

推进机械行业零碳工厂建设，夯实节能降碳装备根基

——《关于组织开展国家级零碳工厂建设工作的通知》专家解读之四

近日，工业和信息化部办公厅印发《关于组织开展国家级零碳工厂建设工作的通知》(以下简称《通知》)，部署开展零碳工厂建设工作。机械行业作为国民经济的支柱产业和装备制造业的核心，不仅是零碳工厂建设的重要践行者，也是节能降碳技术装备的重要提供者，将在推进零碳工厂建设工作中发挥重要作用。

机械工业节能与资源利用中心主任 王婧

立足用能特点和装备优势 系统推进机械行业零碳工厂建设

近年来，我国机械行业在产业规模、对外贸易、创新能力等方面取得显著成就，产业节能降碳效果明显，为推进新型工业化奠定了坚实的基础。截至2025年年底，机械行业规模以上企业达13.7万家，占全国规上工业企业总数的23.9%。根据中国机械工业联合会统计，2025年，机械行业规模以上企业增加值同比增长8.2%，增速高于全国工业和制造业2.3个和1.8个百分点。机械行业能源消费以电力为主，碳排放约占全国工业碳排放的5%，脱碳难度相对较小，具备零碳转型的良好基础。

《通知》从“源头减碳—过程脱碳—协同降碳—智能控碳—碳抵销和信息披露”5个方面系统提出了零碳工厂评价指标体系，并以核心指标基本要求和目标要求引导企业分阶段建设、持续提升。机械行业建设零碳工厂应对照核心指标要求，结合行业用能结构、工艺特点和装备基础，从以下几个维度着力推进。

优化用能：加快用能结构绿色低碳转型，实现“源头减碳”。

用能结构转型是零碳工厂建设的关键抓手，以“单位能耗碳排放”“非化石能源消费占比”“非化石能源电力消费物理认定量占比”为核心目标，加快构建以非化石能源为核心的工厂用能体系。具体来说，大力发展非化石能源，鼓励工厂因地制宜开发利用分布式光伏、分散式风电、生物质发电等绿色电力，探索绿电直连，提高可再生能源使用比例；建设工业绿色微电网，集成光伏、风电、余热回收、高效热泵等，实现多能互补、高效协同；提升电气化与清洁供热水平，推广电锅炉、电窑炉、电加热等技术，加快清洁低碳氢能应用，提升电气化水平和可再生能源供热(制冷)比例，从源头大幅削减化石能源消耗与碳排放强度。

技术驱动：大幅提升能源利用效率，实现“过程脱碳”。

技术创新是零碳工厂建设的核心驱动力。围绕“单位工业增加值能耗”“节能装备



图为徐工精密绿色工厂

应用占比”“碳清除率”等指标，推进生产过程中节能降碳。一是加强绿色制造。大力推动绿色制造工艺技术装备产业化应用，面向铸造、机加工、焊接、涂装、热处理、电镀等环节，推广精密铸造、增材制造、近净成形、激光表面改性、干式切削等绿色工艺技术。二是实施节能降碳改造。聚焦生产过程，持续开展节能降碳诊断、技术改造和设备更新，采用高效节能电机、变压器、空压机、风机、泵等通用设备，推动单位产品、工序能耗达到行业先进水平。

链式协同：带动上下游共同降碳，实现全产业链“协同降碳”。

零碳工厂建设需突破厂区边界，重点围绕“开展产品碳足迹分析占比”“零碳供应链管理措施符合项数”等指标，向产业链上下游延伸，实现全产业链协同降碳。一是积极开展产品碳足迹核算，鼓励企业开展产品碳足迹分析，识别产品全生命周期重点碳排放环节，基于核算结果持续优化产品设计与制造工艺，降低机械装备生产碳排放。二是加快零碳供应链建设，优先采购绿色低碳原材料与零部件，推广绿色物流，提高清洁运输

比例，带动产业链上下游协同落实节能降碳措施。三是对机械加工产生的金属切屑、废机油、废旧砂轮等生产废料循环回收，建立废旧装备回收溯源体系，对废旧电机、风电机组齿轮箱、内燃机、工程机械等价值高的核心部件进行再制造。

数智赋能：提升数字化智能化水平，实现工厂运行“智能控碳”。

数字化智能化是零碳工厂建设的重要支撑。依据“能碳管理中心能源数据自动采集率”与“能碳管理中心功能符合项数”等指标要求，加快数字技术与绿色低碳深度融合。一是建设数字化能碳管理中心，运用工业互联网、物联网、大数据等技术，实现能耗与碳排放数据自动采集、精准计量、智能化分析与可视化呈现。二是深化智能优化应用，采用人工智能、数字孪生等技术对生产全流程精准建模，预测运行状态，优化工艺参数，打通不同系统间的数据壁垒。如，推动高效智能电机系统发展，实现电机内部状态实时监测、负载反馈与智能调控；对空压机站、泵站等建立用能预测模型，实现预警与优化控制。

碳抵销和信息披露：提升碳排放信息披露透明度与质量。

碳抵销和信息披露是零碳工厂建设成效可展示、可比较、可验证的重要基础。机械行业产品种类多、供应链层级多、应用场景广，企业低碳转型成效不仅体现在自身工厂碳排放下降，也会通过装备产品和供应链协同向上下游传导。机械行业企业应围绕能源消费、碳排放水平、重点产品碳足迹、节能降碳措施和零碳工厂建设成效等内容，建立规范化数据记录、核算分析和披露机制，确保数据来源清晰、核算口径一致、支撑材料完整、结果可追溯。通过高质量信息披露，企业在增强零碳工厂建设透明度和公信力的同时，也可以更好地回应客户低碳采购、绿色供应链管理和国际市场规则变化带来的新要求。

夯实零碳工厂建设装备基础 持续强化产业赋能

机械行业作为制造业节能装备的核心

玻璃基板封装进入量产前夜

(上接第1版)

于宗光表示，目前行业头部企业量产、送样的TGV玻璃基板产品，已通过客户严苛的可靠性测试，在高低温循环、力学冲击、弯折适配等多项测试中均实现指标达标。这意味着玻璃已经能够稳定适配芯片封装、光模块等高端场景的工业化应用，脆性问题已不再制约规模化量产落地。当前行业核心竞争壁垒，已从“解决脆性基础问题”转向“高精密通孔良率、多层互联工艺、规模化成本控制”的高阶竞争。

TGV成为玻璃基板 封装量产关键

阻碍玻璃基板封装量产的“脆性基础问题”基本解决后，下一个要解决的便是“高精密通孔良率”难题。TGV(玻璃通孔)工艺良率直接决定整板良率，是当前玻璃基板封装实现产业化过程中面临的主要瓶颈。

作为玻璃基板实现垂直方向电互连的唯一途径，TGV的性能直接决定了封装密度和信号完整性；TGV涉及超精密通孔、高深宽比填充、界面可靠性控制等技术，是玻璃基板区别于有机基板的核心技术差异点。在玻璃基板加工成本中，TGV通孔和金属化也是占据成本最高的部分，这两个环节的成本占比超过40%。

于宗光表示，突破TGV工艺限制、实现玻璃基板量产是个系统工程，需要依靠“工艺算法+制程体系+设备适配+良率管控”的综合能力提升。TGV设备可以国产化采购或定制满足，但适配国产场景的工艺配方、制程逻辑、良率管控体系、全流程

整合能力是长期积累的核心壁垒。

该技术需实现的核心突破集中体现在三个方面：

其一，高精度通孔成型工艺，这是TGV的第一道核心壁垒。传统机械与物理去除工艺、激光直接消融加工技术、光敏玻璃诱导成孔技术存在精度不足、通孔侧壁粗糙、深浅不均等问题，无法满足高端封装需求。激光诱导深度刻蚀工艺(LIDE)被认为是当前实现大尺寸、高密度TGV批量制造的最优技术路径。该工艺采用“先改性、后刻蚀”的加工策略，从而形成高质量的通孔。

其二，高可靠通孔金属化工艺。通孔成型后，均匀、致密、高附着力的金属镀层是实现稳定导通的关键。在这个环节中，行业普遍存在良率低的痛点，通孔难以实现填充。

其三，多层RDL互联与键合工艺。高端先进封装需要多层RDL与高密度互联，但由于玻璃机械强度低、与多层布线介质热失配大，复合基板翘曲甚至撕裂是主要问题。易碎是TGV工艺使用中最需关注的问题。“玻璃通孔中需要填充铜引线，但是铜的膨胀系数比玻璃大很多。在温度升高过程中，膨胀的铜将挤碎玻璃或者破坏玻璃上的电路。”张继华表示，“为解决这一问题，我们正在验证各种解决方案，例如在材料层面提高玻璃强度和热膨胀系数，或者在工艺层面玻璃中间做一个柔性缓冲层。”

2027年将是玻璃基板 封装订单释放期

过去两年，全行业在推动玻璃基板技术成熟方面做了诸多努力：通过

基础工艺攻关，实现了多材质玻璃的高精度通孔加工适配；上下游配套产业链逐渐完善，工艺路线逐渐清晰，通孔不均、金属化脱落、叠层翘曲等核心良品问题得到有效改善；场景落地提速，玻璃基板技术在光通信、MLED、AI芯粒集成、射频封装等多元应用场景成功适配。此前制约产业化的通孔加工、金属化、多层RDL互联、键合适配等核心工艺，经过多年的集中攻关已实现较大幅度的迭代升级。

玻璃基板封装何时量产？对于这个问题，行业里已基本形成共识：2026年为产业验证窗口，2027年订单逐步释放，2028年进入起量阶段。海外巨头方面，英特尔计划2026年实现小批量试产，2027年实现规模化放量；台积电预计2027年试产，2028年下半年实现规模化量产。国内部分头部企业已建成中试产线并实现小批量供货，向规模化量产稳步推进。

于宗光表示：“玻璃基板封装技术目前正处于从‘技术验证’向‘小批量量产’过渡的关键阶段。今年是‘关键验证期’，而不是‘全面量产元年’。”

从产业化落地节奏来看，中高端AI算力芯片、异构芯粒集成芯片、MLED高端显示芯片以及光通信将率先实现玻璃基板封装的规模化应用。其核心原因在于：这类场景对基板高频高速、低损耗、高平整度、高稳定性的需求最为迫切，传统有机基板性能瓶颈最为突出，玻璃基板的替代性价比优势显著，且产品验证周期更短、落地门槛更低。

除了面向中高端算力芯片的应用场景外，张继华表示，玻璃基板也能在光模块的光纤阵列(FAU)中发

挥作用，因为这个场景所需的玻璃基板结构件生产的技术链条更短——只需要打孔，不需要做填充、布线，因此有望成为最先量产的产品类型。FAU的功能，可以理解为连接光模块与外部光纤的接插件——能够把光纤的光导入到光模块中。当然，二维FAU在基板厚度、位置精度、通孔圆度、异型结构等方面提出了新的要求。采用玻璃基板生产FAU的产线正在建设，此类产品也正处于验证阶段，预计2027年实现投产。

我国有望在玻璃基板领域 实现全本土化

展望未来，全球玻璃基板封装将迎来百亿美元的增长规模。据Omdia测算，2026年全球封装玻璃基板市场规模将达186亿美元，2030年有望突破320亿美元，年复合增长率约14.5%。

从发展现状来看，包括核心工艺、制程技术、量产装备在内的TGV玻璃基板产业链关键环节，全球各地发展几乎处于同一起跑线，加上我国企业已经陆续布局，因此我国具备在这个领域实现全本土化的机会。

于宗光表示，总体来看，我国在TGV玻璃基板赛道已具备局部领跑、整体并跑的国际竞争力。相比较而言，海外企业通过早期专利布局形成了先发优势，但产业化节奏保守，工艺适配性弱、成本偏高；国内企业在混合刻蚀、多层叠层、玻璃基整体封装方案等领域已形成自主专利壁垒与技术优势，多项工艺指标达到或优于海外同行水平。

但在高端检测设备和特种化学品方面，国内企业的赶超需要更长时间。张继华表示，在设备方面，用于玻璃基板封装的激光器、通孔检测、镀膜分析等设备主要依赖进口，国内暂时缺少成熟的量产产品。原材料则以康宁、肖特等厂商的产品为主，本土化正在逐步推进中，并已取得可喜进展。

《智能网联汽车 自动驾驶系统安全要求》 强制性国家标准发布

(上接第1版)同时，明确车辆制造商应在自动驾驶系统研发验证过程中组织开展相应的仿真、场地及道路试验，并确保相关试验资源和条件满足研发验证要求。二是强化系统动态驾驶任务执行能力，保障使用安全。标准要求自动驾驶系统安全水平应至少达到正在承担动态驾驶任务的合格且专注驾驶人的水平，同时不得对用户及其他道路使用者造成不合理安全风险。在此基础上，明确系统在不同场景下执行动态驾驶任务的安全要求，并明确最小风险策略的触发和执行要求。三是规范人机交互与用户告知要求，防范误用滥用风险。标准要求自动驾驶系统的激活和退出过程应安全，并明确就绪、激活、退出等状态信息及信号的提示规范。对于L3级自动驾驶系统还应具备驾驶人接管能力监测功能。同时，要求车辆制造商除产品使用说明书外，还可通过官网、车载显示终端等渠道清晰告知用户驾驶自动化等级、能力范围、局限性、控制策略及用户角色转换等关键信息，引导用户正确认知与使用。四是完善多维度检验检测方法，保障标准可落地实施。标准构建“企业保障能力检验+安全档案检验+确认性试验”多位一体的检验检测体系，对企业安全保障能力和产品安全档案的完整性、鲁棒性等进行检验。在此基础上，由第三方检测机构依据GB/T 41798《智能网联汽车自动驾驶功能场地试验方法及要求》、GB/T 44719《智能网联汽车自动驾驶功能道路试验方法

及要求》和GB/T 47025《智能网联汽车 自动驾驶功能仿真试验方法及要求》推荐性国家标准，综合采用场地试验、道路试验、仿真试验等方法开展确认性试验，确保对自动驾驶系统实际能力进行全面检验检测。

与此同时，我国牵头制定的联合国自动驾驶系统全球技术法规(ADS GTR)于2026年6月正式获批发布。与ADS GTR相比，我国标准对L3级、L4级自动驾驶系统提出更为细化的技术要求，进一步明确不同级别产品的安全边界，完善用户使用告知、操作培训等要求，创新性构建了统一的标准化学试验场景体系，在保持核心技术要求与国际法规协调一致的同时，更贴合我国道路交通环境与行业管理实际需要，更具有落地实施的可行性。

《智能网联汽车 自动驾驶系统安全要求》的发布实施，为自动驾驶产品明确了统一的安全准入基线，对规范自动驾驶技术研发应用、提升道路交通安全水平、压实企业安全主体责任、护航产业健康可持续发展具有重要意义。据介绍，下一步，工业和信息化部将扎实做好标准的宣贯解读与实施执行，强化智能网联汽车产品准入管理，保障自动驾驶系统安全合规应用；同时，将持续完善自动驾驶试验方法、安全事件数据交互与管理系统等配套标准，加快构建完善的智能网联汽车监管体系，加速自动驾驶技术的产业化规模化进程，引领我国智能网联汽车产业高质量发展。(耀文)