

**别只关注螺栓强度：
技术清洁度是高端装备失效的隐形核心风险**

一、前言：为什么螺栓清洁度已成为强制性核心质量指标

传统紧固件品质管控仅聚焦抗拉强度、硬度、扭矩、镀层防腐等力学与防腐性能，但在**新能源汽车、液压装备、航空航天、自动驾驶、精密医疗设备**领域，微米级微观颗粒污染引发的批量失效事故频发，技术清洁度（Technical Cleanliness）正式升级为与强度同等重要、甚至优先级更高的关键特性。

肉眼完全无法识别的金属碎屑、镀层粉末、切削粉尘、纤维、油污微粒，藏匿于螺栓螺纹牙底、垫片贴合面、螺栓头部倒角、盲孔缝隙内，装配后会随振动、热胀冷缩脱落进入设备内部，引发不可逆故障：

1. **新能源高压系统（电池包、电控、电机）**：导电金属微粒刺穿电芯隔膜，造成内部短路热失控；高压端子间游离颗粒增大接触电阻，局部过热烧蚀连接件；微小金属屑搭接正负极产生电弧，直接触发 **BMS** 误告警、高压回路熔断，存在起火爆炸安全隐患。
2. **液压 / 流体设备**：颗粒堵塞阀组节流孔、划伤密封面，导致泄漏、动作卡滞、油压波动，大幅缩短泵体、油缸使用寿命。
3. **自动驾驶精密感知部件**：粉尘颗粒附着激光雷达、摄像头镜片，造成成像失真、测距失效。
4. **航空航天精密机构**：硬质金属碎屑磨损轴承、伺服机构，引发飞行器动作失灵，属于一级安全风险。

行业共识：**只要螺栓用于高压导电、精密流体、光学传感、航空动力点位，必须在图纸明确标注清洁度等级、检测标准、颗粒限值**，无清洁度要求的紧固件禁止用于高可靠安全部件。

二、全球权威螺栓清洁度执行标准体系（权威机构原文依据）

螺栓无单独专属清洁度国标 / 国际标准，行业统一复用零部件通用清洁度规范，四大主流体系覆盖全部制造场景：

（一）汽车行业（新能源乘用车 / 商用车主流强制标准）

1. **ISO 16232:2018《道路车辆 零部件和系统清洁度》（国际通用母标准）** 全球汽车行业基准方法标准，国内等同转化为 **GB/T 41481-2022**（2022-11-01 实施，国

家标准化管理委员会发布，可在国家标准信息公共服务平台免费查阅全文）。规范完整颗粒萃取、过滤、重量法、颗粒计数法、空白值校准、检测报告要求，适用于电池包螺栓、电机连接螺栓、底盘液压紧固件全品类。判定采用**颗粒数量 + 污染物总重量双重限制**，任一指标超标即判定不合格。

2. VDA 19 系列（德国汽车工业协会 VDA-QMC，主机厂落地实操标准）

VDA 19.1：零部件出厂清洁度检测规范（2025 第三版最新），规定螺栓螺纹、异形结构萃取方案、衰减试验判定、颗粒分级表（Class A/B/C/K0.3 等高洁净等级），是德系车企、新能源头部企业来料检验唯一执行依据；

VDA 19.2：装配全流程清洁管控标准，覆盖螺栓开封、工装、人员、工位环境、装配后除尘，解决来料合格但装配引入二次污染问题。补充：VDA 19 分级侧重实操限值，ISO 16232 侧重统一检测方法论，项目图纸通常标注“按 ISO16232 执行，限值遵循 VDA19.1 等级”。

（二）航空航天 / 军工高端紧固件标准

- 1. NAS 1638、IEST-STD-CC1246E：航空精密零部件颗粒分级，航空螺栓洁净等级对标 VDA 最高 K0.3 级，管控 0.5μm 超细颗粒；
- 2. GJB 5964：国内航天产品清洁度军用标准，对钛合金、高温合金螺栓有金属颗粒零容忍要求。

（三）通用液压工业标准

ISO 4406 流体清洁度代码，配套液压阀体螺栓清洁度管控，侧重油路内游离颗粒限值。

关键标准区分总结
表格

标准体系	适用行业	核心侧重点	螺栓管控重点
GB/T41481-2022/ISO 16232	国内整车、新能源设备	统一检测方法、报告规范	螺纹颗粒提取、空白校准、双维度判定
VDA19. 1/19. 2	德系车企、动力电池厂	分级限值、生产 / 装配全流程管控	高压螺栓超高洁净等级、衰减验证
NAS1638/GJB5964	航空、军工精密装备	超细硬质颗粒、离子污染	高温合金、钛合金特种紧固件

三、螺栓清洁度分级与典型限值要求

标准仅规定检测方法，具体颗粒限值由主机厂图纸 / CSR 客户规范定义，行业通用三级洁净等级，覆盖绝大多数螺栓应用场景：

1. 普通机械级（VDA Class C，非精密、非高压结构螺栓）

适用：车身普通钣金连接、非承载低压支架螺栓 限值参考：单颗螺栓污染物总重量 $\leq 0.3\text{mg}$ ； $\geq 100\mu\text{m}$ 颗粒 ≤ 200 个， $\geq 50\mu\text{m}$ 颗粒 ≤ 2000 个；不允许存在 $\geq 320\mu\text{m}$ 硬质金属颗粒。

2. 中高精密级（VDA Class B，电机、底盘液压、储能辅件螺栓）

适用：驱动电机壳体螺栓、液压管路接头紧固件、储能低压模组螺栓 限值参考：总污染物 $\leq 0.1\text{mg}$ ； $\geq 100\mu\text{m}$ 颗粒 ≤ 100 个， $\geq 50\mu\text{m}$ 颗粒 ≤ 1000 个；禁止 $\geq 200\mu\text{m}$ 金属碎屑。

3. 超高洁净安全级（VDA K0.3，动力电池包、高压电控、自动驾驶核心部件螺栓）

新能源行业强制最高等级，管控导电微粒为核心目标：

1. 污染物总重量 $\leq 0.03\text{mg}$ / 颗；
2. 粒径分级计数： $\geq 50\mu\text{m}$ 颗粒 ≤ 100 个， $\geq 100\mu\text{m}$ 颗粒 ≤ 10 个；
3. 硬性红线：不允许存在 $\geq 150\mu\text{m}$ 金属导电颗粒；涂层碎屑、切削铁粉、铝屑一律判定致命缺陷；
4. 额外管控：需做 SEM 能谱分析，识别颗粒材质，杜绝铜、铁、铝导电污染物残留。

检测核心判定规则（标准强制要求）

1. 空白值校准：检测前做空白试验，空白滤膜杂质重量不得超过产品允许总重量的 10%；大粒径金属颗粒空白区间减半判定，消除设备、溶剂自带杂质干扰；
2. 衰减试验（VDA19.1 强制）：同一螺栓连续 6 次萃取清洗，单次颗粒总量占总累计量比值 < 0.1 ，证明清洗萃取工艺完全剥离螺纹死角污染物，检测数据有效，否则更换清洗方案重测；
3. 螺纹死角优先萃取：检测重点抓取螺纹牙底、头部法兰面、垫片贴合缝隙，该区域污染物权重占总限值 70% 以上。

四、螺栓全生命周期清洁度系统化管控方案（从原料到装配下线）

清洁度无法依靠人工擦拭管控，必须搭建**源头工艺→出厂清洗→洁净检测→真空包装→来料存储→装配作业→下线除尘**全链条闭环管控，完整落地 VDA19.1+VDA19.2 要求。

（一）源头工艺管控：从制造减少污染物生成

1. 成型工艺优化：优先采用冷镦净成形替代切削加工，大幅减少车削金属碎屑；滚丝工序配套高压喷淋在线除屑，避免铁屑嵌入螺纹牙底；
2. 去毛刺标准化：采用超声波预去毛刺 + 负压吹扫组合，禁止干磨工艺产生超细粉尘；
3. 表面处理管控：镀锌、达克罗、铝涂层工序严控涂层粉末脱落，槽液定期过滤，避免涂层微粒吸附螺纹；堆叠存放高度受限，防止螺栓互相磕碰掉粉；
材质区分清洗方案：碳钢采用水基中性清洗剂；不锈钢防钝化残留；铝 / 镁合金禁用强碱清洗，避免腐蚀产生腐蚀微粒。

（二）出厂精密清洗工序（高洁净螺栓必须洁净室作业）

1. 清洗产线配置：连续式全自动超声波高压清洗流水线，分脱脂、粗洗、精洗、纯水漂洗、热风烘干 5 段；高压冲洗压力 2~5bar，溶剂选用无尘异丙醇 / 碳氢清洗剂；
2. 洁净环境要求：Class B/K0.3 超高洁净螺栓清洗、烘干、分拣工位，设置千级（ISO6 级）FFU 层流洁净区，H14 高效过滤器 0.3 μm 过滤效率≥99.995%，隔绝环境浮尘二次污染；
3. 禁止人工捞取转运：全程不锈钢洁净料框密封转运，禁止裸手接触螺纹区域。

（三）出厂抽样检测流程（依据 GB/T41481-2022/VDA19.1）

三种标准检测方法，按洁净等级分级选用：

1. **重量分析法（基础通用）** 洁净溶剂全面冲刷螺栓螺纹与表面，收集全部冲洗液，0.45μm 滤膜过滤、恒温烘干称重，计算残渣总质量；适合批量快速筛查普通等级螺栓。
2. **自动颗粒计数法（中高洁净标配）** 激光颗粒分析仪统计 2μm/5μm/14μm/50μm/100μm 各区间颗粒数量，自动对比 VDA 分级限值，新能源高压螺栓必做。

3. **显微 SEM 能谱分析（超高洁净安全件专项）** 显微镜放大 100~400 倍观察颗粒形态，配合 SEM/EDX 分析颗粒材质，区分金属导电颗粒、涂层粉末、纤维粉尘，追溯生产污染源（滚丝、涂层、环境）。

（四）密封包装防护：阻断仓储、运输二次污染

清洗烘干合格后 1 分钟内完成防静电真空封装，管控要点：

1. 包装材质：ESD 防静电真空袋（高压螺栓专用），无纤维析出；普通机械件可用洁净 PE 密封袋；
2. 分装规则：单袋定量，避免大量螺栓相互摩擦产生新碎屑；袋内附带洁净干燥剂，防止水汽结露吸附粉尘；
3. 标识要求：包装袋标注清洁等级、检测标准、批次、检测日期，开封后有效期（标准要求≤4 小时）。

（五）来料入库与装配现场管控（VDA19.2 装配清洁规范）

1. 来料检验：每批次抽检清洁度，真空包装破损直接拒收；
2. 开封管控：仅在洁净装配工位拆封，禁止在普通车间长时间裸露放置；操作人员穿戴无尘手套、无尘服，禁止皮屑、汗液污染螺纹；
3. 工装管控：套筒、扭力扳手定期超声波清洗，避免工装碎屑掉落连接孔；
4. 涂层脱落应急处置（行业高频痛点） 装配扭矩过大、接触面异物会造成螺栓涂层成片脱落，碎屑极易藏于螺纹底孔：
 1. 普通机械结构：吹扫 + 离线超声波清洗螺纹孔后复检；
 2. 电池包、高压电控等高风险区域：直接报废该螺栓，禁止重复使用；螺纹孔采用喷淋萃取深度清洁，严禁仅压缩空气简单吹扫；
 3. 追溯根因：校准扭矩设备、优化接触面粗糙度、调整涂层附着力工艺。

（六）装配下线三级除尘体系（动力电池包强制落地）

仅螺栓来料洁净不足以保障总成洁净，合盖前必须完整除尘，行业通用三级净化方案：

1. 一级风淋气刀吹扫：多角度高压气流剥离表面大粒径松散粉尘；
2. 二级 FFU 层流洁净区：垂直单向流千级洁净环境，持续沉降去除微细悬浮颗粒；
3. 三级离子风中和静电：消除塑料壳体、绝缘膜静电吸附的超细粉尘，负压系统实时收集剥离微粒，避免粉尘二次飘散； 配套自动隔离门分段隔离除尘工位，防止交叉污染，完全满足 VDA19.2 装配环境管控要求。

五、常见误区与质量失效案例解析

误区 1：肉眼看不见灰尘 = 清洁度合格 微米级金属颗粒完全透明不可见，大量新能源起火事故拆解显示，螺栓螺纹残留 50 μ m 铁粉肉眼无法识别，装配后振动脱落造成电芯短路。

误区 2：装配前用气枪吹扫就能替代精密清洗 压缩空气含油、含水、自带管路粉尘，吹扫只会把颗粒吹入螺纹底孔深处，无法彻底萃取收集，不符合 ISO16232 萃取标准。

误区 3：只管控螺栓，忽略配套垫片、螺纹孔清洁 垫片毛刺、底孔加工碎屑是装配后最大污染源，总成清洁度需螺栓 + 连接件 + 安装孔同步管控。

典型失效案例 某储能企业采用未管控清洁度的模组连接螺栓，批量上线 3 个月出现多组 BMS 采样异常，拆解发现螺纹内嵌铝屑造成接触电阻漂移；更换 VDA K0.3 级洁净螺栓并配套三级除尘产线后，故障彻底清零。

六、总结与行业落地建议

在新能源、航空、精密液压高端制造时代，螺栓清洁度是设备安全与长期可靠性的底线指标，不能作为次要质量特性简化管控。

1. 图纸标注规范建议：紧固件图纸同步标注「清洁度等级 + 执行标准 + 颗粒限值」，示例：技术清洁度按 GB/T41481-2022（ISO16232:2018）执行，颗粒限值遵循 VDA19.1 K0.3 级，禁止 $\geq 150\mu$ m 金属颗粒残留；
2. 供应链管控：要求紧固件厂商提供同批次清洁度检测报告（含颗粒计数、重量分析数据），高安全部件强制提供 SEM 材质分析记录；
3. 产线升级：涉及高压、流体精密点位，同步完善出厂清洗洁净室、装配 FFU 除尘、来料抽检清洁度三大硬件，实现全流程可追溯管控；
4. 技术支持：具备全链条清洁度管控能力的紧固件厂商，可同步提供清洁度专项培训、样品洁净度验证、失效颗粒溯源分析一站式解决方案，从设计端规避颗粒污染风险。

关于盈锋志诚嘉

公司深耕紧固件制造 20 余年，布局深圳总部、襄阳汽车专用工厂及印尼、印度海外基地，月产紧固件 6.5 亿颗，拥有 26 项专利，2013 年通过 IATF16949 认证，2017 年进入新能源供应链。企业掌握冷镦、热处理、表面处理全制程工艺，配套全套精密检测设备。