波纹管与直（光）管换热器的性能比较

诺盟品牌带有膨胀节的双管板换热器有两种形式——一种为波纹管，另一种为直（光）管。由于直（光）管的价格稍贵一些，而波纹管从字面上容易让人产生管体不结实的理解，直（光）管好于波纹管的误解由此而生。本文将从专业角度对照比较一下两种形式的换热器，以便用户在选用时能够做出正确的选择。

PROCESS-Tip

* 更多信息请登录：pharm.vogel.com.cn
* **反馈编码：201240**

在药品生产的过程中，经常会涉及到对料液和介质的加热或者冷却，这就不可避免地会使用到换热器。为了避免料液和介质产生交叉污染，传统的列管式换热器已经不再被企业所接受，所以就出现了以下几种形式的换热器，见表 1。

由于管中管形式的换热器面积相对较小，所以使用较多的还是双管板换热器。在双管板换热器中，直通式的换热效果较好，故本文仅对直通式的换热器进行讨论。考虑到换热介质的温度范围较大：有时为 7 ~ 12 ℃的冷冻水，有时是较高温度的蒸汽灭菌。因此，诺盟在直通式的双管板换热器中优化设计了壳层膨胀节的环节。诺盟双管板换热器无论是直（光）管，还是波纹管换热器，都设计了膨胀节，如图 1 所示。

表 1 符合 GMP 要求的换热器形式

双管板换热器	直通式	直通式直（光）管	换热流形为逆流
		波纹管	
		毛细管	
	U 型	光管 180° 折弯	换热流形为折流
管中管式换热器	直通式	直（光）管	换热流形为逆流

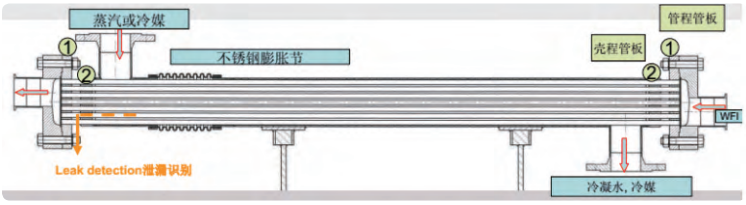

图 1 诺盟双管板换热器剖面示意图

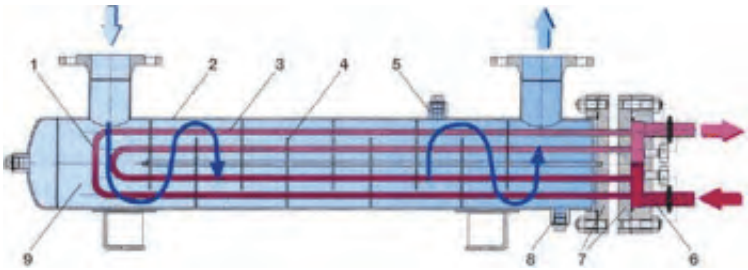

图 2 U 型双管板换热器剖面图

1 波纹管形式的由来

1.1选择直通式换热器的依据

上文提及管中管换热器的换热面积受到限制，双管板的换热器又有两种形式：直通式如图 1 所示，U 型如图 2 所示。

从图 2 中可以看出 U 型换热器的换热流形为折流，按照换热推动力的对数平均温差△t_m 为逆流的最大、顺流的最小、折流的介于两者之间。虽然折流形式的长度可以做的相对短一些，但实际的换热面积并不能变小多少。所以就出现了直通式的换热器（如图 3 所示），但直通式换热器长度会被做的很长，所以需要继续进行改进。

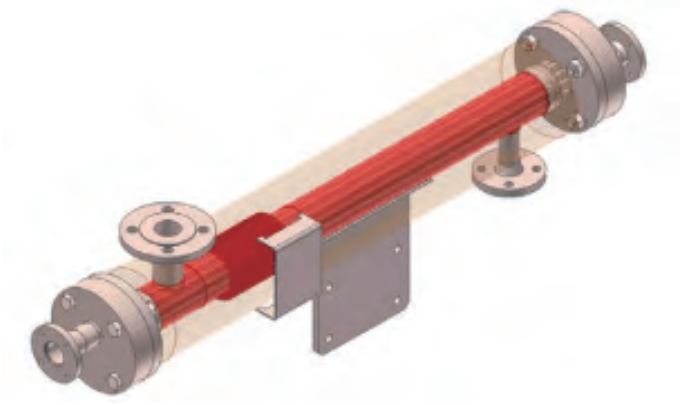

图 3 直通式双管板换热器示意图

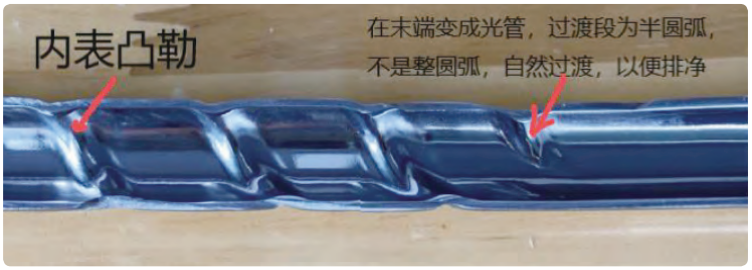

图 4 诺盟波纹管列管换热器的照片

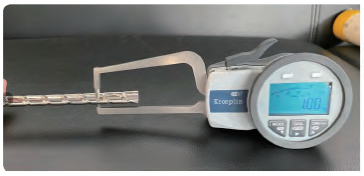

图 5 波纹管的壁厚没有变化

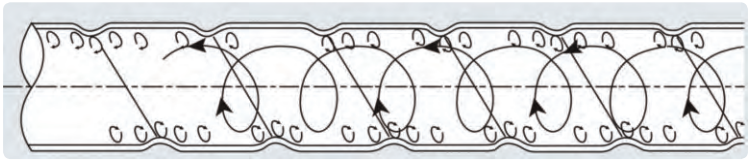

图 6 波纹管列管内径向扰动示意图

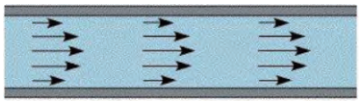

图 7 直（光）管

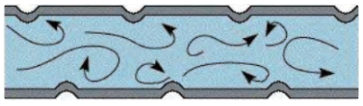

图 8 波纹管

1.2直通式换热器的性能改善

直通式换热器的对数平均温差虽然最为有利，但毕竟需要做的很长，这会对安装条件造成影响，所以在技术上有改进的需求。根据换热量的计算公式 [1]：

$Q=KS\triangle t_m$

公式中：Q——换热量；

K——总传热系数；

S——换热面积；

$\triangle t_m$——对数平均温差。

在换热量一定的情况下，如果要减小换热器的长度，一个方式是将换热器做得粗一点。但有一定的弊端，就是缩短了物料在换热器中的停留时间，这会使热交换的时间不够充分。另一个方式就是设法增加 K 值，如果能够提高 K 值的话，在 Q 值一定的时候，S 值就能够变小。于是就出现了波纹管列管的换热器，如图 4 所示。

2 波纹管列管换热器的特点

波纹管列管换热器是在直（光）管基础上，经过技术升级换代而出现的。其机理是提高总传热系数，从而降低所需要的换热面积。可以在达到同样换热效果的情况下节省材料，最终不但降低了成本，还减轻了设备的重量。

2.1波纹管的稳定性

由于波纹管本体是由光管管坯冷压痕加工而成的，一般认为其成型后对管体有强化作用。而通过外压稳定性实验可知，承受外压的波纹换热管的失稳首先发生在直管段，只有继续升高外压，波纹管才会失稳。这说明波纹段的稳定性优于直管段，具有高于直管段的失稳临界压力。

实验同时表明，波纹段的失稳变形均发生在波谷处，同时波纹段的失稳在局部的单个波谷处，一般不会出现 2 个以上的波谷同时失稳 [2-3]。这表明波峰的稳定性比波谷更好。当然如果冷压痕的工艺不到位也会出现相反的情况，在冷压痕工艺中，无论是波谷还是直段的壁厚是不变的（如图 5 所示），冷压痕完成后管体实际上变短了。这一点非常关键，如果做不到这一点，波纹管的稳定性会差于直（光）管。

另外，诺盟的波纹管列管与平时所见的波纹管还是有较大区别的。首先诺盟的波纹管只有波谷和平段，并没有波峰，而且波谷在轴向是螺旋形的，并且波纹管与板连接处的直段是一体的。

2.2波纹管列管内的换热效果

波纹管列管由于管内有波峰、

表 2 波纹管与直（光）管性能对比表

项目	波纹管换热器	直（光）管换热器	备注
价格优势	↑	↓	同样的换热量，波纹管更便宜
设备的重量轻	↑	↓	设备重量与价格成反比
压力稳定性	↑	↓	压力失稳，波纹管更优秀
耐水锤和憋压	↑	↓	但还是要避免水锤和憋压
总导热系数	↑	↓	相对而言波纹管优秀
自清洁效果	↑	↓	湍流有利于自清洁
放尽容易程度	↓	↑	波纹管倾斜后也能放尽
温差应力小	↑	↓	波纹管的影响小
列管的厚度	↓	↑	直（光）管的管壁可做得厚一些

波谷的存在，所以增加了列管中径向热交换对流的效果，如图 6 所示。

径向对流对于总传热系数 K 的影响非常大，这才是导致双管板波纹管换热器价格低廉、重量轻的根本原因。波纹管列管与直（光）管在同样长度下，其管体表面的换热面积要大一些，但这个变化远远不如改变 K 值的贡献大。

从波纹管和直（光）管管内流形的对比，能够清晰地看到其有着完全不同的效果，直（光）管接近管壁时流速明显地降低，如图 7 和图 8 所示。

用波纹管代替直（光）管制成的波纹管换热器，致使流体的速度与方向不断地发生变化，从而形成充分的湍流。这就使得所有的流体都有机会与管壁进行热交换，影响传热的边界效应便“不复存在”了。其总传热系数可以提高 2 ~ 3 倍，实际运行中有的甚至达到 5 倍 [4]。如果达到同样的传热量，换热面积就相当于原来的 0.5 ~ 3。这才是波纹管换热器价格低于直（光）管换热器的根本原因，所需要的换热面积少了，重量自然也就轻了。

根据计算和实践经验，1 mm 厚的波纹管比 0.5 mm 厚的波纹管的总传热系数要低 10%。跟踪的数百台波纹管换热器之所以运行了 10 ~ 14 年没有大修或损坏，主要得益于壁薄（几乎均为 0.5 mm）[4]。但在壁厚方面诺盟没有刻意地去满足毕渥数的要求，由于在壳层中未设置管架，所以诺盟的列管厚度设计为 1 mm。

2.3抗水锤冲击

诺盟双管板换热器的外壳都接有一段膨胀节，所以在安装使用后，如果遭受水锤的冲击或者憋压，换热器的轴线上膨胀节处就会出现错位的情况（如图 9 所示）。波纹管和直（光）管的换热器都会发生这样的情况，外壳变形后理论上都会引起列管的扭曲。正是由于波纹管有较多伸缩的余量，在经历变形时应变的弹性余地要大一些，也就是说在这样的情形下抵抗失稳的能力要强一些。但无论如何，在安装的过程中要避免水锤的发生，可以通过采取使用角坐阀、延时开关等其他措施。但如果涉及到憋压，就需要考虑介质的阀门不能够全部关死。这忠告用户在安装、使用中必须引起足够的重视。

图 9 膨胀节错位变形的图片

3 波纹管与直（光）管换热器的对比结论

用表格的形式来对比诺盟双管板换热器中波纹管与直（光）管的性能情况，结果见表 2。

从表 2 可以看出，各项关系指标中相对占优的是波纹管换热器。诺盟品牌的直通式双管板换热器，其中德国生产的是直（光）管换热器，意大利生产的是波纹管换热器。由于直（光）管换热器的价格要比波纹管换热器稍贵，于是有人将原因归结到人工费用上，但这并不是造成差价的根本原因。其实，根本原因在于波纹管换热器的 K 值很大，能够大幅度地减小 S 值，这才使得不锈钢的用量、成本、重量均降低。但正因为双管板直（光）管换热器的价格高，才容易引起价高质优的片面联想。

当然，波纹管的柔度大于直（光）管，刚度小于直（光）管，所以在设计波纹管换热器时需要注意其区别。因为波纹管在轴向力的作用下产生的位移与其刚度有关，所以不能简单地按照胡克定律来计算。

采用波纹管列管的双管板换热器，是弹性力学和传热学两大技术的完美结合，是管壳式换热器的一次革新。在选择换热器形式时，需要科学地进行判断，进而做出正确的选择。根据半导体行业的戈登 · 摩尔定律，质优价高并不是完全正确的，它将被产品的升级换代所打破。

【参考文献】

[1] 管壳式换热器：GB 151-1999.

[2] 舒庆安，冯兴奎 . 波纹换热管稳定性研究：第七届全国高等学校过程准备与控制过程专业与科研成果校际会论文集 [C]. 成都：四川大学，2000.

[3] 赵金星，丰艳春 . 波纹换热管的性能分析 [J]. 管道技术与设备，1997（6）：8-9+25.

[4] 顾广瑞 . 波纹管换热器的若干理论问题 [A]. 化工进展，2006（25）.