

催化裂化外取热器开发与研究进展

孙富伟*

(中国昆仑工程公司,北京 100037)

摘要:介绍了外取热器的分类及工作原理,论述了新型高效外取热器研究进展及工业应用情况,包括环流结构外取热器、颗粒可预分配的外取热器、可拆分式外取热器、耦合汽提功能外取热器、双提升结构外取热器,并对取热技术的发展趋势进行了展望。

关键词:外取热器;催化裂化;环流;换热

中图分类号:TQ051.1;TE624

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)06-0029-05

Advances in research and development of external catalyst cooler of FCC

SUN Fu-wei*

(China Kunlun Contracting & Engineering Corporation, Beijing 100037, China)

Abstract: The classification and working principle of external catalyst cooler are introduced. The research development and industrial applications of new high efficient external catalyst coolers are described, including external catalyst cooler with loop structure, external catalyst cooler with particles pre-allocated, detachable external catalyst cooler, external catalyst cooler coupling with stripping function and external catalyst cooler with double lifting structure. The development trends of heat removal technologies are prospected as well.

Key words: external catalyst cooler; FCC; loop; heat exchanger

催化裂化是最重要的石油二次加工工艺,其反应是典型的热平衡过程,即再生烧焦过程释放的热量和反应过程所需的热量相平衡。随着近年来原油的不断重质化及劣质化,重油或渣油的残炭值越来越高,催化剂的再生-烧焦过程中放出的热量远大于系统所需要的热量,为了维持系统的热平衡,使用取热器移除过剩热量以维持装置热平衡已成为常用的方法^[1-3]。

早期催化裂化装置采用内取热技术,投资少,结构简单,不需要设置催化剂循环调节系统及增压风系统,存在取热效率低、热负荷无法调节、启动和停用困难及取热管易损坏等缺点。相比内取热器,外取热器设置在再生器外部,通过颗粒循环管线和再生器连通,内部设置多组取热管束与热催化剂颗粒接触换热。外取热器取热负荷调节灵敏度更高,调节范围更大,设备可靠性也更高,因此获得了普遍应用,已经完全取代了内取热器^[4-6]。当前,在几乎所有的重油催化裂化装置中,外取热器的作用愈发重要,同时也是装置能量回收的重要设施。外取热器从高温催化剂中取走多余的热量产生高压或中压蒸汽,供应联合装置使用,是大型炼油化工装置重要的蒸汽来源。外取热器高效平稳运行对装置提高加工量、降低能耗、延长开工周期以及总体盈利能力的提高都具有十分重要的意义。

但是由于目前加工原料的不断变劣,生焦量逐

渐增大,外取热器从高温催化剂中移除热量的工作条件十分恶劣。此外,催化裂化装置外取热器的换热管结构复杂,热负荷分布不均匀,实际应用中易发生爆管、磨损及腐蚀穿孔等问题,不但使外取热器的使用寿命缩短,而且会导致系统的余热不能及时移除,严重影响生产过程及安全^[7-9]。针对实际问题,国内外众多研究者及生产设计人员在开发新型高效的外取热器结构及取热技术方面做了大量工作,并取得了一定的成果^[10-13]。本文中概述并分析了近年来国内具有代表性的催化裂化外取热器新结构及各自特点,以期为后续研究者提供有价值的参考。

1 外取热器分类及工作原理

20世纪60年代,外取热技术随着重油催化裂化的出现而诞生。随着取热技术的不断进步,到20世纪90年代,依次出现了上流式、下流式、气控式等多种型式的外取热器。随着重油掺炼量的逐渐提高,生焦率不断上升,进而导致高温烟气余热加大,又出现了高温烟气取热技术、输送管路式外取热技术等多种型式的外取热技术。根据催化剂和气体流动方式的不同,外取热器一般可分为上流式、下流式、返混式和气控式4类^[14]。

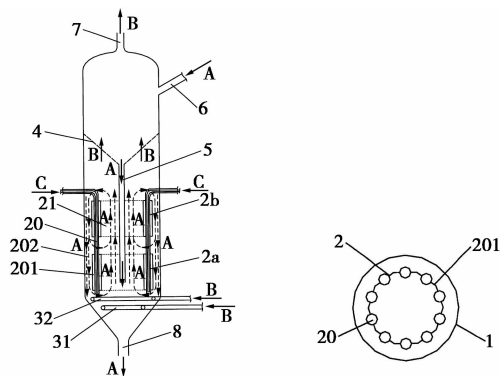
外取热器通过颗粒循环管线与再生器连通,内部设置多组垂直管束。热催化剂颗粒从再生器中引

入外取热器内部,在流化介质的作用下保持流化状态的同时,与取热管束进行接触换热,温度降低的冷催化剂颗粒再返回再生器或者通过再生管线进入反应系统。利用外取热器干预、调节催化裂化装置的热平衡,通过降低参与反应的催化剂温度,能够有效地提高剂油比。较低的催化剂温度可以使原料油的预热温度提高,改善雾化效果,缩短气化时间,减小油-剂初始接触温度差,减少了热裂化反应的发生,提高了原料的转化率,改善了产品分布,从而实现高再生温度、高剂油比、高原料预热温度的“三高”操作状态^[15]。

2 新型高效外取热器研究进展

2.1 环流结构外取热器

卢春喜等^[16]开发了环流结构外取热器,将气-固环流原理应用到外取热器的传热强化上,充分利用环流器相间接触好、体积传质系数大等优点^[17-19],通过颗粒的环流实现气固之间的高效接触,延长了气体与颗粒在其停留时间内所通过的路径,强化了颗粒的轴向内循环,提高了取热管束外的气固两相对流传热系数,显著提高了热量传递效果。该结构取热管束竖直布置,每根取热管焊接有轴向翅片,相邻取热管上的翅片互相搭接,围成一个闭合区域,从而构成导流筒,结构示意图如图 1 所示。取热管上焊接翅片在轴向位置上可设置多组,进而形成轴向位置上的多段导流筒。自再生器而来的热催化剂进入取热器中,通过调节较高的内环气速及较低的外环气速,形成了导流筒内外环的颗粒密度差,颗粒进而在密度差的驱动下围绕导流筒进行轴向运动,颗粒与取热管壁间进行多次换热,增加了取热表面的颗粒更新速率,减少了对流热阻,从而达到强化传热的目的。



1—外取热器壳体;2—导流筒;2a—一段导流筒;2b—二段导流筒;4—多孔筛板;5—中心下料管;6—进料管;7—气体出口管;8—颗粒出口管;20—竖向取热管;21—导流筒区;22—环形区;31—导流筒区气体分布器;32—环形区气体分布器;201—轴向翅片;A—待取热固体颗粒;B—气体;C—冷却水

图 1 CN1627035A 外取热器示意图

环流结构外取热器利用取热管自身翅片形成导流筒架结构,减少了取热管束数量、节约了成本的同时,具有传热效果好、传热强度大、设备简单、调节灵活、节省成本等优点。

Liu 等^[20]在一套 $\Phi 600 \text{ mm} \times 7\,000 \text{ mm}$ 半圆形的大型有机玻璃两段气升式气固环流取热器实验装置上,采用 FCC 催化剂,在导流筒区表观气速 $0.101 \sim 0.670 \text{ m/s}$,环形区表观气速分别为 0.049 m/s 和 0.099 m/s 范围内,测定了导流筒壁与床层颗粒之间的传热系数、床层密度和颗粒环流速度的分布规律。实验结果表明,两段环流取热器比目前工业催化裂化装置使用的外取热器有较高的传热系数。两段环流装置的传热系数在 $675.8 \sim 1\,038.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$,而目前工业用传热效果较好的下流式催化裂化外取热器传热系数仅为 $407 \sim 523 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 。床层密度和颗粒环流速度是影响传热的主要因素,传热系数随导流筒区气速的增加而增加,适当增加环形区

ing, 2011: 1911 - 1913.

[25] 石飞虹,赵银荣,刘利. 生物絮凝剂用于处理酒精废水的实验研究[J]. 中国科技博览, 2013, (1): 295 - 296.

[26] 宋宏杰,刘培,唐敏,等. 混凝沉淀法深度处理酒精废水[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12): 4372 - 4376.

[27] Shen P, Han F, Su S, *et al.* Using pig manure to promote fermentation of sugarcane molasses alcohol wastewater and its effects on microbial community structure [J]. Bio-resource Technology, 2014, 155: 323 - 329.

[28] 陈渊,杨家添,刘国聪,等. 水热法制备 BiVO_4 及其可见光催化降解糖蜜酒精废水[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 971 - 978.

[29] Quan X, Tao K, Mei Y, *et al.* Power generation from cassava alcohol wastewater: Effects of pretreatment and anode aeration [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2014, 37(11): 2325 - 2332. ■

(上接第 28 页)

[19] 于鲁冀,唐敏,刘培,等. 超滤-反渗透集成膜技术深度处理酒精废水[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(7): 82 - 85.

[20] 孟昭,周立辉,张景林,等. 新型生物膜反应器处理糖蜜乙醇废水试验研究[J]. 湿法冶金, 2012, 31(1): 61 - 64.

[21] 唐敏,宋宏杰,孔德芳,等. 混凝过滤-超滤-膜系统深度处理酒精废水试验研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(7): 95 - 97.

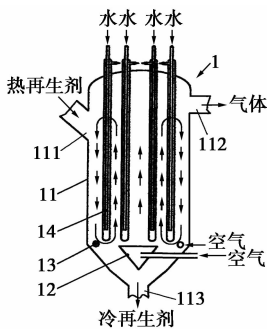
[22] 张志柏,朱义年,刘辉利,等. 蔗渣活性炭去除糖蜜酒精废水 COD 的实验研究[J]. 工业水处理, 2009, 29(12): 23 - 25.

[23] 游少鸿,覃鸿东,朱义年. 竹炭吸附-微波辐射法去除糖蜜酒精废水中的 COD[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(4): 535 - 538.

[24] You S, Ma L, Xie Q. Advanced treatment of molasses alcohol wastewater using Fenton-like reagent [C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineer-

气速能显著改善传热效果。

卢春喜等^[21]继而又开发了强制内混式催化裂化催化剂外取热器,结构示意图如图2所示。该结构通过控制内外设置的不同气体分布器不同的气体流量,造成取热器内不同横截面区域内表观气速和床层密度的不同,强化颗粒在床层的内循环,从而增强颗粒在换热壁面的更新速度,有效提高颗粒与壁面的换热效率。该结构取热管束仍然呈环状均布,但未闭合形成导流筒,有效地增加了单位空间内的取热面积并减少了壁效应,因而具有更高的取热效率;通过调节内外分布器的气体通入量,可以更灵活地调节取热量,可以实现以更小的设备达到所需的取热负荷,降低设备制造成本。该结构已在国内多套工业装置上的到了应用。



1—外取热器;11—壳体;12—中心气体分布器;
13—外围气体分布器;14—竖直取热管;111—催化剂进口;
112—气体出口;113—催化剂出口

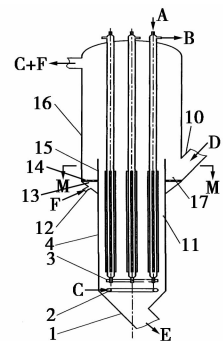
图2 CN101769694A 外取热器示意图

Sun 等^[22]和 Yao 等^[23]对其进行了实验验证。在1套 $\Phi 500 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ 、内设竖直翅片取热管的大型催化裂化外取热器冷态模型中,采用和工业装置类似的传热机制,对设置导流筒及不设置导流筒的外取热器结构进行了研究,测量了不同操作条件下外取热器内取热管传热系数的变化规律,并结合床层密度轴、径向变化规律进行了分析,并与自由床外取热器进行了对比。结果表明,取热管传热系数随表观气速增大呈现先增大后减小的趋势,峰值点出现在 0.51 m/s 时,这一趋势和床层从鼓泡到湍动的流域转变密切相关,工业设计中可以选用床层的起始湍动速度作为最佳操作气速。2种新结构的取热系数均高于传统自由床结构。在相同气速下,2种新结构的最大取热系数分别比自由床取热器的最大取热系数高约 9.5% 、 4.7% ,且二者均可以在较低的气速下取得较高的取热系数,有效地节约流化风量和降低装置能耗。此外,新结构通过调节内、外

环气量的比例关系进一步调节取热量,使取热负荷的调节灵活度提高。

2.2 颗粒可预分配的外取热器

张永民等^[24]提出了一种颗粒可预分配的催化裂化外取热器,结构示意图如图3所示。热催化剂颗粒首先进入到一个环形流化床中,利用其对颗粒度预分配作用使热颗粒从环形流化床内侧壁上缘或内侧壁上设置的溢流槽口均匀地流入密相流化床中,进而与换热管壁接触换热。通过热催化剂颗粒在外取热器横截面上更为均匀地分布,防止换热管局部温度过高,使各换热管的取热负荷更加均匀,避免因局部温度超过管材受热极限等原因造成的爆管泄露等事故。另外,环形流化床、溢流槽口及在溢流槽口面向密相床一侧设置的防冲罩从根本上缓解了进口侧颗粒对换热管的直接冲刷,避免了由此引发的冲蚀失效问题,显著提高了设备的可靠性并延长其使用寿命。



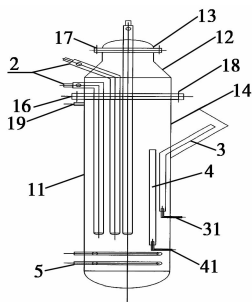
1—催化剂出口;2—密相流化床气体分布器;3—导向支架;
4—外取热器;10—催化剂入口;11—密相流化床;12—环形流化床流化风入口;13—环形流化床流化风预分布腔;14—环形流化床底部气体分布板;15—环形流化床内侧壁;16—扩大段;17—环形流化床;A—冷却水;B—气液混合物;C—密相流化床流化气体;D—热催化剂颗粒;E—冷催化剂;F—环形流化床流化气体

图3 CN103113914A 外取热器示意图

2.3 可拆式外取热器

石宝珍^[25]开发了一种可拆式外取热器,结构示意图如图4所示。该结构壳体分为顶部封头、管束安装段和下部主壳体,分别用法兰连接,大部分管束焊接在安装段,各管束与壳体间用套管连接,可以使2部分换热管单独拆装,以方便取热管的检修和更换。检修时无需将整个管束卸下,仅需将封头打开,把损坏的换热管从壳体套管内抽出,即可从封头将其取出。采用套管连接换热管与壳体,既便于换热管抽出,不破坏壳体及衬里,又对换热管

起到弹性支撑作用,防止壳体焊接处受力集中引起断裂。低温催化剂可通过取热器中部设置的催化剂输送管输送回再生器,而取热器底部低温催化剂可以通过催化剂混合管输送到取热器上部,加速催化剂热量交换。

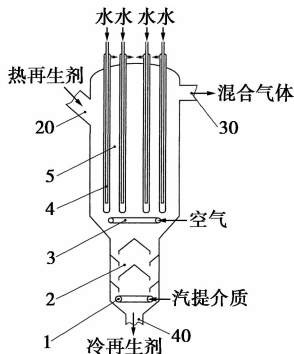


2—换热管;3—催化剂循环输送管;4—催化剂混合管;5—流化介质分布管;11—壳体;12—换热管安装段;13—顶封头;14—外取热器与再生器连接管;16,17—分拆法兰;18—螺栓;19—流化气体排出口;31,41—催化剂输送气体管

图 4 CN201090965Y 外取热器示意图

2.4 耦合汽提功能外取热器

张永民等^[26]开发了一种可实现催化裂化再生剂调温和汽提的耦合设备,结构示意图如图 5 所示。该结构由上部的调温段和下部的汽提段组合而成。通过在调温段下部耦合流通面积较小的汽提段,使该结构同时具备了催化剂颗粒温度调节与脱除烟气的功能,可以仅用少量汽提蒸汽实现烟气脱除的功能,可最大限度抑制再生剂在蒸汽气氛下的失活效应,同时有效降低气压机负荷。调温与汽提之间可以根据需要独立调整,更有利于提高催化裂化工艺的效率。在两段操作过程中可以分别控制不同的表观气速,调温段由于设置于汽提段上方,对汽提段操作无影响;而汽提段由于所需气量很小,其调节对调



1—汽提蒸汽分布器;2—汽提段;3—空气分布器;
4—取热管;5—调温段;20—再生剂入口;
30—混合气体排出口;40—再生剂出口

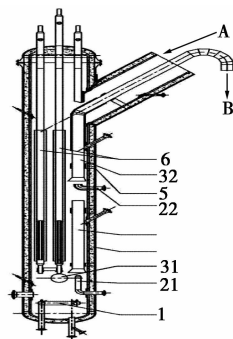
图 5 CN101760229A 外取热器示意图

温段影响也很小,因此该设备结构设计可相对独立考虑,结构简化,实施难度降低。

该结构可直接安装在催化裂化装置的再生立管上,再生剂经过调温、汽提后直接进入提升管反应器当中,或者与另一股热再生剂混合后进入提升管反应器,不仅可以显著提高催化裂化装置的剂油比、再生温度和原料预热温度,有利于提高催化裂化装置的整体效益和产品分布的改善,还兼有烟气脱除功能,降低富气压缩机的负荷和装置的能耗。

2.5 双提升结构外取热器

王明明等^[27]开发了一种双提升结构外取热器,结构示意图如图 6 所示。该结构将传统的气控式外取热器催化剂返回管由 1 次提升改为 2 次提升,改造后每段的提升高度降低为原来的一半,提升高度的减少大大降低了提升阻力,显著提高了提升效果,从而提高了热催化剂的循环量,进而提高了取热效率。该结构较之一段提升结构外取热器操作更加灵活,调节范围更大。



1—流化风环管;4—内衬里;5—器壁;6—取热管束;7—支撑;
21—一次提升风喷嘴;22—二次提升风喷嘴;31—一次提升冷催化剂返回管;32—二次提升冷催化剂返回管;A—热催化剂入口;
B—冷催化剂出口

图 6 CN103849425A 外取热器示意图

2.6 小结

各种外取热器结构特点如表 1 所示。

表 1 新型结构外取热器简要比

外取热器型式	显著特点	分布器个数	是否需要提升风	取热系数/ $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
CN1627035A	气控下流式 环流结构,强化接触,换热效果好	2	否	675.8 ~ 1038.8
CN101769694A	气控下流式 强制内循环,调节灵活	2	否	700 ~ 900
CN103113914A	气控下流式 颗粒预分配,防止冲蚀,换热均匀	2	否	—

续表

外取热器型式	显著特点	分布器个数	是否需要提升风	取热系数/ $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	
CN201090965Y	气控返混式	可拆分,内提升管输送颗粒	1或2	是	—
CN101760229A	气控下流式	设置汽提挡板,调温与汽提耦合	1或2	否	800~950
CN103849425A	气控返混式	双提升结构,内提升管输送颗粒	1	是	—

3 结论

外取热器是催化裂化(FCC)装置必不可少的关键设备之一,其高效平稳运行对于维持系统的热平衡,进而提高装置加工量、改善产品分布、提高目的产品收率、延长开工周期具有十分重要的意义。外取热器同时也是FCC装置一项重要的节能设施。及时取走热再生催化剂的热量,回收能量产生中压蒸汽,为其他装置的蒸汽用量提供了有效补充,实现了节能降耗,有利于提高总体盈利能力。

催化裂化外取热器作为传递热催化剂颗粒与再生器过剩热量的设备,目前已经逐渐延伸到流化床甲醇制烯烃、流化床甲醇制芳烃等其他采用连续反应再生方式的流态化领域,利用其高效率、负荷灵活调节及可靠性强等特性保持反应再生过程的热平衡及回收能量。其长周期平稳运行对于整个装置的安全平稳运行有着重要的影响。

但是在实际运行中,由于物料品质波动及操作工况的不稳定,外取热器仍存在不同程度的爆管、磨损及腐蚀穿孔等问题;此外取热管合理的设置至关重要,设置过疏,取热效率低,效果差;设置过密易导致内壁面效应增强,进而造成节涌、架桥等不正常流化状态。在今后的研究中,要加强对其结构、布管方式、蒸汽发生方式等方面的研究,开发高效结构,改进安装及操作方式,在提升取热效果的同时,延长外取热器的使用寿命,杜绝影响生产过程及安全的因素。

参考文献

[1] 陈俊武. 流化催化裂化反应工程[M]. 2版. 北京:中国石化出版社,2005:1338-1343.

[2] Zuo Li-hua. Present situation and prospect for FCC technology development in China[J]. Petrochemicals Technology and Economics, 2000, 16(1): 16-21.

[3] 梁凤印. 流化催化裂化[M]. 北京:中国石化出版社,2006:105.

[4] Zhang Fu-yi. Discussed technology design of catalyst cooler in FCCU[J]. Petroleum Refinery Engineering, 1993, 23(1): 18-25.

[5] Wang Chun-feng, Wan De-bin, Wang Ning, et al. Heat Transfer

analysis of external catalyst cooler in FCC[J]. Contemporary Chemical Industry, 2010, 39(5): 611-613.

[6] Li Li. Commercial application of pneumatic controlled external catalyst coolers[J]. Petroleum Refinery Engineering, 1999, 29(9): 11-17.

[7] 杨家兵. 重油催化裂化装置外取热器管束、衬里损坏原因分析及处理对策[J]. 石油化工设备技术, 2009, 30(1): 35-38.

[8] 周辉. 催化裂化外取热器损坏原因分析及改进措施[J]. 石油化工设备技术, 2001, 22(2): 8-11.

[9] Yang Kai-yan. Application of external catalyst cooler in RFCC unit[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2005, 36(1): 44-47.

[10] Zhou Hui. Reason analysis and improvement of external heat-remover failure for catalytic cracker[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2001, 22(2): 8-11.

[11] Pillai Rahul, Niccum Phillip K. FCC catalyst coolers open window to increased propylene. Proceeding of the 2011 Grace Davison FCC Conference[M]. Munich: KBR Paper Number, 2011: 2263.

[12] 王化秋, 柴中良, 郑亭陆. 催化裂化装置气控式外取热器浅析[J]. 炼油技术与工程, 2003, 33(11): 12-14.

[13] 李会雄, 林英, 牛天文, 等. 350万吨/年重油催化裂化外取热器水动力特性计算方法[J]. 化工进展, 2006, 25(s1): 334-339.

[14] Zhang Yin-rong, Qi Yu-tai, Li Shu-xun, et al. The technology of catalyst cooler in RFCCU and its progress[J]. Journal of Fushun Petroleum Institute, 2002, 22(3): 22-26.

[15] 陈俊武. 催化裂化工艺与工程[M]. 2版. 北京:中国石化出版社, 2005: 1104-1206.

[16] 卢春喜, 刘显成, 时铭显. 气固环流取热器: CN, 1627035A[P]. 2005-06-15.

[17] Mohanty K, Das D, Biswas M N. Hydrodynamics of a novel multi-stage external loop airlift reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(14): 4617-4624.

[18] Lu Chun-xi. Research and industry application of loop flow technology in the field of petroleum processing[J]. CIESC Journal, 2010, 61(9): 2177-2185.

[19] 刘梦溪, 卢春喜, 时铭显. 气固环流反应器的研究进展[J]. 2013, 64(1): 116-123.

[20] Liu Xian-cheng, Lu Chun-xi, Shi Ming-xian. Study on heat transfer between gas-solids surface of two draft tubes in an air lift loop heat exchanger[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2004, 4(s1): 611-618.

[21] 卢春喜, 张永民, 孙富伟. 强制内混式催化裂化催化剂外取热器: CN, 101769694A[P]. 2010-07-07.

[22] Sun Fu-wei, Zhang Yong-min, Lu Chun-xi, et al. Large cold-model experiment on heat transfer and hydrodynamics of an FCC external catalyst cooler[J]. Acta Petrologica Sinica (Petroleum Processing Section), 2013, 29(4): 633-640.

[23] Yao Xiuying, Sun Fuwei, Zhang Yongmin, et al. Experimental validation of a new heat transfer intensification method for FCC external catalyst coolers[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2014, 75: 19-30.

[24] 张永民, 禹沁元, 张新国, 等. 一种颗粒可预分配的催化裂化外取热器: CN, 103113914A[P]. 2013-05-22.

[25] 石宝珍. 一种可拆分式外取热器: CN, 201090965Y[P]. 2008-07-23.

[26] 张永民, 刘梦溪, 卢春喜, 等. 一种用于实现催化裂化再生剂的调温和汽提的耦合设备: CN, 101760229A[P]. 2010-06-30.

[27] 王明明, 白都都. 一种新型双提升结构的外取热器: CN, 103849425A[P]. 2014-06-11. ■