

适用于高压大流量的快速接头的设计方法

魏伟

因特威流体技术（嘉兴）有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i7.8227

[摘要] 随着工业技术的不断发展，高压大流量快速接头在能源、化工、航空航天等领域的应用日益广泛。这类接头需在高压、大流量的工作环境下保持稳定的密封性和连接可靠性，对设计提出了极高的要求。本文将探讨适用于高压大流量的快速接头的设计方法，通过深入分析接头的结构原理、材料选择、密封机制及连接稳定性，提出一套科学、合理的设计策略，以满足现代工业对高效、安全、可靠连接技术的需求。

[关键词] 高压大流量；快速接头；设计策略

Design method of quick connectors suitable for high pressure and high flow

Wei Wei

Intever Fluid Technology (Jiaxing) Co., LTD

[Abstract] As industrial technology continues to advance, high-pressure, high-flow quick connectors are increasingly used in sectors such as energy, chemicals, and aerospace. These connectors must maintain stable sealing and connection reliability under conditions of high pressure and high flow rates, which places extremely high demands on their design. This paper explores the design methods for high-pressure, high-flow quick connectors by analyzing their structural principles, material selection, sealing mechanisms, and connection stability. It proposes a scientific and practical design strategy to meet the modern industrial demand for efficient, safe, and reliable connection technology.

[Key words] high pressure and large flow; quick connector; design strategy

引言：

快速接头作为一种无需专用工具即可实现快速连接的装置，广泛应用于各种流体传输系统中。对于高压大流量场景，快速接头不仅需要具备快速、简便的连接特性，还必须能够承受高压冲击，保持长期稳定的密封性能。传统的快速接头设计往往难以满足这些严苛要求，因此，开发适用于高压大流量的新型快速接头具有重要意义。本文将从结构设计、材料选择、密封机制及连接稳定性几个方面出发，探讨适用于高压大流量快速接头的设计方法。

1. 结构设计分析

1.1 内胀式密封连接方式

内胀式密封连接方式结构型式适合于高压大流量快速接头，即手柄弯曲使连接杆活动，进而推动金属爪牙内缩以实现紧密抱管壁，该密封圈形变除了严格接触管壁的表面，还能通过内胀生成一个稳定的密封面。该连接式适合承受高压冲击的

场合，即增大接头内壁与管道内壁的接触面积，有效增强了该结构接头的密封性能与连接稳固性。研究发现采用内胀式结构的接头其抗泄漏性增强了大约 20% 以上，可适用于各种管径和管道材质，具有更高的适应性，在长期使用中金属爪牙与密封圈相结合不会对接头连接出现频繁连接、拆卸过程中松动或泄漏。对这种结构的接头研究，其在承受最大压力可达到 100MPa 的接头承受状态下仍能很好的保证密封与稳定性^[1]。

1.2 强化接头主体结构

根据高压大流量的工作环境要求，在接头主体结构设计上应进行优化设计，在高压作用下确保接头具有良好稳定性。一般情况下会在接头壁厚方面进行设置，还可以选择高强度合金材料，通过热处理淬火来提升其抗压强度和耐磨性。增加接头壁厚有助于提升接头所承受的高压压力，能有效维持接头在长时间高压环境中的运行无损坏变形。材料方面一般选择高强度合金材料，不锈钢或钛合金，这类高强度合金本身所具有的

物理特性，对高压冲击有一定的抵受能力，同时本身的抗氧化、耐高温能力较强，能在高压环境下维持高强度的物理性能。可以看出，材料选择采用钛合金的接头，其抗压能力可达到 850MPa，不锈钢可达到 650MPa。

2. 材料选择分析

2.1 高强度合金材料

合金材料是设计高压大流量快换接头的重要部分，具备高力学和耐腐蚀性能。不锈钢、钛合金等常用作快换接头主体以及关键部件，这类材料本身具有高力学性能及良好的耐腐蚀、耐高温特性，可以保障高压大流量工况下，接头流体冲击压力作用下良好工作的力学性能。如不锈钢的屈服强度高达 250MPa，工作温度为 600℃ 以上等耐高温特性，这类参数都适用于高压大流量工况条件。如钛合金具有质轻、强度高的优点，耐腐蚀，可有效保障在恶劣工况下，耐久、长久地工作；如在使用工况需求比较高时，比如在深海探测装置、高温气体输送环境等特殊场合，钛合金可更保障使用寿命的稳定性。不同的合金成分可有效保证在长时间、高压大流量工作状态下，具有优异的物理力学性能，不发生材料的疲劳或断裂等。

2.2 高性能密封材料

对于快速接头设计，其密封材料具有决定性的意义，尤其在高压大流量情况中，密封材料性能好坏直接影响其工作性能和安全性。对于耐高温高压以及抗腐蚀性能较强的高性能密封材料有着很好的密封效果和可靠性。氟橡胶和聚四氟乙烯 PTFE 作为高性能密封材料都是常用的高性能密封材料。氟橡胶是耐温、耐腐蚀性能比较优异的材料，其使用温度普遍在 -40℃~+250℃，即使在高温下也有较高的弹性和较好的密封性。PTFE 的摩擦系数很小，并且其具有很好的化学惰性，可以在较高浓度的强酸、碱、有机溶剂中使用。在设计快速接头结构时，接头在最大压力为 150MPa 的载荷下用氟橡胶和 PTFE 密封圈，接头的密封性能较好^[2]。

3. 适用于高压大流量的快速接头的设计策略

3.1 优化密封结构设计

高压大流量快插接头设计的关键在于其密封结构，密封结构设计的好坏直接关系到快插接头的寿命及可靠的安全。因此在对密封结构进行优化设计时，应从多方面考虑，不仅要符合压力高、密封腔内压力变化剧烈的工况，也要考虑快速插拔的要求。对于密封结构，应从流体力学和材料力学角度出发，密封结构为梯度密封形式，主要包括 1 个硬密封和 1 个弹密封的组合，硬密封的材料是硬度为 HRC58-62 的高合金钢，表面镀铬处理后的粗糙度为 Ra0.4 μm，可以承受压力为 80MPa；弹性密封的材料为 Shore 硬度为 85A 的氟橡胶，工作温度 -40~230℃，两密封层的配合间隙为 0.02-0.05mm，密封效果与流体压

力自动匹配。经测试表明，该梯度密封形式在压力 60MPa 泄漏率小于 0.01ml/min，比常见的单层密封大幅降低。仿生学理念也被引入密封结构创新，模拟鲨鱼皮肤微结构，在密封面上刻蚀深度为 0.1-0.3mm 的倾斜沟槽阵列，沟槽倾角 15°-20°，形成流体的动态自紧固效应^[3]。在高压流体冲击下，微沟槽中流体方向的湍流会形成动量使密封面自身压紧，压力增加密封效果越好。经测试表明，该仿生结构在瞬时脉冲压力 80MPa 时，密封面的变形不超过 0.005mm，实现了稳定密封。此外，弹性元件也至关重要，在此方面做文章可以更加有效的增强密封性。普通高压 O 型密封圈很容易产生挤出密封，而变径设计采用了 X 型截面密封圈，其密封圈变形回弹性率高达 95% 以上，嵌入密封圈的中心位置有 0.8mm 厚的 PEEK 防挤出环。X 型密封圈与壳体的接触面积是 O 型圈的 1.3 倍，在同等压力下接触应力变小，因此密封元件的寿命更长。通过使用实际测试，这种变径设计密封的 6000 次对接-分离循环测试密封度下降不超过 5%，O 型圈设计下降达到 20% 以上。

3.2 提高连接稳定性

高压大流量快速接头的连接稳定性是保证其使用可靠性、在极端工况下实现安全性运行的关键指标，可通过其连接结构、连接件、连接材料等多方面入手保证连接稳定性。为了提高其连接稳定性，发展一种可靠连接机构是提高其稳定性基本路径。双锁定连接机构结构在该连接结构的基础上加入一组内部和外部的锁定机构，内部采用由弹簧带动钢球的锁定，钢球直径 8-10mm，硬度 HRC60，并布设在周向 120° 的位置；外部使用快速旋转的锁紧环，采用梯形螺纹（导程角 5°-7°）实现自锁。这种连接结构在承受径向 35kN 外力的作用下，连接部位发生相对位移不大于 0.02mm，实现了连接的超高稳定性。此类连接机构通过试验证明，在经过 2000 次振荡试验（频率 20-80Hz，加速 10g）后，还具有保持原接头连接强度的能力。另一方面，载荷应力集中情况的改变对连接稳定性也十分重要。通过有限元计算和实验对比的研究方法确定出合理的载荷传递路径；在高速接头关键连接部位采取分流措施，将载荷由集中作用力变成多个受力点，单点最大应力比传统连接降低 45%；连接部位的连接过渡部位采用 R2-R3mm 的圆弧过渡，减小应力集中系数，其系数由常规设计值 2.8 减小至 1.4 以下。根据实测数据，在脉动压力（0-70MPa，0.5Hz）的环境载荷情况下接头的疲劳寿命增加超过 3 倍。同时利用材料表面处理工艺对提高连接界面的稳定性做出了贡献。采用离子氮化+等离子碳化处理方式对连接部位进行表面处理，厚度 0.08-0.1mm，有效提高了连接界面的稳定连接性能。复合硬化层厚度达到 12mm，硬度达 HV1200，摩擦系数下降至 0.15 以下，并通过纳米陶瓷颗粒（Al₂O₃，粒径 50~80nm）增强的涂层技术对连接

界面进行处理，使接触面的耐磨损性能提升4倍。长期磨损试验结果表明连接-分离循环达5000次的接触面尺寸差在0.01mm以内，确保了连接的可靠性^[4]。

3.3 加强散热设计

热管理是确保高压大流量快速接头长期可靠工作的关键因素，因为流体从高压工况流过高压接头的过程中会产生热能，如果不利于散热会导致接头中密封件老化、材料衰减、系统崩溃。对高压大流量快速接头进行更好的散热设计是保证产品长期可靠工作的关键之一。冷却设计关键是要确定产生热量的来源。接头产生热量主要是在流体的流动过程产生摩擦热、转向热、漩涡热等。利用CFD计算流体动力学数值仿真，有40L/min的流体通过标准的DN25接头，局部温升为35—45℃，高温点在流道转角和密封处。根据此特点，内流道进行优化设计，流道转角选用R8-R10mm的大曲线转角，并且流道截面变化控制在±5%，保证了雷诺数较低($Re < 2300$)，降低了能量耗损及热流量的产生，实际测量结果表明温升下降40%。其次在结构上创新设计散热效果。在接头外壁增加径向散热翼片，高5—8mm，厚2mm，间隔4—6mm，增加表面积140%；散热翅片采用380W/(m·K)的铜合金材质，在接头内壁使用铜材材料的热导将内部热量快速传导至外表。另外，相变材料的应用，接头关键点使用相变温度为60—65℃的石蜡基相变材料胶囊（直径2—3mm），潜热值210J/g，在温度变动中自动吸放热量，起到了调温作用。结果表明，上述设计使工况流速波动（10~60L/min）下的接头温度波动由±15℃降为±5℃，确保了对温度敏感元件的性能稳定。最后，表面处理对散热性能影响也较大^[5]。对表面进行黑色阳极氧化处理（氧化厚度15~20μm），可使表面发射率提升至0.85以上，提升辐射散热能力。对表面进行外表面等离子微弧氧化处理，形成微孔结构（孔径2~5μm，微孔密度800~1000/mm²），使表面与空气接触面积增大，其对流换热系数提高了35%。热循环试验（环境温度20~80℃，热循环次数5000次）结果显示，采用表面处理技术的接头散热性能稳定可靠，性能衰减量不超过7%，相较于常规处理方式优越很多。

3.4 实施智能化监测

智能化监测系统为高压大流量快速接头的安全运行提供了全新保障，通过实时数据采集与分析，可及时发现潜在问题并采取预防措施。这一技术的应用不仅提高了接头的安全性，也延长了系统的使用寿命。多参数集成传感网络是智能监测的核心组成部分。在接头关键位置嵌入微型传感器阵列，包括压力传感器（量程0~100MPa，精度±0.5%）、温度传感器（量程-40℃至150℃，精度±0.3℃）和应变传感器（灵敏度10mV/με）。这些传感器采用MEMS工艺制造，尺寸小于3×3mm，

不影响接头原有结构和性能。传感器数据通过I²C总线（通信速率400kHz）实时传输至微控制器，采样频率可达200Hz，确保对快速变化的工况进行准确监测。实际应用表明，该系统能够检测到幅值仅为2MPa、持续时间短至50ms的压力波动。再有，边缘计算技术的应用实现了智能预警和自适应控制。接头内置ARM Cortex-M4微处理器（主频80MHz，内存128KB），执行实时数据处理和状态评估算法。采用改进的卡尔曼滤波算法对传感数据进行去噪处理，信噪比提高12dB；通过小波变换进行特征提取，识别异常模式的准确率达95%以上。系统建立了基于模糊逻辑的健康状态评估模型，将接头状态分为“正常”、“注意”、“警告”和“危险”四个等级，并通过蓝牙5.0模块（传输速率2Mbps）将状态信息传输至控制中心。测试验证，该系统能够在故障发生前12~24小时预测潜在问题，为维护人员预留充足的处理时间。除此之外，远程监控与大数据分析显著提升了接头的全生命周期管理能力。每个接头配备唯一ID码和NB-IoT通信模块（功耗<5mW），定期将工作参数上传至云平台。云端采用深度学习算法分析历史数据，建立接头性能衰减模型，预测剩余使用寿命，准确率达85%以上。系统还实现了接头群组管理功能，对同一系统中的多个接头进行协同监控，识别系统级别的异常模式。实际部署数据显示，这套监控系统使预防性维护效率提高65%，计划外停机时间减少78%，设备综合效率（OEE）提升15%。

结语：

综上所述，适用于高压大流量的快速接头的设计是一个涉及多个方面的复杂工程。通过优化结构设计、选择合适的材料、制定有效的策略，可以开发出满足现代工业需求的高效、安全、可靠的快速接头。展望未来，随着工业技术的不断进步和应用场景的不断拓展，高压大流量快速接头的设计方法也将不断完善和创新。

【参考文献】

- [1]张弛.高压大流量天然气计量检定装置设计[J].化工管理, 2024, (33): 125-128
 - [2]徐飞.关于伺服电机控制高压大流量双泵液动力系统的分析[J].南方农机, 2019, 50 (15): 216.
 - [3]庞有利.门式支架液压控制管路快速接头技术的改造研究[J].机械管理开发, 2021, 36 (08): 17-19.
 - [4]刘洋.沉船存油回收阀门及快速接头设计与分析[D].大连海事大学, 2021.
 - [5]廖志雄.一种高压装卸软管强度试验装置的研发.广东省, 广东省特种设备检测研究院云浮检测院, 2020-08-06.
- 作者简介：魏炜，出生年：1994.08，男，汉族，籍贯：吉林省，职务：技术总监，研究方向：机械制造。