

# 高性能润滑材料与功能化学添加剂 工程应用白皮书

面向高端制造、能源开采与复杂工况的材料设计、验证及全寿命治理

作者：张耀中

支持单位：云拓智库·云拓数据

完成时间：2026.04

# 出版说明

|      |                        |
|------|------------------------|
| 研究主题 | 高性能润滑材料与功能化学添加剂工程应用白皮书 |
| 作者   | 张耀中                    |
| 研究领域 | 润滑材料与功能化学添加剂工程         |
| 研究支持 | 云拓智库 · 云拓数据            |
| 发布日期 | 2026 年 4 月             |

## 编制与使用说明

本白皮书围绕润滑材料、功能化学添加剂及其在制造装备、内燃机、能源开采和高温系统中的工程应用，讨论材料设计、验证、生产、导入和全寿命治理。

政策、法规和标准均通过发布机构或标准组织的公开渠道核验；文末列示发布机构、准确题名、日期、文号或标准号及直达链接。

本书用于行业研究、技术交流和工程方法参考，不替代设备制造商许可、法定检测、现场安全评价或针对特定项目出具的专业意见。

资料与标准状态核验截至 2026 年 4 月 20 日。标准、法规和产品要求如有修订、代替或废止，应以应用时最新有效文件为准。

引用和传播应注明书名与来源，保留适用条件和完整语境，不得删改为对特定产品、项目、企业或机构的认证与背书。

封面图片：封面摄影：Bergstrand Consultancy / Unsplash（依据 Unsplash License 使用）。图片使用遵循相应素材许可条款，仅用于本白皮书版面呈现。

# 目录

---

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 01 执行摘要 .....         | 11 |
| 从消耗品到工程系统 .....       | 11 |
| 本书的研究对象 .....         | 11 |
| 关键判断 .....            | 11 |
| 实施主线 .....            | 11 |
| 面向产业的价值 .....         | 12 |
| 证据链决定结论强度 .....       | 12 |
| 标准变化带来的窗口 .....       | 12 |
| 应用边界必须被管理 .....       | 12 |
| 02 研究背景、范围与方法 .....   | 12 |
| 研究背景 .....            | 12 |
| 研究边界 .....            | 13 |
| 目标读者 .....            | 13 |
| 研究方法 .....            | 13 |
| 术语与判断口径 .....         | 13 |
| 信息时点 .....            | 13 |
| 研究不替代工程批准 .....       | 14 |
| 跨学科方法 .....           | 14 |
| 03 润滑材料产业链与工程对象 ..... | 14 |
| 产业链的多层结构 .....        | 14 |
| 工程对象不是单一油品 .....      | 14 |
| 参与者的责任边界 .....        | 14 |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 产品价值的两种形成方式 .....            | 15        |
| 从牌号交易转向能力交易 .....            | 15        |
| 行业的批次与场景特征 .....             | 15        |
| 知识在产业链中容易丢失 .....            | 15        |
| 服务能力成为差异化来源 .....            | 15        |
| <b>04 摩擦学机理与失效模式 .....</b>   | <b>16</b> |
| 润滑状态的连续变化 .....              | 16        |
| 黏度与油膜的两难 .....               | 16        |
| 化学膜与表面竞争 .....               | 16        |
| 污染物如何放大失效 .....              | 16        |
| 以失效模式组织验证 .....              | 16        |
| 热量是重要诊断信号 .....              | 17        |
| 表面工程改变润滑需求 .....             | 17        |
| 失效拆解需要保存证据 .....             | 17        |
| <b>05 基础油与载体材料体系 .....</b>   | <b>17</b> |
| 基础油决定配方底盘 .....              | 17        |
| 黏度等级只是起点 .....               | 17        |
| 溶解性与沉积风险 .....               | 18        |
| 合成路线的适用边界 .....              | 18        |
| 供应稳定性与替代验证 .....             | 18        |
| 生物基与可再生路线 .....              | 18        |
| 基础油混配的设计价值 .....             | 18        |
| 选型记录应可追溯 .....               | 19        |
| <b>06 功能化学添加剂体系与协同 .....</b> | <b>19</b> |
| 添加剂功能的组合逻辑 .....             | 19        |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 抗氧化体系需要分阶段设计 .....    | 19 |
| 极压抗磨与材料相容 .....       | 19 |
| 少量组分也可能支配结果 .....     | 19 |
| 协同与拮抗的验证矩阵 .....      | 20 |
| 添加剂会在使用中消耗 .....      | 20 |
| 灰分与排放后处理约束 .....      | 20 |
| 化学品法规与沟通 .....        | 20 |
| 添加剂预混与加料窗口 .....      | 20 |
| 07 复合、纳米与稀土功能材料 ..... | 21 |
| 复合化的真实目标 .....        | 21 |
| 纳米材料首先是分散问题 .....     | 21 |
| 稀土功能材料的工程边界 .....     | 21 |
| 表征手段要服务于假设 .....      | 21 |
| 产业化需要额外的质量控制 .....    | 22 |
| 摩擦膜需要动态理解 .....       | 22 |
| 计量与取样面临新挑战 .....      | 22 |
| 环境健康风险不可省略 .....      | 22 |
| 08 配方设计与性能平衡 .....    | 22 |
| 从需求表而不是原料表开始 .....    | 22 |
| 建立多目标性能地图 .....       | 23 |
| 试验设计减少盲目迭代 .....      | 23 |
| 成本评价应覆盖全寿命 .....      | 23 |
| 配方冻结与变更控制 .....       | 23 |
| 鲁棒性优于极值 .....         | 23 |
| 决策记录减少反复 .....        | 24 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 放大验证反哺配方 .....             | 24        |
| <b>09 原料质量与供应链管理 .....</b> | <b>24</b> |
| 原料规格必须连接配方功能 .....         | 24        |
| 供应商准入不止是文件审核 .....         | 24        |
| 储运是质量形成的一部分 .....          | 24        |
| 替代料要按风险分级 .....            | 25        |
| 供应链数据形成预警 .....            | 25        |
| 来料取样要覆盖代表性 .....           | 25        |
| 防错与真实性核验 .....             | 25        |
| 双来源策略需要持续维护 .....          | 25        |
| <b>10 生产工艺与过程控制 .....</b>  | <b>26</b> |
| 调和工艺决定成品状态 .....           | 26        |
| 设备清洁与交叉污染 .....            | 26        |
| 在线参数与离线检测协同 .....          | 26        |
| 过滤不等于越精越好 .....            | 26        |
| 批次放行与留样 .....              | 26        |
| 从小试到量产的尺度效应 .....          | 27        |
| 包装也会影响稳定性 .....            | 27        |
| 偏差处理形成改进闭环 .....           | 27        |
| <b>11 实验室评价与台架验证 .....</b> | <b>27</b> |
| 建立分层证据链 .....              | 27        |
| 方法选择必须对应风险 .....           | 27        |
| 重复性与样品管理 .....             | 28        |
| 台架设计贴近任务周期 .....           | 28        |
| 从验证结果到应用决定 .....           | 28        |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 测量不确定度影响比较 .....               | 28        |
| 实验室质量保证 .....                  | 28        |
| 建立台架与现场关联 .....                | 28        |
| 试样表面与磨合条件 .....                | 29        |
| <b>12 内燃机润滑系统应用 .....</b>      | <b>29</b> |
| 内燃机的多重任务 .....                 | 29        |
| 黏度与燃油经济性的边界 .....              | 29        |
| 沉积、烟炱与氧化控制 .....               | 29        |
| 标准与认证的作用 .....                 | 29        |
| 车队与设备端的闭环 .....                | 30        |
| 发动机类型差异 .....                  | 30        |
| 排放系统与化学约束 .....                | 30        |
| 换油周期的证据 .....                  | 30        |
| <b>13 工业齿轮、轴承与液压系统应用 .....</b> | <b>30</b> |
| 齿轮系统的负荷谱 .....                 | 30        |
| 轴承对清洁度高度敏感 .....               | 31        |
| 液压油兼具介质与润滑属性 .....             | 31        |
| 泡沫、空气与水分 .....                 | 31        |
| 现场换油与混油控制 .....                | 31        |
| 润滑脂的独立评价 .....                 | 31        |
| 电驱设备的新要求 .....                 | 31        |
| 润滑系统冲洗与验收 .....                | 32        |
| 冷却与油量共同影响结果 .....              | 32        |
| <b>14 钻井液及能源开采相关应用 .....</b>   | <b>32</b> |
| 钻井液是多功能工程流体 .....              | 32        |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 高温高压改变材料行为 .....               | 32        |
| 润滑性与井壁稳定的平衡 .....              | 32        |
| 现场监测与用量控制 .....                | 33        |
| 环境与井控边界 .....                  | 33        |
| 固相控制影响润滑判断 .....               | 33        |
| 储层保护与后续作业 .....                | 33        |
| 现场试验的快速性与可靠性 .....             | 33        |
| 化学污染与兼容性 .....                 | 33        |
| <b>15 高温传热与极端工况应用 .....</b>    | <b>34</b> |
| 高温介质的双重老化 .....                | 34        |
| 传热与润滑需求并不相同 .....              | 34        |
| 极端温度下的材料相容 .....               | 34        |
| 极端负荷与间歇运行 .....                | 34        |
| 安全设计优先于寿命延长 .....              | 34        |
| 低温与高空环境 .....                  | 35        |
| 辐射、真空及特殊介质 .....               | 35        |
| 热系统的取样位置 .....                 | 35        |
| 耐燃液压液的专用管理 .....               | 35        |
| <b>16 状态监测、换油策略与智能运维 .....</b> | <b>35</b> |
| 监测对象包含油和设备 .....               | 35        |
| 取样质量决定诊断上限 .....               | 35        |
| 限值与趋势各有作用 .....                | 36        |
| 换油终点应由风险决定 .....               | 36        |
| 数字化运维的落地条件 .....               | 36        |
| 在线传感器需要维护 .....                | 36        |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 润滑路线和器具管理 .....         | 36 |
| 诊断治理 .....              | 37 |
| 17 绿色设计、再生利用与环境治理 ..... | 37 |
| 绿色性能需要全生命周期定义 .....     | 37 |
| 可生物降解不等于无风险 .....       | 37 |
| 废矿物油的分类与流向 .....        | 37 |
| 再生利用的技术与质量边界 .....      | 37 |
| 环境治理与运行改进相结合 .....      | 38 |
| 包装与物流减量 .....           | 38 |
| 泄漏预防优先 .....            | 38 |
| 环境声明的审慎原则 .....         | 38 |
| 18 典型场景与工程实施路径 .....    | 38 |
| 场景一：重载齿轮箱升级 .....       | 38 |
| 场景二：液压系统清洁度治理 .....     | 39 |
| 场景三：高温链条与传热系统 .....     | 39 |
| 场景四：钻井液润滑改进 .....       | 39 |
| 企业级推广路线 .....           | 39 |
| 场景五：纳米添加剂放大 .....       | 39 |
| 阶段门与决策人 .....           | 39 |
| 培训与现场反馈 .....           | 40 |
| 19 质量、安全、合规与效果评价 .....  | 40 |
| 质量体系覆盖整个变更链 .....       | 40 |
| 化学品与过程安全 .....          | 40 |
| 标准状态与合规声明 .....         | 40 |
| 效果评价需要基线 and 对照 .....   | 40 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 风险治理与停止规则 .....            | 41        |
| 第三方检测的边界 .....             | 41        |
| 审计关注证据闭环 .....             | 41        |
| 数据安全与商业秘密 .....            | 41        |
| 投诉、召回与现场隔离 .....           | 41        |
| <b>20 趋势、推广价值与结论 .....</b> | <b>42</b> |
| 材料技术走向定向设计 .....           | 42        |
| 标准体系持续更新 .....             | 42        |
| 数据驱动但不过度承诺 .....           | 42        |
| 推广价值来自方法复制 .....           | 42        |
| 结论与行动建议 .....              | 42        |
| 电气化带来新的材料问题 .....          | 43        |
| 服务模式走向共同负责 .....           | 43        |
| 三阶段行动路线 .....              | 43        |
| 人才与组织能力 .....              | 43        |
| <b>参考来源 .....</b>          | <b>44</b> |