

管壳式热交换器结构选型及其在化工领域的应用

刘芳杏

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

摘要：本论文全面且深入地探究管壳式换热器在化工领域的应用全景。从剖析化工生产热交换刚需切入，详述管壳式换热器选材准则，考量介质腐蚀性、温度、压力等要素；解读结构选型策略，权衡管束排列、管板设计、壳体构造及折流板搭配；洞察不同化工介质特性对设备的特殊要求。结合原油蒸馏、合成氨、乙烯生产等典型工艺实例，量化其效能提升与节能贡献，精准剖析现存瓶颈，前瞻性展望创新路径，为化工热交换技术进阶提供关键理论与实操指南。

关键词：管壳式热交换器；结构选型；化工领域；传热优化

1 热交换器在化工领域的重要性

热交换器在化工领域扮演着至关重要的角色，是众多工业生产过程中不可或缺的设备之一。它们通过高效地进行热量传递，实现了能量的转换与回收，极大地提升了工业生产的效率与可持续性。在化工行业中，热交换器被广泛应用于反应物的冷却与加热过程，确保了化学反应在适宜的温度条件下进行，从而提高了产品的质量和产量。同时，它们还能有效地回收生产过程中产生的废热，将其转化为可用的热能，降低了能源消耗，实现了资源的最大化利用。电力行业同样离不开热交换器的支持；在电站的循环冷却系统中，热交换器通过吸收和释放热量，维持了发电机组的稳定运行。在锅炉系统中，余热回收热交换器的应用更是将烟气的热量充分回收，用于预热给水或加热其他介质，显著提高了能源利用效率。除了化工和电力行业，热交换器在制药、食品加工、冶金等多个化工领域也发挥着重要作用^[1]。在制药过程中，热交换器能够精确控制反应温度，确保药物的有效成分得以充分提取和纯化。在食品加工行业，它们则用于加热、冷却和杀菌等关键环节，保障了食品的安全与品质。

2 热交换器的基本原理

热交换器是一种用于实现热量传递与转换的设备，其基本原理主要基于热力学和流体力学的相关理论。简单来说，热交换器通过两个或多个不同温度的流体之间的热传导，实现热量的转移与利用。在热交换器内部，通常存在两种或多种流体，这些流体被分隔在不同的通道中，但彼此之间通过热交换器的壁面进行热传导。热量从温度较高的流体（称为热流体）通过壁面传递到温度较低的流体（称为冷流体），从而实现热量的交换。这一过程主要依赖于三个基本的传热机制：传导、对流

和辐射。在热交换器中，传导是热量通过固体壁面（如金属管壁）从一种流体传递到另一种流体的主要方式。对流则是流体内部因温度差异引起的流动，它有助于增强热量在流体内部的传递效率。而辐射虽然在热交换器中作用较小，但在某些特殊情况下（如高温环境）也可能对热量传递产生影响。为了实现高效的热量交换，热交换器的设计通常需要考虑多个因素，包括流体的物性（如导热系数、密度、比热容等）、流动状态（层流或湍流）、壁面材料及其导热性能等。此外，热交换器的结构形式（如管壳式、板式、螺旋式等）和操作流程（如并联、串联等）也会对热量传递效率产生重要影响。

3 管壳式换热器选材

3.1 耐腐蚀性

化工介质酸碱环境，腐蚀性繁杂。强酸性介质（如硫酸、盐酸工艺流）较多，钛及钛合金应用频繁，其钝化膜具有耐腐蚀性；不锈钢316L等合金含铬、镍等合金元素具有较强耐蚀性。碱性介质环境，碳钢通过覆层镍、蒙乃尔合金应对；含氯离子腐蚀场景，双相不锈钢靠微观双相结构协同抗蚀，选材依介质化学特性精准选择。

3.2 温度适配：高温韧性与低温韧性兼顾

高温环境（超400℃），铬钼合金钢系（如15CrMo、25CrMo）凭耐高温蠕变性能，晶格结构高温不乱；陶瓷涂层碳钢复合材料借陶瓷隔热、碳钢承力。低温工况（低于-50℃），铝合金、奥氏体不锈钢低温韧性大幅体现，防脆断，保温层防冷量损失，依温度选择材质。

3.3 压力抉择：强度与韧性平衡

高压（超10MPa），厚壁碳钢、合金钢锻件应用，通过优化热处理改善微观结构，强度、韧性提高；焊接工艺精细管控，防裂纹萌生。中低压域，常规碳钢、不锈钢薄板的应用，在满足强度前提下，兼顾成本与传热效

率，依据压力等级调整材质厚度、强度等级等。

4 管壳式换热器结构选型

4.1 管束布局权衡

管束排列选择。正三角形排列换热管“紧密相拥”，空间利用率超90%，传热系数较正方形排列提升15%-20%，但清洗需“巧劲”，适用于清洁介质；正方形排列“宽松有序”，机械清洗“畅行无阻”，在易结垢工况“更胜一筹”，管间距依管径、振动风险在1.25-1.5倍管径动态调试，保障流体均匀分配与管束稳定。

4.2 管板设计厚度：承压、密封与成本方面考虑

管板是承压“核心”。固定管板结构简单、成本低，适用于温差小（ $< 50^{\circ}\text{C}$ ）工况；浮头式管板以浮动端“缓冲”热胀冷缩，温差容忍度升至 200°C 以上，大型换热器长管束尤适用，虽成本上浮30%-50%，但可靠性“超值”；U形管式管板单管板“简约”设计，管内清洗靠化学法，适用于高温高压、管程介质洁净且腐蚀强场景，依工况“量体裁衣”定厚度、材质。

4.3 壳体结构选择：工况和工艺介质特性

壳体材质根据介质不同。普通碳钢壳体通常应用于常规介质；不锈钢壳体抗腐蚀；复合钢板壳体（如碳钢+不锈钢内衬）兼具成本与耐蚀“平衡”，厚度依直径、压力经ASME等标准公式精准核算，内部折流板结构根据工艺要求选弓形、螺旋形等，弓形折流板间距依雷诺数在150-600mm优化，促湍流、控压降。

4.4 折流板优化：传热强化与流动阻力

折流板为壳程传热增效。弓形折流板主流应用，单弓形结构简单，传热增强同时，压降适中；双弓形、三弓形折流板“逐级扰流”，传热提升20%-30%，压降增量可控，适用于高粘度介质；螺旋折流板以螺旋“轨迹”引导流体，传热均匀、压降降10%-15%，在大流量、热敏介质工况优势突显，依壳程流速、粘度精准匹配。

5 管壳式换热器选型关键因素

5.1 工艺流体特性

流体腐蚀性：强腐蚀性流体（如含氯离子酸性溶液）需选耐蚀材料，如钛管或特种不锈钢管壳式换热器，或衬里（橡胶、搪瓷等）防护碳钢基体换热器；弱腐蚀流体可选普通材质并辅以涂层防腐。

流体粘度：高粘度流体传热慢、阻力大，宜选大管径换热管、低流速及特殊折流板（如螺旋折流板）促进湍流，或采用多壳程结构增加传热温差，降低粘度影响。

流体清洁度：含固体颗粒或杂质易结垢流体，选易清洗结构，如U形管式可抽芯清洗，或设置可拆卸封头、在线清洗装置，避免污垢堆积影响传热。

5.2 操作工况参数

温度：高温工况（超 400°C ）材质需耐高温蠕变，如铬钼合金钢，考虑热膨胀差异，设膨胀节补偿；低温工况防材料脆化，选低温韧性好材质，优化保温减少冷量损失。

压力：高压下换热器结构强度关键，增加壳体壁厚、选高强度材料，优化管板与换热管连接，如采用强度胀加密封焊，依压力等级选合适密封垫片，确保无泄漏。

流量：大流量要求换热器大换热面积，多管程组合，合理分配管程、壳程流量，平衡压降，用软件模拟优化，防局部流速过高或过低影响传热与设备寿命。

5.3 传热性能需求

依据工艺热负荷计算所需传热面积，考虑污垢热阻修正，选高导热系数换热管材质，优化管程、壳程传热系数，如提高壳程流体流速、设翅片管强化管外传热，管内采用螺纹管、内插物扰动流体强化传热，权衡强化传热措施与成本、压降增加关系。

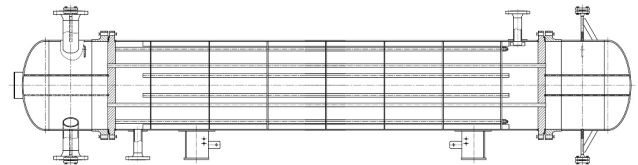


图1 固定管板式

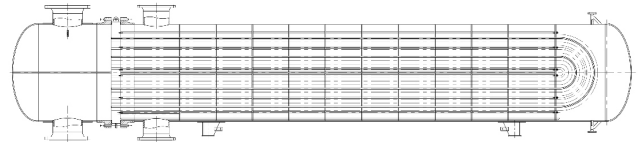


图2 U形管式

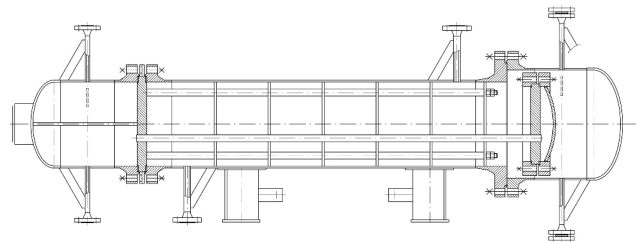


图3 浮头式

6 管壳式换热器在化工典型工艺应用案例

6.1 原油蒸馏

在炼油厂原油常减压蒸馏装置，管壳式换热器预热原油，利用塔顶馏分、侧线产品热量，降低能耗。原油走壳程防结焦，馏分走管程便于高压输送与清理，多采用浮头式结构，适应热膨胀，经优化传热面积、换热流程，提高拔出率，节能达10%-15%，显著降本增效。

6.2 合成氨工艺

合成氨变换、冷凝工序，管壳式换热器移走反应

热、冷凝氨，高温变换气（400℃左右）与水换热，选耐热高压碳钢材质，固定管板式，因温差应力小，优化管程数与折流板，确保高效传热，氨冷凝器以冷冻盐水冷却气态氨，特殊防腐处理防氨腐蚀，保障合成氨稳定生产，回收大量余热。

6.3 乙烯裂解装置

乙烯裂解气冷却与分离流程，管壳式急冷换热器迅速降温裂解气（800-900℃降至200-300℃），防二次反应，采用特殊合金材料抗高温、结焦，双壳程结构增传热温差，为后续分离提供条件，虽工况苛刻，但凭借可靠设计运行，保障乙烯高收率生产，是乙烯装置核心设备。

7 现存挑战与未来展望

管壳式换热器当下仍深陷若干困境，传热强化遭遇技术“天花板”，紧凑化进阶空间受限，智能运维尚处萌芽初级阶段。展望未来，纳米流体有望凭借微观尺度热物理特性革新，于换热微环境掀起效能革命；仿生换热表面灵感源于自然精妙热交换机制，或为结构创新注入“活水”；3D打印技术赋能换热器定制化塑形，微通道集成催生极致紧凑结构范式；物联网传感器织就全流程感知“神经网络”，AI故障预测模型护航智能运维转

型，助力管壳式换热器冲破困局，引领化工热交换技术驶向绿色智能新航道，推动产业攀越发展新高峰。

8 结束语

综上所述，热交换器作为化工领域的关键设备，其结构选型优化与高效应用对于提升工业生产效率和能源利用效率具有重要意义。随着科技的不断进步和工业化进程的加速推进，热交换器将在更多领域中发挥其独特优势，为工业生产和人类生活提供更加便捷、高效的热能转换和利用方案。未来，期待热交换器技术能够不断创新与发展，为构建更加绿色、可持续的工业体系贡献力量。

参考文献

- [1]GB/T 151-2014《热交换器》
- [2]毛希澜主编.换热器设计[J].上海:上海科学技术出版社,1988:18~26
- [3]秦叔经、叶文邦主编,换热器[J].北京:化学工业出版社,2003:5~15
- [4]铁颂文主编,换热器设计手册[J].北京:化学工业出版社,2002:141~159