

板式换热器的蓝海

——新型铜合金板式换热器

杜国明

(国际铜业协会(中国) 上海 200020)

1 铜合金板式换热器(简称 CAPHE 板式换热器)产品概述

换热器是广泛应用于化工、石油化工、动力、医药、冶金、制冷等行业的通用设备。板式式换热器的结构特别适合用于湍流情况下的液-液传热。集中供热、制冷空调和生活用水的换热工况比较简单、规范,工作压力、工作温度都不高,介质属于中性,所以选用板式换热器十分理想。20 世纪 80 年代初,中国开始采用板式换热器水-水或气-水换热连续供热,取代传统的间隙式汽暖供热。这一供热方式的改变,取得了很好的经济效益,一般可节煤 20%~30%,现在普遍为热力站所采用。

板式换热器现状表明不锈钢和钛板在板式换热器板片材质选择中占据主导地位。但不锈钢面临的难题是短期内很难克服高浓度氯离子水质下的缝隙腐蚀、板片表面细菌生长、热传导效率相对较低等缺点,而生产企业选择钛材作为板式换热器板片材质又受到全球钛材供应紧张、产品依赖进口、价格昂贵、交货期长等问题的困扰,出现了目前板式换热器产品应用中板片腐蚀和产品初始成本过高的两难局面。在这个技术和经济问题的矛盾中,用户很难有折中的选择。

2 板式换热器板片的主要腐蚀机理

板式换热器的板片经冷压形成波纹板片后,将不可避免有应力存在。但是,为保证板片几何精度和足够的刚度(抗变形能力),冷压后不能进行热处理消除内应力;同时,使用超声波等手段消除应力的方法因其价格昂贵、加工周期长,不可能在板式换热器波纹板片加工中得到应用。故在波纹形板片中不同程度地存在因冷加工压制成形而产生的内应力,尤其在变形大的区域内应力更甚。板式换热器波纹板片和垫片经叠装夹紧后,可以保证耐压、密封。同时,这种结构也为氯离子(Cl^-)缝隙应力腐蚀等局部腐蚀的产生创造了条件,见图 1。

波纹形板片的密封垫片槽受力变形 Cl^- 应力缝隙腐蚀是奥氏体不锈钢板片最常见且最为头痛的问题。在板式换热器使用过程中,水(汽)介质或多或少会有 Cl^- 存在;板片中存在一定的压制成形应力,板式换热器结构形成密封垫片与板片间的缝隙及板片间触点区域的存在,都会加剧局部腐蚀的产生。奥氏体不锈钢在含有 Cl^- 或氢化物水溶液

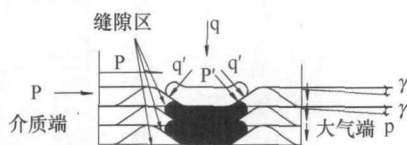


图 1

中的应力腐蚀破裂,可以用晶格滑移—溶解—断裂学来说明其机理。奥氏体不锈钢具有面心立方点阵,滑移时容易出现层状位错结构,而层状位错在含 Cl^- 的水溶液中容易产生线状蚀沟,引起穿晶破裂,致使板片破坏。

针对板式换热器的特殊结构及使用情况,以下诸方面均是造成这一破坏的条件。

(1) 波纹板片中的密封垫片槽是整个板片中变形较为严重的区域,必定有大量压制后应力存在;加上板式换热器在夹紧后垫片受压变形对板片密封槽区域产生了很大的预紧力作用;使用时介质的压力作用在垫片与板片密封槽之间等都会加剧滑移的发生。

(2) 组装后的板式换热器,其板片密封槽边缘与变形后的密封垫片间引成缝隙,为 Cl^- 应力缝隙腐蚀提供了一个环境条件。由于该缝隙很小,流体介质在该区域的流动形态只能是层流甚至是死区。

(3) Cl^- 在缝隙区域会产生沉积和聚集现象,尤其在板式换热器时开时停时,这种情况更严重。即使是流体介质中 Cl^- 的浓度仅十几个 mg/L 时,在缝隙区域的 Cl^- 的浓度有时会高达几倍甚至十倍以上。

综上所述:“应力 + Cl^- + 缝隙”形成产生了奥氏体不锈钢板片 Cl^- 应力缝隙腐蚀的客观条件。如果流体介质的温度高于 80°C (Cl^- 腐蚀的敏感范围)则更会加剧这一腐蚀破坏。即使在板片选择时从全面腐蚀的角度选用了腐蚀速率 $<0.05 \text{ mm/a}$ 的材质,由于未重视 Cl^- 应力缝隙腐蚀,经常会发生使用一年不到。甚至于三个月板片就已被破坏的实例,有的甚至打开板式换热器后发现板片沿密封槽整个破裂断开。所以在介质及工艺状态已确定的情况下,板片材质的合理选择,在首先确保耐全面腐蚀(均匀腐蚀)的同时,不应忽视裂缝腐蚀、点蚀(孔蚀)和晶间腐蚀等局部腐蚀的影响。

3 CAPHE 板式换热器产品适用领域

铜合金板式换热器是国际铜业协会(中国)立项的研发项目。在全国锅炉容器委员会板式换热器分会和部分换热设备企业和铜加工厂的协助下开发出的新型节材、高效、价格适中的换热产品。而开发铜合金板式换热器正好为广大客户提供了一个很好的高性价比产品的选择。从2005年始,为了提高铜加工行业的科研创新能力,国际铜业协会(中国)携手全国锅炉压力容器标准化技术委员会热交换器分会技术委员会达成共识,调动国内换热器厂家和大型铜加工厂的资源,充分利用铜合金材料与不锈钢和钛合金相比所具有的良好耐腐蚀、高导热性、突出的抑菌性等明显优势,联合研发铜合金板式换热器。经过3年的不断研发和实验,探索铜合金和板式换热器应用相结合,完成了适用板式换热器用铜合金板材的研发、铜合金板式换热器制造以及耐腐蚀性能研究。在2008年终于开发出具有自有知识产权的创新型铜合金板式换热器(简称CA板式换热器)。

我们认为耐 Cl^- 是铜质板式换热器的突破口,若能在此领域有所进步,将有巨大的市场;具体的铜质板式换热器目标市场领域分析如下所述。

4 含 Cl^- 的冷却水和地热利用场合

这类市场几何覆盖了所有的水—水、水—油、水—汽、水—其他介质的板式换热器冷却器。

由于此类冷介质水源(尤其是内陆地区地下水)中均一定程度含有 Ca^{2+} , Mg^{2+} 等易结垢的物质,在去除此类物质时,一般以价廉的氯化物或含 Cl^- 物质(工业 NaCl)进行化合作用来去除,由此在水介质中必然会存在一点余量的 Cl^- 。要使 Cl^- 控制在 $\leq 20 \text{ mg/}$

L 以下，则会相应提高附属设备的投资费用。加上板式换热器的板片与垫片的结构形式缝隙，在此缝隙区域的 Cl^- 含量局部会达到 100 mg/L 甚至更严重的程度（前面已述），将会对不锈钢板片产生严重的局部腐蚀直至破裂而导致板式换热器不能正常使用；选用钛板或 SMO254 其昂贵价格又是大部分用户所不能承受的；故只能以经常更换板片而勉强为之。如果能以低于钛板或 SMO254 价格的铜合金取代，当然会受到用户的欢迎。①供热，采暖行业；②地热利用机组中的板式换热器；③各种场合及行业中油、水冷却器（水—水、水—油）及废热、余热回收利用板式换热器。

5 从 Cl^- 浓度和温度看应用领域

从氯离子浓度和温度两个指标可以推荐的目标领域如表 1。

表 1

	<50℃	50 ~ 65℃	65 ~ 85℃	85℃ 以上
海水	SMO254 / Ti	SMO254 / Ti	Ti	Ti
90 ~ 100 mg/L	SMO254	SMO254 / Ti	SMO254 / Ti	Ti
50 ~ 90 mg/L	Mo ₂ Ti / SMO254	SMO254	SMO254 / Ti	SMO254 / Ti
20 ~ 50 mg/L	304 / 316L	316L	316L / Mo ₂ Ti	Mo ₂ Ti / SMO254
<20 mg/L	304	304	304 / 316L	316L / Mo ₂ Ti

黄色区域是主要目标市场，我们应该从此方面着手寻找或研发铜合金；特别是 20 ~ 90 mg/L 之间，温度在 65℃ 以下区域，更是铜质换热器应该应用的范围，此市场估计达到含 Cl^- 介质板式换热器应用场合的 70% 左右。

Cl^- < 20 mg/L 的环境，不锈钢 304 就能够应付；但实际上含 Cl^- 介质水要处理到小于 20 mg/L 成本较高，一般工程上不会用此方法。

2) 我国地热利用市场的正飞速发展，地下水利用在板式换热器领域的广泛推广，铜合金板式换热器将非常适合于此领域；此外，在近江河和近海船舶制造、温水游泳池、海水养殖、海水淡化以及电厂余热利用等领域也有着广阔的市场空间。

6 板式换热器用铜合金选材性能参数

根据我们多方考察和试验，最终我们选定 LC6870（铝黄铜）和 LC7060（白铜）作为合金材料，无论是在压制性能、耐腐蚀性的方面都可以满足地热工程和近海含较高 Cl^- 离子的利用要求。以下是这两种合金的基本参数。

6.1 牌号、状态、规格

牌 号	状 态	形 状	厚度/mm	宽度/mm	长度/mm
LC6870	Anneal (M or O) 软	Strip 带材	0.3 ~ 2.5	≤1 000	
		Sheet 板材	0.3 ~ 2.5	≤1 000	≤2 000
LC7060		Strip 带材	0.3 ~ 2.5	≤610	
		Sheet 板材	0.3 ~ 2.5	≤610	≤2 000

6.2 力学性能

合金牌号	状态	抗拉强度/MPa	延伸率/%	维氏硬度/HV1
LC6870	M	≥410	≥40	≥90
LC7060		≥300	≥30	≥90

6.3 表面质量

产品的表面应光滑、清洁，表面色泽应均匀一致，不允许有裂纹、划伤、起皮、氧化、黑斑等影响使用的缺陷。

6.4 物理性能

(1) LC7060 物理性能。

密 度	液相线温度	固相线温度	弹性模量（拉伸）	线膨胀系数
20℃时为 8.94 g/cm ³	1 150℃	1 100℃	140GPa	20 ~ 300℃时 为 17.1μm/（m·K）
比热容	40W/（m·K）at 20℃ 导热系数	电导率：体积测定法	电阻率	颜色
380J /（kg·K） at 20℃	20℃时 为 40W/（m·K）	9.1% IACS	190nΩ·m at 20℃	粉红-银白色

(2) LC7060 耐腐蚀性能。

介 质	温度/℃	周期天/d	腐蚀速度 /（g/m ² ·h）	腐蚀深度 /（mm·a ⁻¹ ）	腐蚀级别	表面状态
3% NaCl	40 ± 0.5	180	0.010 4 ~ 0.016 7	0.010 2 ~ 0.016 4	4 级稳定	光滑有光泽

(3) LC7060 防海生物附着试验。

优于 B30，逊于紫铜、HSn62 - 1、LC6870。

(4) LC6870 物理性能。

密 度	液相线温度	固相线温度	（Tension） 弹性模量（拉伸）	线膨胀系数
8.6g/cm ³ at 20℃	971℃	931℃	102 GPa	18.5μm/（m·K） at 20 ~ 300℃
比热容	导热性能	电导率：体积测定法	电阻率	颜色
20℃时 375J /（Kg·K）	105 W/（m·K）	23% IACS	20℃时 为 0.075Ω·m m ² /m (75 nΩ·m)	N/A

(5) LC6870 静海水耐腐蚀性能。

介 质	温度/℃	周期/h	腐蚀速度/（mm·a ⁻¹ ）
氧饱和海水	24	3 840	0.25

7 经济性分析

在换热器行业里，普遍采用材料成本系数的方法来进行成本分析，如图 2 和图 3，我们把这些系数分别基于 2008 年 3 月的铝黄铜，白铜、双向 254 不锈钢和钛板的市场价格来设定。为了方便比较，成本系数 1 在表 1 和 2 种分别代表 LC6870 和 LC7060。

使用 LC6870 与使用 254 双相不锈钢或钛板来制造板的成本相比，如果铜合金的换热效率比这两种板材提高 5%，在相同的板厚下成型，则在生产过程中，压制相同尺寸板片，254 不锈钢是 LC6870 铜合金板造价的将近 2 倍，而钛合金板的造价是它的将近 4 倍。

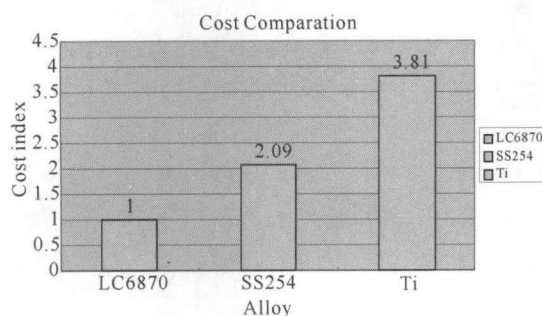


图 2

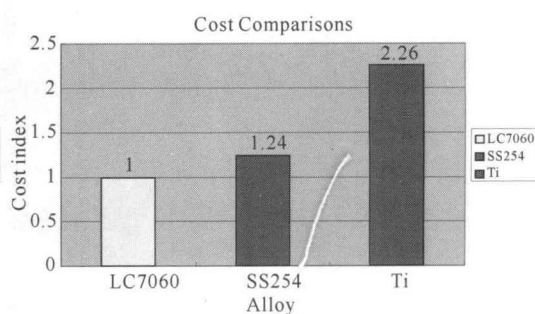


图 3

以上三种合金应用于海水中或高浓度氯离子环境中，该价格系数是根据三种合金在 2008 年 3 月的市场价格确定的，图 2 中把 LC6870 设为系数 1。

使用 LC7060 与使用 254 双相不锈钢或钛板来制造板的成本相比，如果铜合金的换热效率比这两种板材提高 5%，在相同的板厚下成型，则在生产过程中，压制相同尺寸板片，254 不锈钢是 LC7060 铜合金板造价的将近 1.18 倍，而钛合金板的造价是它的将近 2.14 倍。

以上三种合金应用于海水中或高浓度氯离子环境中，该价格系数是根据三种合金在 2008 年 3 月的市场价格确定的，图 3 中把 LC7060 设为系数 1。

随着下半年金属市场的变化，铜合金的价格有着进一步的回落，在成本上有了进一步的降低，比如一台铜合金的板式换热器的造价是 1 100 元/ m²，而钛板的板式换热器则需要 3 500 元到 4 000/ m²，假使 100 m² 的换热面积，铜合金可以为客户节省大约 24 万元的投资，而其寿命，在正常维护和保养下可以达到 3 至 5 年甚至更长。在未来很长一段时间，我们认为铜合金的价格都回在一个较低的价格区间运行，对成本的影响有限。综上所述，铜合金板式换热器在实际应用终将会体现更高的性价比，为广大客户所乐于接受。

8 CAPHE 传热性能优异

根据铜质板式换热器研发项目组委托国家石油钻采炼化设备质量监督检验中心完成铜质板式换热器热力性能测试对比分析结果显示：铜合金板式换热器的应用，相对不锈钢板式换热器 LC6870 板材将提升传热系数 11% 以上；LC7060 板材的使用，将提升传热系数 4.7% 以上。铜合金板式换热器的应用可以减少板片的数量，使客户投资更为经济。

9 铜合金板式换热器案例分析

用户：陕西绿源地热能开发有限公司；地点：咸阳职业邮电学院机房；设备：可拆卸式铜合金板式换热器；数量：一台；换热面积： 150 m^2 ；单板规格： 0.8 m^2 ，长1710 mm，宽600 mm，厚0.6mm；板片数量：189张

描述：根据咸阳地热水的水质条件（例，咸阳 WR1 井 Cl^- 3101.9 mg/L， SO_4^{2-} 477.4 mg/L，矿化度6179.5 mg/L），甲方要求板式换热器为可拆式，定位杆和紧固丝杠长度应满足今后增加10%热负荷的需要。板片材料采用铜合金板材。板片密封胶垫要求耐温 120°C ，并且能够抵抗高浓度 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的腐蚀。板式换热器一次侧供回水设计温度为 $80/40^\circ\text{C}$ ；二次侧供回水设计温度为 $70/35^\circ\text{C}$ ，工况应满足一、二次侧压力降 $<50\text{ kPa}$ 。板式换热器传热系数应按 $\leq 4000\text{ W/m}^2\text{C}$ 计算。换热器设计压力为1.6MPa，出厂前应做整体水压试验。

根据上述要求，优选BRH08-1.0-149.6型换热器一台，板片材质铝黄铜，密封垫片材质三元乙丙，从2007年11月15日开始投入使用，换热效果好，运行稳定。到目前为止，使用状况良好。经过4个月的运行，我们于2008年7月15日打开机器，除了发现水中带的沉淀物和残渣整个板片外观完好，未发现腐蚀和侵蚀。

10 结 论

从以上咸阳的案例来看，铜合金板式换热器的应用是成功的，当然运行的时间还需要更长一段时间来检验。我们相信，只要按照规范程序维护，在地热市场应用铜合金板式换热器将会越来越受到客户的欢迎，并有很大的前景，我们也欢迎用户与我协会合作开展试点应用。