

钢丝缠绕技术助力提高 站用储氢气瓶的安全性

农工民主党北京 CNGV 课题组

洪诤

20220828

概述

高压气瓶目前在氢能加气站中还没有普遍应用，主要原因是它还不能防止氢脆失效。因为氢气分子尺寸极小，又是易燃气体，在高压环境下、容易进入金属容器内部，造成晶界的早期腐蚀，甚至引起气瓶爆裂，这种高压储氢容器因氢分子腐蚀晶粒而造成的失效，具有突发性，很具危险性。因此，典型的高压储氢容器内表面一般都要敷盖一层耐氢脆的金属材料薄板，（例如 316L 不锈钢板：低碳、12%Cr、16%Ni 和 2—3%Mo）用于抵抗氢脆腐蚀。但因 316L 的强度不高、价格也贵，不宜单独用作高压容器的承压材料，还需要采用更高强度、更高韧性的板材作为基材。例如采用低碳低合金钢板经卷圆、再内衬一层 316L 不锈钢板、才能焊接成高压气罐，气罐外还需再缠绕高强度钢带层。这就是目前抗氢脆高压储氢容器的典型结构。由两种钢板焊接而成的高压气罐既要承受高压，又要防止氢脆。因其制造工艺复杂、已是氢能加气站中投资很大的一种基础装备。

高压气瓶是无缝钢管经两端旋压成球冠后制成的无缝容器，外表面不允许焊接其他零件，也不允许机械加工或者人为损伤。宜用作加气站的站用气瓶，属于工业化生产的制品。其生产效率高、质量易控制，安全性较好、成本也低廉。目前，25Mpa

的 CNGV 加气站的站用气瓶已经普遍采用了 35CrMo 无缝钢管旋压的大型 I 型钢瓶。今后 40Mpa 的 CNGV 高压站用气瓶估计也会采用增加了壁厚的 I 型高压气瓶。因这种气瓶不具有防氢脆的功能，暂时还不能用作氢能加气站的站用气瓶。

近年来、浙江蓝能公司和中材科技公司开发了一种用增厚的合金钢（35CrMo）无缝管制造的“**45Mpa 抗氢脆长管高压气瓶**”：气瓶增加了壁厚；内表面作了强力滚压处理；能在长期高压储氢环境中抵抗氢脆腐蚀；经国家氢环境实验室的长期试验考核，证明有效。已通过了新产品鉴定，可用作氢能加气站中的高压储氢容器，将在国内新建的氢能加气站中推广应用。

（浙江兰能公司 20220815 又宣布**研制成功了一种 90Mpa 的储氢瓶式容器**，可用于 70Mpa 的高压氢能加气站）

实践证明：增加气瓶壁厚、降低气瓶所承受的拉应力值（760-880Mpa），能提高气瓶的耐氢脆的能力；对气瓶内表面实施强力挤压、形成预压应力层和提高其光洁度，也可以提高气瓶的抗氢脆能力；两种措施并举，便能将此气瓶用作氢能加气站内防止氢脆的的站用气瓶。

这种利用强化内表面、提高气瓶抗氢脆能力的技术，是一项重大的创新：一方面，工业化方式生产的高压气瓶要比手工方式生产的高压气罐质量更稳定，性能更可靠，安全性更好；另一方面，用气瓶取代气罐、还能大幅度减少制造工作量和降低制造成本；能起到减少投资的效果，确是氢能加气站中应予

推广的产品。

但是，该产品目前仍属 I 型气瓶。降低负荷及内表面强化的技术措施、虽能提高气瓶的抗氢脆能力，但在其金属内部仍会存留不少微细的晶界缺陷，在长期高压储氢环境下仍有可能扩展成裂纹，甚至发生突然开裂的危险。

因此，我们建议在该抗氢脆的 I 型气瓶外表面、再增加一层高强度钢丝缠绕层，形成一种同质材料缠绕层的 III 型钢瓶。这样既可以防止该气瓶突然爆裂；还能够减轻该气瓶的自重；这种在防氢脆高压气瓶的外表面、增加钢丝缠绕层的方法，是一种有效而廉价的技术措施，有必要去作研究和开发。

另一方面，国家住建部已于 2021 年 06 月 28 日颁布了天然气汽车 CNGV 高压加气站的新标准 GB50156-2021。其储存压力已从目前的 25Mpa 提高到 40Mpa，必须采用 $\geq 40\text{Mpa}$ 的高压站用气瓶。以便更快速地为 35Mpa 车用气瓶充装更多的高压天然气。从提高安全性考虑、这些增厚的高压气瓶也有必要采用钢丝缠绕结构得以强化并使之轻量化，将会有利于促进和保障我国天然气汽车产业的技术进步和产业升级。

一、站用气瓶的工作状况

站用气瓶是天然气汽车 CNGV 加气站或氢能加气站中储存高压燃气的装置。储存着易燃、易爆的高压气体，通过间断性的充气 and 放气，可快速地将加气站储存的高压燃气充装给车用气瓶；站用气瓶又是一种对工作寿命要求极高的高压容器，应能

适应 30 万次以上、20 年以上的工作寿命。

目前，CNGV 车用气瓶的压力限值均为 20Mpa，CNGV 站用气瓶的压力限值也均为 25Mpa。利用站用气瓶的间断充气放气、利用两者间的压力差（5Mpa）、便可将高压 CNG 从站用气瓶快速地充装给车用气瓶，直至充满到 20Mpa。高压氢能加气站也应像压缩天然气汽车 CNGV 加气站一样，配备着 45Mpa 站用气瓶组，以便给氢燃料电池汽车 HFCV 的车用气瓶快速加气至 35Mpa。

为了能使加气站的压缩机运转时间最短，并能对车用气瓶实现快速充气，站用气瓶组应设置有高压、中压和低压三个群组的储存装置，并按下述规范运行：（以 CNGV 加气站为例）

压缩机启动后，先将这高、中、低三组站用气瓶全部充满，达到最大工作压力值（例如 25Mpa）时、压缩机暂时停机。当加气站给车用气瓶充气时：三线加气机由编程器 PLC 控制、先开通低压瓶组，当其压力值从 25Mpa 下降至某设定值时（例如 13Mpa）、低压瓶组受控关闭，停止充气；同时开通中压瓶组充气，中压瓶组压力值从 25Mpa 降至某设定值时（例如 18Mpa）、中压瓶组受控关闭，停止充气；同时开通高压瓶组充气。当高压瓶组的压力值从 25Mpa 降低至 20Mpa 时，高压瓶组受控关闭，停止充气；接着 PLC 就控制压缩机启动，按顺序对高压、中压和低压瓶组加压充气。直至三组气瓶压力值全部达到 25Mpa 时，压缩机再度停机。这种规范既能维持压缩机开机时间最短，也能确保车用气瓶的快速充装，已成为 CNGV 加气站的典型规范。

氢能加气站也应照此规范操作运行。

二、站用气瓶应有极长的疲劳寿命

站用气瓶组在压缩机启动时充气升压，在给车用气瓶充装时放气降压，直到站用气瓶全都放气至预定的低气压值时、再启动压缩机充气。如此不断循环，长期工作。站用气瓶每天充气放气的次数约为数十次，（例如一天 12 小时营业时间内充放气 48 次，即 15 分钟一次）年充装次数可达 17520 次。如气瓶的设计寿命为 20 年，则其充气放气的总次数将会达到约 35 万次。因此，站用气瓶是一种长期在高气压环境下反复工作的构件，应具有极长的疲劳寿命。

相对而言，车用气瓶的充气、放气次数就要太少了：车辆到加气站充气时、车用气瓶充满至 20Mpa；车辆运行时、气瓶连续放气，气压值连续降低，降至 $<2\text{Mpa}$ 时，车辆就要再回到加气站去重新充气（要充到 20Mpa 后再能重新运行）；形成一次循环。私家车一般每天充气 1 次，一年的充气次数也只有约 400 次。（II 型车用气瓶的设计寿命规定为 15 年，而其充气次数合计仅为 6000 次；III 型复合气瓶的设计寿命规定为 20 年，其充气次数合计也仅为 8000 次）出租车每天充气 2-3 次，年充装 800-1200 次。其运营时间仅为 7 年，其车用气瓶的充气次数合计也只有 5600-8400 次。

鉴于两种气瓶工况的差别，站用气瓶和车用气瓶在设计和使用方面、均有很大的不同：车用气瓶强调轻量化，应尽量减

轻气瓶的重量，确保单次储气量足够，以便提高车辆的运营效率；站用气瓶则应具有长久的疲劳寿命，确保安全运营 20 年，充放气次数要达到 30 万次之多，但可不必计较其自重。

国外 CNGV 加气站都采用高压气瓶组储气，有 I 型整体钢瓶和 II、III 型复合材料缠绕钢瓶两大类，均已有相应的标准（ISO11120 和 ISO11119）。国内 CNGV 加气站的储气装置目前有两种：整体结构的 I 型钢瓶和高压储气井。其中高压储气井系将高压管件埋藏在地下封口，可节省地面的面积，但不便于日常维护保养，不宜推广；高压气瓶则是工业化的产品，质量稳定，成本较低，已得到广泛采用。

目前国内 25Mpa 的 CNGV 站用气瓶都是整体结构的 I 型钢瓶。即采用材质 35CrMo 无缝钢管、经两端旋压，制成厚壁、无缝的长管气瓶（直径为 559-711mm；长度为 6000-11500mm；壁厚为 18-35mm），装备在 CNGV 的子站和常规站中运行。站用气瓶分为低压、中压、高压三组，容积比例为 3：2：1，其中低压瓶组 3 只、中压瓶组 2 只、高压瓶组 1 只。

三、提高车用气瓶的储存压力标准、促进我国 CNGV 产业升级

目前，国际上 CNGV 车用气瓶的储存压力限值均为 20Mpa，大都采用玻璃纤维 II 型钢瓶（例如 85 升和 200 升的玻璃纤维 II 型钢瓶），也有的采用了碳纤维全缠的轻量化 III 型钢瓶（例如 90 升或 260 升 20Mpa 碳纤维 III 型钢瓶）。

为了提高 CNGV 产业的技术水平和运营效率，应尽快提高车

用气瓶的储存压力限值标准，从现有的 20Mpa 提高到 35Mpa。这样，CNGV 车辆的一次充气续驶里程就可以从目前 200 公里提高到 350 公里以上。还能带动 CNGV 车辆的技术性能得到全面提高，实现我国 CNGV 的产品升级和产业升级。

2012 年气瓶全国标委会（SAC/TC31）曾颁布过玻璃纤维环缠车用气瓶标准（GB24169-2012），意图将车用气瓶的储存压力标准提高到 25Mpa，但因当时的加气站标准（GB50156-2012）没有同步修订（至 30Mpa），储存压力仍限定为 25Mpa，致使这个提高效率的设想未能实施。

气瓶标委会也曾于 2017 年颁布过一个站用气瓶和运气车气瓶的新标准“大容积钢质无缝气瓶”（GB/T33145-2016）。把公称压力提高到了 30Mpa，公称水容积为 150L-3000L。以期提高运气车的效率，并能为 25Mpa 的高压车用气瓶快速充气。但是，由于所推荐的 30Mpa 运气车气瓶仍系 I 型钢瓶，自重太大，不能增加运气量，致使“大容积钢质无缝气瓶”GB/T33145-2016 的标准没有得到实施：在用的长管运气车至今仍在沿用着 20Mpa 的应力限值，运气效率低下；站用气瓶的压力也没有提升压力到 30MPa；这是一段没有实现的尝试。

中国农工民主党中央在 2016 年十二届全国政协第四次会议上、提出了“促进我国天然气汽车发展”的提案。建议把 CNGV 车用气瓶的压力限值从目前的 20Mpa 提高到 35Mpa。得到了国家工信部的积极支持，批复文件认为：“把天然气汽车的储存

压力从 20Mpa 提高到 35Mpa、在我国已具备实施的条件”“建议从修订各项标准入手，促进该提案的实施。”

中国交通运输协会天然气车船分会和中国汽车工业协会燃气汽车分会积极支持农工民主党的提案和工信部的批复，于 2018 年 4 月召集了 22 个企业和部分专家、组建了“提高 CNGV 储存压力”的项目组，探讨和研究促进提高 CNGV 储存压力的有关措施：在四川省自贡市拟新建一座 40Mpa 的 CNGV 高压加气站；在重庆市将开展 35Mpa 小型乘用车和轻型载货车的性能及燃气消耗量试验；拟开展气瓶储存压力值和盛装量之间关系曲线的测定试验；在重庆万州地区将申报开展高压加气站和高压天然气出租车的运行实验；等等。两协会已向工信部、住建部、市场管理总局等主管部门正式提出了修订 CNGV 相关标准的建议。

住建部已于 2021 年 6 月 28 日颁布了天然气汽车高压加气站的新标准 GB50156-2021；工信部也计划在 2022 年推出 35Mpa 燃气汽车技术条件的新标准；全国气瓶标委会（SAC/TC31）也将各企业新编制的高压车用气瓶和高压站用气瓶标准备案归档，将制定并颁布 35Mpa 车用气瓶和 40Mpa 站用气瓶的新国标。

四、 $\geq 40\text{Mpa}$ 的高压加气站要求提供更加安全的站用气瓶

据估计、40Mpa 高压加气站初始采用的站用气瓶可能仍是 I 型钢瓶。因为 I 型钢瓶结构简单，只需增加气瓶壁厚、就能提高压力限值，很容易实现升级，升级的成本较低。但是，在 $\geq 40\text{Mpa}$ 的环境下仍然采用 I 型钢瓶、是有很大大风险的：因为

提高压力后、虽能用增加壁厚的办法提高该气瓶的强度去防止失效；但气瓶内部存在的细微缺陷、会因压力提高而更容易扩展成裂纹，造成事故。解决问题的彻底办法就是：在气瓶的外部再缠绕一层同质材料的高强度钢丝缠绕层，以防止其内胆的突然爆裂，并保持较长的疲劳寿命。

我们认为，在 $\geq 40\text{Mpa}$ 工况下、站用气瓶既不宜采用 I 型气瓶，也不宜采用玻璃纤维或碳纤维等非金属材料缠绕的 II、III 型钢瓶。

因为实践已经证明，无论是玻璃纤维缠绕的钢瓶、还是碳纤维缠绕的铝瓶，都会在使用若干年以后、会因缠绕层的预应力衰减而出现内胆体积的永久性膨胀变形、甚至破裂失效。ISO 也因此规定：复合材料气瓶的设计寿命一般不得超过 20 年。

五、钢丝缠绕 III 型钢瓶能满足 $\geq 40\text{Mpa}$ 高压加气站的要求

高强度钢丝是在 ISO11119-2012 标准中曾被推荐的一种高强度缠绕线材，但是始终没有成为高压气瓶的标定线材。这是因为：当时没有 $> 25\text{Mpa}$ 的高压加气站市场需求；没有高强度的钢丝产品；也没有人开展过钢丝缠绕的应用研究。而我们现在可以向业界推荐的钢丝、乃是一种已在高速轮胎中成功应用的低价格、高强度线材：其断裂强度能达到 4200Mpa ，直径仅为 0.2 毫米，断裂延伸率为 2%，价格仅为 18-20 元/公斤。质量稳定，价格低廉，并已实现批量生产。完全可以把这种优质、低价的高强度线材应用于 CNGV 站用气瓶：其强度指标虽低于碳

纤维，但价格却远具有竞争性；其蠕变温度高，又有很高的疲劳寿命；缺点则是密度高、自重大，不适合用于车载气瓶。

钢丝缠绕气瓶的优势主要体现在**能形成具有稳定性的缠绕层和较高的疲劳寿命，并具有低廉的价格**。这些特点系由钢丝自身所决定的：机械构件的疲劳设计理论已经证明：预应力构件可以和整体构件一样、具有较高的疲劳寿命，但自重却大为减轻。预应力构件却能调控应力幅值和平均应力间的比例，而整体构件却只能调控应力幅值本身。只要设计合理，钢丝缠绕结构的气瓶完全能够达到 30 万次以上的疲劳寿命。

钢丝缠绕气瓶的内胆和缠绕层具有相同的材质，其弹性模量和热胀系数相同，在长期反复的充气放气过程中，内胆和钢丝层热胀冷缩的量值是相同的，因而不会出现预应力衰减的现象，确保了该气瓶在力学结构上的稳定性。而非同质材料的缠绕层则因与内胆的胀缩量不同、会出现预应力衰减现象、造成内胆发生永久性的变形。这也是非金属材料缠绕的气瓶（玻璃纤维或碳纤维缠绕的 II、III 型气瓶）疲劳寿命仍然低下的原因。

在 ISO11119-2012 标准中的缠绕材料栏目里，就已经推荐过高强度钢丝。但因当时没有高压加气站的市场需求，也没有满足相应指标的钢丝产品，只能作出原则性的推荐。现在情况不同了：40Mpa 的 CNGV 高压加气站新标准已经颁布，正待推广实施；低合金钢高压气瓶也已应用于 45Mpa 的氢能加气站；高强度低价格的细钢丝产品也已批量上市，技术已经成熟；只需

在业内开展钢丝缠绕的应用试验，将高强度钢丝应用于高压气瓶，完成开发气瓶新品规定的程序，便能实现钢丝缠绕III型气瓶的开发和应用。

发明专利“一种钢丝缠绕结构的高压气瓶”（专利号 ZL 2013 1 0108284.1）已于 2015 年 07 月 01 日授权，是自有知识产权的专利技术。北京天海工业公司曾在其现有装备上、利用该项专利开展过钢丝缠绕结构的 25Mpa、75L II 型钢瓶（环向缠绕钢瓶）的试验工作。在缠绕结构、缠绕工艺、水压自紧、爆破试验等方面均取得了阶段性成果和经验，也发现了钢丝缠绕气瓶在工艺上、结构上应予解决的问题和改进的方向。但因当时市场没有紧迫的需求，（I 型钢瓶已能满足要求）没必要再用增加成本的办法去开发钢丝缠绕气瓶。天海公司作了一些试探后，就停止了该项目的研发工作。

现在的情况不同了：40Mpa 的 CNGV 加气站标准 (GB50156-2021) 已经颁布，继续沿用 I 型钢瓶将会暴露出许多安全问题；45Mpa 防氢脆的 I 型气瓶也已研发成功，有必要在该气瓶的表面增加钢丝缠绕层、进一步提高其使用安全性；这些都为开发钢丝缠绕结构的III型气瓶创造了良好的条件。

目前开发钢丝缠绕气瓶的主要工作是设计制造出合格和稳定的钢丝缠绕III型站用气瓶。要通过设计、试验和定型工作，掌握钢丝缠绕的设计和工艺；制订出稳定的工艺规程和检测方法；使之形成规范，编制成企业标准，形成新产品；重点则是

开发出能顺利完成站用气瓶钢丝缠绕作业的专用机械手。

六、钢丝缠绕气瓶或将成为高压加气站的标配产品

我们建议，开发和推广钢丝缠绕结构的III型高压气瓶产品，用于 $>25\text{Mpa}$ 的站用气瓶，其理由是：

站用气瓶的压力限值提高到 40Mpa 以后，其安全性已是一个突出的问题。如果仍然采用I型钢质气瓶，就很危险了：其一，气瓶壁厚大幅增加后、制造难度增加了（例如热处理和无损检测），产品可能会达不到质量要求；其二，气瓶出现微细裂纹和发生破裂的可能性大大增加，安全性会大打折扣。压力愈高、危险愈大；因此，压力在 $\geq 40\text{Mpa}$ 的高压环境中采用I型结构的整体钢瓶是极具危险的，应该尽快纠正；

另外，仅仅采用玻璃纤维缠绕的II、III型气瓶，也是不够完善的：因为按照ISO新规定的设计原则，在 $>25\text{Mpa}$ 的环境中缠绕层的厚度大增，造成结构臃肿，失去了轻巧和低价的优势；而且，实践也证明了这类玻璃纤维缠绕层的气瓶在使用中会有明显的预应力衰减现象；气瓶内胆的容积会膨胀，发生不可恢复的永久变形，致使其设计寿命只能控制在15-20年以内。

即使采用了碳纤维缠绕的III型钢瓶、也因缠绕层和内胆的材质不同，也会存在着预应力衰减问题。碳纤维缠绕只解决了缠绕层提高强度和更加轻量化，但没有解决气瓶延长疲劳寿命的问题。ISO规定的碳纤维气瓶设计寿命也只限于20年；

因此，在 $\geq 40\text{Mpa}$ 站用气瓶领域中、我们推荐采用钢丝缠

绕结构的III型钢瓶去取代 I 型钢瓶；去取代玻纤环缠结构的 II 型钢瓶以及碳纤维全缠结构的III型钢瓶；以便充分发挥这种气瓶高寿命和低成本的优势，促其成为高压加气站的标配产品。

七、钢丝线材的缠绕工艺性

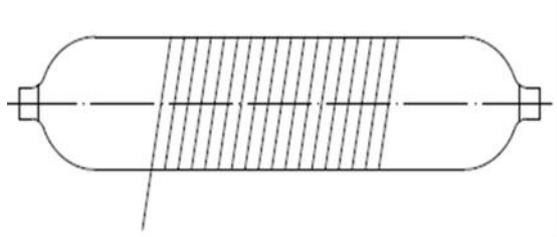
III型气瓶的典型结构是在金属内胆的全部外表面缠绕着树脂碳纤维束的气瓶。树脂碳纤维束经加温固化后，在内胆的外表面形成了一个稳定的碳纤维增强层，通过水压自紧工序使内胆产生预压应力，增强层则产生预拉应力，气瓶仍处于受力平衡的状态；因此III型气瓶不但能减轻承受的最大拉应力、还能减少气瓶的整体重量。既能实现轻量化、又能承受高负荷。

经树脂浸渍的碳纤维线束、既有柔软性，又具粘接性。可以顺利地缠绕在金属内胆的全部外表面上，能使缠绕层紧密地粘结在内胆表面上，具有良好的可缠绕性。

钢丝线材则不然，它虽有强度高、价格低的优势，但因没有开发出亲合力强的树脂，目前只能进行干性缠绕；又因钢丝束的柔性较差，在球冠处缠绕时可能会出现跳丝故障；因此，需要重新开发钢丝缠绕层的合理结构和工艺：要么找出与钢丝束亲合力强的树脂或粘合剂，以便继续沿用碳纤维束的（湿性）缠绕工艺和装备；要么尽快设计出干性钢丝缠绕层的合理结构、便于顺利地进行缠绕作业；本文侧重于设计出合理的钢丝缠绕层结构并完善其干性的缠绕工艺。

钢丝气瓶的缠绕层可以分解成环向缠绕层和轴向缠绕层。

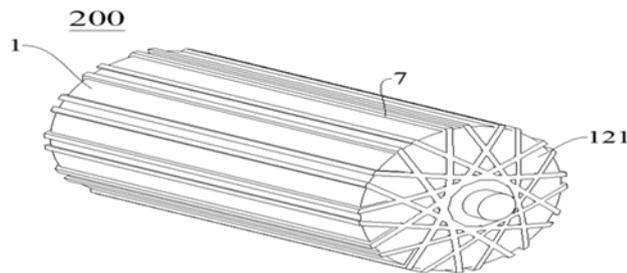
1) 环向钢丝缠绕层



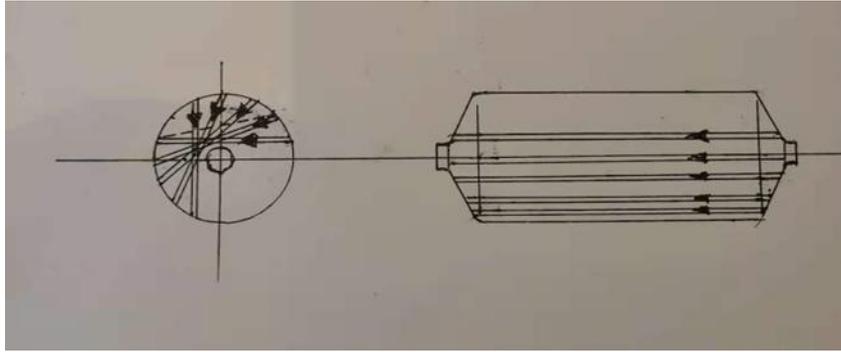
将钢丝束线材沿气瓶圆柱面的左端向右作螺旋线形缠绕，到达右端圆柱面终点时折返，完成第一层环缠；折返后由右向左继续作螺旋线缠绕，到达左端尽头时再折返，完成第二层环缠；如此继续，直到完成设计所要求的环缠层数。

2) 轴向钢丝缠绕层

钢丝束沿圆柱面平行于轴线方向缠绕到球冠处时，沿着某一固定弦线方向前行缠绕；每次缠绕到球冠处、弦线长度都不变；而内胆则自转一个角度；可在球冠处形成均匀的交叉状的缠绕轨迹；继续缠绕，便形成了多层网状缠绕层。用以向内胆施加足够的轴向预应力。可先行设计出缠绕的方案，确保钢丝能均匀分布在球冠的表面。如下图所示。

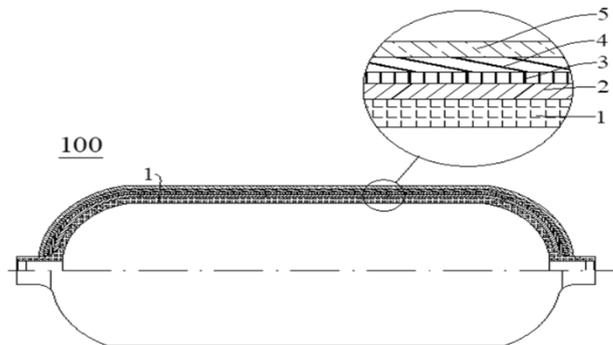


气瓶两端球冠处的内胆形状最好制成圆台状，以便钢丝束能在球冠表面顺利缠绕。



八、钢丝缠绕III型气瓶的结构

钢丝缠绕站用钢瓶的纵向剖面如下图所示：1为合金钢材质的内胆（35CrMo，由直径 $>559\text{mm}$ 的无缝钢管4130X旋压制成）；2为环氧树脂铺底层，用以增加钢丝缠绕层和内胆之间的粘合力；3为纵向钢丝缠绕层，用以对内胆施加轴向预应力；4为环向钢丝缠绕层，用以对内胆施加环向预应力；5为专门设置的玻璃纤维树脂薄层，用以保护钢丝层的外表不遭磕碰、免受外力冲击；



钢丝缠绕站用气瓶可分为长管气瓶和集束式气瓶两种型式。

九、长管气瓶式站用气瓶

在 25Mpa 的CNGV加气站中、目前都采用35CrMo材质的I型长管气瓶，外径为 $559\text{--}711\text{mm}$ 、长度为 $8000\text{--}11500\text{mm}$ ；在 40MPa 的高压CNGV加气站中、将采用增厚型的I型长管气瓶；

在 45Mpa 氢能加气站站中、目前采用的是经特殊处理的增厚型 I 型长管气瓶，外径 485mm 壁厚 35.5mm 长度 8000mm（容积为 1000 升）；我们建议将上述长管气瓶都改造成钢丝缠绕结构的 III 型气瓶。按照以下步骤制作：

- 1、在内胆外表面涂刷一层环氧树脂铺层；
- 2、在钢丝缠绕专机上进行轴向钢丝缠绕层的缠绕作业施工；
- 3、在同台专机上进行环向钢丝缠绕层的作业施工；
- 4、在环缠设备上进行玻璃纤维树脂保护层的作业施工；
- 5、缠绕工序完成后的气瓶需经加热固化，以保持其结构的稳定性；
- 6、对钢丝缠绕气瓶进行水压预紧处理：将钢丝气瓶置于盛满冷水的水箱中，气瓶内部充满软质水；对气瓶内的软质水施加足够的水压，致使内胆的钢材发生屈服变形，保压数分钟；释放水压、取出气瓶、放出瓶中剩水；烘干气瓶，即完成了该缠绕气瓶的水压自紧工序。自紧后的内胆承受着预压应力，可以抵消部分工作拉压力；自紧后的钢丝层则承受着预拉应力和工作拉应力叠加的组合拉应力。预紧后的钢丝缠绕 III 型气瓶方可作为正常商品交付。

十、开发钢丝长管气瓶的缠绕专机

钢丝缠绕机是开发钢丝缠绕气瓶的关键装备。它必须保证钢丝缠绕的工序能够正常操作；应有足够的生产效率、满足气瓶生产的节拍要求；基本设想如下：

1》能将典型尺寸的气瓶内胆架设在工作台的两个支架上，缠绕机布置在工作台的正前方，能完成对内胆的环向缠绕和轴向缠绕的有关动作；缠绕机的附属装置布置在缠绕机的后方。

2》环向缠绕：内胆可沿支架连线作旋转运动；缠绕机可沿气瓶的轴向作往复运动；通过气瓶自转和缠绕机轴向往复移动，可以实现环向缠绕。

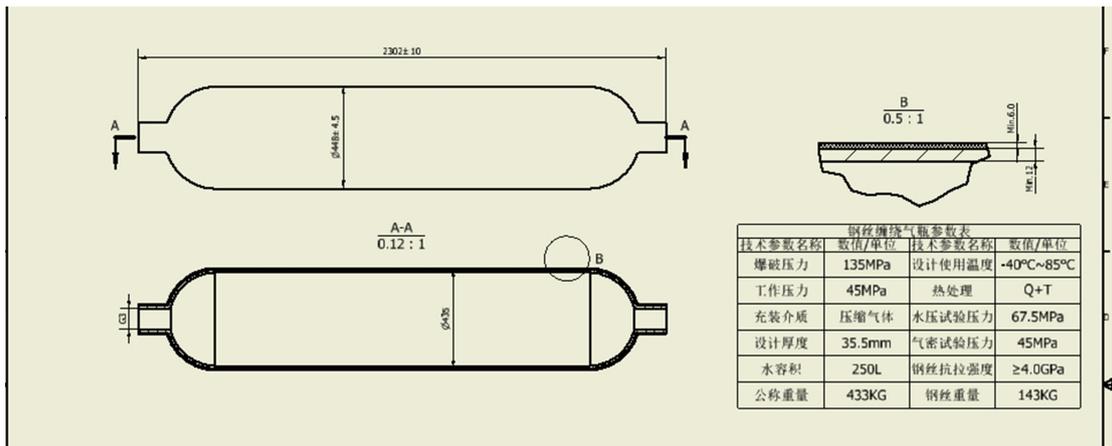
3》轴向缠绕：缠绕机应能按照设计的缠绕轨迹、引导钢丝束作出相应的缠绕操作：从气瓶一个端面沿轴向反复地缠绕到另一端面，内胆则配合缠绕、作小角度的旋转，钢丝束在球冠处发生交叉、形成网格，均匀地覆盖在内胆的全部表面上。

4》缠绕机能将钢丝束从料仓通过导论、张紧并引导至出口，对气瓶内胆进行缠绕。具有智能和示教的功能，稳定地实现缠绕。

5》按照一小时缠绕完一只气瓶的节拍要求，确定每道工序所需的作业时间，进而确定有关机构的结构尺寸和运动参数。

十一、集束气瓶式站用气瓶组

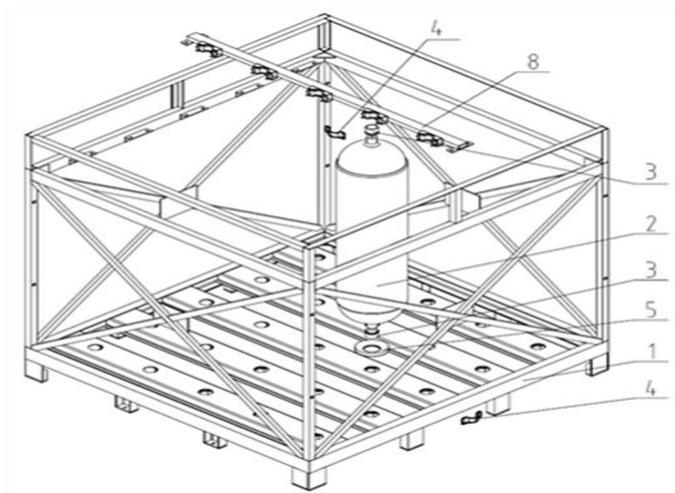
站用气瓶也可以选用小容积气瓶组成的集束式橇体结构。例如将 15-25 只 45Mpa 的 250 升钢丝气瓶组装在橇体中，可承担起储存高压氢气的功能。单只气瓶尺寸如下图所示：



该气瓶的外形尺寸等同于载货汽车的车用气瓶。只需在原缠绕车间内添置一台钢丝缠绕专机，就能够完成钢丝缠绕结构的III型钢瓶的生产。

气瓶橇体是一个立体桁架，下部的Ω形横梁用以固定气瓶的下部、支撑气瓶重量；上部和侧面则只要将气瓶夹持牢固即可。采用对合式瓦盖4结构、夹紧气瓶两端的瓶嘴，固定在橇体的上、下横梁上。瓦盖和瓶口间设有弹性橡胶圈3，气瓶底部还增加了一个缓冲用的盆形橡胶垫5。橇体要比长管气瓶复杂，增加了不少高压管道和附件，也增加了费用。

橇体结构如下图：



采用中小型气瓶用作站用气瓶可简化气瓶制造，也节省了

周检费用，有利于加快建设更多的 CNGV 加气站和氢能加气站。

十二、钢丝束的交货状态

缠绕用的钢丝束应构成“一”字形，以便于顺利进行缠绕，并有利于对内胆施加均匀的压力。但同时又必须照顾到缠绕的效率。可将几根直径为 0.2mm 的细钢丝先组成钢丝细束，再排列成“一”字型绳束：例如，可先将 3 根细钢丝编成 3X1 的钢丝细束、再将 5-7 根细束排列成一字型的线束交付；又如，先将 7 根细丝编成 (1+6) 细束、再将 5-7 根细束排成较粗的一字形绳束交付；也可以先将 7 根直径为 0.2mm 的高强度钢丝编成左旋方向的 (1+6) 六边形钢丝细束；再将 7 股钢丝细束，编织成一根右旋方向的 (1+6) 六边形钢丝绳束，以此作为基绳交付。基绳应作好防腐蚀处理、以连续长索的方式缠绕在卷筒上交付。气瓶厂将此基绳再整编成 3-5 排型钢丝束线材、以适应不同直径的站用气瓶，用作环向缠绕或轴向缠绕的线材。

十三、钢丝缠绕层起头处和收尾处的处置

钢丝层的起头处需要作人工辅助处置：先将钢丝绳头处用低熔点合金（如焊锡）封固，再将绳头人工塞放在后续缠绕层的下面、处于能被压紧的状态，便可以继续进行缠绕作业了。

钢丝层的收尾处也需要人工辅助处置：将端部带孔的扁钢针、预置在最后 3-5 圈处；继续缠绕、使钢丝绳压住钢针；到达收尾处、剪断钢丝绳，用焊锡封固绳头，再将剪断的绳头穿入预埋扁钢针的孔内；抽出扁钢针，钢丝绳尾即被牢牢地压紧

在最后的几排钢丝缠绕层下面了，也就形成了稳定的缠绕层了。

十四、开发能与细钢丝束亲和的树脂或者粘结剂的设想

如能通过试验、开发出与细钢丝亲和力强的树脂或粘结剂，就可以制备出能进行湿性缠绕的钢丝束线材。目前还只是一种设想。例如将细钢丝束硫化成“一”字形的连续线材，既能将多股钢丝通过硅橡胶硫化粘结在一起，形成整体，可在层与层之间涂施胶料粘结，便于缠绕操作。既可以改善钢丝束的缠绕性，还可以提高钢丝束的抗腐蚀性能。值得通过试验、研究探讨：如能成功，将可以由钢制品公司直接供应硫化后的钢丝束线材：例如先将7根（1+6）直径为0.2mm的高强度细钢丝编成六边形状（1+6）的细钢丝绳；再将10根细钢丝绳硫化成排成一字形线材；以此70根细钢丝组成的一字形硫化线材、作为原材交付。硫化后的细钢丝束包含了70根细钢丝，既便于包装运输和正常保管；又便于在现有设备上顺利进行缠绕作业；但必须认真细致地分析清楚该硫化线材的物理性能，确保硫化后的钢丝绳束能顺利通过高压气瓶新产品定型所必须的各种试验。例如：枪击试验、跌落试验、火烧试验、耐腐蚀试验，等等。

结语

钢丝缠绕属于气瓶的增强技术，也是气瓶的一种缠绕结构。其特质是采用了低成本、高强度的细钢丝，缠绕在钢质内胆的外表面，构成了同质材料的增强结构。除了能防止钢质内胆突然爆裂外，还具有很长的疲劳寿命。特别适宜应用于站用气瓶。

钢丝缠绕气瓶缺点之一是缠绕层的比重太大，(7.85g/cm³)只能用作固定式的站用气瓶，不能用作车用气瓶；缺点之二是细钢丝束的柔性较差，目前也没有开发出与之亲和的树脂或粘合剂，还不能像碳纤维束那样、直接采用传统的装备进行湿性缠绕，只能另行开发干性缠绕工艺、开发出钢丝缠绕的专用装备，才能顺利实现量产。

(完)