

铝镁合金螺栓在新能源汽车电池包结构中的可靠性评估

王加渊

浙江国盛汽车科技股份有限公司 浙江温州

【摘要】新能源汽车电池包作为核心部件，其结构稳定性和安全性对整车性能至关重要。铝镁合金螺栓凭借低密度、高比强度和良好耐腐蚀性，在电池系统连接中逐步替代传统钢制螺栓，实现减重与增强可靠性的双重目标。通过优化连接方式、改进制造工艺与装配控制，该类螺栓在复杂工况下的服役表现不断提升。结合仿真分析与实验验证，其在实际应用中的力学性能和长期稳定性得到有效保障。相关技术进展推动了新能源汽车安全性能的整体提升，为后续轻量化发展提供了可行路径。

【关键词】铝镁合金螺栓；新能源汽车；电池包结构；可靠性评估；抗腐蚀能力

【收稿日期】2025 年 4 月 15 日

【出刊日期】2025 年 5 月 24 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250237

Reliability assessment of aluminum-magnesium alloy bolts in battery pack structures for new energy vehicles

Jiayuan Wang

Zhejiang Guosheng Auto Technologies Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang

【Abstract】 As a core component of new energy vehicles, the battery pack plays a critical role in determining the structural stability and safety of the entire vehicle. Aluminum-magnesium alloy bolts, with their low density, high specific strength, and excellent corrosion resistance, have gradually replaced traditional steel bolts in battery system connections, achieving both weight reduction and enhanced reliability. By optimizing connection methods, improving manufacturing processes, and refining assembly control, the service performance of these bolts under complex operating conditions continues to improve. Combined with simulation analysis and experimental verification, their mechanical properties and long-term stability in practical applications have been effectively ensured. These technological advancements have contributed to an overall improvement in the safety performance of new energy vehicles, providing a feasible path for future lightweight development.

【Keywords】 Aluminum-magnesium alloy bolt; New energy vehicle; Battery pack structure; Reliability assessment; Corrosion resistance

引言

电池包作为能量存储与传输的核心组件，其内部连接件的性能直接影响整体运行稳定性。在此背景下，铝镁合金螺栓因其优异的轻量化特性和良好的力学表现，逐渐成为关键紧固件的优选材料。围绕其在电池结构中的应用，相关企业在材料适配、工艺控制与连接优化等方面展开深入探索，力求构建更加高效、可靠的装配体系。这一趋势不仅推动了整车轻量化进程，也为新能源汽车的安全性能提升提供了新的技术支撑。

1 铝镁合金螺栓的应用现状

随着新能源汽车技术的不断进步，整车轻量化成为提升续航能力和能效的重要手段之一。在这一背景下，电池包作为新能源汽车的核心能量载体，其结构设

计和材料选择直接影响整车性能。螺栓连接作为电池包装配中的关键工艺，广泛应用于模块固定、壳体密封以及与车身的连接等环节。传统上，钢制螺栓因其高强度和成熟工艺被普遍采用，但其较高的密度也带来了较大的附加质量，限制了整车轻量化潜力的进一步挖掘。近年来，铝镁合金凭借其低密度、高比强度和良好的耐腐蚀性能，逐渐进入新能源汽车零部件选材视野，其中铝镁合金螺栓在电池包结构中的应用逐步增多。

当前，铝镁合金螺栓在新能源汽车电池包中的使用主要集中在对重量敏感且受力适中的连接部位，如电池模组间的电气连接支架、电池壳体盖板的紧固点位等。这些位置对螺栓的抗拉强度和疲劳性能要求相对适中，而更注重减重效果与装配效率。部分主机厂和

零部件供应商已开始尝试将铝镁合金螺栓替代传统钢制螺栓,并结合表面处理技术提升其耐磨性与耐久性,以满足复杂工况下的使用需求。在制造端,相关企业也在探索适用于铝镁合金材料的冷锻、热锻及精密加工工艺,以提高螺栓的尺寸精度与一致性。

从行业发展趋势来看,铝镁合金螺栓在新能源汽车领域的应用仍处于推广阶段,尚未形成统一的技术标准和大规模普及。受限于材料成本、加工难度及连接性能的认知局限,目前其使用范围仍主要集中于高端车型或特定功能模块。由于铝镁合金在高温环境下的蠕变性能相对较弱,在涉及高温紧固场景时仍需谨慎评估其适用性^[1]。尽管如此,随着材料科学的进步与制造工艺的优化,铝镁合金螺栓在新能源汽车电池包中的应用前景日益广阔,越来越多的研究机构和企业正加大对其性能测试与工程验证的投入,为后续的广泛应用奠定基础。

2 提升电池包结构稳定性的策略

在连接方式的选择上,应充分考虑不同部位的受力特征与环境条件,合理配置螺栓的规格、布局密度及预紧力参数。对于高动态载荷区域,采用高强度预紧配合设计,确保连接节点具备足够的抗松动能力;对于温度变化频繁的区域,则需兼顾螺栓与被连接件之间的热膨胀差异,避免因温差引起的连接失效。引入多点分布式的连接模式,有助于分散局部应力集中,提高整体结构的承载均衡性。

在材料层面,除选用具备良好力学性能与耐腐蚀特性的铝镁合金外,还需注重其与周边金属或复合材料之间的兼容性。由于电池包内部存在多种异种材料组合,不同材料之间可能因电化学反应导致加速腐蚀问题,因此必须通过合理的表面处理技术,如阳极氧化、微弧氧化或涂层防护等方式,提升铝镁合金螺栓的抗腐蚀能力和耐磨性能,从而延长其使用寿命。在制造与装配环节,应严格控制加工精度与安装工艺,确保螺栓连接的一致性和可靠性^[2]。采用高精度冷锻成型、数控加工等先进制造技术,可以有效提升螺栓尺寸的一致性和表面光洁度,减少因制造误差引发的应力集中。在装配过程中,应用扭矩-角度双重控制法,实现对预紧力的精准控制,防止因过拧或欠拧造成的连接失效。

建立全过程的质量检测机制,包括材料性能测试、连接节点疲劳试验及整车振动模拟等手段,以验证结构设计的有效性。为进一步提升电池包的整体结构稳定性,还需结合仿真分析与实验验证手段,对螺栓连接系统的力学行为进行深入研究。利用有限元分析技术,

可对不同工况下的连接节点进行应力分布预测与疲劳寿命评估,指导设计方案的持续优化。开展实际道路工况下的耐久性试验,获取真实环境中的结构响应数据,为后续的工程改进提供科学依据。

3 铝镁合金螺栓的实际应用案例

在新能源汽车电池包结构中,铝镁合金螺栓的应用已逐步从理论研究走向工程实践,并在多个整车企业和零部件供应商的项目中得到验证。随着轻量化需求的提升,传统钢制螺栓因质量较大逐渐难以满足更高性能指标的要求,而铝镁合金材料因其密度低、比强度高和良好的加工性能,在部分关键连接部位展现出替代优势。在当前的实际应用中,铝镁合金螺栓多被用于电池模组之间的电气连接支架、电池壳体与托盘之间的固定点以及高压线束接插件的辅助紧固位置。这些区域对螺栓的抗拉强度要求适中,但对减重效果和装配效率有较高需求。

相较于传统钢制螺栓,铝镁合金螺栓可实现单颗减重约 30%至 50%,在大规模应用背景下对整车轻量化具有积极意义。其良好的导热性也有助于局部热量的快速扩散,间接提升电池系统的热管理效率。在制造工艺方面,铝镁合金螺栓的成型技术不断成熟,冷锻、温锻及精密机加工等工艺已广泛应用于量产环节。为提高螺栓表面的耐磨性和耐腐蚀性,相关企业普遍采用阳极氧化、微弧氧化或化学镀层等方式进行处理,以增强其在复杂环境中的服役能力^[3]。针对铝镁合金材料在高温环境下可能出现的蠕变问题,部分厂商通过优化合金成分和热处理工艺,提高了材料的高温稳定性和长期使用可靠性。

生产企业普遍采用扭矩-角度双重控制策略,结合自动拧紧设备与数据采集系统,实现铝镁合金螺栓装配过程的精准控制与实时监控。多家机构通过静态拉伸、疲劳寿命及盐雾试验验证其力学性能与耐腐蚀性,结果表明其满足电池包连接要求并在耐腐蚀性上优于传统材料。有限元仿真分析为结构优化提供理论支持,部分高端电动车型已批量应用该类螺栓,经道路耐久与碰撞测试验证,其在复杂工况下具备良好的连接稳定性与可靠性。

4 新能源汽车安全性能的新进展

随着新能源汽车市场的快速扩张,整车安全性成为行业关注的重点领域之一。电池系统作为新能源汽车的核心组成部分,其结构安全、热安全及电气安全直接关系到整车的安全表现。近年来,围绕提升新能源汽车整体安全性能的技术创新不断涌现,涵盖材料研发、

结构设计、智能监控以及制造工艺等多个方面,推动了整车安全水平的显著提升。在结构安全方面,车身与电池包一体化设计理念逐步成熟,通过优化连接方式材料匹配,提高了整车在碰撞、翻滚等极端情况下的抗冲击能力。铝镁合金等轻质高强度材料不仅用于螺栓紧固件,在电池壳体、支架结构中也得到更广泛的应用,实现了减重与增强刚度的双重目标。

多向传力路径的设计理念被引入电池包内部支撑结构中,使得外力能够更均匀地分散,降低局部变形引发发热失控的风险。在热安全管理方面,液冷、相变材料与主动通风等复合型温控技术逐渐成为主流配置。新一代电池热管理系统能够实现对电芯温度的精确控制,防止因温差过大导致的容量衰减和安全隐患。部分车型还配备了基于传感器网络的实时温度监测模块,结合算法预测功能,提前识别异常温升趋势,并采取相应的冷却或隔离措施,有效遏制热蔓延的发生。电气安全同样取得显著进步。高压电路系统的绝缘防护等级持续提高,新型高分子绝缘材料和密封结构的应用大幅降低了短路、漏电风险。车辆控制系统集成了多重断电保护机制,在发生碰撞或检测到严重故障时,可迅速切断高压回路,保障乘员与维修人员的安全^[4-8]。电池管理系统(BMS)的功能也不断拓展,除传统电量估算外,已具备对单体电池健康状态、充放电行为进行深度分析的能力,进一步提升了运行过程中的安全性。

制造工艺与检测手段的进步也为新能源汽车安全性能的提升提供了有力支撑。自动化装配线的普及使关键部件的安装精度大幅提升,减少了人为因素带来的质量波动。无损检测、X射线探伤、红外热成像等先进检测技术被广泛应用于电池模组及连接部位的质量控制环节,确保产品出厂前达到最优状态。虚拟仿真技术的发展使得企业在设计阶段即可对整车安全性能进行多维度模拟评估,提前发现潜在问题并优化解决方案。在政策法规层面,国家及相关行业组织陆续出台多项针对新能源汽车安全标准规范,涵盖电池安全、整车碰撞测试、电磁兼容性等多个维度,为企业的技术研发与产品验证提供了明确指引。这些标准的实施不仅提升了行业的整体门槛,也促进了技术路线的规范化发展。

5 结语

随着新能源汽车技术的持续发展,电池包结构的安全性与可靠性成为行业关注的重点。铝镁合金螺栓因其轻量化和优良的力学性能,在电池系统中的应用日益广泛。通过对材料特性、连接方式及制造工艺的不断优化,其在提升结构稳定性方面展现出积极作用。整车安全性能也在结构设计、热管理和电气控制等方面取得显著进步。未来,随着材料科学和智能制造技术的发展,铝镁合金螺栓的应用范围有望进一步扩大,为新能源汽车整体性能的提升提供更有有力支撑。

参考文献

- [1] 薄晨琦,林建,孙华,等.某增材制造用铝镁合金粉遇湿湿行为的研究[J].爆破器材,2025,54(02):44-50.
- [2] 张尚成.铝镁合金塔类设备高空组对焊接技术[J].安装,2024,(12):36-38.
- [3] 高磊.铝镁金属抛光工艺分析[J].山西冶金,2024,47(11):109-111.
- [4] 梁怡航,王会廷,杨金顺,等.5A06-O 铝镁合金差温拉深成形性能研究[J].塑性工程学报,2024,31(10):55-61.
- [5] 王会廷,杨金顺,梁怡航,等.5A06-O 铝镁合金板材差温拉深凸耳行为研究[J].内蒙古工业大学学报(自然科学版),2024,43(05):385-393.
- [6] 李超.不同抑爆剂抑制铝镁合金粉尘燃爆特性与机理研究[D].兰州理工大学,2024.
- [7] 高蕾,杨莉.铝镁合金粉中氯化银浓度法测定氯含量[J].安徽化工,2023,49(02):147-150+155.
- [8] 张毅,卫国,李军,等.可降解铝镁合金卡瓦基座的分析[J].机械制造,2021,59(06):30-34.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

