

宋虎堂 李多民 李培宁 黄振海 著

FENGWO JINCOU JIEGOU LUOXUANBAN

HUANREQI SHEJI JI YINGYONG

蜂窝紧凑结构螺旋板 换热器设计及应用



化学工业出版社

宋虎堂 李多民 李培宁 黄振海 著

FENGWO JINCOU JIEGOU LUOXUANBAN

HUANREQI SHEJI JI YINGYONG

蜂窝紧凑结构螺旋板 换热器设计及应用



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书作者结合多年工作经验及研究成果,介绍了蜂窝结构螺旋板紧凑换热器的研究进展及这种换热器的结构特点、强度及其流体传热数值模拟方法,并采用数值模拟和试验验证方法对这种新型换热器结构内部流体流动和传热情况以及结构的强度进行了分析研究,为蜂窝螺旋板换热器传热面设计计算及强度计算提供了手段,同时介绍了蜂窝紧凑结构螺旋板换热器的工业应用前景。

本书共有 6 章,内容丰富详尽,可供石油化工企业传热制冷等各有关专业设计、制造使用参考,也可供高等院校、科研院所研究人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

蜂窝紧凑结构螺旋板换热器设计及应用/宋虎堂等著.
北京:化学工业出版社,2011.9
ISBN 978-7-122-11962-9

I. 蜂… II. 宋… III. 蜂窝结构-螺旋板式换热器-
设计 IV. TQ051.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 149829 号

责任编辑:辛 田
责任校对:宋 玮

文字编辑:冯国庆
装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:化学工业出版社印刷厂
850mm×1168mm 1/32 印张 5 字数 126 千字
2011 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

蜂窝紧凑螺旋板换热器是目前正在研究的一种新型的换热设备，它综合了板式、板翅式和螺旋板式三种换热器的优点，其外部采用圆筒体耐压结构，内部蜂窝单元将一个个大直径的圆筒压力容器化解为一个个蜂窝状的许多小单元压力容器，这种小单元蜂窝，卷紧后紧密接触，承压能力和刚度要比整块筒壳大许多，既耐高压又抗失稳。另外，它内部密密麻麻的蜂窝孔均布于换热器的内部，既增大了换热器的传热面积又使传热介质充分接触换热，流体流经窝槽，产生碰撞，形成扰流，改变了流动状态，且没有流向急转弯和传热“死角”，实现两流体全逆流对流换热；流速大，阻力小，传热效率高。在相同换热面积下，占空间更小，紧凑度更高，可选用薄板制造，节省材料，重量轻；与板翅式相比，蜂窝之间不需要焊接；蜂窝板冲制可实现自动化，成本低，制造简单，可实现大型化和微型化。

综上所述，由于这种换热器强度好，可用于较高压力场合，传热效率高，可回收低位热，同时，结构紧凑、重量轻，成本低廉，制造简单，能广泛应用于石油化工、精细化工、医药卫生、电力能源、航空航天及日常生活等各行各业，因此，它是一种很有发展前景的热交换设备，具有很大的推广应用价值。

本书作者详细介绍了这种新型换热器的结构特点，采用数值模拟和试验验证方法对这种换热器结构内部流体流动和传热情况以及结构的强度进行了分析研究，为该换热器传热面设计计算及强度设计计算提供了手段。

本书第1章、第2章和第3章由宋虎堂、李培宁编写，第4章由黄振海编写，第5章由宋虎堂、李多民编写，第6章由李多民编写，全书由宋虎堂统稿，李培宁对本书的编写与审阅给予了大力指导。由于编写时间和编者的水平有限，不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 螺旋板换热器的研究进展	3
1.2.1 结构形式及其特点	4
1.2.2 结构设计的研究进展	7
1.3 流体传热数值模拟技术的发展	9
1.3.1 有限差分法	9
1.3.2 有限容积法	10
1.3.3 有限单元法	10
1.4 夹层结构传热研究进展	11
1.5 周期性充分发展流传热技术	12
1.6 蜂窝紧凑结构螺旋板换热器开发研究意义	13
第 2 章 创建蜂窝紧凑结构螺旋板换热器的构思	16
2.1 引言	16
2.2 板式换热器、螺旋板换热器及板翅式换热器的比较	17
2.2.1 板式换热器	17
2.2.2 螺旋板换热器	17
2.2.3 板翅式换热器	18
2.3 集螺旋板、板式及板翅式换热器优越性为一体的蜂窝 紧凑结构螺旋板换热器的构思	18
2.4 蜂窝螺旋板蜂窝结构与板翅式紧凑换热器蜂窝 结构的比较	20
2.5 蜂窝紧凑结构螺旋板换热器的结构特点及优越性	21
2.5.1 结构强度	21
2.5.2 传热效率	22

2.5.3	结构紧凑度	23
2.6	蜂窝紧凑结构螺旋板换热器设计制造技术的研究	23
2.6.1	蜂窝紧凑结构螺旋板换热器的总体设计	23
2.6.2	凹凸波纹螺旋板的设计制造技术的研究	25
2.6.3	蜂窝螺旋板的卷制技术的研究	27
2.6.4	传热设计中的关键技术	27
2.6.5	蜂窝紧凑螺旋板强度设计及板材的选择	28
2.6.6	螺旋板板薄引起的换热器两端封闭的结构 设计问题	28
第3章	蜂窝状螺旋板换热器螺旋板凹坑结构尺寸与强度	29
3.1	引言	29
3.2	蜂窝螺旋板之间受力状态分析	30
3.3	应用 ASME 第Ⅷ卷第1册附录17 进行强度设计的 探讨	32
3.3.1	蜂窝螺旋板强度采用 ASME 第Ⅷ卷第1册附录17 进行设计的方法与结果	32
3.3.2	蜂窝密度与尺寸的限制	35
3.3.3	基于平板理论的 ASME 方法用于蜂窝螺旋板是过分 保守的	36
3.4	应用 ASME 第Ⅷ卷第2册 5.2 章的方法进行蜂窝螺旋 板强度计算的探讨	37
3.4.1	ASME 第Ⅷ卷第2册的概况	37
3.4.2	本书结构采用三种塑性垮塌载荷分析法适用性的 分析论证	39
3.5	极限分析实例及计算结果	42
3.5.1	实例结构形状及尺寸	42
3.5.2	蜂窝螺旋板受载直至塑性垮塌过程的数值模拟 及结构破坏机理分析	44
3.5.3	不同实例结构允许载荷的计算结果汇总表	53
3.5.4	许用载荷计算结果的分析与评论	54
第4章	蜂窝状螺旋板换热器流体传热的数值模拟	58

4.1	引言	58
4.2	基于周期发展流模型的数值模拟对流传热技术	59
4.3	蜂窝螺旋板模型简化及网络划分	61
4.3.1	模型简化	61
4.3.2	网络划分	63
4.4	螺旋通道弯曲度对传热的影响	65
4.4.1	无扰流件圆弧通道弯曲度对流体及传热效果的影响	65
4.4.2	带短圆管状扰流件的弯曲通道弯曲曲率对传热的影响	68
4.5	螺旋通道宽度 H 对传热及压力降的影响	68
4.6	扰流件排布对传热的影响	70
4.6.1	扰流件的排布和模型	70
4.6.2	圆筒扰流件流场的研究	72
4.6.3	圆筒扰流件两种排布的温度场	73
4.6.4	圆筒扰流件间距对传热及压降的影响	74
4.6.5	扰流件密度相同时不同排布的 $\overline{Nu}/(\overline{Nu})_0$ 及 $\Delta p/(\Delta p)_0$	77
4.6.6	扰流件排列方式及 L/D 的选择	78
4.7	短圆筒状扰流件锥度对传热及压降的影响	80
4.8	内、外层板壁均有凹坑对传热及压降的影响	83
4.8.1	内、外层板均有凹坑夹层结构作周期性流计算时采用的半凹坑周期性单元	84
4.8.2	流场分布	84
4.8.3	温度场	86
4.8.4	两板均带有凹坑对 Nu 的影响	86
4.8.5	两板均带有凹坑对压力降的影响	88
4.9	采用单流道结构模型实验验证	88
4.9.1	单流道实验模型	89
4.9.2	实验方法及步骤	90
4.9.3	实验测量与数据处理	90

4.9.4 数值模拟结果	93
4.9.5 单流道结论	94
第5章 蜂窝螺旋板换热器模型制造的实践及其传热计算的 试验验证	96
5.1 引言	96
5.2 蜂窝螺旋板换热器制造关键技术探讨	97
5.2.1 蜂窝螺旋板的成形工艺	97
5.2.2 蜂窝板的卷制成形工艺	100
5.2.3 端部连接	103
5.3 实验模型设计制造	106
5.3.1 换热器模型设计	106
5.3.2 制造及成品检验	107
5.4 换热器模型实验验证	108
5.4.1 验证方法及技术路线	108
5.4.2 实验模型及实测数据	109
5.5 换热器模型数值模拟	111
5.5.1 传热基本理论	111
5.5.2 模拟计算	113
5.6 模型换热器验证结论	119
5.6.1 实测数据与模拟结果对比	119
5.6.2 蜂窝螺旋板换热器的换热性能	120
第6章 蜂窝紧凑结构螺旋板换热器的工业应用	122
6.1 高效紧凑型换热器的工业应用	122
6.2 蜂窝紧凑结构螺旋板换热器的工业应用展望	123
6.2.1 蜂窝紧凑结构螺旋板式换热器的优越性	123
6.2.2 蜂窝紧凑结构螺旋板式换热器的应用可行性	125
6.2.3 蜂窝紧凑结构螺旋板换热器的工业应用展望	129
附录 符号表	139
参考文献	142



1.1 引言

节能是国民经济发展的永恒主题，换热器在国民经济和工业领域应用十分广泛。随着现代新工艺、新技术和新材料的不断开发和能源问题的日趋严重^[1]，世界各国已普遍把能源综合利用和节能放到十分重要的地位，目前，在发达的工业国家热回收率已达5%。因而换热设备发挥着重要的作用，面临着严峻的挑战。换热器的性能对产品质量、能量利用率以及系统运行的经济性和可靠性起着关键性作用，有时甚至是决定性作用。

换热设备是过程工业广泛使用的一种通用设备。据统计，在一般石油化工企业中，换热器的投资占全部投资的40%~50%；在现代石油化工企业中占30%~40%；在热电厂中，如果把锅炉也算作换热设备，换热器的投资约占整个电厂总投资的70%；在制冷机中，蒸发器的质量要占制冷机总质量的30%~40%，其动力消耗占总值的20%~30%。由此可见，换热器的合理设计和良好运行对企业节约资金、能源和空间都十分重要。提高换热器传热性能并减小其体积，在能源日趋短缺的今天更具有明显的经济效益和社会效益。

传统的管壳式换热器具有结构简单、可靠性高、适应压力范围

广、选材范围大、成本低，设计、制造和使用技术成熟等优点，特别在处理量大、温度和压力高等高参数工况下，管壳式换热器更突显其独特的优势。因此，管壳式换热器广泛应用于石油、化工、轻工、冶金、食品、制药、能源、动力、航空及其他工业部门。但是，传统的管壳式换热器一般采用光滑圆管作为传热元件，弓形折流板支撑管束，同时折流板又具有导流作用。壳程流体流动时在转折区及进出口附近涡流的滞留区都会形成流动和传热死区，从而降低了传热效率。壳程流体横向冲刷换热管束，造成较大的流动阻力，并且在大雷诺数下换热管束常发生流体诱导振动，而导致换热管泄漏失效。因此，传统的管壳式换热器在结构和性能上都有待进一步完善。

随着传热理论的发展和制造水平的不断提高，采用新型高效的强化传热表面结构、扩大传热面积、增大单位体积内的传热面积为紧凑型换热器的发展提供了契机，使得紧凑型换热器具有更为突出的优点，其应用范围也不断扩大，几乎渗透到工业与交通的各个部门，成为目前最有发展前途的新型换热设备^[2,3]。因此，如何设计开发新型高效的紧凑换热器，成为国内外研究者和制造厂家关注的热点之一。

根据工程领域和工艺条件的不同，已相继开发出紧凑型列管式换热器、板式换热器、板翅式换热器等不同结构形式的高效能换热器。相对列管式换热器而言，板式换热器、板翅式换热器均采用板面作为传热面，扩大了传热面积，增大了单位体积内的传热量。如列管式换热器 12.7m^3 ($\phi 1800\text{mm} \times 5000\text{mm}$) 的传热效果，板式换热器只需 6m^3 ($3\text{m} \times 2\text{m} \times 1\text{m}$)。但长期的使用发现，由于板边使用垫片密封，使得板式换热器的可操作压力受到很大的局限性，目前最高使用压强不超过 2.5MPa ，温度范围在 $-35 \sim 200^\circ\text{C}$ 之间。其密封周边较长，需用的垫片量大，在使用过程中需要频繁拆卸和清洗，加之板片在制造过程中会发生不平整的现象，造成板式换热器泄漏的可能性很大，因此其工程使用状况并不是很理想^[4,5]。板翅式换热器虽然具有比表面积大、设计灵活、体积小、重量轻、经

济性好、可满足许多特殊工况的换热要求等优点，但自清洁能力差，易堵塞。

综合上述分析，目前使用的这些紧凑式换热器在使用性能、适用范围和维护保修方面都具有很大的局限性。随着各种高精端技术的发展，不仅对换热器的体积和重量提出更高的要求，而且对换热器的紧凑性、换热效率和智能化维护等都提出近乎苛刻的要求。因此，亟待开发传热面密集度较高、结构强度更好的紧凑型换热器。

1.2 螺旋板换热器的研究进展

螺旋板换热器最初由瑞典的罗森勃来特^[6] (Rosemblad) 首先提出，1932 年以此人命名的 Rosemblad 公司就成批组织生产并形成专利。自问世以来，由于其结构紧凑，传热系数高；尤其是在两种介质温差小的情况下，可以回收低位热量；自洁能力强；设备造价低，占地面积小等优点，得到了越来越广泛的应用。世界许多国家相继设计、制造了螺旋板换热器，它 20 世纪 30 年代传入美国 and 英国，如美国的 AHRCO 公司、UNION Carbide 公司和英国的 APV 公司；第二次世界大战以后传入日本，如日本的“大江”、“川化”公司，随着战后日本经济的迅速发展也促进了螺旋板换热器的研究改进和进一步使用；同时，前苏联和东欧国家也相继研究和改造了该型式换热器，如前苏联的标准 TOCT12067，德国的 ROCA 设备公司等。目前对该产品的研制以西欧和北欧水平最高，特别是瑞典的阿法-拉伐 (ALFA-LAVAL) 公司，无论是制造规模和技术上都是世界上一流的。

我国从 20 世纪 50 年代中期开始使用螺旋板换热器，当时主要用于烧碱厂中的电解液加热和浓碱液冷却。1966 年我国开始研制螺旋板换热器，设计、制造部门研制了卷制螺旋板的专用卷床，使卷制的工效提高了几十倍，为推广应用螺旋板换热器创造了良好的条件。1968 年开始生产产品，第一机械工业部在苏州召开螺旋板式和固定管板式换热器系列审查会议^[5]，经过几十年的努力和不断

断改进,苏州、北京、广州、佛山等一些压力容器生产厂家相继都生产出了质量过关、性能符合标准要求的产品。特别是引进了国际先进技术,设计上采用整板卷制工艺,无中心隔板焊缝结构,解决了多年来困扰的螺旋板中心隔板应力处最易内漏的问题,体现了设计、制造的新水平。

1.2.1 结构形式及其特点

螺旋板换热器是一种由螺旋状传热板片构成的高效间壁式传热设备,由两块条形金属卷板同时卷绕形成两个同心的螺旋形通道,流道内的两种介质获得相同的流动性质,这种设计接近于理想热传递设备^[7]。对于易于堵塞或被颗粒污染的流体,螺旋板式换热器更是理想的结构,其单一的螺旋形通道结构使得流道内流体对污垢有自冲刷作用,所以,螺旋板式换热器的污垢形成速度约为管壳式换热器的 1/10。

螺旋板式换热器有I型、II型和III型三种基本形式,如图 1.1 所示。

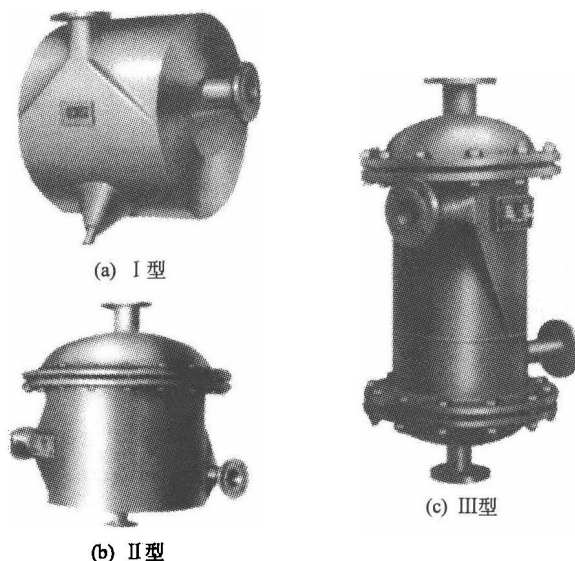


图 1.1 螺旋板换热器的类型



I 型螺旋板式换热器为不可拆结构, 这是最原始的结构型式。通道两端全封闭, 适用于对流传热, 主要用于液-液流体的传热。它虽然造价低, 但从清洗和寿命角度看, 均无法与可拆式的相比^[6]。II 型螺旋板式换热器一般采用可拆式结构, 通道交替封闭, 主要用于气-液的热交换; III 型螺旋板式换热器一般也为垫片密封式的可拆式结构, 一个通道敞开, 另一个通道封闭, 主要用于蒸汽冷凝。

螺旋板换热器具有以下特点。

(1) 传热效率尚高

由于这种弯曲的流道可产生二次流动效应, 从而激发湍流, 大大改善了流体间的热传递。如某化肥厂的合成氨加热器, 原用管壳式换热器结构, 换热面积为 30.9m^2 , 改用螺旋板换热器后, 所需换热面积仅为 15.5m^2 , 其换热效率提高了一倍, 但仍远低于板式换热器及板翅式换热器。

(2) 结构紧凑但仍很笨重

如一台直径为 1.5m 、宽为 1.8m 的螺旋板换热器, 其传热面积可达 200m^2 , 而单位体积的传热面积约为管壳式换热器的三倍, 但单位传热面的重量仍然很大。

(3) 使用可靠

由于螺旋板式换热器是由两块整板卷制后, 端部焊接密封而成, 只要保证端部焊接质量, 就能保证两种介质之间不会产生漏泄。

(4) 有自清洁作用, 不易堵塞

由于流体在设备内走的是均匀的单通道, 流速很高呈涡流状态, 因而污物不易沉积。若通道内某处有异物或余渣停滞, 那么该处的通道随即变窄, 在流量不变的情况下, 该处的流速便相应增大, 产生冲刷力便把该处的污物或余渣冲走, 这种现象便是螺旋通道特有的自冲刷作用也叫自洁作用。而对于管壳式换热器, 若某根管内壁某处有污垢沉积, 则此管的局部阻力随即增大, 则流量受到限制, 流速降低, 介质流量就向其他换热管分配, 使换热器内每根

换热管的阻力重新平衡, 这样有污垢沉积的管子流速越来越低, 流量越来越少, 越易沉积, 直到最后完全堵死。在石化装置中, 经常碰到管壳式换热器管子堵死的现象。

(5) 温差应力小

由于螺旋板换热器有两个较长的螺旋通道, 当螺旋体受热或冷却时, 可像钟表内的发条一样伸长或收缩。而螺旋体各圈之间都是一侧热流体, 另一侧冷流体, 且最外圈与大气接触, 螺旋体之间的温差不像管壳式换热器那么明显, 因此, 不会产生大的温差应力, 另外, 在轴向上, 由于螺旋体同步伸长或收缩, 产生的温差应力也较小。在使用两介质温差很大的场合, 均未发现有较大的温差应力存在。如某厂的甲醇合成塔换热器, 热介质最高温度为 $470 \sim 480^{\circ}\text{C}$, 冷介质的温度为 10°C , 平均温差为 200°C 左右。

(6) 热量损失少

由于该型式换热器结构紧凑, 即使换热器的换热面积很大, 但它的外表面还是较小的。另外, 冷、热介质流体一层层交互包覆, 且接近常温的流体通常是从最外边缘处的通道流入, 所以一般不需要保温。

(7) 能用于低位热量回收

当两流体在螺旋通道中采用全逆流操作时, 则两流体的对数平均温差较大, 有利于传热。据有关试验数据可知, 螺旋板式换热器允许的最小温差是最低的, 在两流体温差为 3°C 的情况下仍可以进行热交换。由于允许的温差较低, 因此, 工业生产中都利用这种类型换热器来回收低位热量。

(8) 有效利用流体压头损失

流体介质在螺旋通道中流动, 虽没有流动方向的剧烈变化和脉冲现象, 但因螺旋通道较长且螺旋板上焊有一定数量的定距柱, 因此, 一般情况下, 其流体阻力降比管壳式换热器要大。由于流体在通道内作均匀的螺旋流动, 流体阻力主要发生在流体与螺旋板的摩擦以及定距柱的扰流处, 而这部分阻力可以造成流体湍流, 从而提高了传热系数, 因此, 这种换热器更能有利地利用流体的压头



损失。

(9) 制造简单，价格低廉

与其他类型换热器相比，节省材料，没有大法兰和大尺寸壳体，主体材料螺旋板采用薄钢板，总体重量轻，且钢板比钢管价格便宜。另外，机加工量少，制造工时少，且一般情况下不需要探伤，因此，制造成本低，价格较便宜。

尽管螺旋板式换热器存在着上述诸多优点，但是由于其结构的特殊性，也存在以下不足之处。

(1) 不能承受太高压力

由于螺旋板式换热器的直径较大，且厚度较小，因此刚度差，每一圈螺旋板都承受介质两侧的压力，当介质压力差达到一定程度，即达到或接近板的临界状态，螺旋板就会失稳而出现压瘪现象。此外，由于端部结构的特殊性，也决定了这种类型的换热器不能承受太高压力。

(2) 适用介质有限

通道清洗用机械方法清洗较为困难，通常采用热水、蒸汽吹扫或其他清洗剂清洗，故不适合于含有固体颗粒或黏性大的介质。

(3) 修理困难

螺旋板换热器虽然不容易泄漏，但是一旦发生泄漏，往往修复困难，通常是整台报废。

1.2.2 结构设计的研究进展

(1) 通道密封结构

我国大都是采用端部圆钢焊接来进行密封的，这种结构的优点是制作简单、使用可靠，但材料浪费大，成本较高，且圆钢选材必须与螺旋体一致。

通道密封焊时焊缝咬肉和夹渣等缺陷难以避免，焊后变形亦较大。这种密封应尽量避免使用，一般只有在通道较宽、难以采用其他密封形式时才使用。从引进产品来看，其密封都采用了通道边缘翻边（弯曲）后再焊接的形式。它具有省材、结构简单、焊后变形

小及焊接缺陷少等优点。宽通道、厚螺旋板的翻边比较困难，如果为窄通道及薄螺旋板结构则翻边工艺较易实现。

(2) 螺旋体中心管结构

国内外所用的中心管，差别较大。国内一般只有 $\phi 200\text{mm}$ 和 $\phi 160\text{mm}$ 两种，中间为中心隔板，如图 1.2(a) 所示。这种结构使得中心管直径不能太小，故结构不紧凑。中心隔板又使加工量增加，且其与螺旋板之间焊缝的焊接质量无法检验，质量难以控制。而国外常用的有如图 1.2(b) 和图 1.2(c) 所示的两种形式。中心管内的衬环（半圆环），国内均采用圆钢制作，优点是加工方便。国外采用的是方钢，可确保内衬环具有足够的刚度，且焊点牢靠。

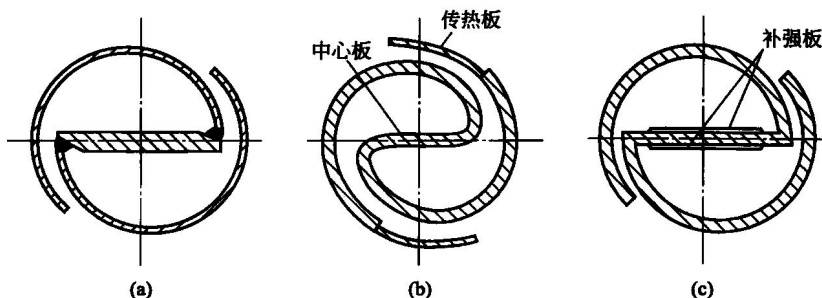


图 1.2 中心隔板的形式

(3) 接管结构

据文献[6]介绍，这种换热器进出口局部流阻要占其总流阻的 5%~10%，故对接管结构进行改进也很重要。为了降低流体阻力，我国生产的不可拆式螺旋板换热器都采用了切向接管结构。而从国外产品来看，都采用了径向接管，它主要靠径向接管下的集管来增加流量和降低接管流体阻力的，如图 1.3(a) 所示。国内用的切向接管结构，也有待改进，如图 1.3(b) 所示的焊接式接管箱有两条焊缝，焊接应力增加，存在发生焊接缺陷的可能性，同时还有流阻较大和影响传热效率的问题。现在有部分厂家已将其作了改进，即把螺旋板的延伸部分做成渐缩形的进出口，如图 1.3(c) 所示。流阻降低，减少了焊接应力和流体死角，传热效率明显改善。