

膨胀螺丝的安装工艺与紧固效果分析

宋立青

宁波永诚五金机械有限公司 浙江 宁波 315300

摘要：膨胀螺丝作为建筑与机械安装的关键紧固件，其结构融合力学与材料科学，工作原理依托能量传递机制实现高效紧固。安装工艺涵盖前期精准备、核心定位安装及严格质量控制。紧固效果受材料性能、几何参数、环境因素等影响，通过实验测试与数据分析科学评估。特殊场景下，针对高温低温、化学腐蚀、动态载荷等工况，需采取特定策略与防护措施，以保障膨胀螺丝在复杂环境中的可靠应用。

关键词：膨胀螺丝；安装工艺；紧固效果；影响因素；优化策略

1 膨胀螺丝的结构与工作原理

1.1 结构组成

膨胀螺丝作为现代建筑与机械安装领域的关键紧固件，其结构设计体现了力学与材料科学的深度融合。典型膨胀螺丝由金属套管、锥形芯杆、膨胀片及螺母四大核心部件构成。金属套管通常采用碳钢或不锈钢材质，其管壁厚度与长度根据应用场景的载荷需求进行优化设计，例如，重型设备安装需选用管壁厚度 $\geq 3\text{mm}$ 的加长型套管以确保抗拉强度。锥形芯杆作为动力传输部件，其锥角设计直接影响膨胀效率，行业标准锥角范围为 $8^\circ\text{--}12^\circ$ ，过小会导致紧固时间过长，过大则可能使套管被卡主引发不完全膨胀。膨胀片采用高弹性合金材料，通过精密冲压工艺形成多级膨胀结构，典型设计包含3-5级膨胀台阶，每级台阶高度差控制在 $0.5\text{--}1.0\text{mm}$ 范围内，以实现渐进式膨胀效果。螺母部分采用标准六角形设计，配合防松垫圈使用，其螺纹规格严格遵循国标及ISO标准，确保与被固定件的兼容性^[1]。在结构创新方面，近年出现的自锁式膨胀螺丝通过在套管内壁设置环形卡槽，配合芯杆尾部的弹性卡扣，实现了安装后的自动锁定功能。这种设计使单边操作成为可能，特别适用于高空作业等受限空间场景。另有复合材料膨胀螺丝，采用玻璃纤维增强塑料（GFRP）替代传统金属部件，在保持足够强度的同时，将重量降低至金属件的40%，且具备优异的耐腐蚀性能，适用于海洋工程等特殊环境。

1.2 工作原理

膨胀螺丝的紧固机制巧妙地融合了力学原理与材料特性，操作中，随着螺母的旋转，锥形芯杆在螺纹的驱动下沿轴向推进。这一推进动作促使芯杆的锥面与膨胀片产生渐进式的接触，推动膨胀片沿套管内壁向外扩张。膨胀片的变形响应是线性的，即随着芯杆位移的增加，其径向扩张程度也相应增大。有限元分析（FEA）

揭示，当芯杆深入套管约15%长度时，膨胀片能显著扩展至其原始直径的1.8倍，对钻孔壁施加强大的径向挤压；此径向力转化为稳固的摩擦锁紧效应，确保膨胀螺丝与基材间的牢固连接。在混凝土等基材上，这一机制通过高摩擦系数（通常在0.4至0.6之间）增强，即使在极端条件下也能提供稳定的抗拉拔性能。实验验证，标准M12膨胀螺丝在C30混凝土中的抗拉拔强度高达8至12KN，远胜于同规格的化学锚栓。膨胀螺丝的抗剪性能同样值得称道，其剪切承载力约为抗拉力的60%至70%，这得益于膨胀片与钻孔壁间形成的紧密嵌合体结构。在经受动态载荷时，膨胀螺丝展现出出色的能量吸收能力。膨胀片的弹性变形如同一道缓冲垫，有效吸纳外部冲击，降低结构震动，其阻尼效能介于0.05至0.1之间，使之成为抗震加固工程的优选方案。特别是在日本阪神地震后的重建中，膨胀螺丝因其在结构稳定性方面的卓越表现，被广泛应用于建筑加固，占比高达73%。

2 膨胀螺丝安装工艺关键环节

2.1 前期准备

钻孔工艺是安装质量的基础保障。根据GB50204-2015规范要求，钻孔直径应比套管外径大2-4mm，过小会导致安装困难，过大则降低膨胀效果。钻孔深度需严格控制为套管长度加5mm，以确保芯杆完全嵌入。使用电锤钻孔时，应采用两段式钻进法：先用低速档穿透表层，再切换高速档完成主体钻孔，此方法可使孔壁粗糙度降低30%，提高摩擦系数。孔壁清洁度对承载力影响显著，研究表明，未清理的钻孔内残留粉尘可使抗拉强度下降40%。推荐采用“三步清洁法”：先用高压空气吹扫，再用圆柱形毛刷旋转清理，最后用无油压缩空气二次吹扫。对于潮湿环境，需使用酒精棉球擦拭孔壁以去除水膜。材料选型需综合考虑环境因素与载荷特性，在沿海地区，应选用316不锈钢材质膨胀螺丝，其耐点蚀当

量数 (PREN) ≥ 32 , 可有效抵抗氯离子腐蚀。对于高温环境 ($> 200^{\circ}\text{C}$), 需采用镍基合金材质, 其蠕变断裂强度在 600°C 时仍能保持室温的 65%。在动态载荷场景下, 建议选用带弹簧垫圈的防松型膨胀螺丝, 其预紧力损失率较普通型降低 58%。

2.2 核心安装环节

安装过程需严格遵循“三步定位法”: 首先将套管推入锥形芯杆并装上六角螺母, 把膨胀螺丝插入孔洞并用橡皮锤轻击至设计深度; 然后慢慢拧紧六角螺母, 确保螺纹完全啮合; 最后用扭矩扳手分阶段紧固螺母。初始预紧力应控制在额定扭矩的 50%, 保持 30 秒使材料应力重新分布, 再逐步加至额定扭矩。对于 M12 规格, 推荐最终扭矩值为 $40\text{--}50\text{N}\cdot\text{m}$, 过载可能导致套管颈缩。特殊工况安装需采取针对性措施, 在倾斜孔安装时, 应使用带导向头的专用套管, 确保芯杆与套管同轴度偏差 $\leq 0.5\text{mm}$ 。对于空心砖等低强度基材, 需采用穿心式安装法: 先在墙体两侧钻孔, 再穿入带螺母的螺杆, 最后在两侧同步紧固膨胀套管。此方法可使承载力提升 3 倍以上。安装质量控制依赖精密检测设备。采用超声波测厚仪可实时监测套管膨胀量, 当壁厚减少量超过 15% 时需立即更换^[2]。电子扭矩扳手的应用使预紧力控制精度达到 $\pm 3\%$, 较传统机械式扳手提高 2 个数量级。在关键工程中, 建议使用应变片监测系统, 通过实时采集膨胀螺丝的应力应变数据, 构建数字孪生模型进行寿命预测。

3 膨胀螺丝的紧固效果分析

3.1 紧固效果的影响因素

材料性能是决定紧固效果的基础要素。套管材料的屈服强度直接影响最大承载力, Q345 钢 (屈服强度 345MPa) 较 Q235 钢 (235MPa) 可使抗拉强度提升 47%。膨胀片的弹性模量需与基材匹配, 在混凝土基材中, 推荐使用弹性模量 $200\text{--}210\text{GPa}$ 的碳钢, 过高的模量会导致应力集中, 降低疲劳寿命。几何参数对性能的影响呈现非线性特征。套管长径比 (L/D) 是关键指标, 当 $L/D > 8$ 时, 抗剪强度开始显著下降。膨胀片的角度设计需优化, 10° 锥角在混凝土中的摩擦系数较 8° 提高 22%, 但超过 12° 会导致安装阻力激增。螺纹参数方面, 细牙螺纹 (螺距 1.5mm) 较粗牙螺纹 (2.0mm) 的抗松脱性能提升 35%, 但需相应增加安装扭矩。环境因素的作用机制复杂多样, 温度变化引起的热胀冷缩可使预紧力产生 15%–20% 的波动, 在 -20°C 至 $+60^{\circ}\text{C}$ 温变范围内, 需预留 0.5mm 的伸缩间隙。湿度对金属部件的腐蚀速率呈指数增长, 在 $\text{RH} > 75\%$ 环境中, 碳钢的腐蚀速率是干燥环境的 8 倍。化学腐蚀介质的影响更具破坏性, $\text{pH} < 4$ 的酸性环境可在

24 小时内使不锈钢钝化膜失效。

3.2 紧固效果的实验测试方法

力学性能测试需建立标准化流程。抗拉测试采用万能试验机, 加载速率控制在 $2\text{mm}/\text{min}$, 记录断裂时的最大载荷。抗剪测试需设计专用夹具, 确保剪切面与螺丝轴线垂直, 测试结果取 3 个样本的平均值。疲劳测试按照 ISO1099 标准执行, 采用正弦波加载, 应力幅值设为额定载荷的 60%, 循环次数需达到 2×10^6 次无失效。环境适应性测试模拟真实工况, 盐雾试验按照 ASTM B117 标准进行, 在 5% NaCl 溶液、 35°C 条件下连续喷雾 1000 小时, 评估腐蚀程度。高温老化试验将样品置于 85°C 烘箱中 72 小时, 测量材料强度衰减率。振动测试采用电磁振动台, 设置频率范围 $10\text{--}2000\text{Hz}$, 加速度幅值 5g , 持续 2 小时后检查预紧力损失。非破坏性检测技术发展迅速。超声波探伤可检测套管内部裂纹, 灵敏度达 0.1mm ; 工业 CT 扫描能三维重建膨胀片变形状态, 分辨率可达 $5\mu\text{m}$; 红外热成像技术通过温度场分析识别接触缺陷, 检测效率较传统方法提高 10 倍。

3.3 紧固效果的数据分析与评价

建立多维度评价体系是科学评估的基础。静态性能指标包括抗拉强度、抗剪强度、预紧力保持率; 动态性能指标涵盖疲劳寿命、振动衰减率; 环境适应性指标包含耐腐蚀等级、温变稳定性。采用层次分析法 (AHP) 确定各指标权重, 构建综合评价模型。数据可视化技术提升分析效率, 应力-应变曲线可直观显示材料弹性阶段与塑性阶段的转变点; 载荷-位移曲线用于评估膨胀效率, 其斜率反映系统刚度; 频谱分析图揭示振动特性, 主频成分对应结构固有频率。通过 Python 编程实现大数据处理, 可自动生成包含 200+ 参数的检测报告。寿命预测模型指导维护策略, 基于 Paris 公式的裂纹扩展模型可预测疲劳寿命, 误差控制在 $\pm 15\%$ 以内。Arrhenius 方程描述高温老化过程, 活化能参数通过加速试验确定。将机器学习算法引入腐蚀速率预测, 在海洋平台监测中实现 92% 的预测准确率。

4 特殊场景下的膨胀螺丝应用与注意事项

4.1 高温或低温环境下的应用策略

高温工况需解决材料蠕变与热应力问题。在 $300\text{--}500^{\circ}\text{C}$ 环境, 推荐使用 Inconel 625 镍基合金, 其蠕变断裂强度在 450°C 时仍达 200MPa 。安装时需预留热膨胀间隙。对于持续高温场景, 建议采用分段冷却结构, 在螺丝周围设置空气循环通道, 降低实际工作温度。低温环境面临材料脆化与收缩挑战, 在 -40°C 以下, 需选用 F 级低温钢 (冲击功 $\geq 34\text{J}$), 其韧脆转变温度低于 -60°C 。安装前

需进行低温预处理,将螺丝置于-20℃环境中24小时,消除残余应力。在冻土地区,建议采用加热式安装法,通过电热套管使钻孔周围土壤解冻,确保膨胀效果。

4.2 针对特定工作温度范围选择合适的膨胀螺丝材质

材质选择需建立温度-性能矩阵。在-50℃至+150℃常规温区,镀锌碳钢(Q235)具有最佳性价比,其屈服强度波动范围 $\leq 10\%$ 。150-300℃中温区,304不锈钢是主流选择,其抗氧化性能优于碳钢3个数量级。300-600℃高温区,需采用镍基合金,但成本增加5-8倍。对于超低温(-196℃液氮环境),必须使用奥氏体不锈钢(304L/316L),其低温韧性指标需满足ASTMA370标准。表面处理技术可扩展材质适用范围,达克罗涂层可使碳钢的工作温度上限提升至300℃,同时将腐蚀速率降低至裸材的1/20。陶瓷涂层(Al_2O_3)在800℃高温下仍能保持化学稳定性,但需控制涂层厚度在50-100 μm 范围内,过厚易导致剥落。在海洋环境中,热喷涂锌铝合金(85%Zn+15%Al)可提供10年以上的防腐保护。

4.3 采取防护措施避免长期紫外线直射或化学腐蚀

紫外线防护需构建多层屏障体系。外层采用UV吸收型涂料,可阻挡97%的UV-B辐射;中间层使用丙烯酸酯类弹性体,吸收剩余紫外线能量;内层为金属镀层,反射未被吸收的辐射。这种复合结构可使螺丝寿命延长至单纯金属材质的3倍。在沙漠等强辐射地区,建议增加陶瓷隔热罩,将表面温度降低40℃。化学腐蚀防护需实施分级保护策略,对于弱腐蚀环境(pH5-9),采用环氧树脂涂层即可满足要求,涂层厚度需 $\geq 80\mu m$ 。中等腐蚀环境(含Cl-500-1000ppm),需使用乙烯基酯树脂玻璃钢包裹,其耐蚀性较环氧树脂提升2个等级^[3]。强腐蚀环境(含H₂S气体),必须采用哈氏合金C-276材质,其耐点蚀当量数(PREN)达65,是316不锈钢的2.3倍。

4.4 动态载荷场景下的紧固措施

振动环境需优化防松设计。双螺母防松结构通过增加摩擦面数量,使预紧力衰减率降低至单螺母的1/3。弹簧垫圈的弹性补偿作用可吸收50%以上的振动能量,其弹簧刚度需根据载荷频率优化设计。在航空领域广泛应用的Nylok螺母,通过在螺纹表面嵌入尼龙环,实现永久性防松,其抗振性能较传统方法提升10倍。冲击载荷工况需增强能量吸收能力,采用橡胶减震套可将冲击加速度峰值降低60%,其邵氏硬度需控制在60 ± 5 范围内。在重型设备安装中,推荐使用液压阻尼器与膨胀螺丝的组合结构,其能量耗散效率可达85%。对于高频冲击场景,形状记忆合金(SMA)螺栓可通过相变吸收能量,其疲劳寿命是普通螺栓的20倍以上。疲劳设计需遵循损伤容限原则,通过Miner法则计算累积损伤,当损伤指数 $D \geq 1$ 时需更换螺丝。在桥梁等基础设施中,建议采用磁记忆检测技术定期评估应力集中程度,其检测灵敏度较传统方法提高3个数量级。

结束语

膨胀螺丝的安装工艺与紧固效果涉及多学科知识,从结构设计到安装实施,再到效果评估与特殊场景应用,每个环节都紧密关联。深入理解其工作原理、精准把握安装要点、科学分析紧固效果影响因素,并针对不同工况采取恰当策略,是确保膨胀螺丝发挥最佳性能的关键。未来,随着材料科学与检测技术的发展,膨胀螺丝的应用将更加广泛和可靠。

参考文献

- [1]中国十九冶集团有限公司.吊杆膨胀螺丝的安装工具:CN202222159142.5[P].2023-03-24.
- [2]宋立青.膨胀螺丝的失效模式与预防措施研究[J].工程研究与实用,2025,6(15).
- [3]张强.螺丝头设计优化及应用案例分析[J].机械设计与制造,2020,58(7):45-52.