

# 压缩天然气汽车储气瓶的设计和制造特点

温浩源

内蒙古自治区特种设备检验研究院通辽分院 内蒙古 通辽 028000

**摘要:** 本文介绍了压缩天然气汽车储气瓶的类型,包括钢或铝合金金属瓶与复合材料气瓶,阐述了它们各自的设计特点,如压力设计、结构设计、连接与密封设计等,分析了制造特点,包括制造工艺与质量控制,并探讨了制造技术发展趋势,如轻量化设计与智能化制造,为压缩天然气汽车储气瓶的发展提供参考。

**关键词:** 压缩天然气汽车;储气瓶;设计特点;制造特点;发展趋势

引言:随着环保意识的增强与能源结构的调整,压缩天然气汽车作为一种清洁能源汽车,其发展前景广阔。而储气瓶作为压缩天然气汽车的关键部件,其设计与制造水平直接影响着汽车的性能与安全性。深入了解压缩天然气汽车储气瓶的类型、设计特点、制造特点及发展趋势,对于推动该领域的技术进步具有重要意义。

## 1 压缩天然气汽车储气瓶的类型

### 1.1 钢或铝合金金属瓶

钢或铝合金金属瓶采用高强度合金钢或铝合金作为主要制造材料,其结构设计采用两端覆盖半球形的圆筒形状。这种特殊结构设计具有显著的力学优势,圆形筒体与球形封头的组合能够使内部压力均匀分布在容器表面。在承受高压时,这种几何形状可以避免局部应力集中现象,显著降低容器破裂风险,从而大幅提升使用过程中的安全性。圆筒部分提供了充足的天然气储存空间,而精心设计的半球形封头则通过其曲面特性,有效分散内部压力载荷,使整体承压性能达到最佳状态。这类金属气瓶在性能表现上具有多方面优势。其承压能力十分突出,完全能够满足高压天然气储存的技术要求。经过特殊表面处理,容器外表面会形成致密的保护层,这种处理工艺赋予产品优异的耐腐蚀性能,确保在各种环境条件下都能保持长期稳定的使用性能。从经济性角度考量,金属气瓶的生产成本相对较低,这主要得益于成熟的金属材料加工工艺和标准化的生产流程。整个制造过程不需要特别复杂的设备或特殊技术,使得生产成本得到有效控制。在空间利用方面,金属瓶体结构设计紧凑,具有很高的容积效率,能够在有限空间内储存更多天然气,为车辆提供更持久的动力支持。

### 1.2 复合材料气瓶

复合材料气瓶采用多层复合结构设计,内部以钢或铝内衬作为基础支撑,外部通过“整体缠绕”工艺,将树脂浸渍的长纤维紧密包裹。强化材料多选用高强度碳

素纤维和玻璃纤维的混合物,这些纤维具备高强度、高模量的特性,沿受力方向有序排列,与树脂基体充分结合,形成坚固且稳定的复合结构。钢或铝内衬发挥初始承压作用,为气体提供密封屏障;外部纤维缠绕层则承担主要压力负荷,二者相互配合,显著提升气瓶的综合性能<sup>[1]</sup>。在性能表现上,复合材料气瓶的优势与劣势并存。突出优点在于重容比小,相比传统金属气瓶,其重量大幅降低。这种轻量化特性有助于汽车减轻自重,进而提高燃油经济性与动力性能,尤其适用于对车辆自重敏感的乘用车领域。然而,该类气瓶生产过程复杂,从纤维的预处理、树脂的精确调配,到缠绕成型、热固化等环节,每个步骤都需严格把控工艺参数。复杂的生产流程与昂贵的原材料,导致生产成本居高不下,市场售价昂贵。此外,受结构与材料特性制约,复合材料气瓶内部有效储存空间相对较小,容积效率较低,使得车辆单次加气后的续航里程受限,在推广应用过程中,需要在成本控制与性能提升之间寻求更好的平衡。

## 2 压缩天然气汽车储气瓶的设计特点

### 2.1 压力设计

储气瓶公称工作压力主要分为20MPa和25MPa两档,此压力级别的确定基于多方面考量。容积与重量比是关键因素,较高压力级别可使天然气在更小空间内实现高效储存,满足车辆有限安装空间下的续航需求,降低单位容积的重量,提升汽车轻量化水平。降低加气站运行成本同样影响压力设定,统一且合理的压力标准便于加气站设备适配,减少设备调试与维护投入。压力级别还需契合天然气输送管道压力条件,确保加气过程顺畅稳定。安全设计是储气瓶压力控制的核心。储气瓶配备安全阀,内置100℃易熔合金与26MPa爆破片。当瓶内温度升至100℃时,易熔合金熔化,触发泄压通道开启;若压力达到26MPa,爆破片瞬间破裂,迅速释放内部高压气体。两种安全装置协同作用,形成双重保障机制。温度

过高时，易熔合金率先响应，防止因气体膨胀导致压力骤升；若压力突破极限，爆破片立即启动，避免储气瓶因超压发生爆炸。这种设计确保储气瓶在极端工况下，能及时将内部压力降至安全范围，有效规避因压力失控引发的安全事故。

## 2.2 结构设计

储气瓶圆柱体与半球形的形状设计对结构强度和安全性影响深远。圆柱体主体提供规则储存空间，其曲面结构使压力沿圆周方向均匀分布，减少应力集中。两端半球形封头进一步优化受力状态，球形几何特性将内部压力转化为沿曲面的压应力，避免局部产生过高拉应力。这种形状组合使储气瓶在承受高压时，应力分布更趋合理，大幅提升承压能力。光滑连续的曲面过渡设计，降低了疲劳裂纹萌生概率，增强储气瓶抗疲劳性能，延长使用寿命。在车辆长期颠簸振动环境下，稳定的形状结构有效保障储气瓶完整性。材料选择直接决定储气瓶性能、重量与成本。钢材凭借高强度与良好韧性，成为传统储气瓶常用材料，经热处理强化后，可满足高压储存需求，但自身重量较大，增加车辆负载。铝合金材质密度低，在保证一定强度前提下显著减轻重量，且抗腐蚀性能优良，适用于对重量敏感的车辆。复合材料由内衬与纤维缠绕层构成，碳纤维或玻璃纤维强化层赋予其极高强度重量比，使储气瓶在同等承压能力下重量大幅降低，提升车辆燃油经济性；不过，复合材料生产工艺复杂，成本高昂，限制其广泛应用。不同材料各有优劣，设计时需综合车辆使用场景、性能需求与成本预算，权衡选择适配材料，实现储气瓶性能最优化。

## 2.3 连接与密封设计

储气瓶与车辆的可靠连接是保障行车安全的重要环节。固定连接方式采用高强度螺栓、钢带或抱箍等，将储气瓶稳固安装于车辆预设位置。螺栓连接通过精准计算拧紧力矩，确保储气瓶与车辆底盘或支架紧密结合，在车辆行驶过程中的颠簸、振动环境下，仍能保持位置稳定，避免因松动产生碰撞风险。钢带或抱箍连接则利用弹性紧固特性，环绕储气瓶外部，通过收紧装置施加压力，使储气瓶与安装支架紧密贴合，同时具备一定的缓冲作用，减少车辆行驶时的动态应力对储气瓶的影响。密封设计是防止天然气泄漏的关键<sup>[2]</sup>。瓶口部位采用多道密封结构，主密封通常选用高性能橡胶密封圈，利用其弹性形变填充瓶口与阀门连接处的微小间隙，形成初始密封屏障。辅助密封通过在瓶口螺纹处涂抹密封胶，进一步填充螺纹缝隙，增强密封效果。阀门内部同样设置多级密封组件，阀芯与阀座间采用硬质密封与软

质密封相结合的方式，硬质密封保证高压下的结构稳定性，软质密封材料如聚四氟乙烯则确保密封的紧密性。针对储气瓶可能出现的缝隙，采用激光焊接或氩弧焊等工艺进行密封处理，形成连续的密封焊缝，杜绝气体泄漏隐患，确保储气瓶在高压储存与使用过程中的安全性。

## 3 压缩天然气汽车储气瓶的制造特点

### 3.1 制造工艺

钢或铝合金金属瓶制造包含多道精细工序。切割环节需根据设计尺寸将金属板材或管材精准裁剪，为后续成型奠定基础。成型过程通过冷拉成形、液压成形等技术，将金属材料加工为两端半球形、中间圆柱形的瓶体结构，其中冷拉成形可提高金属强度与表面光洁度，液压成形则能更好控制瓶体壁厚均匀性。除锈处理采用喷砂或化学药剂方式，去除金属表面氧化皮与杂质，保证后续涂层附着力。喷漆工序为瓶体喷涂防腐与装饰涂层，提升耐候性。整体焊接将瓶体各部分连接，焊接参数严格控制，确保焊缝强度与密封性。热处理规范对瓶体性能影响关键，退火处理消除加工应力，淬火与回火提升金属综合力学性能，使瓶体在高压环境下稳定服役。复合材料气瓶制造以纤维与树脂复合为核心。纤维布料经层叠和纺织预处理，确保纤维方向与受力方向一致，增强承载能力。涂敷胶体环保树脂黏合剂时，需精确控制厚度与均匀度，保障纤维与树脂充分浸润。缠绕工序将碳纤维布料按特定轨迹逐层缠绕于内衬表面，缠绕张力、角度直接影响气瓶强度分布。热固化处理通过升温、保温、降温程序，使树脂完全固化，形成高强度复合结构。此过程中，温度、压力、时间参数控制不当，易导致树脂固化不完全、纤维与树脂界面脱粘等缺陷，因此各环节工艺参数需严格监控与调整，才能保证气瓶质量达标。

### 3.2 质量控制

储气瓶制造检测项目覆盖全流程。外观检查通过目视与测量，排查瓶体表面划痕、凹陷、涂层不均等缺陷；防腐蚀涂层检测采用划格、盐雾试验，评估涂层附着力与耐腐蚀性能。水压试验向瓶内注水加压，观察是否渗漏及变形，检测承压能力；耐热性能检验模拟极端温度环境，测试瓶体材料与密封结构稳定性。这些检测项目从不同维度验证储气瓶质量，确保符合使用标准。检验规则为质量把控提供依据。型式试验包括水压爆破试验，通过持续加压至瓶体破裂，测定极限承压能力；循环疲劳试验模拟长期使用中的压力波动，检测瓶体抗疲劳性能<sup>[3]</sup>。批量压力循环试验针对每批次产品，抽取样本进行多次压力循环测试，验证生产稳定性。检验周

期根据生产批次与使用年限设定,定期对在产与在用储气瓶抽检。报废评定标准依据检测结果,对存在严重缺陷、超过使用年限或性能不达标气瓶判定报废,防止安全隐患留存,保障压缩天然气汽车运行安全。

#### 4 压缩天然气汽车储气瓶的制造技术发展趋势

##### 4.1 轻量化设计

新型轻质材料为储气瓶轻量化带来突破。高强度铝合金凭借密度低、比强度高的特性,在保证瓶体强度前提下大幅减轻重量。通过合金成分优化与热处理工艺改进,其屈服强度显著提升,可承受高压天然气储存需求。先进复合材料如碳纤维增强树脂基复合材料,具备更高的强度重量比,碳纤维沿受力方向排布后经树脂固化,形成高强度复合结构,有效降低储气瓶自身重量,助力汽车实现轻量化目标。这些材料不仅能减少车辆负载,还可降低能耗,提高燃油经济性,成为未来储气瓶制造的重点研发方向。结构优化技术从设计源头减轻储气瓶重量。拓扑优化基于力学分析,通过计算机算法在给定空间内寻找材料最优分布方案,去除冗余部分,使结构更紧凑合理。形状优化则针对储气瓶外形与内部结构,调整瓶体弧度、壁厚分布,在满足承压要求的同时减少材料用量。例如,对储气瓶封头曲面进行参数化优化,在保证应力均匀分布的前提下,降低封头厚度;优化瓶体内部支撑结构,增强整体稳定性的同时减轻重量。通过结构优化,储气瓶在保持安全性能的基础上,有效实现减重目标,提升车辆整体性能。

##### 4.2 智能化制造

自动化生产线重塑储气瓶制造模式。机器人焊接技术凭借高精度、高稳定性,替代人工完成复杂焊接工序。机器人可根据预设程序,精准控制焊接参数与路径,确保焊缝均匀、牢固,避免人工操作导致的焊接缺陷,大幅提高焊接质量与生产效率。自动化检测设备集

成多种检测技术,如超声波探伤仪自动检测瓶体内部缺陷,视觉检测系统识别表面瑕疵,快速准确地完成质量检测,减少人为误差。自动化生产线实现从原材料加工到成品组装的连续化作业,降低人力成本,提升生产效率与产品一致性。智能制造系统推动储气瓶制造企业管理升级。制造执行系统(MES)实时监控生产过程,采集设备运行数据、生产进度信息,通过数据分析优化生产流程,提高设备利用率与生产效率。企业资源计划系统(ERP)整合采购、生产、销售等环节,实现资源合理配置与高效管理,降低库存积压与生产成本。二者协同运行,构建数字化管理平台,管理者可通过平台实时掌握生产动态,及时调整生产计划。例如,依据订单需求与原材料库存情况,自动安排生产任务;根据设备状态预测维护时间,减少停机故障。智能制造系统实现生产过程的数字化、智能化管理,提升企业竞争力与市场响应速度。

##### 结束语

压缩天然气汽车储气瓶的设计与制造涉及多个方面,从类型选择到设计细节,再到制造工艺与质量控制,每个环节都至关重要。随着科技的不断进步,轻量化设计与智能化制造成为储气瓶制造技术的重要发展方向。未来,应持续加大研发投入,提升储气瓶的性能与质量,推动压缩天然气汽车产业的健康发展。

##### 参考文献

- [1]王荣.压缩天然气加气站安全技术管理策略探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(19):45-47.
- [2]冯浩.压缩天然气加气站建设运营探讨[J].中国管理信息化,2021,24(18):131-132.
- [3]董奕彤.压缩天然气加气站设备选型与运行管理要点[J].化工管理,2021,(02):1-2.