

被动强化传热管研究现状

高志新¹, 王飞², 钱锦远¹, 刘步展¹, 高晓斐¹, 金志江^{1*}

(1. 浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027;

2. 杭州市特种设备检测研究院, 浙江 杭州 310051)

摘要:回顾了四种典型的强化换热管元件即波纹管、横纹管、扭曲椭圆管及螺旋槽纹管的研究现状,发现与普通光管相比,这几种强化传热管不仅具有更高的换热能力,还具有较强的抗污垢性能,同时在强化管元件中放置内插物等扰流装置还能继续提高换热能力。基于这些强化传热管元件的较高换热能力在一定工况下才能实现,未来应开发新型的具有扰流、避免流动死区形成的传热管,以满足更广的适用范围或者能够实现更好的换热效果。

关键词: 换热管; 强化传热; 扰流装置

中图分类号: TQ051.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)03-0024-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.03.006

Progress of passive enhanced heat transfer tubes

GAO Zhi-xin¹, WANG Fei², QIAN Jin-yuan¹, LIU Bu-zhan¹, GAO Xiao-fei¹, JIN Zhi-jiang^{1*}

(1. Institute of Chemical Process Machinery, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310051, China)

Abstract: A review of several typical enhanced heat transfer tubes such as corrugated tube, transversally corrugated tube, twisted tube and spiral fluted tube, is carried out. Compared with smooth wall tube, these enhanced tubes have higher heat exchange capacity and better anti-fouling ability. Besides, the heat transfer efficiency can be promoted to a higher level if the objects that can disturb flow are put in the tubes. However, higher heat transfer efficiency of such enhanced heat transfer tubes can only be achieved under certain conditions. Therefore, new heat transfer tubes that could avoid the formation of mobile dead-zone should be designed to meet the broad applications or facilitate better heat transfer effect.

Key words: heat transfer tubes; heat transfer enhancement; swirl flow devices

换热器作为工业生产过程中一类不可缺少的设备,广泛应用在化工、石油、能源等各工业中。据统计,在现代石油化工工业中换热器投资约占设备总投资的30%,在炼油厂全部工艺设备总投资占约40%。由于能源危机一直困扰着世界各国,如何在热量交换过程中得到较高的换热效率以提高能源的利用率成为实现过程工业中节能降耗面临的主要问题。而发展小尺寸、低质量以及换热能力强的设备的需要,促进了换热设备中强化传热技术的研究^[1]。强化传热管因能够使流体在运动过程中产生涡流等流动形式而提高换热器的换热能力,进而使设备能在低温度差下工作,并减小设备体积和质量,降低了设备的制造成本等,目前被大量应用于换热设备当中。本文中简单介绍了强化传热的方法等,并对波纹管、横纹管、扭曲椭圆管及螺旋槽纹管几种典型的能够提升换热能力的传热管的研究现状做重点介绍,最后总结提出新的研究趋势。

1 强化传热的方法

一般来说强化传热方法有主动强化传热和被动强化传热,其中主动强化传热指的是必须附加额外的能量,而被动强化传热则除了流体传送所必需的能量之外,不需要附加额外的任何动力。被动强化传热通过管件结构或者表面的突变来引发流体在流动过程中形成漩涡等二次流动而间接地增大自身的换热能力,虽然不需要直接输入外部能量,但是会导致流体在流动过程中压降增加;主动强化传热由于有外部能量的作用,可以显著增加其换热能力,但是也由于这一原因,如采用主动强化传热,一般需要复杂的结构设计。

主动强化传热在很多情况下难以实现,因而在管式换热器中,强化传热一般利用改变换热面积的翅片管或者采用具有较高换热系数的异型管来实现^[2]。其中使用强化传热管元件是常用的方式,即通过改变换热面的形状或在传热面、传热路径上设

收稿日期:2016-07-04;修回日期:2016-12-29

作者简介:高志新(1992-),男,博士生,主要从事高效节能装备的研究,zhixingao@foxmail.com;金志江(1966-),男,博士,教授,主要从事高效节能装备与技术的研究,通讯联系人,zjz@zju.edu.cn。

置插入物的方式获得高效换热管。如螺旋槽纹管、波纹管、横纹管、扭曲管以及管内设置各种插入物等强化换热管。

2 几种典型的被动强化传热管

2.1 波纹管

波纹管(图1)一般是将光滑圆管表面加工成具有均匀连续的波纹突起的强化换热管,由于环形的波动使得管内外的流体介质的湍动能增加,导致管壁处边界层减薄,因而波纹管不但具有较强的传热性能,还具有良好的自清洁能力。

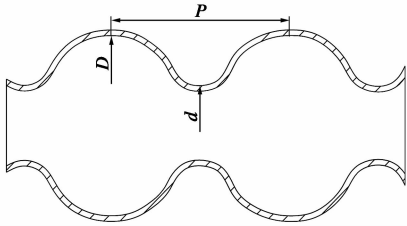


图1 波纹管示意图

2.1.1 波纹管的传热特性

宋景东等^[3]通过对波纹管和光管进行 CaCO_3 加速析晶污垢对比实验发现,在洁净工况下,波纹管的传热效果是光管传热效果的 1.2 倍;存在垢阻的工况下,波纹管的传热性能是光管的 1.8 倍,且波纹管的渐近污垢热阻值约为光管的 0.9 倍,说明波纹管在阻垢性能方面具有优势,比光管更适合在结垢工况下使用。Vicente 等^[4]研究了雷诺数在 2 000 ~ 90 000 以及普朗特数在 2.5 ~ 100.0 的范围内,介质为水和乙二醇的几种波纹管的换热性能以及摩擦特性,发现在相同条件下波纹管的换热性能及压降较光管高,其中努塞尔数较光管高达 250%,而摩擦系数增加了 20% ~ 300%。

2.1.2 扰流装置对波纹管传热性能的影响

Hasanpour 等^[5]利用实验对比了雷诺数在 5 000 ~ 15 000 的工况下波纹管中插入几种扭曲带的换热能力与压降情况,发现扭曲带的存在使其换热能力较单纯波纹管的要高,其在雷诺数为 5 000 时与单纯波纹管的努塞尔数比值可达 1.8,但扭曲带的存在导致管内的阻力系数也较单纯波纹管的要高。Dizaji 等^[6]讨论了雷诺数在 3 500 ~ 18 000,套管换热器内外管为波纹管时的换热及摩擦特性。发现与内外管均为光管相比,当内管是波纹管外管是光管时,努塞尔数是其 1.10 ~ 1.52 倍,摩擦系数是其 2.50 ~ 2.87 倍;当内外管均为波纹管时,努塞尔数是其 1.23 ~

2.17 倍,摩擦系数是其 3.00 ~ 3.54 倍。

2.2 横纹管

横纹管(图2)一般是将光管外壁滚轧出与管轴向呈 90° 的横向沟槽,从而在管内外壁上形成环形周期性内凹的换热管。这些管面横纹的存在可诱发流体的扰动及产生横向涡流,从而使边界层减薄,达到强化传热的效果。

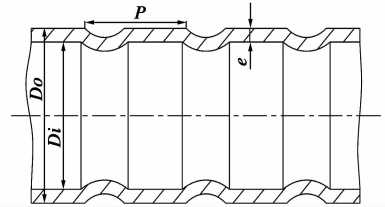


图2 横纹管示意图

2.2.1 横纹管的传热特性

文玉良等^[7]对以熔融盐为传热工质的横纹管进行了研究,发现横纹管比光管具有更好的传热性能。徐志明等^[8]对横纹管的传热性能和抗污垢性能进行了研究,发现横纹管的传热性能和抗垢性能优于光管,其渐近污垢热阻值约为光管的 0.83 倍,且污垢状态下其传热性能是光管的 1.40 倍。

2.2.2 结构参数对横纹管传热特性的影响

李洪亮等^[9]利用实验方法对以 LiBr 水溶液为介质的横纹管传热特性进行了分析,发现节距和槽深对换热性能有很大影响。Bilen 等^[10]通过实验分析了在雷诺数 10 000 ~ 38 000 的工况下,横纹管中相同波纹高度的半圆形、矩形和梯形波纹对管的传热性能的影响,结果显示,在雷诺数 Re 为 38 000 的工况下,半圆形横纹的横纹管的传热效果比光管的传热效果提高了 63%,矩形横纹管的传热效果提高了 47%,梯形横纹管的传热效果提高了 58%。

2.3 扭曲椭圆管

扭曲椭圆管(图3^[11])是圆型光管经过冷轧技术加工成的椭圆横截面沿轴线螺旋扫略出的螺旋形换热管。其不仅具有较高的换热特性和较低的压降性能,同时在壳层装配时还具有自支撑(图4^[11])的功能,从而使得管式换热器在设计制造过程中可以省掉折流板结构,因此与普通折流板换热器相比,

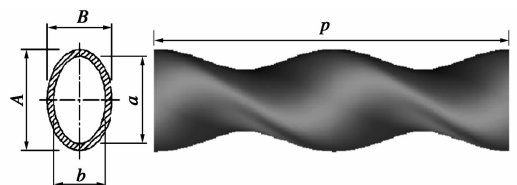


图3 扭曲管示意图

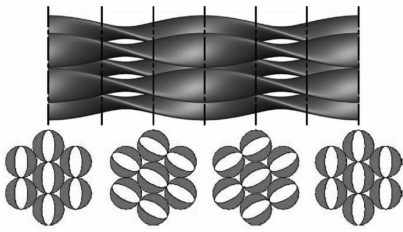


图 4 扭曲管自支撑示意图

成本降低了 $1/4$ ^[11]。

2.3.1 扭曲椭圆管的传热特性

蒋翔等^[12]利用实验对比了扭曲管和光管在管外水喷淋下的传热性能,发现在相同情况下扭曲管的换热系数比光管高 18.0% ~ 33.1%。Tan 等^[11]利用实验和数值模拟结合的方法研究了扭曲管管式换热器中壳程的换热特性,发现与光管相比,扭曲管管式换热器的换热性能得到增强,但同时其压降也有所增加。

2.3.2 结构参数对扭曲椭圆管传热特性的影响

高学农等^[13]以水为介质,研究了不同截面长短轴比($b/a = 0.027 \sim 0.470$)和高扭曲比(即导程与直径比, $S/d = 17.190 \sim 50.620$)的扭曲椭圆管内的传热与压降特性,发现高扭曲比椭圆管的管内换热系数和阻力系数均随长短轴比值和扭曲比值的增大而减小,并且随长短轴比值的增加而减小得更快。此外,长短轴比值对高扭曲比椭圆管的管内传热与阻力特性的影响更大;在相同雷诺数和普朗特数下,高扭曲比椭圆管管内的换热性能是光管的 1.3 ~ 2.5 倍;阻力系数为光管的 1.2 ~ 1.5 倍。Tan 等^[11]通过实验发现,扭曲管管式换热器的壳程中换热系数及摩擦系数随着椭圆截面长短轴的比值 a/b 的增加而增加,随着扭曲螺距 p 的增加而先增加后减小。

2.3.3 扭曲椭圆管传热及压降计算

Dzyubenko 等^[14]对扭曲椭圆管单管管内单相流动的传热及压降特性进行了实验研究及数值计算,得到了传热和压降的计算准则关系式。孟继安等^[15]采用数值模拟的方法对椭圆管进行研究,并拟合出了管内层流传热与压降的关系式。

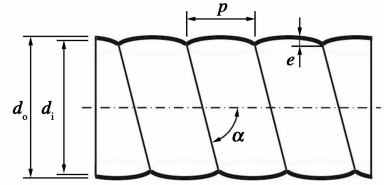
2.4 螺旋槽纹管

螺旋槽纹管是由圆形光管经塑型加工而成的管壁上具有内凹和外凸的褶皱螺旋形变管,其可以强化管内外流体传热、强化管内液体沸腾和管外蒸汽的冷凝。螺旋槽纹管主要用于液-液型传热,强化传热及抗污垢性较光管好,应用比较广泛。

2.4.1 单头螺旋槽纹管

(1) 单头螺旋槽纹管的换热特性

Fernández-Seara 等^[16]实验研究了雷诺数在 10 000 ~ 70 000 下单头螺旋槽纹管(图 5)在管外氨冷凝下的换热特性及摩擦特性。发现与光管相比,其换热性能增强了 2.11 ~ 2.53 倍,而摩擦系数在雷诺数 17 000 ~ 58 000 是光管的 4 ~ 5 倍。



(a) 示意图



(b) 实物图

图 5 单头螺旋槽纹管示意图及实物图

Kalendar 等^[17]实验研究了以水-盐水为介质,雷诺数在 $10^3 \sim 7 \times 10^3$ 范围下的单头螺旋槽纹管和光管的换热性能及抗污垢性能,发现螺旋槽纹管比光管具有更小的污垢热阻,随着雷诺数的增加,螺旋槽纹管和光管的换热性能都增加,但螺旋槽纹管的换热性能明显优于光管。

(2) 结构参数对换热性能的影响

Hærvig 等^[18]利用模拟的方法研究了在雷诺数 $Re = 5 000$ 和 10 000 的情况下 28 种不同结构的螺旋槽纹管(螺距 $p/d = 0.5 \sim 2.0$,螺旋凸肋高 $h/d = 0 \sim 0.16$)的换热及摩擦特性。发现在不考虑压降的时候,最优的螺旋槽纹管结构是 h/d 为 0.16, p/d 为 1.5。但同时考虑压力损失和换热性能的时候,在雷诺数等于 5 000 的情况下, $h/d = 0.05, 0.10, p/d = 0.5, 1.0$ 时有最优的结果,此时换热性能比光管提高了 1.57 倍。Salimpour 等^[19]利用实验研究了雷诺数在 3 000 ~ 15 000,水和二氧化钛纳米流体在螺旋槽纹管中的对流换热情况。其中螺旋凸肋高与直径比 $h/d = 0.065, 0.103$,螺距与直径比 $p/d = 0.917, 1.297$,螺纹宽度与直径比 $w/d = 0.363, 0.492$ 。研究发现,努塞尔数随着 h/d 及 w/d 的增加而增加,随着 p/d 的减小而增加。

(3) 扰流装置对换热特性的影响

Saha^[20]通过实验研究了内插有螺杆的螺旋换

热管在层流状态下的换热及流动性能,发现在层流工况下,配有内插物的螺旋槽管比单独的螺旋槽纹管具有更好的换热性能,其中内插有螺旋镂空纽带的换热管的阻力系数会增加 10% ~ 50%。Pal 等^[21]实验研究了以油为工作介质的带有内插锯齿纽带的单头螺旋槽纹管在层流流动状态下的换热特性,发现与不带有内插物的管相比,管内阻力系数增加了 63% ~ 107%,努塞尔数增加了 82%。

Li 等^[22]对螺旋槽纹管制成的螺旋盘管的流动和换热特性进行了数值模拟研究,研究表明,雷诺数在 $7.07 \times 10^4 \sim 16.92 \times 10^4$,螺距 p 在 20 ~ 60,槽深 $e = 2$ 条件下,螺旋槽纹管相比于光管进一步强化了换热性能,且螺距的降低可获得更好的换热性能,在研究范围内,螺旋槽纹管制成螺旋盘管换热性能相比于光管提高 50% ~ 80%,流阻升高 50% ~ 300%。Zachár^[23]数值研究了以水及水-乙二醇混合物为介质的螺旋盘绕螺旋槽纹管(管径 $d = 15, 20, 25$, $h/d = 0.050, 0.075, 0.10$,螺距 $p = 22.25, 44.50, 89.00$,线圈直径 340 mm,线圈螺距 40 mm,迪恩数 30 ~ 1 400)中的换热性能,并与螺旋盘绕光管进行了对比。发现螺距与管径的比值 p/d 和螺旋凸肋高与管径的比值 h/d 对传热率的影响趋势是同样的,但是 p/d 的值对换热效果的影响相对来说更强烈。同时还发现与普通螺旋盘绕管相比,其换热率增加 80% ~ 100%,压降增加 10% ~ 600%。其中在 $p/d = 1, h/d = 0.1$ 时,传热率与光管相比增加近 100%。

单头螺旋槽纹管虽然在强化换热方面具有较大的优势,但由于单头螺旋槽纹管的槽深 e 和螺距 p 的变化范围较小,使得其应用受到了一定的限制,这促使了结构上具有更为多变结构的多头螺旋槽纹管的出现。

2.4.2 多头螺旋槽纹管

(1) 多头螺旋槽纹管的传热特性

刘佳驹等^[24]利用数值模拟的方法以水为介质研究了三头螺旋槽纹管的传热性能,发现在雷诺数 300 ~ 1 800,一定槽深的三头螺旋槽纹管可在不明显增加流动阻力的情况下使换热性能有较大提升。Kareem 等^[25]采用实验和数值模拟结合的方法研究了三头螺旋槽纹管在以水为介质且低雷诺数下的换热性能(图 6^[25])。发现在雷诺数 100 ~ 600,换热效率是光管的 1.8 ~ 3.4 倍,在雷诺数 800 ~ 1 300,换热效率是光管的 2.6 ~ 3.4 倍,在雷诺数 600 ~ 800,换热效率最高,是光管的 3.4 ~ 3.7 倍。

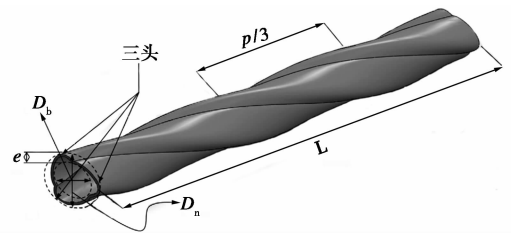


图 6 三头螺旋槽纹管

Liu 等^[26]对以水为介质,雷诺数在 6 000 ~ 18 000 的 4 种螺旋槽纹管($e = 3, d = 16$,分别为单头到四头螺旋槽纹管)的管外换热性能进行了数值模拟研究。发现这 4 种槽纹管的换热性能明显高于光管,其中雷诺数等于 18 000 时,单头螺旋槽纹管的努塞尔数为光管的 1.2 倍。并且发现在相同情况下 4 种槽纹管的换热量与光管相比分别增加了 104.6%、105.4%、106.7%、109.6%,压降则分别为光管的 1.21、1.16、1.12、1.08 倍。

(2) 结构参数对换热性能的影响

Ahn^[27]对雷诺数在 1 700 ~ 13 000 工况下的四头螺旋槽纹管换热性能进行实验研究,分析螺旋槽纹管的螺距和槽深等参数对其换热性能的影响,实验结果表明,当螺旋槽纹管外径与外部光管内径比小于 0.5 时,螺距与槽深比值 p/e 接近 8 的过程中,努塞尔数逐渐增加;当螺旋槽纹管外径与外部光管内径比大于 0.5 时,努塞尔数则逐渐降低。Promthaisong 等^[28]模拟了雷诺数在 5 000 ~ 20 000,螺旋槽纹管中的螺旋凸肋高与直径比 ($h/d = 0.02 \sim 0.16$) 和螺距与直径比 ($p/d = 0.1 \sim 1.0$) 对换热性能的影响。发现在 $h/d = 0.08 \sim 0.10, p/d = 0.20 \sim 0.25$ 内螺旋槽纹管性能最优。同时与光管相比,螺旋槽纹管的换热性能是其 0.75 ~ 2.35 倍,压降损失则是其 1.0 ~ 2.4 倍。

(3) 扰流装置对换热特性的影响

Eiamsa-Ard 等^[29]模拟了几种内插纽带对螺旋管换热性能的影响。发现内插纽带可以提高螺旋管的换热性能以及压力降,并且换热性能及压力降均随雷诺数的增加而减小。Zimparov^[30]实验研究了 2 种三头螺旋槽纹管(槽深与管径比值 $e/d = 0.0407, 0.0569$)在以水为介质,雷诺数在 4 000 ~ 60 000 的范围内与 5 种扭曲插入带(螺距与管径比值 $h/d = 15.3, 12.2, 7.70, 5.80, 4.70$)结合后的换热性能与摩擦压降特性。发现对螺旋槽纹管,摩擦系数随着 h/d 的减小而增加,同时与光管相比,含有内插纽带的螺旋槽纹管的换热性能与摩擦系数较高。其中努

赛尔数是光管的 1.9 ~ 9.6 倍,摩擦系数则是光管的 2.4 ~ 17.9 倍。

3 结语

强化传热管元件通过自身结构的变化诱发流体在运动过程中产生螺旋或漩涡运动,从而使边界层减薄以及换热面积增加来实现强化传热,在相同条件下其换热效率与光管相比有显著提升。波纹管、横纹管及螺旋槽纹管等与光管相比不但具有较高的换热性能,还具有较高的抗污垢性能。同时在管中放入能改变流体流动状态的内插物等扰流装置可以更好地提升强化传热管元件的换热效果。此外横纹管中的肋高和肋节距、扭曲管中的截面长短轴比和扭曲比以及螺旋槽纹管中的螺旋凸肋高和螺距等都对换热管的换热性能及摩擦系数有重要的影响。

国内外对强化传热管元件的研究方法一般为实验法或者数值模拟法及二者综合运用。数值模拟法能够快速直接地得到想要的结果,但需要有一定的实验作为依托。对传热管的研究目标一般是为了得到管件的换热能力的公式,以及为了得到具有更高换热能力的管件,对管件的各个结构参数进行单独分析或者综合分析,从而得到满足一定条件下的最优的管件设计结构。

目前大多研究集中在单相湍流工况下的换热分析,故未来应对现有的强化传热管在多相流下的换热情况进行研究讨论。此外现有的强化传热管一般在一定的工况下才能表现出最优的传热效果,在某些特定情况下对传热能力的提高不是十分明显。并且强化传热管在提高换热能力的同时也导致流体在流动过程中的压降增加,因此需要开发新型的强化传热管,使流体在流动过程中湍动增加,并在流动方向上避免死区存在,以具有更好的传热效果及较低压降特性或者使其拥有更广适用范围。

参考文献

- [1] 冯国红,曹艳芝,郝红. 管壳式换热器的研究进展[J]. 化工技术与开发,2009,38(6):41-45.
- [2] 潘文厚,杨启明. 管壳式换热器节能技术研究[J]. 现代化工,2007,27(10):50-53.
- [3] 宋景东,徐志明,甘云华,等. 波纹管传热与污垢性能的实验研究[J]. 东北电力学院学报,2003,23(1):6-9.
- [4] Vicente P G, García A, Viedma A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2004,47(4):671-681.
- [5] Hasanpour A, Farhadi M, Sedighi K. Experimental heat transfer and pressure drop study on typical, perforated, V-cut and U-cut twisted tapes in a helically corrugated heat exchanger[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2016,71:126-136.
- [6] Dizaji H S, Jafarmadar S. Experiments on new arrangements of convex and concave corrugated tubes through a double-pipe heat exchanger[J]. Experimental Heat Transfer,2016,29(5):1-16.
- [7] 文玉良,丁静,杨晓西,等. 高温熔盐横纹管传热特性与强化机理研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(1):113-115.
- [8] 徐志明,陈玲,孙彬彬,等. 结构对横纹管综合性能影响的研究[J]. 热力发电,2011,40(3):46-50.
- [9] 李洪亮,柳坤. 横纹管强化吸收器的传热传质实验研究[J]. 化学工程,2011,39(1):14-18.
- [10] Bilen K, Cetin M, Gul H, et al. The investigation of groove geometry effect on heat transfer for internally grooved tubes[J]. Applied Thermal Engineering,2009,29(4):753-761.
- [11] Tan X, Zhu D, Zhou G, et al. 3D numerical simulation on the shell side heat transfer and pressure drop performances of twisted oval tube heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2013,65:244-253.
- [12] 蒋翔,李元希,涂爱民,等. 异形钢管蒸发式冷凝器的传热与能耗性能[J]. 现代化工,2008,28(9):66-70,72.
- [13] 高学农,邹华春,王端阳,等. 高扭曲比螺旋扁管的管内传热及流阻性能[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2008,36(11):17-21.
- [14] Dzyubenko B V. Influence of flow twisting on convective heat transfer in banks of twisted tubes[J]. Heat Transfer Research,2005,36(6):449-459.
- [15] 孟继安,李志信,过增元,等. 螺旋扭曲椭圆管层流换热与流阻特性模拟分析[J]. 工程热物理学报,2002,36(S1):117-120.
- [16] Fernández-Seara J, Ufía F J. Heat transfer and friction characteristics of spirally corrugated tubes for outer ammonia condensation[J]. International Journal of Refrigeration,2012,35(7):2022-2032.
- [17] Kalendar A, Galal T, Al-Saftawi A, et al. Enhanced tubing thermal performance for innovative MSF system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2011,25(8):1969-1977.
- [18] Hærvig J, Condra T, Sørensen K. Numerical investigation of single-phase fully developed heat transfer and pressure loss in spirally corrugated tubes[C]. Linköping University,2015.
- [19] Salimpour M R, Golmohammadi K, Sedaghat A, et al. Experimental study of the turbulent convective heat transfer of titanium oxide nanofluid flowing inside helically corrugated tubes[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2015,29(9):4011-4016.
- [20] Saha S K. Thermohydraulics of laminar flow through a circular tube having integral helical corrugations and fitted with helical screw-tape insert[J]. Chemical Engineering Communications,2013,200(3):418-436.
- [21] Pal P K, Saha S K. Experimental investigation of laminar flow of viscous oil through a circular tube having integral spiral corrugation roughness and fitted with twisted tapes with oblique teeth[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2014,57:301-309.

所以,催化剂的活性与活性位点的活性以及数量呈正相关。当催化剂使用 3 年后,因为催化剂的机械磨损、碱金属中毒、通道堵塞等原因使活性位点数量减少导致活性位点数量减少,从而导致脱硝效率明显降低,而无法正常工作。针对此种情况,目前已经有相应的再生处理方法。

1.1 湿法再生

1.1.1 去离子水洗再生

Khodayari 等^[9]通过水洗再生的方法来处理碱金属中毒的 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂。将失活脱硝催化剂用去离子水冲洗,然后用压缩空气干燥即可再利用。在利用去离子水冲洗的过程中,可以将可溶解性的盐类和表面的部分颗粒物去除。对于较难清洗的附着物(如硫酸钙)可以利用超声波水洗,加强水洗效果。

程华^[10]经过研究检测证明,水洗再生能有效去除 S、Ca 等中毒物质,微观形貌也有较大改善,但只对 K 中毒的脱硝催化剂有很大提升作用。在 350 ~ 450℃ 的工作温度,脱硝活性能达中毒前的 83% 以上。而且经过测试分析,得知对于 K 中毒的催化剂活性恢复情况为:超声水洗 > 搅拌水洗 ≥ 浸渍水洗。

水洗虽然对催化剂脱硝活性恢复有一定作用,但主要作用于碱金属导致的催化剂失活。

1.1.2 酸洗再生

Khodayari 等^[3]研究了酸洗再生的催化剂的活性程度。失活 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂样品分别采用 100 mL 的水溶液,不同浓度的硫酸溶液,硫酸和硫酸氧钨的混合溶液,硫酸、硫酸氧钨和仲钨酸铵(APT)的混合溶液在 25℃ 下进行连续搅拌冲洗,之

后在 110℃ 下进行干燥 1 h。干燥结束后,放入 430℃ 的空气气氛炉中焙烧 2 h。将所得的样品进行活性测试时,发现用 0.5 mol/L 的硫酸溶液冲刷 30 min 后能恢复至新鲜催化剂的 92% 的活性。

云端等^[11]对模拟钾中毒的 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂进行酸洗再生测试。通过模拟失活实验使催化剂的最大脱硝效率由 100% 下降到 30% 左右。然后使用 1% 的 H_2SO_4 溶液酸洗浸泡 2 h,干燥之后在 450℃ 下煅烧 3 h。经过检测,再生之后的催化剂的脱硝活性几乎完全恢复,甚至高于中毒前。

可以看出,比起水洗再生,酸洗有良好的恢复活性的效果。通过研究发现,酸洗再生既能够洗掉催化剂表面的碱金属等杂质,也能够恢复 $V^{5+}-OH$ 等活性位点^[12-14],增加 Lewis 和 Brønsted 的酸性位点^[15]。

1.1.3 复合再生

催化剂实际使用过程中的工作环境复杂,失活的原因也很复杂。因此,一般采取复合再生的方法。吴凡等^[16]将电厂失活 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 脱硝催化剂进行超声化学清洗、活性负载以及煅烧等一系列再生处理。检测发现,催化剂的脱硝效率恢复至新鲜催化剂的 94.1%。

Shang 等^[17]就厦门嵩屿电厂的燃煤脱硝催化剂组进行再生研究。通过去离子水冲洗,利用 pH = 2 的硫酸去离子水溶液冲洗催化剂,之后在 60℃ 的温度下干燥 10 h。检测发现,再生之后的催化剂显示了极好的脱硝活性,甚至比新鲜催化剂活性更高。

复合再生相比单独水洗再生、酸洗再生显示出更良好的脱硝效果,而且适用于电厂等脱硝催化剂使用量大的单位,操作简便,且减少经济成本。

(上接第 28 页)

[22] Li Y, Wu J, Wang H, *et al.* Fluid flow and heat transfer characteristics in helical tubes cooperating with spiral corrugation [J]. *Energy Procedia*, 2012, 17: 791 - 800.

[23] Zachár A. Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(19/20): 3928 - 3939.

[24] 刘佳驹,刘伟. 采用深槽螺旋波纹管的折流杆换热器传热与流动数值模拟 [J]. *工程热物理论*, 2015, (1): 151 - 153.

[25] Kareem Z S, Abdullah S, Lazim T M, *et al.* Heat transfer enhancement in three-start spirally corrugated tube: Experimental and numerical study [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 134: 746 - 757.

[26] Liu J J, Liu Z C, Liu W. 3D numerical study on shell side heat transfer and flow characteristics of rod-baffle heat exchangers with spirally corrugated tubes [J]. *International Journal of Thermal Sci-*

ences, 2015, 89: 34 - 42.

[27] Ahn S W. Experimental studies on heat transfer in the annuli with corrugated inner tubes [J]. *KSME International Journal*, 2003, 17(8): 1226 - 1233.

[28] Promthaisong P, Jedsadaratanachai W, Eiamsa-Ard S. 3D numerical study on the flow topology and heat transfer characteristics of turbulent forced convection in spirally corrugated tube [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2016, 69(6): 607 - 629.

[29] Eiamsa-Ard S, Promthaisong P, Thianpong C, *et al.* Influence of three-start spirally twisted tube combined with triple-channel twisted tape insert on heat transfer enhancement [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2016, 102: 117 - 129.

[30] Zimparov V. Enhancement of heat transfer by a combination of three-start spirally corrugated tubes with a twisted tape [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(3): 551 - 574. ■