

## 加氢站氢气集装管束夏季降温冷却设计

王小速<sup>1</sup> 李飞<sup>2</sup>

1.奥福科技有限公司, 北京 100070

2.华商国际工程有限公司, 北京 100069

**[摘要]**近年来我国氢燃料电池汽车与加氢站建设快速推进, 氢气集装管束作为加氢站主流储氢设备, 大多采用室外露天布置。夏季高温与强太阳辐射易造成瓶体温度快速升高, 引发高压储氢容器超温、压力异常上升等安全隐患。目前国内规范对氢气集装管束夏季日常降温喷淋系统尚无明确设计条文, 工程设计多参照石化储罐经验, 存在计算依据不足、系统匹配性差等问题。文章以实际加氢站项目为依托, 基于热平衡原理确定冷却水喷淋强度, 完成冷却面积、冷却水量、穿孔管水力计算、管道布置及自动控制方案设计, 形成一套适用于市政水压条件、安全可靠、经济节水的夏季降温冷却系统。工程应用表明, 该系统可将瓶体温度稳定控制在50℃以下, 有效提升氢气集装管束运行安全性与使用寿命, 可为同类加氢站工程设计提供参考。

**[关键词]**加氢站; 氢气集装管束; 夏季降温; 水力计算; 自动控制

DOI: 10.33142/sca.v9i2.19109

中图分类号: F55

文献标识码: A

## Design of Summer Cooling System for Hydrogen Tube Skids at Hydrogen Refueling Station

WANG Xiaosu<sup>1</sup>, LI Fei<sup>2</sup>

1. Aofu Technology Co., Ltd., Beijing, 100070, China

2. Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100069, China

**Abstract:** In recent years, the construction of hydrogen fuel cell vehicles and refueling stations in China has been rapidly advancing. As the mainstream hydrogen storage equipment in refueling stations, hydrogen container bundles are mostly arranged outdoors. The high temperature and strong solar radiation in summer can easily cause a rapid increase in the temperature of the bottle, leading to safety hazards such as overheating and abnormal pressure rise in high-pressure hydrogen storage containers. At present, there is no clear design provision for the daily cooling spray system of hydrogen container bundles in summer in China. Engineering design mostly refers to the experience of petrochemical storage tanks, which has problems such as insufficient calculation basis and poor system matching. The article is based on an actual hydrogen refueling station project, and determines the cooling water spray intensity based on the principle of thermal balance. The cooling area, cooling water volume, hydraulic calculation of perforated pipes, pipeline layout, and automatic control scheme design are completed, forming a summer cooling system that is suitable for municipal water pressure conditions, safe and reliable, and economically water-saving. Engineering applications have shown that the system can stably control the temperature of the bottle below 50 °C, effectively improving the operational safety and service life of hydrogen container bundles, and providing reference for the design of similar hydrogen refueling station projects.

**Keywords:** hydrogen refueling station; hydrogen container bundle; summer cooling; hydraulic calculation; automatic control

### 引言

2020 年以来, 我国在氢燃料商用车领域发展迅速。燃料电池汽车在公交、环卫、物流、重卡等领域逐步推广, 带动加氢站进入规模化建设与示范运营阶段。按照北京、上海、广州、深圳发布的氢能产业规划, 到 2025 年, 四大一线城市连同周边协同城市, 将建成至少 167 座加氢站, 示范运营超过 2.2 万辆燃料电池汽车。氢能交通体系快速成型, 对加氢站的安全性、可靠性、标准化设计提出了更高要求。

在加氢站系统中, 氢气集装管束是应用最广泛的高压储氢装置, 具有布置灵活、建设周期短、投资较低等优点, 在撬装加氢站、固定式加氢站中普遍使用。氢气集装管束通常由多只大容量高压储氢气瓶集成在框架内构成, 设计

压力一般为 20MPa、25MPa 或 35MPa, 属于高压压力容器。受站区布置、工艺流程及安全距离限制, 氢气集装管束在绝大多数情况下都放置于室外露天场景, 长期承受日晒、雨淋、高温、低温等自然环境影响。

氢气是一种极易燃易爆的气体, 爆炸极限宽 (4.0%~75.6%), 点火能量极低 (0.019mJ), 扩散系数大, 一旦发生泄漏极易形成爆炸性混合物。同时, 氢气在高温环境下会加剧材料氢脆风险, 使压力容器力学性能下降。夏季高温天气下, 太阳直射使集装管束外壁温度快速升高, 瓶内氢气温度与压力同步上升, 可能出现压力异常升高、安全阀频繁起跳、充装效率下降、设备寿命缩短等问题, 严重时直接威胁加氢站整体安全。

目前, 《汽车加油加气加氢站技术标准》(GB 50156

—2021)、《加氢站技术规范》(GB 50516—2010, 2021 版)、《加氢站消防系统技术规程》(T/CECS 1108—2022) 等标准对加氢站消防冷却、火灾时喷淋保护做出了相应规定, 但针对夏季日常高温防护的降温冷却系统, 在供水强度、喷淋方式、控制逻辑、水力计算等方面尚无明确统一的要求。工程实践中, 设计人员多参考石化行业可燃液体储罐夏季喷淋经验, 存在参数选取偏于经验化、与氢气高压容器特性不匹配、冷却效果不稳定等问题。

为解决夏季高温环境使集装管束温度过高、升温过快引发的安全问题, 本文结合实际加氢站工程, 对氢气集装管束夏季降温冷却系统设计、热工计算、水力计算及自动控制方案进行系统研究, 形成一套可直接用于工程设计的技术方案, 为加氢站安全运行提供技术支持。

## 1 系统简介

本设计针对室外露天布置的氢气集装管束, 设置专用夏季降温冷却水喷淋系统, 与消防冷却水系统独立设置, 不占用消防水量与水压, 满足加氢站安全设计要求。

系统基本构成:

水源: 市政一次水;

输送管道: 不锈钢供水管、穿孔喷淋管;

控制组件: 温度传感器、控制器、电磁阀、手动阀门;

执行部件: 顶部开孔冷却管, 通过孔口出流形成连续水膜。

系统工作逻辑: 在氢气集装管束瓶身设置温度监测点, 实时采集外壁温度。当瓶身温度超过 50°C 时, 控制器连锁自动打开喷淋控制阀, 市政水通过顶部穿孔管向下喷淋, 在钢瓶表面形成均匀水膜, 通过蒸发吸热与强制对流降低瓶体温度。系统运行一段时间后自动关闭, 避免水资源浪费。同时设置手动阀门, 可根据管束是否处于充装状态选择性投运, 提高系统经济性。

## 2 系统设计

### 2.1 设计基础条件

以某实际加氢站项目为设计对象:

布置形式: 三组氢气集装管束, 室外露天布置;

管束规格: 7 只  $\phi 559 \times 10975 \text{ mm}$  高压储氢气瓶;

外形尺寸: 12192 mm  $\times$  2438 mm  $\times$  1960 mm;

环境条件: 夏季太阳辐射强, 极端气温高;

水源条件: 市政一次水, 水压可满足重力流及低压孔口出流要求;

控制目标: 瓶体表面温度  $\leq 50^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 冷却水供水强度的选取

由于现行规范未对氢气集装管束夏季降温冷却供水强度做出明确规定, 本设计参照项目所在地历年夏季太阳短波辐射强度数据, 以“将太阳辐射峰值热量抵消至平均辐射水平”为目标, 建立热平衡方程进行计算。基本思路是太阳辐射造成管束壁面温升, 通过喷淋冷却水将多余辐

射热量带走, 使瓶体维持在安全温度区间。建立热平衡方程如下<sup>[1]</sup>:

$$60 (f_{\max} - f_{\text{ave}}) \times 10^{-3} = q c_w p_w \Delta t \quad (1)$$

式中:  $f_{\max}$ —高温日最大辐射强度值,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$f_{\text{ave}}$ —高温日平均辐射强度值,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$q$ —冷却水喷淋强度,  $\text{L}/(\text{m}^2 \text{ min})$ ;

$c_w$ —水的比热, 取  $4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$p_w$ —水的密度, 取  $1 \text{ kg}/\text{L}$ ;

$\Delta t$ —水的温降, 取  $6^\circ\text{C}$ 。

将数据代入公式:

$$60 \times 595 \times 10^{-3} = q \times 4.187 \times 1 \times 6$$

$$35.7 = 25.122q$$

$$\text{解得: } q = 1.42 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ min})$$

考虑实际工程中喷淋覆盖不均、局部蒸发过快、安全裕量等因素, 设计取值适当放大:  $q = 1.7 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{ min})$ 。

### 2.3 冷却面积与冷却水量计算

加氢站充装区设有三组氢气集装管束, 集装管束规格为:

钢瓶规格:  $\phi 559 \times 10975 \text{ mm}$  (外径  $d \times$  长度  $l$ );

钢瓶数量: 7 只;

外形尺寸: 12192  $\times$  2438  $\times$  1960 mm (长  $L \times$  宽  $W \times$  高  $H$ );

每组集装管束的冷却面积为:  $S = 7\pi dl + 7 \times 4\pi (d/2)^2 = 141.72 \text{ m}^2$ ;

每组集装管束所需冷却水量为:  $Q_0 = qS = 4.02 \text{ L/s}$ 。

### 2.4 冷却水供给设施设计

本工程水源为市政一次水, 水压难以满足常规水雾喷头额定工作压力, 因此采用管道孔口出流方式实现喷淋降温, 具有系统简单、水压要求低、布水均匀、维护方便等优点<sup>[2]</sup>。

图 1 为氢气集装管束的夏季降温冷却平面示意图, 图 2 为对应的剖面图。

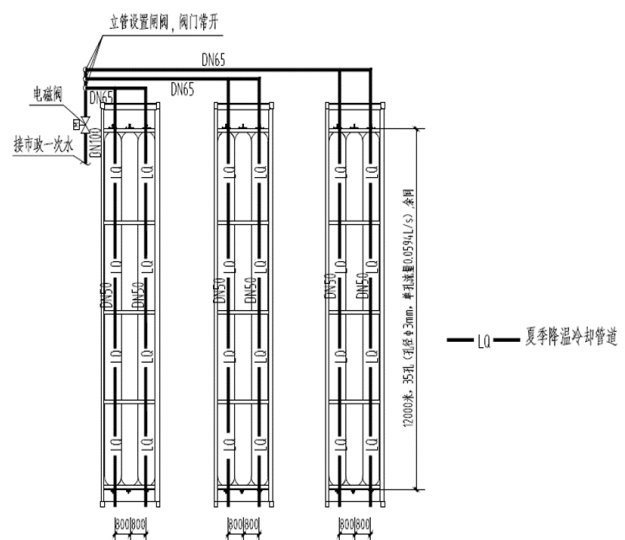


图 1 夏季降温冷却管道平面图

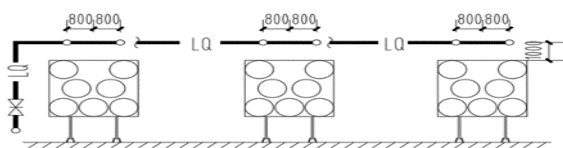


图2 夏季降温冷却管道剖面图

#### 2.4.1 供水管与喷淋管布置

每组氢气集装管束上方沿纵向设置两根 DN50 不锈钢管；管道中心高出钢瓶顶部 1.0m，保证水流覆盖范围；道沿长度方向每隔 350mm 开设  $\phi 3\text{mm}$  小孔，开孔方向垂直向下；管材选用 304 不锈钢，适应室外潮湿、腐蚀性环境，使用寿命长。

#### 2.4.2 孔口出流水力计算

单个小孔处的流量及流速，根据穿孔管孔口自由出流公式 (1) 计算<sup>[3]</sup>：

$$Q_1 = \mu A (2gH_0)^{1/2} \text{ 及 } v = Q_1 / A \quad (2)$$

式中： $\mu$ —流量系数，取 0.60；

$A$ —孔口断面面积， $\text{mm}^2$ ；

$g$ —重力加速度，取  $9.81\text{m/s}^2$ ；

$H_0$ —孔口中心以上总作用水头，取 10m；

代入数据解得  $Q_1 = 0.0594\text{ L/s}$ ， $v = 8.40\text{ m/s}$ 。

每组氢气集装管束小孔个数  $n = 2 \times 12 / 0.35 = 70$  (个)

则实际每组氢气集装管束的夏季降温冷却流量为  $Q_2 = 0.0594 \times 70 = 4.16\text{ L/s} > Q_0$ ，满足冷却要求。故夏季降温的总流量  $Q_{\text{总}} = 4.16 \times 3 = 12.48\text{ L/s}$ 。

### 2.5 操作与控制方案

为提高系统自动化水平与安全性，避免高温天气下人工操作不及时，本设计采用温度自动连锁控制。

#### 2.5.1 温度监测

在氢气集装管束瓶身布置防爆型温度传感器，实时采集外壁温度，信号接入 PLC 控制器。

#### 2.5.2 自动控制逻辑

自动控制逻辑为当瓶身温度  $> 50^\circ\text{C}$  时，控制器连锁打开电磁阀，启动喷淋；系统连续运行 5min 后自动关闭，避免长时间无效喷淋；若温度仍然偏高，可设置间隔一定时间后再次启动。

#### 2.5.3 分组手动控制

分组手动控制三组集装管束一般不同时充装，为节约水资源，每组管束支管均设置手动阀门，操作人员可根据实际使用情况选择开启或关闭对应管束的冷却系统，实现按需喷淋、节水节能。

#### 2.5.4 系统安全性

电气设备均采用防爆结构，满足加氢站危险区域防爆要求；控制系统独立设置，不影响压缩机、加氢机等主工艺设备；具备就地和远程显示、状态反馈、故障报警功能。

### 3 系统安装、调试与运行维护

#### 3.1 安装要求

管道安装横平竖直，支架牢固，间距合理；喷淋管开孔方向严格垂直向下，保证落水均匀；管道具有一定坡度，便于冬季排空防冻；电磁阀、传感器安装位置便于检修，避免暴晒积水。

#### 3.2 调试内容

管道水压试验，检查密封性；通水调试，观察孔口出流均匀性，清理堵塞孔口；温度控制模拟试验，验证自动启停与定时功能；分组和整体联动调试，确保流量、压力满足设计要求。

#### 3.3 运行维护要点

定期检查过滤器，防止杂质堵塞小孔；每月对喷淋管进行冲洗，减少结垢与堵塞；每季度校准温度传感器，保证控制精度；入冬前将管道内积水排空，防止冻裂；建立运行台账，记录启停次数、故障情况、维护内容。

### 4 结语

加氢站氢气集装管束属于高压储氢设备，运行压力高、安全风险大，夏季高温环境对其安全稳定运行构成显著威胁。对集装管束采取合理可靠的夏季降温冷却措施，能够有效控制瓶体温度，降低压力异常升高风险，减缓材料老化与氢脆效应，提高设备安全性、使用寿命与加氢效率。

本文以实际工程为依托，通过热平衡计算确定喷淋供水强度，完成冷却面积、冷却水量、穿孔管水力计算、管道布置及自动控制方案设计，形成一套适用于市政水压条件、自动化程度高、节水节能的夏季降温冷却系统。系统采用孔口出流喷淋，结构简单、运行可靠、维护方便，可将瓶体温度稳定控制在  $50^\circ\text{C}$  以下，满足加氢站安全运行要求。目前我国加氢站正处于快速发展阶段，高压储氢设备的安全防护技术仍有进一步提升空间。未来可结合隔热涂层、智能预测控制、循环水利用等技术，开展复合降温系统研究，进一步提高冷却效果、降低水耗，推动加氢站向更安全、更高效、更绿色的方向发展。系统投入运行后，应建立完善的巡检、维护、校验制度，确保降温冷却系统长期稳定可靠，为加氢站安全生产提供坚实保障。

#### [参考文献]

- [1]高思春,徐凡.二异丁烯储罐水喷淋冷却设计计算探讨[J].石化技术,2016,23(6):2.
- [2]陈金思.油罐水冷却设计计算探讨[J].工业用水与废水,2002,33(2):2.
- [3]鲁晓鹏,王桂彩.卧式液氨储罐夏季降温及消防冷却设计[J].玻璃,2021(8):19-22.

作者简介：王小速 (1995.6—)，女，山东泰安人，汉族，硕士研究生，工程师，主要研究方向为石化工程、化工工程、建筑工程给排水设计。