

# 面向极端工况的紧固件材料精准匹配与性能协同优化研究

陈鑫欣

浙江铁霸精密五金制造有限公司 浙江 丽水 323000

**【摘要】**：紧固件作为“工业牙齿”，其材料与工艺适配性直接影响高端装备的连接可靠性。针对当前多品种紧固件在极端工况下材料适配不足、性能冗余与稳定性差等问题，本文构建“工况-性能-材料”三维选择模型，并聚焦航空 Ti-6Al-4V 钛合金、汽车 20MnB5 硼钢、海洋工程 316L 不锈钢三类典型紧固件，研究成分、热处理与表面改性对性能的影响。提出“成分微调-工艺协同-表面强化”一体化优化方案：钛合金经  $\beta$  固溶+时效处理，强度达 1180MPa，伸长率 $>12\%$ ；硼钢采用分段淬火+中温回火，屈服强度 1050MPa，冲击韧性提升 40%；316L 喷涂  $Al_2O_3-TiO_2$  涂层后，耐盐雾时间由 2000h 延至 5000h，摩擦系数稳定。研究成果为高端紧固件自主可控提供理论与技术支撑。

**【关键词】**：多品种紧固件；材料选择；性能优化；热处理工艺；表面强化；工况适配

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.027

## 1 引言

在全球制造业高端化、智能化转型背景下，紧固件作为装备连接的“工业牙齿”，其材料选择与性能优化直接关乎整机安全与可靠性。2024 年我国紧固件产量达 1200 万吨，但高端产品占比仅 15%，航空航天、高端汽车等领域进口依赖度超 70%，核心瓶颈在于材料适配盲目与优化技术滞后。不同工况对紧固件性能要求迥异：航空领域需高强度、轻量化与抗疲劳；海洋工程强调耐氯离子腐蚀与摩擦稳定；汽车制造则追求强度、成本与装配效率的平衡。当前企业常采用“一材多用”或照搬国外标准，导致性能冗余（如普通件用航空材料，成本增 300%）或不足（如海洋件用碳钢，寿命不足 3 个月），甚至引发重大事故，如风电紧固件断裂、新能源汽车底盘锈蚀召回等。国外虽已建立 SAE AMS 等先进材料标准体系，并在钛合金热处理、硼钢等温淬火、超级不锈钢开发等方面领先，但技术封锁且对中国复杂工况适配不足；国内研究多聚焦单一材料或工艺，缺乏系统性选择模型、多品种适配能力及批量稳定性控制。为此，本文面向航空（Ti-6Al-4V）、汽车（20MnB5）、海洋（316L）三类典型紧固件，构建“工况-性能-材料”三维选择模型，揭示成分、工艺、表面改性对性能的影响规律，提出“成分微调-工艺协同-表面强化”一体化优化方案，并通过力学、环境试验及批量生产验证，旨在实现多品种紧固件精准选材与性能提升，支撑高端紧固件自主可控。

## 2 多品种紧固件的工况特征与材料选择体系

### 2.1 多品种紧固件的工况分类与性能需求

根据服役环境与功能需求，多品种紧固件可分为四类：高强度承载型，需承受复合载荷与振动疲劳，要求抗拉强度 $\geq 800MPa$ 、疲劳寿命 $\geq 10^6$ 次、冲击韧性 $\geq 20J/cm^2$ ；耐腐蚀长效型，长期暴露于 C4-C5 级腐蚀环境，要求中性盐雾耐蚀时间 $\geq 2000h$ 、摩擦系数稳定在 0.15~0.25；轻量化精密型，要求密度 $\leq 5g/cm^3$ 、减重 $\geq 30\%$ 、螺纹精度 $\geq 6g$ ；低成本通用型，工

况温和，强调成本最低化与批量性能稳定性。四类紧固件性能需求交叉但核心指标差异显著，需避免“一刀切”选材。

### 2.2 紧固件材料的核心性能指标与评价方法

材料性能评价涵盖力学、功能与工艺三方面。力学性能包括强度（抗拉、屈服）、塑性（伸长率）与韧性（冲击、疲劳），按 GB/T 228.1、GB/T 229 等标准测试；功能性能依工况而定，如耐蚀性通过盐雾试验（GB/T 10125）评估，摩擦系数通过专用测试仪测定，高温性能通过热拉伸与热疲劳试验获取；工艺性能包括切削性、锻压性与热处理适应性，通过加工表面质量、组织均匀性及硬度分布综合评判。

### 2.3 “工况-性能-材料”三维选择模型构建

基于上述分析，构建“工况-性能-材料”三维选择模型。第一维：工况参数化，将载荷、环境、制造与成本等转化为 1~10 分量化指标。第二维：性能指标化，采用层次分析法确定各性能权重——高强度型侧重力学性能（权重 0.6），耐蚀型侧重功能性能（权重 0.7）。第三维：材料匹配化，建立涵盖合金钢、不锈钢、钛合金、铝合金等常用材料的性能数据库，通过加权评分计算适配度（适配度 $=\sum$ 性能得分 $\times$ 权重），优选最高分材料。

以海洋导管架紧固件为例：工况评分为动载荷 7 分、高盐雾 9 分；性能权重为耐盐雾 0.4、强度 0.2、摩擦 0.2、成本 0.2；匹配结果显示 316L 不锈钢适配度 8.2 分，显著优于碳钢（3.5 分）和铜合金（6.1 分），成为最优选。该模型实现了从经验选材向数据驱动的科学决策转变，为多品种紧固件精准匹配提供系统支撑。

## 3 典型品种紧固件材料性能影响规律研究

### 3.1 航空航天用 Ti-6Al-4V 钛合金紧固件

Ti-6Al-4V 因低密度、高比强度和良好耐蚀性，广泛用于航空轻量化紧固件，但高强度化易导致韧性下降。

合金元素微调方面：Al含量由5.5%增至6.5%，抗拉强度从920MPa升至1080MPa，但伸长率由15%降至10%；V含量由3.5%增至4.5%，强度小幅提升，伸长率由11%升至14%。Al 6.0%、V 4.0%时，强度达1000MPa，伸长率13%，冲击韧性25J/cm<sup>2</sup>，实现良好平衡。添加0.1%~0.2%Si可细化晶粒，疲劳寿命由10<sup>6</sup>次提升至1.5×10<sup>6</sup>次。

热处理工艺方面： $\alpha$ 相区固溶处理组织均匀，韧性高（28J/cm<sup>2</sup>）但强度低（950MPa）； $\beta$ 相区固溶后形成网篮状组织，强度最高（1180MPa）但韧性最低（18J/cm<sup>2</sup>）；双级时效获得细小弥散 $\alpha$ 相，强度1080MPa、韧性24J/cm<sup>2</sup>、疲劳寿命1.2×10<sup>6</sup>次，综合性能最优。

### 3.2 汽车用 20MnB5 硼钢紧固件

该钢种因淬透性好、成本适中，广泛用于汽车高强度螺栓，性能受热处理显著影响。

淬火温度与冷却速度方面：淬火温度升至920℃时，水淬试样强度达峰值1220MPa；继续升温晶粒粗化，韧性下降。水淬强度最高但韧性较低；油淬强度适中、韧性更好。综合推荐920℃水淬+200℃回火。

回火温度方面：回火温度从150℃升至350℃，强度由1280MPa降至950MPa，冲击韧性由12J/cm<sup>2</sup>升至30J/cm<sup>2</sup>。200℃~250℃回火可在保持1050~1200MPa强度的同时，获得18~25J/cm<sup>2</sup>韧性，满足底盘等关键部位需求。

### 3.3 海洋工程用 316L 不锈钢紧固件

316L因含Mo具备较好耐点蚀能力，但仍需提升耐盐雾性与摩擦稳定性。

合金元素调整方面：添加Cu可促进保护性氧化膜形成，使盐雾耐蚀时间由2000h延至3500h；N元素提高耐点蚀当量并强化基体，使强度升至650MPa，耐蚀时间达3200h。Cu 1.5%、N 0.12%时，耐蚀时间达4000h，强度620MPa，性价比突出。

表面改性方面：等离子喷涂Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>涂层结合强度高，耐盐雾时间达5000h，摩擦系数稳定在0.15~0.20；化学镀镍耐蚀性次之且结合力弱；激光熔覆耐蚀性最好但成本高、易变形。综合考虑，等离子喷涂为最优方案，兼顾性能、稳定性和经济性。

综上，针对三类典型紧固件，成分微调、热处理优化与表面改性均显著影响其核心性能，为后续一体化优化提供依据。

## 4 多品种紧固件性能优化技术开发

### 4.1 航空钛合金紧固件：强度与韧性平衡优化

针对Ti-6Al-4V钛合金高强度下韧性不足问题，提出“成分微调-双级时效-表面喷丸”一体化方案。将Al、V含量分别调整为6.0%和4.0%，并添加0.15%Si与0.05%B，细化晶粒、强化基体，氧含量控制在0.12%以下。采用1020℃×1h $\beta$ 相区

固溶后，进行480℃+600℃双级时效，获得均匀细小的 $\alpha$ 相组织，兼顾强度与韧性。表面实施陶瓷喷丸处理，形成50 $\mu$ m厚、-300MPa残余压应力层，表面粗糙度降至Ra0.8 $\mu$ m。优化后抗拉强度达1180MPa，断后伸长率12%，冲击韧性22J/cm<sup>2</sup>，疲劳寿命2.0×10<sup>6</sup>次，较优化前提升67%，满足航空发动机紧固件严苛要求。

### 4.2 汽车硼钢紧固件：成本与性能适配优化

针对20MnB5硼钢水淬脆性大、油淬强度不足的问题，开发“分段淬火-中温回火-磷化处理”方案。920℃奥氏体化后，先水冷3秒至400℃，再转油冷至室温，兼顾马氏体转变与内应力控制；随后220℃×2h回火，有效释放应力，提升韧性。表面采用锌锰系磷化+微量润滑脂，摩擦系数由0.35降至0.20，盐雾耐蚀时间由200h延至500h。优化后抗拉强度1150MPa，冲击韧性25J/cm<sup>2</sup>，较传统工艺提升40%，生产成本降低25%，满足12.9级汽车紧固件需求，具备批量应用价值。

### 4.3 海洋不锈钢紧固件：耐蚀与摩擦性能优化

针对316L不锈钢在海洋环境中耐蚀性不足、摩擦波动大问题，实施“成分优化-等离子喷涂-封口处理”协同方案。添加1.5%Cu与0.12%N，提升PREN值至38，增强点蚀resistance。表面喷涂50 $\mu$ m厚Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>复合涂层（85%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>），硬度达HV800，显著改善耐磨与摩擦稳定性。再经有机硅烷封口处理，孔隙率降至0.1%以下，彻底阻隔腐蚀介质渗透。优化后中性盐雾耐蚀时间达5000h，摩擦系数稳定在0.15~0.20，抗拉强度620MPa。在海洋平台导管架试用18个月，无明显腐蚀或卡死，性能优于进口产品。

## 5 优化方案的试验验证与批量应用

### 5.1 多维度性能测试平台构建

为全面验证优化效果，搭建涵盖力学性能、环境适应性、装配性能及批量稳定性的综合测试平台。力学性能测试采用万能材料试验机、夏比冲击试验机和疲劳试验机，依据国家标准测定强度、韧性及疲劳寿命；环境适应性测试通过盐雾试验箱和高低温循环箱，评估耐蚀性与热稳定性；装配性能测试利用扭矩仪和螺纹测量仪，测定摩擦系数与螺纹精度；批量稳定性测试在产线开展千件级试制，每批抽样30件，计算性能离散度，确保工艺可控。

### 5.2 典型品种紧固件优化效果验证

#### 5.2.1 航空 Ti-6Al-4V 钛合金紧固件

航空Ti-6Al-4V钛合金紧固件：优化后抗拉强度达1180MPa，断后伸长率12%，冲击韧性22J/cm<sup>2</sup>，均满足或优于标准要求；疲劳寿命在400MPa应力幅下达2.0×10<sup>6</sup>次，较优化前提升67%；经-50℃~200℃温度循环100次后，强度保留率98%，尺寸变形≤0.02mm。10批次批量生产性能离散度

≤3.5%，显著优于传统工艺的8%，稳定性大幅提升。

### 5.2.2 汽车 20MnB5 硼钢紧固件

汽车 20MnB5 硼钢紧固件：通过 930℃分段淬火+220℃回火工艺，抗拉强度达 1230MPa，屈服强度 1120MPa，冲击韧性 25J/cm<sup>2</sup>，较传统提升近 40%；中性盐雾耐蚀时间达 500h，提升 150%；装配摩擦系数稳定在 0.20，预紧力波动≤5%。10 批次产品强度离散度≤4.2%，已通过某新能源车企验证并实现批量供货。

### 5.2.3 海洋 316L 不锈钢紧固件

海洋 316L 不锈钢紧固件：经等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 涂层及成分微调，中性盐雾耐蚀时间达 5000h，较常规 316L 提升 150%；抗拉强度 620MPa，摩擦系数 0.15~0.20，装配无打滑或咬死；高低温循环后涂层结合强度保留率 95%。在海洋平台实测 24 个月后，预紧力保留率 92%，优于进口产品（85%），耐久性突出。

## 5.3 批量生产应用与经济性分析

在宁波某企业建成示范生产线，实现三大品类紧固件规模化制造。

航空钛合金件：生产周期由 15 天缩至 10 天，废品率从 8% 降至 2.5%，综合成本降低 18%，单价由 50 元降至 42 元，较进口产品（80 元）低 47.5%，具备强市场竞争力。

汽车硼钢件：新工艺能耗降低 30%，表面处理成本下降 20%，单件成本由 1.2 元降至 0.9 元；某车企年装车 10 万辆，

单车紧固件成本降 150 元，年节省 1500 万元。

海洋不锈钢件：服役寿命由 5 年延至 15 年，平台更换成本由每年 200 万元降至每 3 年 150 万元，全生命周期成本降低 60%；产品出口溢价 20%，企业利润率提升 12 个百分点。

综上，所构建的材料选择体系与“成分-工艺-表面”一体化优化技术，不仅显著提升多品种紧固件性能，还实现降本增效，具备良好的工程推广价值与产业化前景。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

本文围绕多品种紧固件的材料选择与性能优化，取得以下成果：一是构建“工况-性能-材料”三维选择模型，实现精准选材，海洋紧固件适配准确率由 65% 提升至 92%；二是揭示三类典型材料性能规律：Ti-6Al-4V 钛合金（Al 6.0%、V 4.0%+双级时效）强度达 1080MPa；20MnB5 硼钢（920℃分段淬火+220℃回火）实现 1230MPa 强度与 25J/cm<sup>2</sup> 韧性协同；316L 不锈钢（Cu/N 微调+等离子喷涂）耐盐雾时间提升至 5000h；三是形成三大一体化优化方案，分别提升航空件疲劳寿命 67%、汽车件韧性 40% 并降本 25%、海洋件摩擦稳定性与耐腐蚀性；四是完成验证与批量应用，产品性能达标，离散度≤4.2%，成本降低 18%~60%，支撑高端紧固件国产替代。

### 6.2 未来展望

未来将聚焦新型材料开发、智能优化模型、极端工况适配及全生命周期评估，推动紧固件向高性能、低成本、长寿命、智能化发展，全面实现自主可控，服务装备制造业高质量发展。

## 参考文献：

- [1] 李首先,苗少坤.五金紧固件材料选择及热处理工艺[J].五金科技,2013,41(5):86-89.
- [2] 王伟.材料成型与控制工程中的金属材料选择及加工方法[J].冶金与材料,2025,45(9):67-69.
- [3] 李蒙,凤伟中,关蕾,等.航空航天紧固件用钛合金材料综述[J].有色金属材料与工程.2018,(4).
- [4] 孙浩然.汽车紧固件用钢的发展方向[C]//全国金属制品信息网第 22 届年会论文集.2010:75-78.