

路运输至港口堆码。换罐加注的 LNG 动力船到港停泊后，港口吊装设备将其上的空燃料罐吊装至码头指定位置，再将满罐的燃料罐吊装至 LNG 动力船上罐箱位置并与供气系统连接。2023 年，中海石油气电集团有限责任公司江苏分公司在江苏徐州港成功为“宏远-徐州号”和“宏远-武汉号”两艘 5000 吨级 LNG 动力船实施了全国首次换罐燃料补给<sup>[2]</sup>，标志着该模式的实际应用。

换罐加注在加注效率上优势显著，国内有学者已对其进行了讨论。林钢<sup>[3]</sup>等人分析了船用 LNG 燃料罐换罐加注模式的优势、劣势及应用前景，指出相较于其他加注方式，燃料罐箱的建造周期可减少 50% 以上，且能依托现有港口设施大幅降低投产成本，有助于快速构建水域两岸的 LNG 船加注网络，有效缓解 LNG 燃料加注难题。刘保利<sup>[4]</sup>等人的研究发现，在已有固定式加注设施基础上，配置适量移动式加注资源可进一步提升加注服务质量。潘阳<sup>[5]</sup>等人则指出，换罐加注相比传统模式能显著缩短加注时间，提升码头利用率，同时也探讨了 LNG 码头及装卸过程中的潜在风险、应对措施及作业要求。由于换罐加注仍处于起步阶段，当前国内研究不多，流程中仍有众多亟待解决的关键问题，LNG 罐箱与供气系统连接就是其中一个关键点<sup>[6]</sup>。液化天然气（LNG）具有超低温、易气化、易燃易爆的特性<sup>[7]</sup>，一旦发生泄漏，极易引发严重事故，如何保证罐箱与供气系统的连接可靠性是必须解决的关键问题。

表 1 LNG 物性参数<sup>[7]</sup>

温度/ (°C)	压力/ (Mpa)	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	比热/ (kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热导率/ (mW·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	粘度/ (μPa·s)
-163	0.1	454	3.05	190.70	134.96

传统固定式法兰连接无法满足移动式罐箱频繁拆装的需求，当前普遍借鉴船舶加注系统中的方案，采用软管与干式快速接头的组合，而现有干式快速接头（图 1 所示）在振动环境下存在密封失效风险，难以应对 LNG 的极端物性与船舶特殊工况的叠加效应。船舶航行中持续受到波浪冲击、发动机振动及“燃料-机械-流体-结构”多物理场耦合作用，导致连接管路承受复杂动载荷。主流干式快速接头依赖三卡爪连接，无锁止结构，在长期振动下易发生密封失效或意外松脱，安全可靠难保证。其次，为满足 IGC 防火安全标准，必须采用耐高温、阻燃性优的双层金属软管<sup>[8]</sup>，但该产品具有质量大，最小弯曲半径大的固有缺陷，与船上狭窄空间

形成冲突。空间约束迫使软管长度缩短，进一步限制柔性补偿能力。现有干式快速接头多为旋转推进式<sup>[9]</sup>，需人工扭转实现锁紧，但在短距离刚性金属软管场景下，操作人员受限于空间对中，扭转操作难度大，大幅降低换罐效率。连接规范性与操作便捷性上难以兼得。



图 1 传统干式快速接头

由此可见市场上主流旋转卡爪式快速接头结构与换罐加注的需求存在冲突，现有接头结构上未针对船舶振动设计抗松脱机制，操作方式上未适应短距离刚性金属软管的空间约束，未能平衡 LNG 超低温介质密封可靠性与快速拆装效率的要求。因此针对换罐加注模式对快速接头提出的既要具有长时连接的可靠性，又需具有连接断开的便捷性的要求，本文新设计了一种抱箍连接式新型换罐快速接头以满足换罐加注的需求。

## 1 新型换罐快速接头设计

新型抱箍连接式低温新型换罐快速接头公称直径为 DN50mm，设计压力 1.6MPa。整体外形见图 2，该接头包括公头和母头两部分，其中公头长 120mm，母头长 238mm，连接后长 350mm。公头通过阀芯弹簧弹力实现自密封，当公头阀芯受到与弹簧弹力相对的外力作用时，阀芯远离阀座流道打开。母头上设置有抱箍连接装置用于与公头连接；阀门手柄与阀芯之间为齿轮齿条结构，转动阀门手柄即可实现母头阀芯的轴向移动。

公头安装在罐箱上，软管与母头组合安装在 LNG 供气系统的冷箱接口处。该新型换罐快速接头采用了一种非旋转式的快速耦合方式：公头与母头的对接通过一个抱箍装置实现紧配合连接。此设计的显著特点是，操作时无需旋转母头本体，仅需提拉抱箍把手即可完成公母头的锁紧。为确保在船舶航行振动期间仍能保持长时间连接的可靠性，抱箍锁紧后需插入专用的锁止安全销。

公母头抱箍连接后，见图 3，通过转动母头上的阀门手柄开启内部流道，方可进行 LNG 输送。断开连接时，

必须遵循严格的操作顺序：首先关闭母头阀门以切断流体，然后移除锁止安全销，最后下压抱箍把手解锁分离公母头。不按顺序进行操作的行为均可能导致密封失效和泄漏。为防范人为误操作，本接头在设计时增加提示和互锁设计。阀门手柄上设有清晰的开启/关闭位置标识；而锁止安全销的插拔动作本身，也作为连接/断开状态转换的关键步骤，对操作者起到重要的流程确认作用。

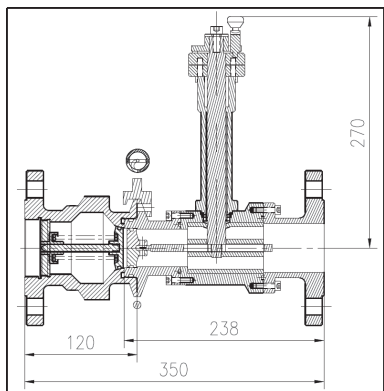


图2 换罐快速接头尺寸图

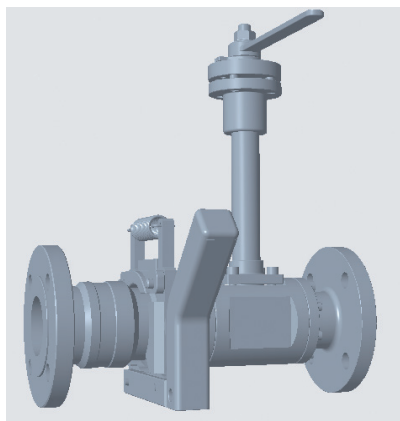


图3 新型换罐快速接头模型连接状态

## 2 新型换罐快速接头校核

### 2.1 温度场分析

接头在使用过程中内部充满低温 LNG 液体，在加注作业或输送液体过程中，表面将积累厚厚的冰层，需对接头温度场进行分析校核，确保接头手柄处不会结冰。利用 Ansys Mechanical 对其进行温度场计算，接头所处环境按常温 20℃ 计算，LNG 物性参数参照表 1。设置快速接头外表面为自然对流换热条件，取换热系数为 5W/m<sup>2</sup>·K；内表面为强制对流换热条件，计算得内部流动普朗特数 Pr 为 2.16：

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (1)$$

式中： $\mu$  为流体动力粘度，Pa·s； $C_p$  为流体比热，J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>； $k$  为热导率，W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。

根据 CCS 规范标准要求，管路内 LNG 的流速不得超过 12m/s，以最优换热情况计算雷诺数 Re 为 2.02E<sup>6</sup>：

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

式中： $\rho$  为密度，kg·m<sup>-3</sup>； $v$  为流体速度，m·s<sup>-1</sup>； $D$  为管路直径，m。

根据 D-B 公式 (3)、(4) 计算换热系数，得到对流换热系数 h 为 13218.18W/m<sup>2</sup>·K。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3)$$

$$h = \frac{Nu \times k}{D} \quad (4)$$

式中：Nu 为努瑟尔数，无量纲。

仿真得到的温度场如图 4 所示，其中接头流道部分长期处于低温环境中，阀门手柄和抱箍手柄处温度约为 5℃，不会发生结冰现象。

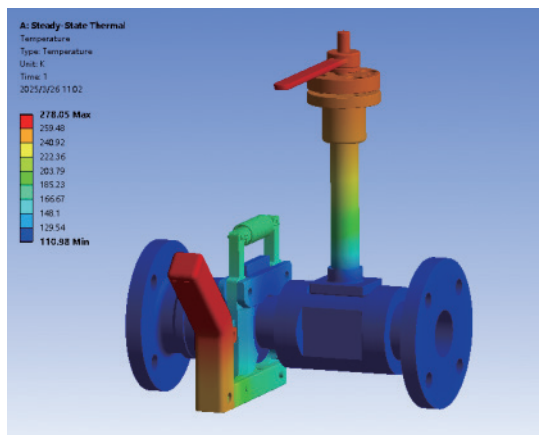


图4 换罐接头温度场分布

### 2.2 流阻分析

新型换罐快速接头内部阀芯为一片式阀板结构，可充分利用流道空间。采用 Fluent 软件对新型换罐快速接头的流阻进行校核，以 50m<sup>3</sup>/h 加注流量换算得管路内介质流速为 7.07 m/s，进口边界条件设置为速度边界，进口速度为 7.07 m/s，出口边界条件设置为压力出口，设置为 0.1MPa。利用 Meshing 划分网格，采用四面体网格划分，平均网格质量 0.853，节点数 111140 个，导入 Fluent 进行计算，得到压力分布图和速度矢量图分别如图 5、图 6 所示。在 50m<sup>3</sup>/h 流量下接头流阻约为 0.07MPa。从图 6 可以看出，介质在接头流道中输送时占据的横截面积与入口截面积相当，基本无流量损失。同时计算了不同流量下新型换罐快速接头的流阻如图 7 所示，可对

后续接头在管路中的应用提供参考。

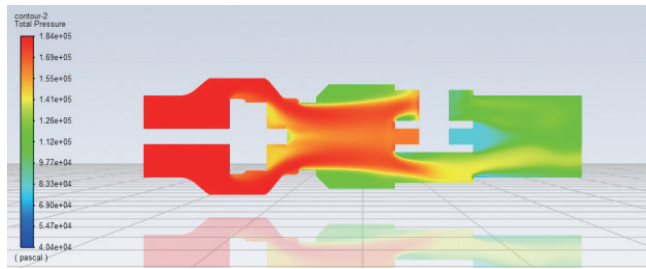


图 5 新型换罐快速接头压力云图

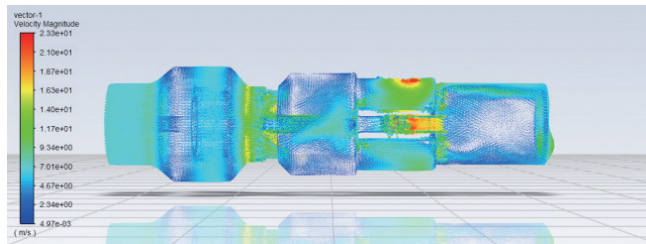


图 6 新型换罐快速接头速度矢量图

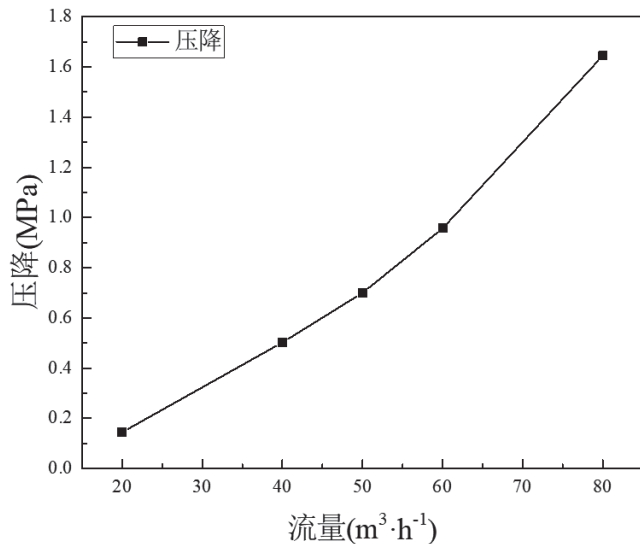


图 7 新型换罐快速接头流阻 - 流量曲线

### 3 新型换罐快速接头试验验证

为了进一步验证新型换罐快速接头的性能，满足 LNG 动力船换罐加注实船应用的要求，对其开展试验验证。试验主要依据 ISO 21593《船舶与海上技术 液化天然气加注干式快速接头技术要求》<sup>[10]</sup> 进行，除常规的密封性，强度试验外，还包括特定的功能性试验如结霜条件下的人工操作力试验，耐久性试验等。同时针对换罐加注的特点依据 CCS《钢质海船入级规范》第 3 篇第 2 章附录 3“机械接头的型式认可”中夹扣式和机械槽式接头振动（疲劳）试验的相关要求进行振动试验验证。

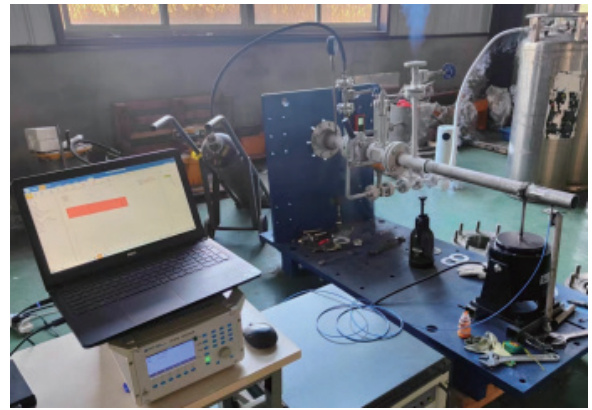


图 8 振动试验现场

#### 3.1 结霜条件下的人工操作力试验

试验环境利用加湿器加湿，使得新型换罐快速接头处于 95% 以上的湿度环境下，利用低温液氮开展液氮，要求在接头表面冰层厚度 10mm 以上情况下进行接头分离操作，分离力不得大于 350N。在预冷 2 小时后，接头表面形成 10.3mm 厚冰层，同时接头手柄位置与抱箍手柄橡胶套均未结冰，可方便人员操作。经测试，接头分离力为 25N，满足标准要求，在结霜时操作人员可轻松完成接头分离。

#### 3.2 耐久性试验

连接断开新型换罐快速接头 10000 次，其中 5000 次需在高湿度环境下进行，要求该过程无泄漏。采用低温液氮对接头管路进行预冷直至管路出口阀门开始喷液，开始进行连接断开试验，每完成 1000 次的操作试验后，关闭液氮入口阀门，接头复温至常温后，重复上述试验直至完成 10000 次操作。该过程中，接头无泄漏现象发生，试验表明接头抱箍密封性稳定可靠。

#### 3.3 振动测试

试验台为悬臂型结构，换罐接头公头法兰与试验台立板刚性连接，母头法兰连接长管路，在距离连接抱箍处约 1 米处施加振动并作为振幅测量点。采用低温液氮对接头管路进行预冷直至管路出口阀门喷液开始振动测试，接头在低温下依次按表 2 所示振动工况进行测试，振动时长超 110h，振动过程无泄漏情况发生，试验表明接头可适应船舶航行期间的微振动情况。

表 2 振动试验参数

周期数	幅度, mm	频率, Hz
$3 \times 10^6$	$\pm 0.06$	100
$3 \times 10^6$	$\pm 0.5$	45
$3 \times 10^6$	$\pm 1.5$	10

### 3.4 性能对比

将新型换罐接头从操作性,抗振动性,安全功能与国外某品牌干式快速接头进行对比分析。新型换罐快速接头采用抱箍提拉式连接方式,解决了传统干式接头需要旋转推进,软管扭矩大的问题,其结霜条件下断开操作力为 25N,某国外干式快速接头分离力约为 160N,前者仅为后者 1/6,新型换罐快速接头操作更方便。在抗振动性上,某国外干式快速接头在进行表 2 中 0.06mm 振幅振动试验时,在振动约 5h 后发生滴液泄漏,试验表明干式快速接头在船舶航行微振动的环境中可能有泄漏风险,新型换罐快速接头通过 110h 全部振动测试。在安全功能上,干式快速接头具备自密封结构,公母头分离后两端能自动密封,具备意外脱落防泄漏功能;新型换罐快速接头不具备自密封结构,阀门手柄与抱箍手柄操作有严格顺序要求,设置有抱箍安全销防止脱落。两接头对比结论详见表 3。后续将考虑结合干式快速接头与换罐快速接头特点,进一步开展结构优化,将抱箍操作动作与阀芯开闭动作连锁,使其可实现自密封功能,进一步提升操作安全性。

表 3 接头性能对比

接头	操作性	抗振动性	安全功能
新型换罐快速接头	分离力 25N, 操作便携	强	无意外脱落自密封功能, 具备安全销防止脱落
国外某干式快速接头	分离力约 160N, 需旋转推进连接	弱	具有自密封结构, 脱落后可防止泄露

## 4 结论

(1) 分析换罐加注模式特点,对罐箱与供气系统之间连接接头提出要求,该接头必须具有抗振动性,既有长时连接可靠性,又有断开/连接操作便携性。

(2) 设计研发了抱箍连接式低温新型换罐快速接头,采用有限元流体分析软件对其温度,流阻特性进行仿真校核。结果表明,在低温使用环境下接头结构设计合理,阀门手柄和抱箍手柄无结冰情况;在 50m<sup>3</sup>/h 流量状态下,接头流阻为 0.07MPa,并获得新型换罐接头流量-流阻曲线。

(3) 开展接头结霜操作力,耐久性,抗弯,振动等性能试验,并顺利通过各项试验。试验结果表明在接头表面 10.3mm 冰层厚度下,接头分离力为 25N,人力操作可轻松分离;接头在 10000 次耐久性试验中无泄漏情况发生,疲劳寿命满足要求;在 460Nm 弯矩下低温

保持 10min 无泄漏发生;接头在 110h 以上振动工况下无泄漏情况发生。

(4) 本论文提出的新型换罐快速接头在低温可靠性、操作便捷性及抗振性能方面均优于传统干式接头,但当前设计仍存在非自密封结构的局限性。未来研究将重点优化联动机制,通过机械连锁设计实现“抱箍提拉动作”与“阀芯关闭动作”的同步触发,从而在意外脱落时自动切断流体通路,提升接头的本质安全性与工程适用性。

### 参考文献:

- [1] 石国政,张晖,范洪军.天然气燃料动力船燃料加注模式研究[J]. 船海工程,2013,42(06):57-60.
- [2] LNG 换罐补给模式正式进入船舶市场[J]. 市场瞭望,2023,(03):2.
- [3] 林钢,苗小超,张莹莹.船用 LNG 燃料罐换罐加注模式探讨[J]. 水运管理,2023,45(12):18-20+25.
- [4] 刘保利,余德平,郑建风.内河液化天然气加注码头储罐分配与加注船调度集成优化[J]. 系统工程理论与实践,2023,43(12):3668-3684.
- [5] 潘阳,王忠杰,刘川川,等.长江干线 LNG 集装箱码头 LNG 船舶燃料罐换罐分析[J]. 中国水运,2025,(10):49-50.
- [6] 王思佳.内河 LNG 动力船换罐模式新突破[J]. 中国船检,2023,(02):26-29.
- [7] 游立新,顾安忠.液化天然气热物性的计算[J]. 石油与天然气化工,1991,(02):48-52.
- [8] 应媛媛,李亚鹏,宋健,等.高柔性真空多层绝热软管的研制[J]. 机电产品开发与创新,2016,29(04):28-29.
- [9] 陈晨,程龙军.液化天然气装卸干式接头设计及应用研究[J]. 安全、健康和环境,2022,22(07):15-20+28.
- [10] 刘铁英,吴顺平,吴笑风,等.船用 LNG 加注干式接头性能试验与技术标准[J]. 船舶标准化工程师,2019,52(05):21-28.

基金项目:“XXX 型绿色智能沿海内河示范船”CBG4N21。