性能和晶体质量目标

Traceable（可追溯）：材料批次、性能数据全程可追溯

6.2 选型决策流程



6.3 关键参数选择标准

6.3.1 密度选择

密度等级	范围 (g/cm ³)	适用区域	主要功能	注意事项
低密度	0.08-0.15	外层保温区	极致隔热	机械强度低
		低温缓冲层	轻量化	易压缩变形
中密度	0.15-0.22	中间过渡层	平衡隔热与强度	需控制厚度梯度
		通用保温层	经济性好	
高密度	0.22-0.30	内层热屏蔽层	辐射屏蔽佳	热导率相对较高
		高温直面区	抗气流冲刷 结构稳定	成本较高
石墨硬毡	0.5-1.2	支撑结构件	高刚性	隔热性能下降
		热场调节器	精密成型	需特殊加工

选型建议：

采用梯度密度设计：内层高密度 → 中层中密度 → 外层低密度

密度变化梯度建议：相邻层密度差 ≤ 0.08 g/cm³

对 6 英寸晶体生长：典型配置为 0.25/0.18/0.12 g/cm³ 三层结构

6.3.2 厚度设计规范

总热阻 $R_{total} = \sum (\delta_i / \lambda_i)$

其中： δ_i = 单层厚度， λ_i = 该层有效导热系数

分层厚度建议：

功能区域	推荐厚度范围	设计依据
内层热屏蔽	15-30 mm	满足 2000°C 以上辐射屏蔽需求
主保温层	40-70 mm	提供主要温降（约 1500-2000°C）
外层缓冲	20-40 mm	降至 800°C 以下，保护炉壳
顶部保温	总厚 50-80 mm	强化轴向梯度，通常比侧壁薄 10-20%
底部保温	总厚 60-100 mm	支撑承重+隔热，通常最厚

空间约束调整：

最大厚度 \leq 炉膛有效半径的 35%

最小厚度需保证安装强度：单层 \geq 10mm

6.3.3 石墨化程度选择

石墨化等级	热处理温度	特性优势	适用场景	成本系数
碳毡	$< 1800^{\circ}\text{C}$	成本低 柔软性好	外层低温区 非关键区域	1.0
半石墨化	$1800-2200^{\circ}\text{C}$	纯度提升 收缩率降低	中层通用区 预算有限项目	1.5-2.0
全石墨化	$> 2200^{\circ}\text{C}$	高温稳定性极佳 杂质最少 寿命最长	内层高温区 高质量晶体生长	2.5-3.5

选择标准：

工作温度 $> 2000^{\circ}\text{C}$ 的区域：必须使用全石墨化毡

预期炉次 > 50 次的长寿命需求：推荐全石墨化

对晶体纯度要求极高（如半绝缘衬底）：必须全石墨化

6.3.4 纯度要求标准

半导体级碳毡杂质限值：

杂质元素	最大允许含量 (ppm)	主要危害
总灰分	< 100 (优质 < 50)	引入深能级缺陷
金属杂质 (Fe, Ni, Cr 等)	< 20	影响载流子寿命
碱金属 (Na, K)	< 5	引起晶体污染
硫 (S)	< 10	产生气相腐蚀
氮 (N)	< 50	意外掺杂

验收检测项目：

- ICP-MS（电感耦合等离子体质谱）全元素分析
- 灰分含量测试（850℃空气燃烧法）
- 气体吸附-脱附测试（评估出气特性）

6.4 形状设计与定制方案

6.4.1 标准形状与用途

形状类型	示意图	主要用途	加工要点
平板/片材	□	顶部/底部保温 填充垫片	边缘需倒角防纤维脱落
弧形片/扇形	∩	包裹圆柱形炉膛	弧度需精确匹配炉径
圆筒/套管	□	侧向保温筒	接缝需交错设计
异型定制件	○●	热场调节环 特殊支撑件	通常使用石墨硬毡 CNC 加工

6.4.2 多层复合结构设计

层结构（从内到外）：

第 1 层：2mm 石墨纸（防渗透层）

第 2 层：20mm 高密度石墨毡（0.25g/cm³，全石墨化）

第 3 层：50mm 中密度碳毡（0.18g/cm³，半石墨化）

第 4 层：30mm 低密度碳毡（0.12g/cm³，碳毡）

第 5 层：1mm 石墨纸（保护层）

设计准则：

- 密度梯度递减：内高外低
- 厚度递增：内薄外厚（辐射屏蔽需要较薄的高密层即可）
- 接缝错位：相邻层接缝至少错开 90°

- 固定方式：采用石墨绳缝合或陶瓷扣固定，禁用金属件

6.4.3 关键区域特殊设计

- 籽晶轴通道设计

[方案 A：多级孔径]

外径 $\Phi 150 \rightarrow \Phi 120 \rightarrow \Phi 90 \rightarrow \Phi 65$ （最终孔径）

每级台阶高度 20-30mm

[方案 B：锥形套环]

使用石墨硬毡加工成 15° 锥形套环

与籽晶杆间隙保持 1-2mm

- 观察窗区域设计

使用高密度、低厚度的石墨毡

开孔尺寸比观察窗大 10-15%

边缘加固防止纤维塌陷

- 热电偶引出口

专用石墨套管引导

周围碳毡预压成型孔

孔径比热电偶大 3-5mm

6.5 供应商评估与质量控制

6.5.1 供应商评估清单

评估维度	具体指标	权重
技术能力	1. 最大可生产尺寸	30%
	2. 密度控制精度 ($\pm 5\%$)	
	3. 石墨化设备能力	
	4. 定制加工能力	

评估维度	具体指标	权重
质量体系	1. ISO9001 认证	25%
	2. 批次一致性 (CPK>1.33)	
	3. 检测设备完整性	
	4. 质量追溯系统	
产品性能	1. 杂质含量数据	25%
	2. 高温收缩率 (<3%@2000°C)	
	3. 导热系数实测值	
	4. 力学性能数据	
服务支持	1. 技术响应速度	20%
	2. 样品提供能力	
	3. 现场技术支持	
	4. 供货周期稳定性	

6.5.2 进料检验程序

必检项目清单：

外观检查：颜色均匀、无可见杂质、边缘整齐

尺寸检验：厚度公差±0.5mm，平面度<1mm/m

密度抽检：每批至少 3 个样品，实测值在标称值±5%内

纯度验证：每批次附第三方检测报告，每季度送检一次

性能测试：导热系数测试（至少每年一次对比测试）

抽样标准：

批量<50 件：抽检 10%

批量 50-200 件：抽检 8%，不少于 5 件

批量>200 件：抽检 5%，不少于 10 件

作者：江苏冠合新材料科技有限公司

网址：<https://grand-hope.com.cn>