

孙奉仲 著



换热器的可靠性 与故障分析导论



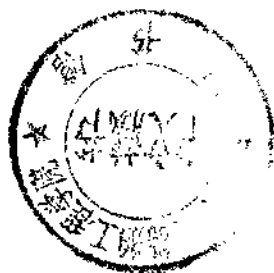
中国标准出版社

TK17
292

414245

换热器的可靠性与 故障分析导论

孙奉仲 著



00414245

中国标准出版社

图书在版编目(CIP)数据

DK46/24
换热器的可靠性与故障分析导论/孙军仲著.-北京:
中国标准出版社,1998.9
ISBN 7-5066-1688-2

I. 换… I. 孙… III. ① 换热器-可靠性-分析 ② 换热器-故障诊断 IV. TK172

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 15938 号

中国标准出版社出版
北京复兴门外三里河北街 16 号

邮政编码:100045

电 话:68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
版权专有 不得翻印

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.75 字数 305 千字

1998 年 9 月第一版 1998 年 9 月第一次印刷

*

印数 1—1 250 定价 37.00 元

内 容 提 要

换热器的可靠性与故障分析理论对于保证换热器的正常运行、延长平均故障前工作时间具有重要意义。本书系统地论述了换热器可靠性分析的基本理论,从保证换热器可靠运行出发,阐述了换热器的可靠性设计方法、可靠性数据的收集、换热器及其网络的故障分析以及状态转移理论等。

本书理论联系实际,内容丰富,数据翔实,可供从事电力工程、化学工程及其它相关领域的科技人员参考,也可作为高等院校的教材及参考书。

前 言

换热器广泛应用于化工、电力、冶金、石油、国防等工业领域，是一种通用的工艺设备。在石油化工行业，换热器的投资占总投资的20%以上，占设备总重量的40%以上。因此，换热器的正常运行是保证各种工艺流程正常进行的基础，对于提高主设备的可靠性，延长平均操作周期具有重要意义。所以，对于换热器的可靠性必须予以足够的重视。

换热器的作用主要包括：使物料的工艺温度通过热交换达到规定的要求，以完成诸如加热、冷却、蒸发、冷凝等工艺过程；有效地利用热能，在余热利用、节能等方面已成为必不可少的设备。换热器的作用不同，应用领域不同，它的工作环境也有所区别，从而对其可靠性的要求也不一样。有些换热器工作环境非常恶劣，或者处于高温高压下工作，或者在易燃、易爆、腐蚀性强的条件下工作。例如化工企业中的某些换热器工作介质的压力最高可达250 MPa，操作温度最高达1 000~1 500℃；有的工作介质为硫酸或硝酸，极具强腐蚀性。另外，有些场合下对换热器的生产出力要求大，连续性强，因此，给换热器的正常运行带来了一定的困难，有时甚至出现严重事故，危及生产及职工的生命安全。

根据资料统计，在化工行业，换热器的故障率在所有化工设备损坏中占的比例最大，为27.2%，远高于槽、塔、釜的损坏率。据有关部门对小氮肥行业1973~1983年的统计，换热器发生爆炸事故共16次，伤亡人数12人，造成了极大的经济损失。例如，某氮肥厂未按国家有关规定，擅自修改换热器图纸，自行加工制造，质量低劣，并错误地将封头焊在底部，又缺乏完善的检验手段，该换热器

在运行过程中突然发生爆炸,伤5人,死亡1人。某工段换热器的载热体为易燃易爆物质,工作中温中压下,由中温变换炉上段流出的气体为 490°C , 1.9 MPa ,进入该换热器,与二次碱性气进行热交换,将温度降至 400°C 。在一次检修完毕启动时,上段壳体与下管板连接焊缝处突然裂开 800 mm 的裂口,冒出的气体迅速燃烧爆炸,损失严重。某高压省煤器由于严重腐蚀,漏水与通过其中的 SO_2 反应生成稀硫酸,酸又与换热器壳体金属发生化学反应生成氢气,达到一定浓度后,遇明火使该换热器爆炸。火力发电厂中的高压加热器也是经常出故障的一个设备,经常由于故障而不能投运,严重影响了电厂正常生产。综上所述,换热器的可靠性,不仅影响到正常生产,而且还给工人的人身安全带来严重威胁。

为了防止换热器事故的发生,从设计、制造、检验、安装到运行和检修,国家有关部门已经制订了详细的法规。例如《压力容器安全技术监察规程》、《钢制管壳式换热器设计规定》、《钢制石油化工压力容器设计规定》、《钢制管壳式换热器技术条件》以及《钢制石油化工压力容器技术条件》等。在《钢制管壳式换热器设计规定》中,分为总论、材料、尺寸公差、设计等四章,另有附加要求、低温换热器、振动、钢材高温机械性能及线膨胀系数推荐值、钩圈及管子特性表等六个附录。其它国家有关标准包括美国的ASME关于动力锅炉及压力容器的有关规范中与压力容器密切相关的第Ⅲ篇“核动力装置构件构造规则”、第Ⅳ篇“压力容器构造规则”以及第Ⅴ篇和Ⅷ篇,美国管壳式换热器制造者协会标准TEMA;英国BS 5500:1978《非直接火压力容器规定》;德国AD压力容器规范等。

在设计、制造、安装、运行或检修时只要按照上述有关标准或规范的要求,一般情况下就可以保证换热器的安全性。但是由于换热器工作环境的复杂性、影响安全工作因素的多样性,再加上对材料、工艺认识上的不全面,或研究的不深刻,导致某些标准或规定的不完善,另外还有运行时间的延长、人们的操作失误、工作条件

的变化等仍然会使换热器发生故障,而且这些故障具有极大的随机性及不可预测性,这给我们控制换热器的运行和维修带来较大困难。

可靠性理论的出现与发展,给我们研究一些不可预知的事件发生带来了希望,同时,也使得换热器领域的一些故障利用可靠性理论可以进行预测,并可以定量计算某些故障发生的概率。这样,就给科学地制订换热器的运行规程和检修规程奠定了理论基础。因此,本书并不研究如何根据一些规程或标准去设计、运行换热器,以保证其安全性,而是从可靠性理论出发,研究换热器的可靠性指标,换热器的失效模式与可靠性分布模型、可靠性数据的搜集与分析、故障的预测与状态的转移以及基于可靠性理论的换热器设计中需要考虑的问题等,从一些无序的随机的大量故障数据中研究预测和计算换热器故障发生概率的方法。

本书是换热器可靠性及故障预测理论方面的专著,是作者十几年来在此领域教学与科研的总结。通过此书的出版,进一步加强可靠性理论在换热器领域的推广和应用,进一步加强对换热器的安全可靠管理,用科学的方法去指导安全实践,进一步减少换热器事故的发生。这就是作者写作此书的心愿。

陆煜教授审阅了全书,并提出了许多宝贵意见和建议,在一些方面作了详细指导,在此表示感谢。

由于作者的水平有限,书中定有不当之处甚至错误,恳请读者批评指正。

目 录

第一章 概述.....	1
1.1 换热器可靠性特征量	1
1.2 寿命特征量	10
1.3 寿命分布	15
1.4 维修性特征参数	28
1.5 有效性特征参数	30
1.6 换热器可靠性指标	32
第二章 换热器可靠性数据的统计分析	37
2.1 可靠性数据的统计	37
2.2 故障数据的直方图处理	42
2.3 故障数据分布参数估计的解析处理	46
2.4 基于指数分布的换热器部件可靠性参数估计	51
2.5 基于正态分布的换热器部件可靠性参数估计	57
2.6 基于对数正态分布的换热器部件可靠性参数估计	64
2.7 基于两参数威布尔分布的换热器部件可靠性参数估计	68
2.8 故障数据的图分析	72
2.9 换热器部件腐蚀的统计规律	88
第三章 换热器网络可靠性模型	97
3.1 换热器网络	97
3.2 串联系统	98
3.3 并联系统	100

3.4	混联系统	104
3.5	n 中取 k 系统	107
3.6	贮备冗余系统	110
3.7	复杂网络系统的可靠性分析基础	116
3.8	复杂换热器网络可靠性分析的全概率简化法	121
3.9	复杂换热器网络可靠性分析的最小路集法	125
第四章 换热器的故障模式与分析		129
4.1	故障物理模型	129
4.2	管束振动	132
4.3	腐蚀	142
4.4	磨损	147
4.5	故障树分析	150
4.6	换热器故障分析的步骤	168
第五章 换热器零部件的可靠性设计		176
5.1	可靠性设计基本概念	176
5.2	应力-强度干涉模型及其可靠度计算	179
5.3	应力、强度为常用分布时的可靠度计算	181
5.4	可靠性设计基本方法	196
5.5	零件的极限状态方程与可靠度系数的几何意义	206
5.6	强度与应力为非正态分布时的可靠性设计方法	211
5.7	零件的疲劳强度可靠性设计	216
5.8	带裂纹零部件的可靠性核算与分析	223
5.9	换热器可靠性设计示例	231
5.10	换热器网络的冗余设计	255
第六章 换热器状态转移及其可靠性		260
6.1	马尔可夫过程与状态转移矩阵	260
6.2	单部件系统的状态转移概率	262

6.3 串联网络系统	270
6.4 并联网络系统	274
6.5 基于设备状态频率和持续时间的可靠性评估	279
6.6 非马尔可夫过程的系统可靠性	286
附录	290
附表 1 Γ 函数表	290
附表 2 正态分布表	291
附表 3 χ^2 分布表	296
附表 4 F 分布表	299
附表 5 t 分布表	305
附表 6 BLIE 权系数表	306
附表 7 修偏系数表	313
附表 8 W 分布的分位数值	317
附表 9 $V_{1,p}$ 的分布的分位数值	319
附表 10 $V_{0.458}$ 的分布的分位数值	324
参考文献	326

第一章 概 述

1.1 换热器可靠性特征量

1.1.1 可靠性定义

换热器的可靠性可定义为在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。应当指出,这里所指的换热器应该是一个广义的概念,可以是一台换热器,即所谓的元件,也可以是多台换热器以某种方式组成的网络,即所谓的系统。当然,元件和系统是一个相对性概念,随着研究对象的变化而变化。例如,如果研究对象本身就是一台换热器,那么它就可以作为一个系统来看待,而元件则是换热器中的换热管、管板、壳体等部件。如果研究换热器网络,则每一台换热器视为元件,而网络就是系统。

根据可靠性定义,换热器的可靠性是与“规定的条件”分不开的。这里所说的条件,是指换热使用时承受应力的条件、工作的环境条件(如温度、压力、振动、腐蚀、磨损等)以及贮存(备用)时的贮存条件。很显然,规定的条件不同,可靠性就不同。一台工作于恶劣环境下且受力类型复杂,应力水平高的换热器在规定的时间内完成规定功能的能力就越低,则工作寿命越短。

换热器的可靠性还与“规定的时间”有关。一般情况下,随着使用时间的增长,可靠性会降低。不同的规定时间会有不同程度的可靠性。值得注意的是,“时间”概念可以用小时、年等时间单位定义,也可以是周期或次数。对于经常启停的换热器来讲,影响最大的是交变应力,故可用应力循环次数来定义时间。

换热器的可靠性还与“规定的功能”有关,完成规定功能的能力是

指完成规定性能指标的可能性,即换热器的出口温度要满足要求,或者流量要满足要求,或者换热效率满足要求。不同应用场合的换热器,规定的功能不一样,具体分析时要具体对待。

可靠性是衡量换热器性能及质量的一个重要指标。由于现代工业技术设备的性能参数日益增多,结构日趋复杂,换热器使用的场合也更加广泛,应用环境也变得更加严酷,所以换热器的可靠性问题应越来越受到重视。

换热器的可靠性可分为三个方面,即固有可靠性、使用可靠性和环境适应性。所谓固有可靠性,是指在设计、制造时能保证的内在可靠性。这种可靠性受许多因素的制约,例如设计方案的选择,零部件的材料、结构与性能,制造工艺以及有关法规、规范的全面性等。所谓使用可靠性,是指在使用运行时换热器所具有的可靠性,主要是指运行维护人员对可靠性的影响,例如运行规程和检修规程,人为失误等。环境适应性是指换热器所处的环境条件对可靠性的影响。根据资料统计,某种机械产品的故障起因于设计质量的占故障总数的 43%;起因于制造质量的占 20%;起因于使用条件和使用方法的占 30%;起因于其它原因的占 7%。因此,为保证较高的可靠性,首先要做到设计质量高,制造质量高,并尽量保证有正确的使用方法,操作人员有熟练的技巧。一般来讲,固有可靠性是通过设计、制造过程所形成的最高可靠性,而使用可靠性既受设计、制造的影响,又受使用条件的影响。所以使用可靠性不会大于固有可靠性。因此,只有通过提高设计和制造质量以提高换热器的固有可靠性;通过改善使用条件以提高换热器的使用可靠性,才能最终提高换热器的可靠性。

换热器的可靠性是刻划其寿命特征的一种能力,这种能力可以从不同的角度,用不同的方法来描述。

1.1.2 可靠度

为了定量地分析换热器的可靠性,必须引入具体的量来描述,这个

量就是可靠度。换热器的可靠度是指时间从 $t=0$ 时刻开始,在规定的条件下,在规定的时间内完成规定功能的概率,用 $R(t)$ 表示,并称 $R(t)$ 为可靠度函数。

根据可靠度的定义,可靠度是对一定的时间而言的,同一台换热器,规定的时间不同,可靠度就不同。因此可靠度是随机变量 T 的函数。对于任意时刻 $t>0$,换热器的可靠度函数 $R(t)$ 是正常工作时间随机变量 T 大于 t 的概率,即有:

$$R(t) = P(T > t), t > 0 \quad (1-1)$$

实际上,随机变量 T 的意义应表示从开始运行到发生失效或故障的时间,如果已知其分布概率密度为 $f(t)$,根据概率定义则可靠度函数 $R(t)$ 也可用下式表示:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1-2)$$

与可靠度相对应,换热器的不可靠度指在规定的条件下,规定的时间内,丧失规定功能的概率,用 $F(t)$ 表示,也是一个与时间有关的函数,又称为故障函数。可靠度和不可靠度是相互对立的事件,根据概率互补定理,两对立事件的概率和恒等于 1,即

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-3)$$

所以可靠度又可表示为:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (1-4)$$

式(1-3)、(1-4)给出了 $R(t)$ 和 $F(t)$ 的关系,再考虑上分布概率密度函数 $f(t)$,它们三者之间的关系为:

$$R'(t) = -F'(t) = -f(t) \quad (1-5)$$

$f(t)$ 又称为故障密度函数。

根据概率的性质,可靠度具有以下性质:

- (1) $R(0)=1$, 表示换热器在开始时刻处于良好状态;
- (2) $R(t)$ 是随机变量 t 的单调减函数,即 $R(t)$ 随 t 的增加而减少;

- (3) $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$, 当使用时间充分大时, 可靠度为 0;
- (4) $0 \leq R(t) \leq 1$, 即在任意时刻可靠度的值都介于 0 和 1 之间。

1.1.3 故障

换热器的故障是指丧失了其规定的功能。应当指出, 对于不可修复的换热器, 如果丧失了规定的功能, 则称为失效。本书均把换热器视为可修复设备, 故均以“故障”来分析。

根据换热器故障的这一定义, 故障的范畴应包括如下三个方面: 引起换热器立即丧失其功能的破坏性故障; 使换热器性能降低的故障; 人为造成的故障。

在大量的工程实践中可以接触到各种各样的换热器故障, 发现故障和排除故障是一项经常的、反复进行的工作。排除故障的关键是弄清故障的原因。根据机械领域某些理论上及实践中积累的大量经验, 按某种方法对故障进行分类, 对故障分析工作具有重要意义。可以按照类别去发现故障共性的东西, 如故障的严重程度, 故障发生的原因, 寻找排除故障的措施等。

对于机械设备而言, 一般有如下几种故障分类方法。当然换热器作为一种特殊的机械设备也是适用的。

最常用的故障分类方法是按照故障发生的时间, 可分为早期故障, 耗损故障及偶然故障。

(1) 早期故障

早期故障是指系统或设备开始投运后在较早的一段时间内出现比例较高的故障。早期故障是由于设计制造不当, 存在缺陷, 或者由于操作、使用的不熟练、不适当而引起的。对于人为因素造成的故障是不易查出的。但据统计早期故障大多数是人为失误造成。所以早期故障的原因不易确定。

应当指出, 对于早期故障出现时期的划分尚没有明确的标准, 一般把故障率逐渐降低、直到被判断为对实际使用没有影响时才称为早期

故障期。

(2) 耗损故障

耗损故障是指系统或设备由于机械磨损、热冲击或化学变化产生的物质损耗或疲劳特性退化而引起的故障。耗损故障的故障寿命分布函数为正态分布或威布尔分布。这种型式的故障寿命在均值附近密度最大,即在均值附近故障最集中。根据这一特性,当设备使用一段时间后,应及时更换备品,这样就可以将许多故障防患于未然。这就是预防性维修所研究的内容。具体的故障分布形式将在以后的章节中讨论。

(3) 偶然故障

从早期故障期结束至耗损故障期的开始之间的一段时间内出现的故障称为偶然故障。一般说来,早期故障可通过生产阶段的适当处理和提高操作人员的熟练程度来逐渐减少,但是产生故障的因素不可能全部排除,会残留一部分而引发故障,但故障的发生是随机的,这就是偶然故障。这是在使用寿命期内发生的故障,这一故障期是最长的。

早期故障、偶然故障和耗损故障三者之间的关系可用图 1-1 表示。此曲线的形状像一浴盆,又称为浴盆曲线。由图 1-1 可知,浴盆曲线(寿命特性曲线)受三条线的制约:与应力有关的故障基本上与使用时间无关;与质量有关的故障随着使用时间的增长是逐渐减少的;与耗损有关的故障随着时间的增长逐渐增大。设备开始使用后,首先进入早期故障期,在这段时间内,通过适当的维护,故障率逐渐降低,此时进入低故障率的偶然故障期,这一时期持续的时间最长,又称设备寿命期。从偶然故障的末期开始,主要由于材质的老化等原因,开始出现耗损故障。进入耗损故障期后,故障率不断增加,直至完全失效。

除了上述按故障发生的时间对故障分类外,尚有其它一些分类方法。

按照故障的原因可把故障分为三类:耗损性故障——设备正常运行时由于耗损(如磨损、腐蚀等)而引起的故障,实际上它反映了设备的寿命;错用性故障——运行时操作不当或意外情况引起设备中某些零

件应力超过设计允许值而产生的故障；固有的薄弱性故障——设备运行时应力没有超过设计值，但由于设计与制造的原因而造成设备中存在某些薄弱环节（如应力集中部位等）形成的故障。

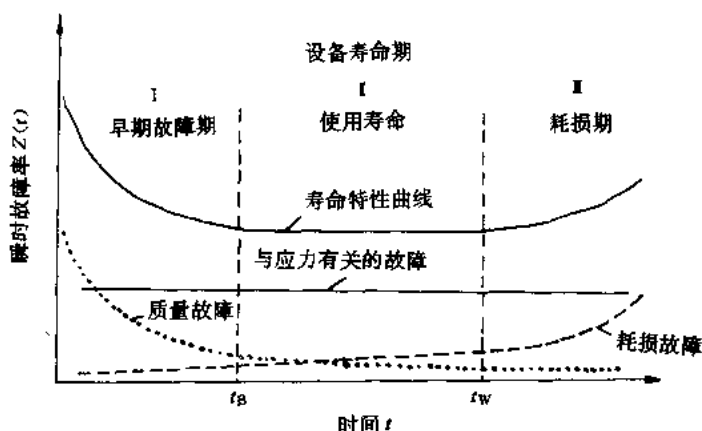


图 1-1 浴盆曲线

按照故障零件的损坏现象分类，一般有变形、裂纹、磨损、断裂、脱焊等。对于这一类故障可用肉眼看到，或者可用常规仪器检测出来。其中有些是可修复的，有些是不可修复的。电站凝汽器发生铜管破裂时，可用堵管的方法临时解决，大修时再予以更换。

按照故障的严重程度可将故障分为一般性故障、严重故障和致命故障。不同用途的换热器，划分标准不相同。对于一般用途的换热器，如果某一根管子泄漏则属于一般性故障，而对于电厂中的高压加热器而言则属于严重故障，而对于锅炉中的过热器、化工厂用的高压换热器则又属于致命故障。

按照故障时设备功能丧失的程度，可将故障分为两类：永久性故障和非永久性故障。对于前者，必须更换零部件后设备才能恢复其功能；对于后者，又称间断故障，它使部件丧失某些功能，但不需要更换零件就可以排除故障，使设备恢复其全部功能。

按照故障发生的速度可将故障分为两类：突发性故障和渐发性故障。腐蚀和磨损均属于渐发性故障，而管子断裂、壳体破裂等均属于突发性故障。

任何一种故障的发生都是有原因的，找到了故障的原因，就可以采取预防性措施，防止故障的再次发生。因此研究故障的机理和发生原因具有重要的意义。但是对于某一个故障，要具体地全面地确定其发生的原因有一定的难度。笼统地讲，故障发生的原因可归纳为以下三类：

(1) 零件选用不当 例如选用了不适合腐蚀介质的管子等。零件的耐环境设计不当，零件的材料不合适，均会引发故障。

(2) 使用维护不当 在使用过程中，适当的维护与正确的操作方法是十分重要的。如果介质的压力、流量调整不当超过了规定值；操作失误，使用时间超过规定的设计寿命等，均会引发故障。

(3) 工作异常 工作异常包括的内容很多，如疲劳、腐蚀、磨损、蠕变等材料的劣化行为。

图 1-2 给出了某船用换热器易出故障的部位及故障类别。

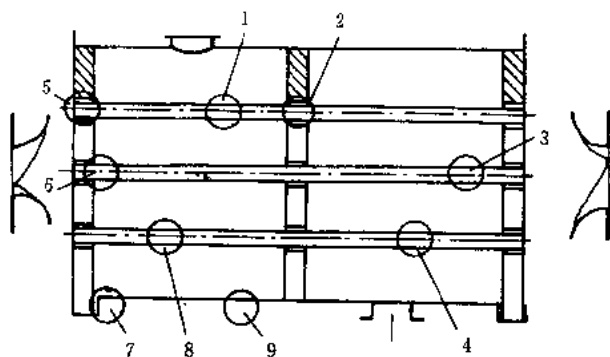


图 1-2 换热器的故障

- 1—振动引起的疲劳破坏；2—管子的磨损；3—进口段的气蚀破坏；
4—流体对管子的冲蚀；5—管子与管板间的失配；6—管子的腐蚀；
7—热应力作用下的壳体或联接件的破坏；8—管子结垢；9—壳体泄漏