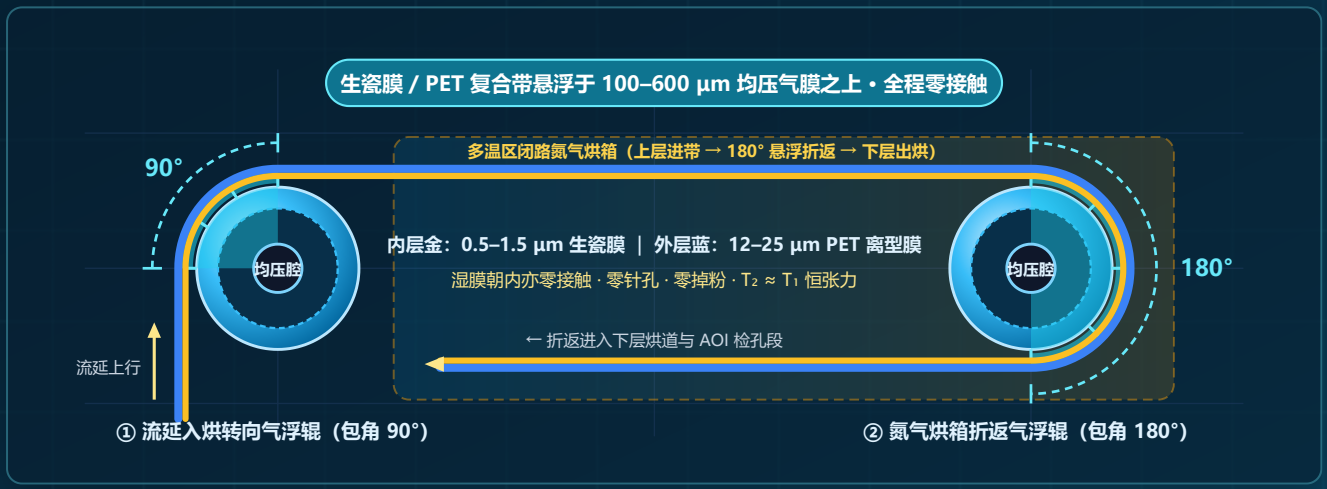
中轴精控
Equilibris System

中轴精控（广州）科技有限公司
Equilibris System (Guangzhou) Technology Co. Ltd.

超薄 MLCC 流延与检孔 · 非接触传输解决方案

多孔介质气浮辊 在MLCC 产线中的应用

零接触 · 零针孔 · 零掉粉 —— 面向 AI 服务器与车规级 1000+ 层高容 MLCC 的 0.5–1.5 μm 亚微米钛酸钡生瓷膜流延、闭路氮气烘箱折返、在线激光测厚 / AOI 针孔检测与微张力收卷全工位的均压气膜支撑方案



高纯微孔陶瓷

百级洁净零掉粉 · 消除剥离摩擦静电

亚微米生瓷膜护膜

100–600 μm 均压气膜 · 波动 < 5 μm

恒张力防叠片错位

死轴零惯量 · $T_2 \approx T_1$ 防载带拉伸蠕变

中轴精控（广州）科技有限公司
Equilibris System (Guangzhou) Technology Co. Ltd.

研发：广州番禺 | 生产：广州南沙

www.zzmc-tec.com

PART 01

走进中轴精控

ABOUT EQUILIBRIS SYSTEM

中轴精控（广州）科技有限公司（英文名 **Equilibris System (Guangzhou) Technology Co. Ltd.**，简称“中轴精控”）是一家专注于**超精密气体静压（气浮）技术**的高新技术企业，主营**气浮轴承、多孔介质气浮辊、气浮平尺、气浮运动台与气浮转台**等核心零部件，并提供**非接触式气浮运动系统整体解决方案。**

公司于 2023 年在广州成立，是**广东工业大学孵化企业**，依托高校与科研团队在气体静压领域的长期技术积累，打通了从**高纯多孔陶瓷 / 多孔石墨材料配方 → 节流元件烧结 → 气浮部件制造 → 超精密运动系统**的完整技术链条，致力于为高端电子陶瓷（MLCC）、半导体、光学膜与新能源装备提供国产化的高精度、零摩擦、零磨损气浮方案。

2023	ISO 9001	广工大	全链条
公司成立	质量管理体系认证	产学研孵化	材料—部件—系统

布局与团队

双基地布局

- **研发总部：**广州市番禺区，毗邻广东工业大学，开展多孔介质材料与三维流固耦合（FSI）算法研发；
- **生产基地：**广州市南沙区，配备瑞士外圆磨床、蔡司三坐标与基恩士共焦激光位移计，承担精密加工、洁净装配与全检。

复合型核心团队

- **材料学博士：**高纯多孔陶瓷 / 多孔石墨配方、CT 孔隙表征与连通微孔结构调控；
- **机械工程博士：**可压缩气体静压润滑理论与张紧薄膜流固耦合（FSI）悬浮仿真；
- **机电控制 + 资深精密加工工程师：**智能自检传感、微张力控制集成与微米级型面加工。

服务领域

高端 MLCC 与电子陶瓷 | 半导体设备 | 光学级离型膜 / 偏光片 | 计量与 AOI 光学检测 | 精密机床 / 工业母机 | 新能源锂电 | 超薄膜卷对卷（R2R）

高容超薄 MLCC 产线客户最关注的三件事

零针孔高良率

0.5–1.5 μm 亚微米生瓷湿膜不粘辊、无微滑移划痕与压入针孔，消除烧结后千层介质击穿短路风险。

千层叠片对位精度

死轴非旋转零惯量 + $T_2 \approx T_1$ 零摩擦传输，消除 12–25 μm 超薄 PET 载带拉伸蠕变与横向缩颈。

高洁净与防静电

烧结微孔陶瓷本征零掉粉、无轴承油脂挥发；非接触彻底消除 3–8 kV 剥离摩擦起电，可选 ESD 抗静电陶瓷。

PART 01

核心技术与产品

CORE TECHNOLOGY & PRODUCTS

技术一：高纯多孔介质材料全工艺自主可控

气浮辊在亚微米生瓷膜产线中的表现取决于节流层的孔隙均匀度与洁净度。中轴精控自主研发**高纯氧化铝（Al_2O_3）等微孔陶瓷**及**细晶自润滑多孔石墨**，结合高精度 CT 孔隙检测与渗透率调控工艺，掌握从粉体配方、烧结到金刚石超精磨与高压吹扫老化的全部关键工艺。

粉体配方设计
造孔体系调控
→
球磨均匀分散
粒径均质化
→
成型与高温烧结
三维连通微孔
→
浸渍渗透精调
匹配目标气隙
→
金刚石精磨
辊面 Ra ≤ 0.4 μm
→
超声清洗吹扫
正向通气老化

达西渗流均压出气

数以百万至亿计连通微孔整面均匀渗出，彻底消除小孔射流尖峰，不吹伤 0.5–1.5 μm 未固化生瓷湿膜。

本征零掉粉、耐溶剂

高纯微孔陶瓷硬度高（HV ≥ 1500）、本征不掉粉、零金属离子析出，耐异丙醇 / 乙醇擦拭，满足百级洁净室要求。

模块化标准件与三变体

36 种标准尺寸常备辊本体 + 两端分级螺纹/止口接口，配转接轴头即可原位替换产线导辊；固定 3 类温材变体覆盖全温区。

技术二：三维流固耦合（FSI）仿真与智能自检气浮

中轴精控自研**三维流固耦合悬浮仿真系统**与**智能自检气浮装置**：内置传感可实时监测悬浮高度与气压状态，气膜刚度高、挤压膜阻尼强，将带材局部高度波动严格锁定在 **< 5 μm**，可直接作为在线激光测厚与 AOI 检孔基准。

在超薄 MLCC 产线中的核心价值

- 与流延机 PLC 闭环联锁，实现“先供气建膜、后走带张紧”；
- 为激光共焦测厚仪与 AOI 检孔相机提供 < 5 μm 非接触稳幅基准；
- 高速绝缘 PET 膜可定制 10^6–10^9 Ω·cm **ESD 抗静电微孔陶瓷。**

产品矩阵（ESGT-AT 标准系列：36 种尺寸 × 6 档包角 × 3 类温材 = 648 款标准型号）

产品线与温材代号	标准结构与温度规格说明	MLCC 产线核心用途
多孔陶瓷气浮辊（ESGT-AT-...-T040-C-...）	高纯微孔陶瓷节流层（C），**仅设 15–40 ℃（T040，NBR 密封）**常温高洁净档，本征零掉粉；可选定制 ESD 抗静电陶瓷	**① 流延入烘 90° 转向、② 常温 N_2 烘箱 180° 折返、③ 激光测厚/AOI 基准（155°）、④ 浮动微张力辊（145°）**
多孔石墨气浮辊（-T040-G- / -T250-G-）	细晶自润滑导电多孔石墨（G），具备 **15–40 ℃（T040-G，NBR）**与 **15–250 ℃（T250-G，FFKM 全氟醚）**两档	**> 40 ℃ 至 250 ℃ 中高温烘道层间 180° 折返、光学级 PET 离型膜有机硅涂布高温烘干转向**
精密气浮轴承与导轨	平面微孔气浮垫、高刚度气浮主轴、气浮平尺/导轨与多轴运动台	狭缝流延精密回转支承、激光测厚无爬行扫描横梁、AOI 飞拍检测平台

PART 02

高容超薄 MLCC 流延制程的挑战与气浮解决方案

CHALLENGES IN ULTRA-THIN MLCC TAPE CASTING & AIR TURN SOLUTION

AI 算力服务器与车规级高容 MLCC 正将钛酸钡（$BaTiO_3$）生瓷膜推向 **0.5–1.5 μm 亚微米厚度、1000–1500 层超薄叠层**，搭载于 **12–25 μm 光学级 PET 离型膜**上进行高速流延、烘干与检孔。在传统接触式导辊与常规小孔吹气辊下，产线面临六大痛点：

① 湿膜粘辊与划伤针孔

流延入烘转向若湿膜朝内或半干翻面，接触过辊 0.1% 的微滑移与微尘即压出划痕与针孔，烧结后引发层间击穿短路。

② 微尘掉粉污染流延腔

传统导辊旋转轴承油脂挥发与金属微磨损掉粉，一旦落入 0.8 μm 生瓷膜即形成导电异物核，导致耐压与 IR 绝缘失效。

③ ~5 keV 剥离摩擦静电

PET 离型膜高速接触剥离产生 3–8 kV 静电荷，强力吸附空气微尘并放电击伤生瓷膜，同时严重干扰在线 AOI 与测厚仪。

④ 小孔射流吹出“火山口”

传统钻孔 / 狭缝吹气辊存在局部高速射流冲击尖峰，极易将未固化亚微米生瓷浆料吹出凹坑、橘皮纹与厚度不均。

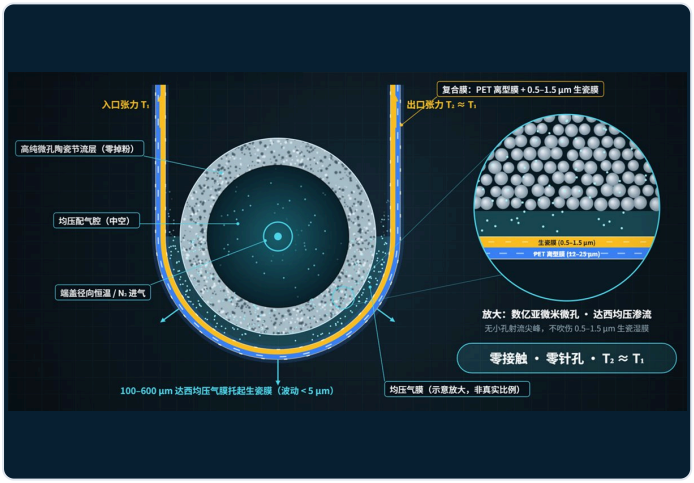
⑤ 载带拉伸蠕变与叠片错位

多根接触辊的轴承启动力矩与转动惯量使张力放大（$T_2 = T_1 e^{\mu\theta}$），拉长超薄 PET 载带，导致千层内电极印刷与叠片错位。

⑥ 机械跳动干扰在线测厚

接触式导辊存在轴承游隙、粘滑微振与热变形跳动（±15–30 μm），无法满足 0.5–1.5 μm 生瓷膜亚微米级在线激光测厚基准。

微孔陶瓷气浮辊工作原理（达西均压渗流）



洁净恒温空气或高纯氮气（N_2）由**端盖外圆径向进气口**进入内部均压配气腔，经**高纯烧结微孔陶瓷节流层**按达西定律整面均匀渗出，在固定辊面与复合带材间形成 **100–600 μm 刚性均压气膜**，托起生瓷膜与 PET 离型膜悬浮转向：

- **亚微米湿膜零接触：**面节流无射流尖峰，不吹伤湿膜、零划伤针孔；
- **死轴零惯量恒张力：**有效摩擦系数 $\mu_{eff} < 10^{-4}$，实现 $T_2 \approx T_1$；
- **高刚度稳幅基准：**挤压气膜阻尼将高度波动锁定在 **< 5 μm**。

为什么在超薄 MLCC 产线中选择多孔陶瓷 / 多孔石墨气浮辊

对比维度	传统接触辊 / 小孔气浮辊	高纯微孔陶瓷气浮辊（T040-C，主力首选）	高密多孔石墨气浮辊（T040-G / T250-G）
气膜与表面质量	接触压痕针孔 / 小孔射流吹坑	**亚微米微孔达西均压，生瓷膜无痕零针孔**	**全表面微孔均压渗流，连续无射流冲击**
洁净度与静电	轴承掉粉 + 剥离 3–8 kV 静电	**本征零掉粉，非接触消除剥离静电（可选 ESD 陶瓷）**	**本征导电不积静电，经封孔吹扫适配高温段**
张力与高度波动	ΔT 累积拉长载带，跳动 >15 μm	**死轴零惯量 $T_2 \approx T_1$，高度波动 < 5 μm**	**死轴零惯量 $T_2 \approx T_1$，热变形小、尺寸稳定**
标准温度分档	高温油脂碳化或金属热变形	**15–40 ℃（T040-C，NBR 丁腈橡胶密封）**	**15–40 ℃（T040-G）与 15–250 ℃（T250-G）**
推荐应用工位	亚微米生瓷膜产线不推荐	**①入烘 90° / ②常温烘道 180° / ③AOI 155° / ④微张力**	**>40–250 ℃ 高温烘道 180° 折返 / 离型膜烘干**

PART 02

全工序应用工位与关键设计

APPLICATION STATIONS & KEY ENGINEERING DESIGN

① 生瓷浆料流延与入烘段

① 流延入烘转向气浮辊（90°）
生瓷湿膜朝向辊面零接触入烘

流延模头前稳幅气浮辊
隔离放卷脉动、消除横向涂布条纹

→

② 闭路氮气烘箱与 AOI 检孔段

② 氮气烘箱折返气浮辊（180°）
高纯陶瓷零掉粉 U 型折返缩短烘道

③ AOI 测厚基准气浮辊（155°）
波动 < 5 μm 兼作激光测厚基准

→

③ 微张力缓冲与母卷收卷段

④ 浮动微张力气浮辊（145°）
竖直滑台零惯量防 PET 拉伸蠕变

离型膜涂布与剥离分切导引段
保护光学级 PET 背面超洁净度

流延入烘段
0.5–1.5 μm 亚微米湿膜

- **① 流延入烘转向气浮辊（走带包角 90°，配 A100 出气档）**：狭缝流延模头涂布钛酸钡浆料后垂直上行，经 90° 均压气膜（150–350 μm）零接触转入水平氮气烘道；生瓷湿膜面朝向辊面亦绝不粘辊、无划痕针孔 **零划伤针孔**
- **流延背辊前稳幅导引**：在进入流延模头前通过高刚度气膜滤除放卷纠偏脉动，避免涂布液桥颤振引发的亚微米横向厚度条纹。

烘箱与检孔段
闭路 N_2 烘道 · 在线 AOI

- **② 闭路氮气烘箱层间折返气浮辊（走带包角 180°，配 A200 出气档）**：位于烘箱三区末端，接入同温高纯氮气（N_2）托举生瓷膜完成 180° U 型折返进入下层烘道，**缩短烘道占地 30%–50%**；≤ 40 ℃ 洁净段选 T040-C 陶瓷，> 40 ℃ 高温段选 T250-G 石墨 **零掉粉缩短烘道**
- **③ 出烘转向兼激光测厚 / AOI 检孔基准辊（走带包角 155°，配 A200 出气档）**：承接下层烘道出口生瓷干膜（PET 面朝辊、生瓷面朝外对准探头），作为**在线激光共焦测厚仪与 AOI 针孔相机**基准，将高度波动锁定在 **< 5 μm**，消除剥离静电干扰 **波动 < 5 μm**

微张力收卷段
2–15 N 超微张力闭环

- **④ 竖直滑台浮动微张力气浮辊（走带包角 145°，配 A150 / A200 出气档）**：装在竖直滑台上作为跳舞缓冲辊（Dancer Roll），**死轴零旋转惯量 + $T_2 \approx T_1$ 零摩擦**瞬时吸收牵引与收卷脉动，防止 12–25 μm PET 载带拉伸蠕变与千层叠片错位 **防叠片错位**
- **光学级 PET 离型膜涂布与后续剥离段**：在离型膜有机硅涂布及生瓷膜剥离分切位采用微孔陶瓷气浮辊，避免背面划伤与静电吸尘。

关键工程设计：六档分区包角、双端等压进气与三类温材体系

六档标准分区包角

标准设 **A060 / A100 / A150 / A200 / A250 / A360** 六档出气区（支持 43°–330° 任意角度定制），仅在包覆扇区出气，节省 45%–60% 高纯氮气耗量。

宽幅双端等压进气

端盖外圆径向 G1/8–G3/8 接口；**W < 600 mm 单端进气，W ≥ 600 mm 双端同时等压进气**，消除宽幅轴向压降，防止超薄载带塌边跑偏。

三类标准温材严选

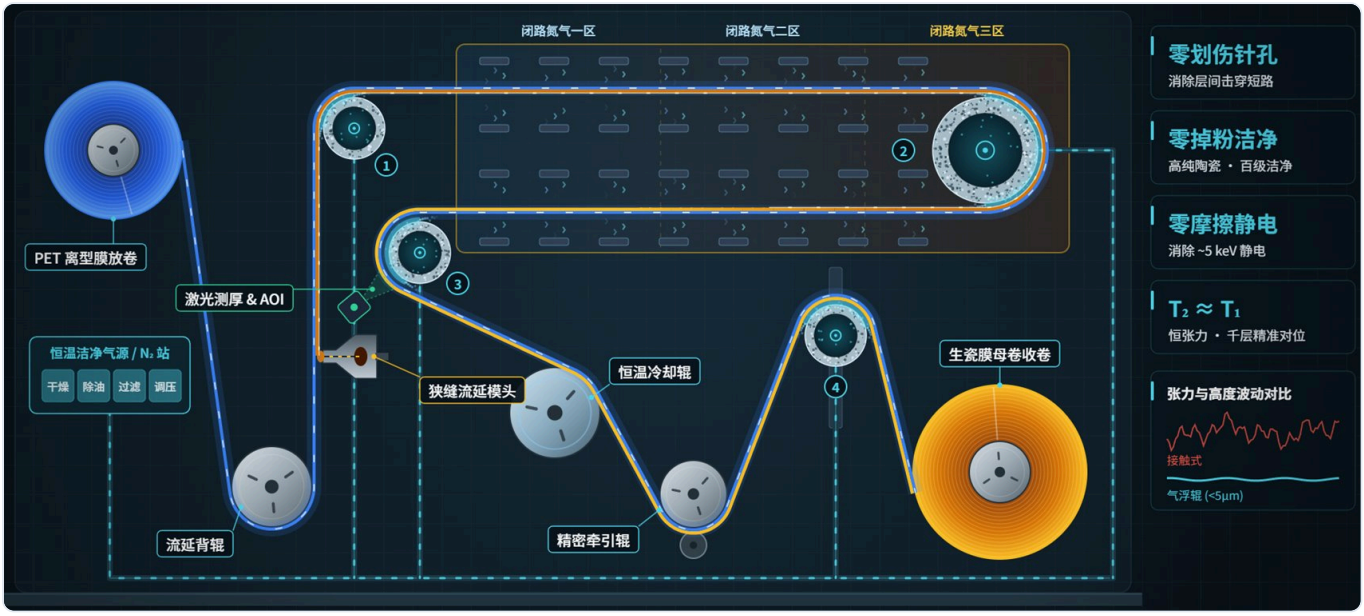
严格执行 **T040-C**（15–40 ℃ 多孔陶瓷，NBR 密封）、**T040-G**（15–40 ℃ 多孔石墨）与 **T250-G**（15–250 ℃ 高温石墨，FFKM 密封）三类组合。

PART 02

MLCC 生瓷膜流延产线走带与气浮辊布置图

WEB PATH LAYOUT & FOUR KEY AIR TURN ROLLER STATIONS (90° / 180° / 155° / 145°)

A. 高容超薄 MLCC 生瓷膜流延与检孔产线穿带全貌 —— 四处关键工位配置微孔陶瓷气浮辊



中轴精控微孔陶瓷气浮辊（①90° / ②180° / ③155° / ④145°）　常规背辊 / 冷却辊 / 牵引辊　PET 离型膜（蓝）+ 生瓷膜（金）复合带

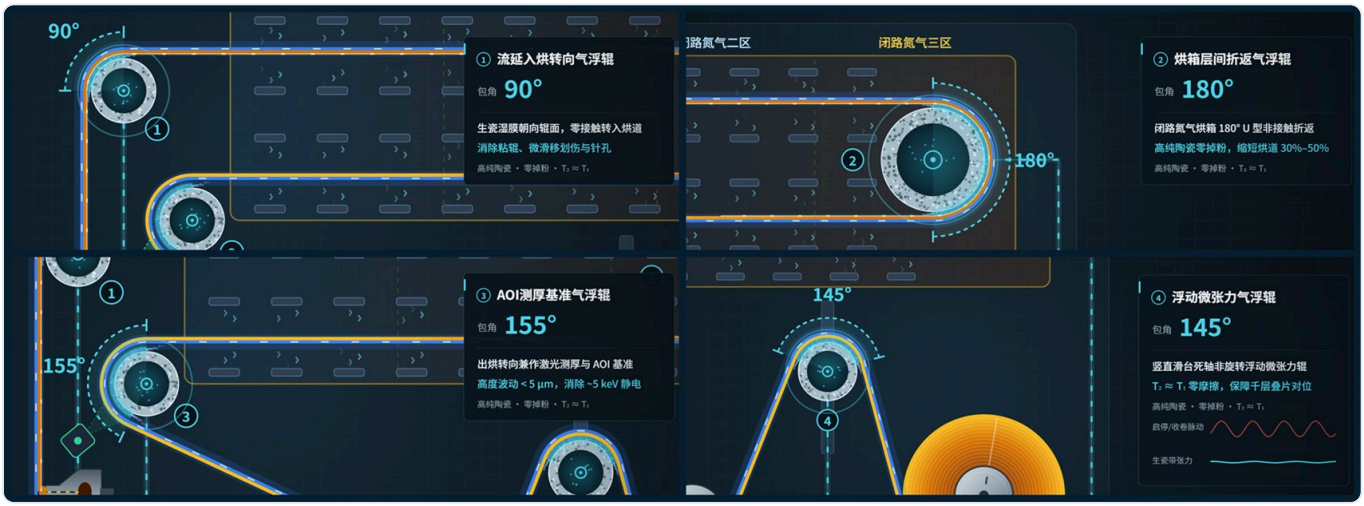
① 流延入烘转向气浮辊（90°）
位于狭缝流延模头上方入烘口，生瓷湿膜朝向辊面，90° 均压气膜零接触托举转入氮气烘道，消除粘辊与划伤针孔

② 氮气烘箱折返气浮辊（180°）
位于闭路氮气烘箱三区末端，180° 半周气膜托举生瓷膜完成上下层烘道 U 型折返，高纯陶瓷零掉粉，缩短烘道 30%–50%

③ AOI 测厚基准气浮辊（155°）
位于下层烘道出口，155° 大包角非接触转向并兼作激光测厚与 AOI 检孔基准，高度波动 < 5 μm，消除 ~5 keV 摩擦静电

④ 浮动微张力气浮辊（145°）
装在牵引与收卷间的竖直滑台上，死轴零惯量 + T₂ ≈ T₁ 零摩擦消除加减速张力脉动，防止 PET 载带拉伸蠕变与千层叠片错位

B. 四工位气浮辊（90° / 180° / 155° / 145°）定向供气包角与功能细节



注：上图为典型高容超薄 MLCC 生瓷膜流延与在线检孔产线穿带原理示意；全线无需替换所有过辊，仅需在四处大包角湿膜转向、氮气烘道折返、AOI 测厚基准与微张力缓冲工位（几何包角分别为 90°、180°、155°、145°，对应标准出气包角档 A100、A200、A200、A150/A200）配置微孔陶瓷气浮辊，由恒温洁净气源/N₂ 站（干燥 → 除油 → 0.01 μm 过滤 → 调压）集中供气，即可消除全线 95% 以上的接触划伤、掉粉与张力蠕变源。

PART 02

选型指引与合作方式

SELECTION GUIDE & COOPERATION

ESGT-AT 标准品选型参数（36 种标准尺寸 × 6 档出气包角 × 3 类温材 = 648 款标准型号）

参数维度	ESGT-AT 标准系列规格范围	MLCC 产线工位选型建议
辊面外径 D	Ø15 / 19 / 25 / 50 / 75 / 100 / 125 / 150 / 160 / 200 mm	④微张力与紧凑转向选 Ø50–100；②氮气烘箱 180° 折返选 Ø100–150
辊面宽度 W	50 – 1600 mm（共 36 种尺寸，总长 L = W + 2T + 2）	按“带材幅宽 + 50–100 mm”选型；流延机常用 300–600 mm，离型膜选 800–1600 mm
出气包角档 A	**A060 / A100 / A150 / A200 / A250 / A360**（支持 43°–330° 定制）	① 90° 入烘选 **A100**；② 180° 折返与 ③ 155° AOI 选 **A200**；④ 145° 微张力选 **A150/A200**
3 类温材变体	**-T040-C-**（陶瓷 40℃）/ **-T040-G-**（石墨 40℃）/ **-T250-G-**（石墨 250℃）	MLCC 百级洁净工位首选 **T040-C** 高纯陶瓷；>40℃ 高温烘道统一选 **T250-G**
进气与安装接口	端盖径向 G1/8 / G1/4 / G3/8；Ø15–25 内螺纹 / Ø50–200 H7 止口	W < 600 mm 单端进气，W ≥ 600 mm 双端进气；配过渡轴头可原位替换传统导辊
气压与稳态气膜	0.20–0.50 MPa 可调；稳态气膜 100–600 μm（波动 < 5 μm）	烘箱内建议接入同温高纯氮气（N_2）；③ AOI 检孔与测厚位调压至高刚度区（< 5 μm）

标准型号编码示例：**ESGT-AT-100-0600-A200-T040-C-0662**（外径 Ø100、辊面宽 600、200° 分区出气、15–40 ℃、多孔陶瓷 C、总长 662 mm，推荐双端 G3/8 进气 + Ø12×8 气管）。官网「产品中心 → 气浮辊 → 多孔介质气浮辊」可在线交互查看全部 648 款标准品的 3D 悬浮高度仿真数据。

MLCC 百级洁净产线安全运行三项规范

① 洁净干燥无油气源

露点 ≤ -20 ~ -40 ℃、残油 ≤ 0.01 mg/m³、终端 0.01 μm 精密过滤（ISO 8573-1 Class 1.2.1），严禁油水堵塞微孔。

② PLC 低压联锁保护

严格执行“先供气建膜、后穿带加张力；先卸张力停机、后断气”；配置储气罐与压力开关防止意外断气擦碰。

③ 待机微正压与带压清洁

待机降温维持 0.05 MPa 氮气微正压防溶剂冷凝倒灌；清洁时保持 0.3–0.4 MPa 正向通气，用无尘布蘸 IPA 单向轻拭。

合作流程

需求沟通
生瓷膜厚 / 幅宽 / 速度
→
FSI 气膜仿真
张力 / 包角 / 悬浮高度
→
方案确认
标准选型 / 轴头定制
→
样辊流延试用
AOI 检孔与张力实测
→
批量全检交付
安装联锁调试
→
持续技术服务
维护指导与通用备件

MLCC 产线选型需提供的信息：PET 离型膜厚度与最大幅宽、生瓷膜厚度与溶剂体系、流延线速度、各工位目标工作张力（N）、穿带包角、氮气烘箱温度、安装空间与既有轴承座跨距、现场洁净气源 / N_2 条件。

让每一米亚微米级生瓷膜都“悬浮”通过

中轴精控以自研高纯微孔陶瓷与三维流固耦合（FSI）智能气浮技术，为 AI 算力与车规级千层超薄 MLCC 流延、氮气烘道折返、在线 AOI 检孔及光学离型膜涂布提供国产化非接触传输方案，欢迎 MLCC 制造企业与流延装备厂商联合验证。

中轴精控（广州）科技有限公司 Equilibris System (Guangzhou) Technology Co. Ltd.
研发：广州番禺 | 生产：广州南沙 | 官网：www.zzmc-tec.com

扫码访问官网

注：文中典型产线布置与参数供方案选型参考，具体规格以中轴精控实际产品规格书及现场工况核算为准。