

# 熔体冷却器中换热管固定形式的确立

蔡高峰

上海苏尔寿工程机械制造有限公司 聚合与结晶事业部(中国)

**摘要:** 通过对熔体冷却器中换热管连接片式固定、横梁式固定类型,以及横梁失效原因的分析,介绍了不同工况下熔体冷却器的结构设计。以上海苏尔寿工程机械制造有限公司研发的熔体冷却器及其固定形式的确立为例,介绍了不同工况下为避免换热管破裂导致泄漏,熔体冷却器中换热管固定形式的选择依据,以期为行业相关人员所参考与借鉴。

**关键词:** 换热管; 横梁; 连接片; 强度

## Fixed form establishment of heat exchange tube in melt cooler

Cai Gaofeng

*Polymer and Crystallization, Sulzer Shanghai Engineering & Machinery Works Ltd., Shanghai/China*

**Abstract:** Analysis of types of heat exchange tube connection plate fixation and crossbeam fixation in melt coolers, as well as the reasons for cross beam failure, the structural design of melt coolers under different working conditions was introduced. Taking the melt cooler which was developed by Sulzer Shanghai Engineering and Machinery Works Ltd. and how to confirm its fixing form as an example, the selection criteria for the fixing form of heat exchange tubes in melt coolers under different working conditions to avoid leakage caused by tube rupture were introduced, in order to provide reference and inspiration for relevant personnel in the industry.

**Keywords:** heat exchange tube; cross beam; connecting tab; strength

近几十年来,世界范围内化纤行业快速发展,中国作为重要的纺织大国,化纤生产得到高速发展,对化纤设备的需求也不断增大,随着行业竞争,企业对设备在节能、体积、安装方式等方面的要求也相应提高。

化纤行业的主设备——熔体冷却器广泛应用于调节物料温度、均匀物料(如加入辅料)、聚合物加工、纺丝加工等场合,是纺丝生产线上的关键设备之一。

## 1 熔体冷却器中换热管的固定形式

熔体冷却器中换热管的固定根据实际应用主要

有两种形式:管口尺寸较小、生产中设备进出口处物料的压力降较大的情况下,通常采用连接片的形式,将其直接焊接到管板上,如图 1 所示;管口尺寸较大、生产中设备进出口处物料的压力降较小时可采用横梁作为过渡,即将连接片焊接到横梁上,再通过横梁焊接到管板上进行固定,如图 2 所示,该结构具有构造紧凑、体积小、能耗低、易安装的优势,但当物料的瞬时压力降过大、横梁强度过低、焊缝强度不足时常会产生横梁失稳问题。

本文主要对第二种横梁固定形式进行介绍,并对本公司——上海苏尔寿工程机械制造有限公司研发的换热管固定形式中横梁固定方式及横梁失稳问题进行介绍与分析。

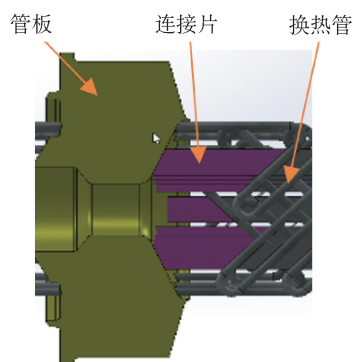


图1 连接片固定形式

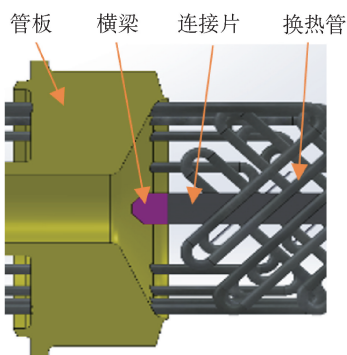


图2 横梁固定形式

## 2 横梁固定形式中横梁失稳的原因

冷却器中换热管采用横梁结构进行固定时冷却器在具有较大换热面积、较小体积的前提下具有结构紧凑的优点,但这一结构的缺点是容易发生横梁失稳。横梁失稳主要是由于物料在设备进口与出口间的压力降过大,引起焊缝失效,进而导致横梁失稳、脱落。横梁脱落后,与其连接的弯管受到较大的物料压力降的作用,被挤压,变形直至扭曲断裂,致使物料泄漏,进入换热管内,物料与导热油一同进入保温系统,这是不希望发生的现象。导致这种横梁失稳情况发生的直接原因主要有3个。

——进出口处物料的压力降过大。物料压力降过大通常是由于误操作导致,横梁处于物料的进口处,在急速升高的物料压力降的作用下,横梁与管板焊接处所受力超出其最大承载量,从而导致横梁脱落;

——横梁设计存在缺陷,致使横梁强度过低。由

于与换热管连接的连接片都焊在横梁上,换热管所承受的压力降都将叠加到横梁上,而横梁与管板的连接只发生在横梁两端较窄的部位,焊缝承受能力有限,在急速增大的物料压力降的作用下,很容易超过横梁与管板间焊缝的最高强度,致使横梁失稳脱落,进而导致换热管泄漏;

——横梁与管板之间的焊缝无法达到全焊透的要求。由于横梁结构只能与管板之间采取角焊缝的焊接方式,横梁与管板之间的焊接强度无法达到使用要求,导致横梁失稳。

## 3 横梁失稳的解决方法

现以本公司的设计为例介绍横梁失稳的解决方法。一般情况下,设备使用者往往对设备认识不足,安装和操作过程中只是简单地照搬常规操作模式。由于本公司生产的熔体冷却器内部结构较为复杂,通常情况下其操作必须参照本公司提供的《苏尔寿 SMR 型换热器的安装、操作及维护说明》<sup>[1]</sup>(下文简称《安装说明》)进行。《安装说明》特别指出:物料进入熔体冷却器时,物料流动产生的压力降需缓慢升高,在达到设计工况允许的最大压力降时必须停止增压,实现平稳过渡。安装、操作中,还必须对工艺技术人员或项目管理人员进行特别提醒。这些解决办法虽有价值,但存在局限性或不可预知性。

彻底解决横梁失稳问题的方法是改进熔体冷却器的内部结构,即将横梁结构改为连接片与筒体直接连接的方式。这样,只需计算单片管束所承受的物料压力降。将连接片的承受能力设计为设备系统最大压力降时的承受力。这样,无论如何操作,连接片能承受的物料压力降都高于实际操作时的物料压力降,横梁不会由于物料压力降过于集中而失稳,但这种连接片的设计方式只有在结构允许的情况下才可被采纳。若管口内径尺寸过大(需要与用户自身管线中较大的管口匹配),可选择在管口内部堆焊出一层类似大小头的结构,使管口变小,而堆焊的部位能与连接片接触,补出足够的焊接空间。但由于管口变小,管口与筒体间产生了高度差,导致一定的积液问题,因此需要与工艺工程师沟通,确保积液对工艺确无影响后方可执行这样的设计。

### 4 横梁及其焊缝的相关强度计算

以本公司一失效横梁为例,本公司与浙江工业大学化机部合作,准确核算了横梁最大承受的物料压力降及其焊缝强度。

熔体冷却器中换热管泄漏后,对失效的熔体冷却器进行切割,发现横梁由直变弯,表明横梁所能承受的最大载荷小于物料最大压力降时所能承受的力,因此需对横梁自身的强度进行计算。横梁承受物料最大压力降时的平衡载荷计算需要建立计算对象的模型:在对本公司提供的管板及横梁的模型进行网格化后,计算软件对模型边界条件的平衡载荷按公式(1)<sup>[2]</sup>进行计算,可知平衡载荷为 18.05 MPa,如图 3 所示。

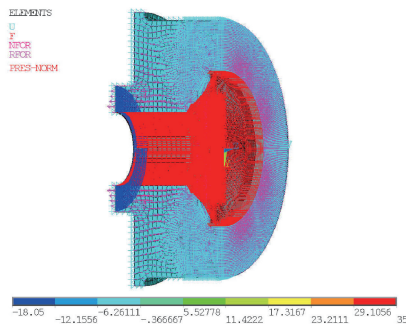


图 3 管板及横梁的平衡载荷

$$p_e = \frac{p}{(R_o/R_i)^2 - 1} \quad (1)$$

式中: $p_e$  为平衡载荷; $p$  为计算压力; $R_o$  为管口外径; $R_i$  为管口内径。

研究对设计压力 350 bar、设计温度 300 °C,物料压力降不同(60 和 80 bar)的两种工况下管板与连接片间的横梁进行了计算,分析极限工况下横梁的最大承受应力,结果如表 1 和图 4 所示。冯米斯应力是一种屈服准则,用于评估材料在复杂应力状态下的强度。冯米斯应力图用于评价应力分布情况,颜色由蓝变红,表示应力逐渐变大。由图 4 可知,工况 1 和工况 2 下对应的最大冯米斯应力分别为 297.295 和 407.165 MPa。利用第四强度理论对冯米斯应力进行分析,可知工况 1 和工况 2 下横梁的最大承受应力为 79.97 和 90.04 MPa,均小于横梁的最大可接受应力 146.6 MPa,表明横梁完全能够承载这两种工况下物料的压力降。

表 1 不同工况下横梁的最大承受应力

工况	物料压力降/ bar	最大冯米斯应力/ MPa	最大承受应力/ MPa
工况 1	60	297.295	79.97
工况 2	80	407.165	90.04

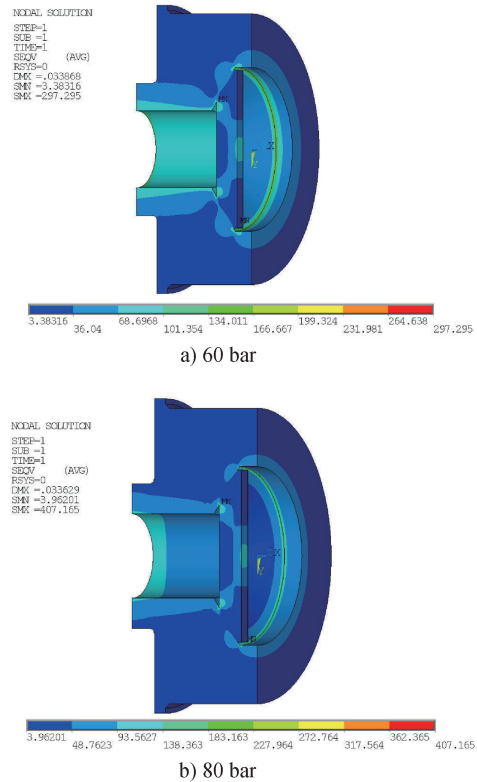


图 4 不同物料压力降工况下管板及横梁的冯米斯应力

由于横梁的最大承受应力足以承载这两种工况下物料的压力降,因此需考虑横梁与管板焊接的焊缝强度。实际操作中,横梁与管板焊接处率先脱落,导致换热管扭曲、变形,断裂形成泄漏,因此横梁失衡十分可能是由焊缝的强度小于物料最大压力降带来的冲击力所引发。横梁焊点的强度按公式(2)<sup>[3]</sup>计算。

$$P_1 = \frac{F}{S} \quad (2)$$

式中: $P_1$  为横梁的计算强度; $F$  为横梁的承受力; $S$  为横梁的受力面积。

根据计算, $P_1$  为 20.58 MPa, $[P]$ (许用应力) $k$ (安全系数)为 78.16 MPa, $P_1 \leq [P]k$ ,安全允许强度远大于计算的允许最大物料压力降下横梁焊点的强度,因此理论上横梁与管板间全焊透时,横梁与管板间的焊缝强度是足够的,但检查实际失效的焊点后发

现:横梁与管板之间的焊点不仅没有完全焊透,横梁与管板接触点的四周也没有完全满焊。焊接质量存在较大问题是由于总图上没对焊接提出要求,焊接人员的不当操作使横梁的焊接没有满足全焊透的要求。因此,必须提升图纸质量。

## 5 横梁实物的冲击试验

为对横梁变形有直观认识,在对横梁及焊缝进行强度计算的同时,本研究还进行了横梁的冲击试验,由知名的第三方检测机构 SGS(瑞士通用公证行)提供冲击试验服务,冲击试验有效实现了对横梁变形量的检测。图 5 为横梁的冲击试验装置。



图 5 横梁的冲击试验装置

试验将横梁固定在两个支架上,两端绝对固定(实际设备中,横梁的固定是靠焊接实现的),再将冲击装置置于横梁上方,不同工况下,横梁承受的力应不同,设计工程师与检测人员沟通后,为进行有效计算,设定工况 1 下承受的力为 16 776 N;工况 2 下承受的力为 50 328 N。在满足检测条件的情况下,检测顺利进行,测得工况 1 和工况 2 下横梁的变形量分别为 0.68 和 1.33 mm。可见,不同压力(40 bar 和 80 bar)工况下横梁的变形量符合理论变形量(6.00 mm)的要求。

## 6 设计过程中优化,处理较高压力降

在要求用户按照《安装说明》操作,避免物料急速升压导致横梁失稳的同时,由于横梁结构存在较多不可控因素:横梁与管板之间焊接的可靠性难以控制,难以保证全焊透;设备运行时物料的压力降未完全按《安装说明》进行平稳操作等,对换热管的固定方式进行改进无外乎是最佳的解决方案,可从源头消除横梁失稳的症结。为此,本公司提出如下方案。

如客户需要较大物料压力降的工况时,应酌情将惯用的横梁设计变更为连接片直接与管板焊接的方式,如图 6 所示。在管板进口尺寸偏大的情况下,如果将连接片排成两排与管板焊接,由于换热管结构限制,连接片间距较小,连接片与管板无法接触焊接,如管板进口外径 168 mm,厚度 35 mm,内径 98 mm 时,连接片间距由于换热管结构限制最大只能为 110 mm,而连接片自身宽度为 30 mm,因此连接片的实际间距为 80 mm,小于管板内径 98 mm,连接片将有 18 mm 的悬空,无法与管板焊接。若将连接片置于换热管中间,与横梁焊接,横梁再与管板焊接,就能避免这一问题。这是最初采取横梁设计的原因。

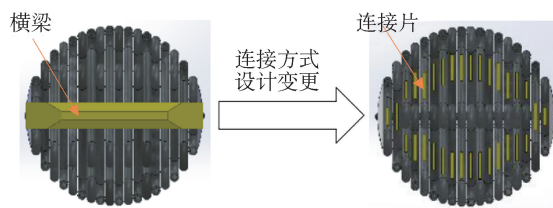


图 6 换热管的两种固定方式

如果变更为连接片与管板直接焊接的设计,则需对管板结构进行改进:缩小管板的物料进口内径,即在进口内壁实施堆焊,将物料进口内径由 98 减至 60 mm,从而小于连接片的实际间距(80 mm),连接片便有了焊接空间。这样管口与筒体之间便有一个台阶,此台阶会产生积液,应与工艺工程师确认积液量在允许范围内后,才可采纳该更改方案。

采用自制小程序对每一根换热管的连接片进行计算,根据材料设计连接片的厚度和宽度。从换热管连接片的结构看,原采用横梁设计的换热管连接片只放置在换热管的中间部位,改进后在换热管较大宽度的方向上安排两排连接片,这样,换热管和连接片的整体强度增大,且单根换热管的连接片是独立承受局部压力降的,可靠性增强,在原连接片的厚度、宽度下,完全可以承受更大的物料压力降。经计算,即使物料的压力降和瞬间压力降很大(生产线极限物料压力降),连接片也能承受。

由上所述,有较高物料压力降的工况下对设备进行内件设计时,需考虑实际操作的物料压力降。为解决这一技术难点,一般会采取保守设计,即将物料的压力降设定为用户生产线所需的最大压力降进行计算,选用较为可靠的连接片,并将其直接焊到管板上。

## 7 结语

本研究所介绍的换热管固定形式的确立,对今后熔体冷却器中换热管固定方式的选择具有实质性的借鉴意义,对设计工作具有一定的参考价值。

对于物料压力降较大的工况,应首选连接片直接连接管板的设计,并需计算连接片的厚度及宽度。

对于满足对应工况条件的设计,若物料压力降急速升高,就需项目工程师或工艺技术人员提醒用户严格按照随箱提供的《安装说明》进行操作,避免横梁失稳、换热管泄露等问题再度发生。

对于一般工况,如果熔体冷却器管板的进出管口尺寸较大,无法满足连接片与管板焊接,选择横梁设计是一种较好的办法。

对于不同工况,对换热管固定形式的选择将影响换热管的正确固定,设计中应该汲取经验教训,予以掌握。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Sulzer Chemtech AG Mixing and Reaction Technology/MRT 0655. Installation, operation & maintenance instructions for Sulzer SMR™ heat exchanger, 2008.
- [ 2 ] Institute of Chemical Machinery Design Zhejiang University of Technology. Stress analysis report 908959001 MAOMINGPOE, 2023.
- [ 3 ] 中国石油和化学工业联合会. 钢制化工容器设计基础规定: HG/J 20580—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011:25.

(上接第 15 页)

基金项目:

1. 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2232023Y-01);
2. 上海市现代纺织前沿科学研究基地资助项目(X11012201-011)。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 宋志刚. 新型往复抓棉机关键技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [ 2 ] 徐旻. 我国棉纺行业智能制造的发展方向探讨[J]. 棉纺织技术, 2016, 44(5): 76-79.
- [ 3 ] 梅顺齐, 胡贵攀, 王建伟, 等. 纺织智能制造及其装备若干

关键技术的探讨[J]. 纺织学报, 2017, 38(10): 166-171.

- [ 4 ] 裴泽光, 张金中, 李智, 等. 一种用于直行抓包机的纤维包除带及拆袋机和方法: 20211319184.4 [P]. 2023-08-01.
- [ 5 ] 裴泽光, 刘琰, 张金中, 等. 棉包自动拆袋机的创新设计[J]. 棉纺织技术, 2023, 51(1): 5-9.
- [ 6 ] 中华全国供销合作社. 棉花包装用聚酯捆扎带: GH/T 1068—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [ 7 ] 辛春亮, 朱星宇, 王凯, 等. LS-DYNA 有限元建模、分析和优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- [ 8 ] 刘琰, 陈俊鹏, 裴泽光. 纤维包自动除带及拆袋机剪带装置设计[J]. 棉纺织技术, 2023, 51(9): 52-55.

## VDMA 亮相 ITMA ASIA + CITME 2024

2024 年 10 月 14 日—18 日在上海举行的 ITMA ASIA+CITME 2024 上, 49 家 VDMA(德国纺织机械协会)会员公司将再次参展, 德国参团是本次展览会上最大的国外展团。

参展的 VDMA 会员几乎涵盖了所有不同的机械门类, 重点是纺纱和化学纤维、非织造布、机织、编织、针织和针织品、后整理和染色以及纺织加工。VDMA 活动的主题将是“绿色纺织生产的智能技术”。VDMA 成员致力于通过高效技术减少纺织价值链中的资源消耗, 目标是利用纺织材料、水、能源和

化学品等资源的潜力, 最大限度地减少 CO<sub>2</sub> 排放。展会也是 VDMA 会员展示其仍然处于纺织机械行业新思想、新产品和新技术前沿的机会。

过去几年中, 德国约 50% 的纺织机械和配件出口到亚洲。2024 年 1 月—7 月, 由于全球经济形势疲软, 价值约 5.8 亿欧元的纺织机械从德国运往亚洲, 相比 2023 年同期下降 25%。中国进口 2.4 亿欧元, 再次成为德国最大的出口市场, 其次是印度、孟加拉国、乌兹别克斯坦、巴基斯坦和越南。