

钛换热器关键部件加工与装配 质量控制：折流板钻孔、管板 钻孔与换热管组对要点解析

Machining and Assembly Quality Control for Key Titanium Heat Exchanger Components: Baffle Drilling, Tube Sheet Drilling, and Heat Exchange Tubes Assembly

供稿|邵伟, 李斌, 党燕妮 / SHAO Wei, LI Bin, DANG Yanni

内
容
导
读

钛及钛合金因其优异的耐腐蚀性和力学性能,在换热设备制造中得到广泛应用。折流板与管板作为换热器核心部件,其钻孔精度及换热管的组对质量,直接影响换热效率、密封性能与设备寿命。本文围绕钛及钛合金折流板和管板钻孔过程中常见问题,如孔径偏差、位置精度不足等,提出优化工艺参数、加强刀具管理与夹具精度等质量控制措施;在换热管组对环节,重点探讨管端处理、组对间隙控制及焊接参数优化对整体装配质量的影响。通过系统控制各关键工序,可有效提升产品精度与一致性,降低缺陷率,为钛换热器的高效、稳定运行提供技术保障。文章内容兼具工程实践指导意义与科普价值,可为相关领域的制造与质量控制人员提供有益参考。

换热器作为一种重要的热交换设备(见图1),广泛应用于化工、石油、动力、食品、环保等行业,其性能的优劣直接关系到整个工艺流程的效率和安全性。换热器在这些领域的工艺流程中占据着举足轻重的地位,不仅是热量传递的关键枢纽,更是保障整个生产系统高效、安全运行的重要因素。

2024年,国家工业和信息化部办公厅发布了《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南》,彰显出国家对节能环保与可持续发展的高度重视。在



图1 换热器

此背景下,换热器行业作为节能减排的关键领域,其发展愈发受到关注与支持。当前,美国、日本、芬兰等发达国家在换热器技术方面领先于国内,拥

作者单位:宝钛装备制造(宝鸡)有限公司,陕西 宝鸡 721014

有一定优势。然而，国内企业也在积极作为，一方面大力引进国外先进技术，另一方面深入消化吸收，并不断加强自主创新能力，力求提升自身竞争力，从而在换热器领域实现更大的突破与发展。

折流板与管板作为换热器的核心构件，其钻孔的精度及与换热管的组对品质直接决定了换热器的热交换效能、密封性能以及服役寿命。随着行业不断向精细化、高效化迈进，对换热器性能的要求也愈来愈高。然而，当前在折流板和管板钻孔及换热管组对过程中，仍存在诸多挑战，如钻孔精度难以稳定控制、组对环节易出现偏差等，这些均可能导致换热器换热效率降低、泄漏风险增加等后果。因此，深入探究并强化换热器折流板和管板钻孔及换热管组对的质量控制策略，具有重要的现实意义。通过填补现有技术短板，优化换热器的性能表现，可为推动相关行业可持续发展、提升整体竞争力提供关键支撑。

折流板和管板钻孔的质量控制

钛折流板和钛管板的特性

钛在许多腐蚀性环境中表现优异，如在含有氯离子的海水、酸性溶液（如特定浓度范围的盐酸、硫酸）和碱性溶液中，钛能够抵抗腐蚀，从而保证换热器的长期稳定运行。这是因为钛表面能形成一层致密的、具有保护性的氧化膜，阻止介质进一步与钛基体发生反应。

钛折流板具有足够的强度来承受流体的冲击和压力。其抗拉强度一般在 400~700 MPa，能够在复杂的流体工况下保持结构完整^[1]。同时，其硬度适中，在加工过程（如钻孔、切割等操作）中，需要根据其硬度特性选择合适的加工工具和工艺参数，以确保加工精度。

钛的热导率虽然低于铜、铝等高导热金属，但在热交换应用中仍具有良好的性能。其热导率在 16~22 W/(m·K)，能有效地传递热量，并且在高温环境下，钛折流板（见图 2）能够保持稳定的热交换效率，适用于较广温度范围的热交换过程^[2]。

钛的密度约为 4.5 g/cm³，相比不锈钢等材料其密度较小，因此在同等体积下质量更轻，有利于减

轻换热器整体质量，在对设备质量有要求的场合（如航空航天、移动设备等）具有明显优势。

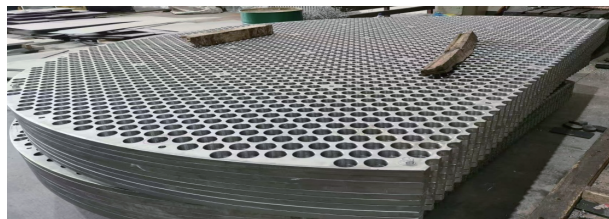


图 2 钛折流板

常见质量问题及成因

➤ 孔径偏差及成因

在管板钻孔（见图 3）加工过程中，刀具、切削参数、机床性能以及操作人员技能等多方面因素均会对孔径加工精度产生显著影响。刀具在持续使用时，因与工件的不断摩擦会逐渐磨损，致使加工出的孔径增大。切削速度与进给量若设置不当，会引起切削力波动，进而造成孔径偏差。机床自身的定位精度以及重复定位精度若不足，在钻孔操作时会产生定位误差，直接影响孔径加工精度。操作人员的熟练程度和经验对控制孔径偏差与圆度起着关键作用，经验丰富、操作熟练的人员能够更精准地把握加工过程，减少因人为操作导致的误差。



图 3 管板钻孔

➤ 孔心距偏差及成因

钻孔前的划线环节至关重要，测量误差超过 ± 0.05 mm 或划线工具自身的误差超过 ± 0.03 mm^[3-4]，均会引发孔心距偏差。加工时，工件装夹力过低会导致装夹不牢固，可能发生位移，从而对孔心距精度产生不良影响。若机床传动系统存在定位误差，会使工件加工位置出现偏差。对于摇臂钻这类需人工控制的钻孔设备，若操作不当（如进给力不均匀），极易造成钻孔偏心，导致孔心距偏差，严重影响钻孔质量。

➤ 孔表面质量问题及成因

在加工过程中,多种因素对孔表面质量具有关键影响。例如,若切削速度显著高于常规值或进给量超出标准值较多,会导致孔表面粗糙度增大并产生毛刺等缺陷。刀具的选择极为重要,若其材质与加工材料不相适配(如用普通碳钢刀具加工钛合金)或几何形状不合理(如钻头顶角设计偏差较大),均会严重影响孔表面质量。冷却润滑环节一旦缺失,刀具磨损速度将加快,孔表面质量也难以保证。此外,切屑的有效排出同样不容忽视。若切屑未能及时清除,会在刀具与孔壁间产生摩擦与挤压,不仅使孔壁出现划痕、加剧刀具磨损,还会因切屑堆积破坏切削稳定性,引发加工系统振动,导致孔底或孔壁部分区域切屑聚集,破坏后续切削均匀性,最终使管板孔表面变得凹凸不平,粗糙度急剧上升。

质量控制措施

➤ 刀具选择

钛合金凭借其高强度、低密度、耐高温以及耐腐蚀等卓越特性,在众多高端制造领域得以广泛应用,但其较差的切削加工性也给加工过程带来诸多挑战。由于钛合金导热系数低,切削时产生的热量难以快速散发,易造成局部温度过高;其弹性模量小,则使材料在加工中容易出现变形;此外,还常常伴有粘刀现象。这些都严重影响加工精度与效率。

针对钛合金的加工难题,刀具的合理选择尤为关键。在硬质合金刀具中,钨钴钛类硬质合金(如YT15)是较为理想的选择,其主要参数见表1。这类刀具具备较高的硬度与出色的耐磨性,在钛合金的粗加工与半精加工阶段表现良好,能够有效应对较大的切削量与一定的加工精度要求。

表1 YT15 硬质合金主要参数

晶粒度/ μm	密度/(g/cm^3)	硬度, HRA	抗弯强度/ MPa
0.6	11.1~11.6	91.0	180

涂层刀具在钛合金加工领域应用广泛,其表面的TiAlN、TiCN等涂层可显著提升刀具的综合性能。这些涂层不仅增强了刀具的硬度与耐磨性,还赋予良好的润滑性,可有效降低切削过程中的切削力与切削温度。在钛合金切削中,涂层刀具比未涂层刀具使用寿命提高1~5倍,切削速度提高20%~

70%,加工精度提高0.5~1级,刀具消耗费用降低20%~50%,同时也有助于提高加工表面质量。

金刚石刀具以其极高的硬度和优异的耐磨性在钛合金加工中展现出独特优势,其加工钛合金时的主要工艺参数见表2。它能够实现高精度、高效率的切削加工,使加工后的钛合金零件达到极高的尺寸精度与表面光洁度要求。然而,金刚石刀具的成本相对较高,在一定程度上限制了其大规模应用范围。

表2 金刚石刀具加工钛合金的主要工艺参数

切削深度/ mm	切削速度/ (m/min)	进给速度/ (mm/r)	切削液用量/ (L/min)
0.2~0.4	150~200	0.05~0.07	20~40

聚晶金刚石(PCD)刀具具有与金刚石刀具相近的卓越硬度和耐磨性,其主要参数见表3。此外,PCD刀具还拥有较好的抗冲击性,使其在钛合金的精密加工中具有良好表现。在对钛合金进行高精度、高质量的切削时,PCD刀具能在保证加工精度的同时,有效避免因冲击导致的刀具损坏,从而确保加工过程的稳定性与可靠性。

表3 聚晶金刚石刀具主要参数

导热系数/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	摩擦系数	热膨胀系数/ K^{-1}	硬度, HV
700	0.1~0.3	$0.9\times 10^{-6}\sim 1.18\times 10^{-6}$	8000

➤ 加工参数优化

根据钛及钛合金的材料特性和钻头直径,可确定合适的转速与进给量。例如,当钻头直径为10 mm时,转速可设为1000~1500 r/min,聚晶金刚石刀具进给速度可设为0.1~0.2 mm/r。研究发现,在此参数范围内,钻孔表面粗糙度(R_a)可控制在3.2~6.3 μm ,且钻头磨损较小。

由于钛及钛合金的导热性差、化学活性高,钻孔过程中必须进行有效的冷却润滑。例如,采用专用的钛合金切削液,并控制其流量在合理的范围内,通过内冷或外冷方式确保钻头在切削过程中始终处于良好的冷却状态,从而减少钻头磨损和切屑粘连,提高钻孔质量。

换热管组对的质量控制

换热管与管板连接常见问题

(1) 焊接参数不当。如电流、电压、焊接速度

不合适；焊工操作技能不足；焊接环境差，如存在强风、湿度高等情况均会影响焊接质量。

(2) 胀管率控制不佳。胀管器选择不合适或操作时用力不均匀，均会导致胀接质量差：胀接过松会使连接处密封不严，过紧则可能导致换热管过度变形甚至破裂。

换热管与折流板装配质量问题

折流板钻孔位置精度不足，或换热管安装过程中发生偏移，均会造成换热管和折流板不同心，影响流体的流动状态，从而降低换热效率。

折流板孔径设计不合理或加工精度差，会导致换热管与折流板之间的间隙不符合要求：间隙过大会使流体产生旁通，降低换热效果；间隙过小则可能会擦伤换热管表面，并在热膨胀时产生应力集中。

质量控制措施

换热管与管板孔、折流板之间的间隙应均匀，一般控制在一定范围内，以保证换热管与折流板的良好配合：间隙合适既能保证换热管顺利穿过折流板，又能减少流体旁通，提高换热效率；间隙过大或过小则会影响连接质量和密封性能。

对中精度直接影响换热管的受力状态和密封性能。换热管应与管板孔、折流板对中良好，偏差不应超过规定值。这有利于保证换热管与管板连接的密封性和强度，防止因径向偏差过大导致局部应力集中，从而影响换热器的使用寿命。此外，换热管伸出管板长度不宜过长或过短，否则会影响换热器的装配和密封性能，如伸出过长可能导致流体分布不均，过短则可能使密封不足。同时，应控制换热管与管板管孔的角度偏差，角度偏差过大会使换热管在管板上的受力不均匀，增加焊接或胀接难度，影响连接质量，还可能导致流体在管内流动不畅，降低换热效率。

质量检验

钻孔质量检验

外观检测可用干净的白布在孔内擦拭，观察白布上是否有污渍或金属屑残留，以判断孔的清洁度。若白布有明显污染，则孔内清洁度不符合要求，需进一步清洗。可使用经过滤的干燥压缩空气

对准孔进行吹扫，将孔内杂质吹出并收集分析，以确定杂质类型和数量，评估清洁度是否达标。吹扫过程中可在孔的另一侧用白布遮挡，观察白布上是否有杂质附着，以确定清洁效果。对粗糙度要求较高的管孔，可使用手持粗糙度检测仪对孔内壁进行检测，实践中表面粗糙度一般要求达到 $3.2\sim 6.3\ \mu\text{m}$ 。粗糙的孔壁会增加流体流动阻力，减少流体流量，进而削弱换热器的换热性能，也可能导致换热管外壁磨损加剧。

使用精度为 $0.02\ \text{mm}$ 的游标卡尺或电子卡尺测量孔径时，在孔的不同位置至少测量 3 个点，取平均值并与设计孔径对比。测量时可轻微晃动卡尺尖端，直到找到最大值，但不能用力过猛，否则会造成卡尺卡爪处发生轻微变形（实践中变形量为 $0.02\sim 0.10\ \text{mm}$ ），导致测量误差，数显卡尺尤为明显。鉴于卡尺精度为 $0.02\ \text{mm}$ ，对精度要求较高的管孔可使用精度为 $0.01\ \text{mm}$ 或 $0.001\ \text{mm}$ 的内测千分尺进行测量，测量时仍需注意避免转动测微螺杆时用力过大造成转动过度，从而影响测量准确性。若采用更为先进的光学投影仪检查，需将折流板或管板的钻孔样板或实物置于光学投影仪下，通过放大投影图像可清晰观察孔的形状、尺寸及孔边缘的加工质量，检测是否存在毛刺、裂纹等缺陷。

换热管组对质量检验

> 换热管与管板组对检验

用直尺或卷尺测量换热管伸出管板的长度，其值应符合设计规定的公差范围^[4-5]。例如，设计要求换热管伸出管板长度为 $3\sim 5\ \text{mm}$ ，则应检查每根换热管是否在此范围内。

使用塞尺检查换热管与管板管孔之间的间隙。对于胀接换热管，间隙通常要求较小，以保证胀接质量；对于焊接换热管，则需检查间隙是否符合焊接工艺要求。

可使用直角尺检查换热管与管板平面的垂直度。如果垂直度不符合要求，可能会影响后续安装和换热器性能。

> 换热管与折流板组对检验

用直尺或卷尺测量相邻折流板的间距，其误差应在允许范围内。例如，若设计要求折流板间距为

500 mm, 则实测值与设计值的偏差一般不应超过规定值(如 ± 5 mm)。

观察换热管是否处于折流板孔的中心位置。可从一端观察换热管在折流板孔中的位置大致判断同心度,也可用专用工具检测,如穿入定距杆和拉杆,通过其穿入情况判断各折流板的同心度。如果同心度偏差较大,定距杆和拉杆将难以穿入,这会直接影响换热管与折流板的组对精度。

用塞尺检查换热管与折流板孔之间的间隙,确保间隙均匀且符合要求,以减少流体旁路,提高换热器的换热效率。

结束语

换热器折流板和管板钻孔与换热管组对的质量控制是确保换热器制造质量的关键环节。在实际生产过程中,应严格按照工艺要求操作,加强对各环节的质量控制。通过刀具管理、加工参数优化、冷却润滑等措施,确保钻孔质量;通过连接工艺控制、间隙控制、对中控制等措施,保证换热管组对质量。同时,加强质量检验与验收,确保产品符合

相关标准和设计要求,从而制造出高质量的换热器,为各行业的生产提供可靠保障。

参考文献

- [1] 孙立潮,赵承志,倡闻,等.折流板间距对换热器换热性能的影响.石油化工设备技术,2023,44(5):13
- [2] 中华人民共和国国家市场监督管理总局.GB/T 28712.2—2023 热交换器型式与基本参数 第2部分:固定管板式热交换器.北京:中国标准出版社,2023
- [3] 全国城市工业品贸易中心联合会.T/QGCML 243—2021 热交换器管板折流板加工工艺规程[J/OL].全国团体标准信息平台(2021-12-29)[2024-12-03].<https://www.ttbz.org.cn/StandardManage/Detail/55977/>
- [4] 中华人民共和国国家市场监督管理总局.GB/T 150.1—2024 压力容器 第1部分:通用要求.北京:中国标准出版社,2024
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 151—2014 热交换器.北京:中国标准出版社,2015

作者简介:邵伟(1983—),男,陕西省宝鸡人,工程师。2005年毕业于南京工程学院自动化(数控技术)专业,主要研究方向:压力容器制造及其质量控制。通信地址:陕西省宝鸡市渭滨区宝钛工业园宝钛装备制造(宝鸡)有限公司;E-mail:93628457@qq.com。