

蜂窝体中碳黑沉积规律的实验研究

邢桂菊¹, 胡升腾², 傅维镛²

(1. 鞍山科技大学 材料科学与工程学院, 辽宁 鞍山 114002; 2. 清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘要: 采用燃料油裂解产生碳黑的方法, 测定出含有碳黑的烟气通过蜂窝体所形成的压差阻力以及入口温度变化, 进而找出蜂窝体的碳黑沉积符合 Boltzmann 变化规律, 它对于高温低氧蓄热燃烧的应用研究, 研发新型蓄热体有很好的参考价值。

关键词: 蜂窝体; 碳黑; 压差阻力; 沉积; 蓄热燃烧

中图分类号: TK223.3 文献标识码: A

1 引言

日本 20 世纪 90 年代初提出“高温空气燃烧 High Temperature Air Combustion”技术, 取得了节能 30%, 设备缩小 20%, NO_x 排放大幅度降低的成果, 在国内外大力推广, 称为 21 世纪关键性技术之一^[1]。

蓄热体是高温空气燃烧技术中极关键的部件, 目前常用的蓄热体基本是球状体和蜂窝体。具有十多年研究应用辐射多孔体(多孔性固体、通气性固体)经验的日本^[2], 首当其冲地将具有相当大比表面积的蜂窝体应用到高温空气燃烧技术上^[3]。

蜂窝体的直通孔道, 使它的压差阻力较小。在同一燃烧量, 同一断面面积条件下, 16 孔/cm² 蜂窝体的压差阻力仅为 20 mm 直径球状体的三分之一。然而它的单位容积传热能力却是球状体的 5 倍以上, 在 30 s 的切换时间内, 可以获得 95% 的温度效率和 92% 的烟气热回收率^[3]。但是, 蜂窝体存在强度差、寿命短、易堵塞及难维护等问题。因此有必要对蜂窝体的有关特性进行深入的研究, 探索出适合各种燃料和蓄热式高性能工业炉窑的新型蓄热体来。

2 实验方法

在实际蓄热式工业炉窑的运行过程中, 由于高

温裂解或不完全燃烧烟气中往往带有一定量的碳黑等。本实验采用燃料油在高温下裂解产生碳黑的方法, 制造一定浓度的烟气通过蜂窝体, 来研究蜂窝体抵抗飞灰碳黑的能力。实验装置由燃料流量控制和雾化混合、高温裂解及蜂窝体碳黑沉积测量部分构成, 见图 1。燃料油(柴油)与惰性气体(N₂)经流量控制单元进入雾化混合器, 被加热到 220 °C 以上, 使柴油成气态, 然后二者混合进入高温裂解炉。炉温控制在 1400 °C 左右, 柴油在高温和 N₂ 的保护作用下发生裂解反应, 很快产生碳黑。蜂窝体实验段的入口和出口分别设置有压力和温度测量点, 并在实验段之前设置碳黑生成观察点及通路切换阀, 以便记录在不同时间条件下烟气通过蜂窝体时的沉积情况。被测量的蜂窝体共为 4 种结构, 其结构参数见表 1。

烟气中的碳黑在蜂窝体内沉积情况是通过实验段入口和出口的压差阻力来确定的, 同时借助于 CCD 摄像系统, 在放大 40 倍的条件下, 将不同时刻的碳黑沉积状态拍摄下来, 作为有力的佐证。

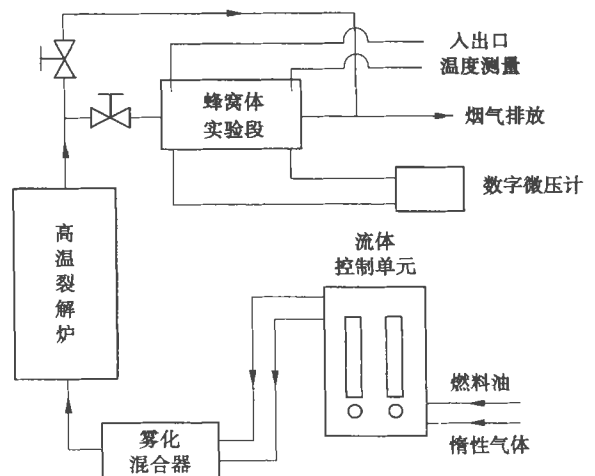


图 1 实验装置流程简图

表 1 各种蜂窝体结构参数

	单孔/mm	壁厚/mm	长度/mm	单位面积	比表面积	空隙率	材质	来源
				孔数/ $l^{\circ}cm^{-2}$	$/m^2 \cdot m^{-3}$	$/m^2 \cdot m^{-3}$		
1号	4×4	1	120	4	640	0.64	堇青石	宜兴
2号	3.3×3.3	0.86	120	5.76	760	0.627	堇青石	北京
3号	2	0.5	120	16	1280	0.64	堇青石	宜兴
4号	1.05	0.2	150	64	2688	0.7056	堇青石	美国

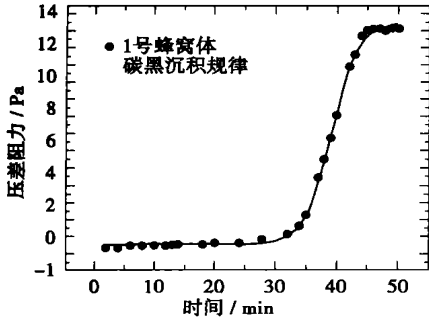


图 2 1号蜂窝体碳黑沉积规律

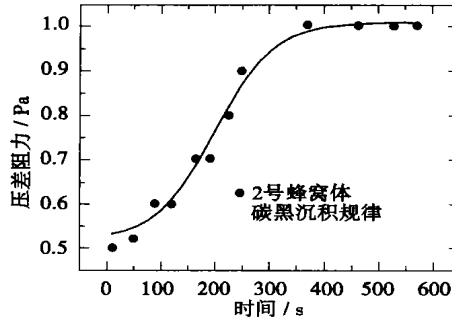


图 3 2号蜂窝体碳黑沉积规律

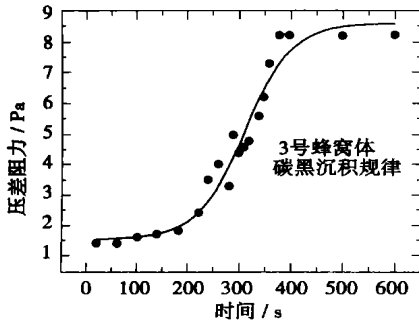


图 4 3号蜂窝体碳黑沉积规律

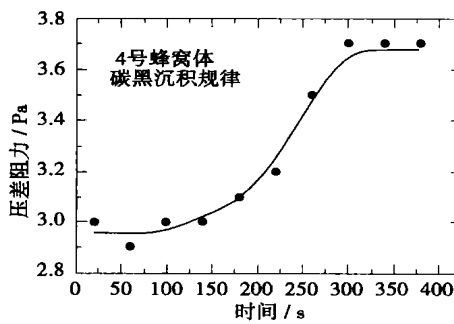


图 5 4号蜂窝体碳黑沉积规律

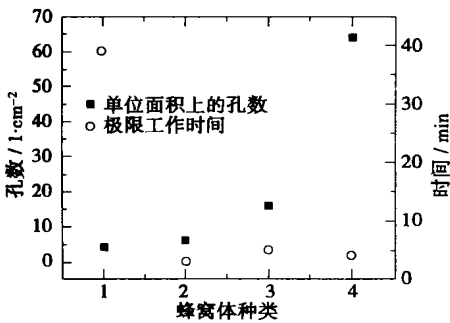


图 6 四种结构蜂窝体的极限工作时间比较

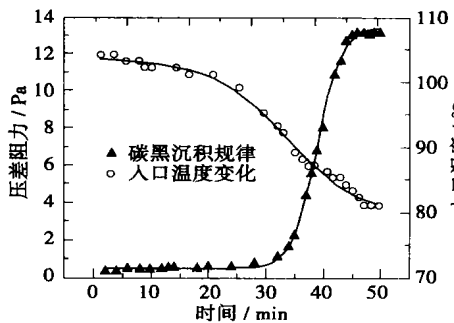


图 7 蜂窝体(1号)入口温度与碳黑沉积的关系

实验中固定烟气流量及烟气中的碳黑浓度, 分别测量了含碳烟气在不同时间内通过各种蜂窝体时的压差阻力变化, 见图 2 ~ 图 5。压差阻力与时间的函数关系都符合 Boltzmann 方程, 即:

$$\Delta P(\tau) = [(\Delta P_1 - \Delta P_2) / (1 + \exp(\tau - \tau_0))] + \Delta P_2 \quad (1)$$

式中 τ, τ_0 — 时间和蜂窝体的极限工作时间点, min 或 s;

$\Delta P_1, \Delta P_2$ — 蜂窝体正常工作时的压差阻力碳黑沉积堵塞时压差阻力, Pa。

1号 ~ 4号蜂窝体压差阻力和工作时间的关系由式(2) ~ 式(5)表示。

$$1号: \Delta P(\tau) = [(0.48 - 13.42) / (1 + \exp(\tau - 2342) \times d\tau)] + 13.42 \quad (2)$$

$$2号: \Delta P(\tau) = [(0.52 - 1) / (1 + \exp(\tau - 200)d\tau)] + 1 \quad (3)$$

$$3号: \Delta P(\tau) = [(1.54 - 8.58) / (1 + \exp(\tau - 310) \times d\tau)] + 8.58 \quad (4)$$

$$4号: \Delta P(\tau) = [(2.97 - 3.72) / (1 + \exp(\tau - 237) \times d\tau)] + 3.72 \quad (5)$$

从实验结果来看, 每一种结构的蜂窝体, 有着固定的正常工作时的压差阻力和极限工作时间点, 或者说有着一定的抗灰能力。当碳黑沉积量超过它的

3 实验结果

3.1 压差阻力的变化

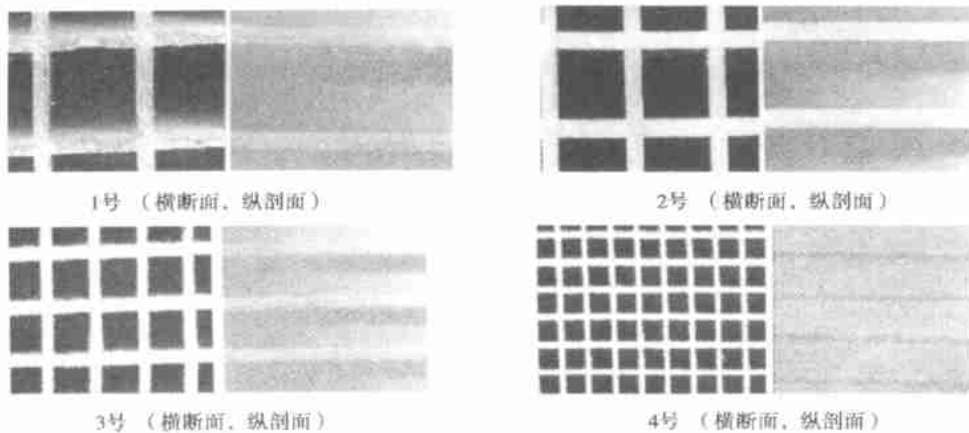
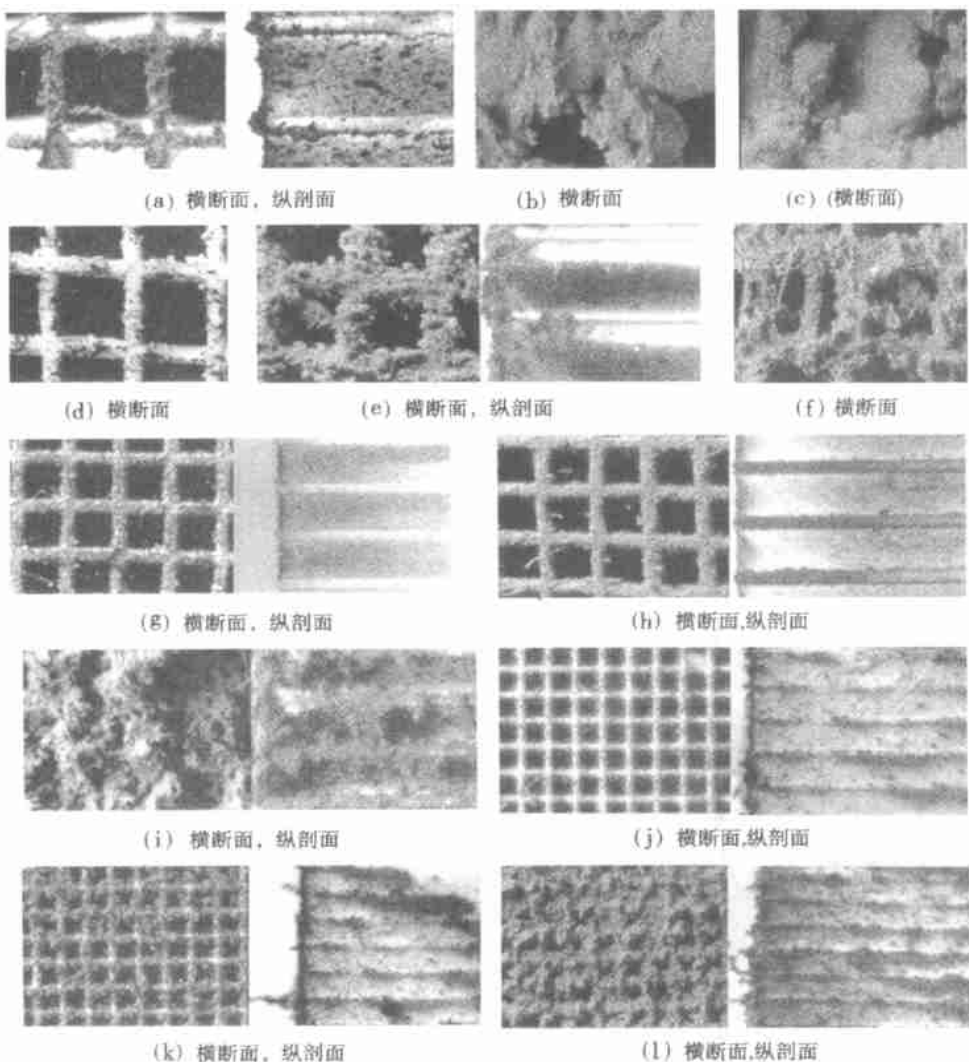


图 8 四种蜂窝体原始横纵断面结构



1 号蜂窝体: (a) 120 s 时, (b) 39 min 极限点时, (c) 极限点以后完全堵塞时;
 2 号蜂窝体: (d) 120 s 时, (e) 240 s 时, (f) 极限点堵塞时;
 3 号蜂窝体: (g) 135 s 时, (h) 240 s 时, (i) 极限点以后完全堵塞时;
 4 号蜂窝体: (j) 60 s 时, (k) 180 s 时, (l) 极限点以后完全堵塞时

图 9 在不同时刻四种蜂窝体碳黑沉积横纵断面状态

抗灰能力时, 它的压差阻力便发生急剧变化, 在较短的时间内, 迅速达到极限值, 直至堵塞。2 号~4 号蜂窝体的结构参数相差很大, 1 号与 2 号蜂窝体的结构参数很接近, 但在某一相同的含碳黑烟气浓度下, 2 号和 4 号蜂窝体的极限工作时间相差不多, 约 3~5 min 左右。1 号蜂窝体的极限工作时间却是它们的 10 倍左右, 见图 6。至于受烟气浓度的影响会如何改变, 尚须进一步探讨。不过这种现象很大程度上说明蜂窝体几何结构与抗灰能力有很重要的关系, 并且在格孔 4 mm 以下存在一个突变点。

3.2 碳黑在蜂窝体内的沉积状态

含碳黑烟气通过蜂窝体的不同时刻, 拍摄出各种结构蜂窝体内的碳黑沉积状态, 见图 8 和图 9。从蜂窝体的横向断面和纵向剖面清晰可见, 当没有碳黑烟气通过时, 蜂窝体的格孔间壁清洁白亮, 而烟气通过的不同时刻, 碳黑由星星点点成核、长大、团聚, 越积越多, 直至完全堵塞。碳黑外观呈棉絮状, 在蜂窝体入口处沉积得多, 格孔越小, 沉积得越快越严重。在极限工作时间点前后, 压差阻力陡增, 但蜂窝体的格孔并不是全部堵塞。1 号蜂窝体的压差阻力突变时间为极限

工作时间的 $1/4$ 左右, 2 号 ~ 4 号蜂窝体的压差阻力突变时间为极限工作时间的 $1/2$ 左右。

3.3 入口温度的变化

实验中重点研究了 1 号蜂窝体的入口温度变化, 它呈稳定下降趋势, 也符合 Boltzmann 方程规律。入口温度曲线与压差阻力曲线相交点, 恰巧落在极限工作时间点的左右, 见图 7。这说明, 该种蜂窝体的极限工作时间点也是其单向蓄热的极限时间点, 接近这一时间点, 蜂窝体蓄热能力下降并丧失。

4 结 论

(1) 含碳黑量一定的烟气在各种蜂窝体内的沉积规律相同, 都符合 Boltzmann 方程;

(2) 从蜂窝体极限工作时间来看, 在单孔 3.3 ~ 4 mm 之间, 存在一个几何结构上的突变点;

(3) 碳黑多沉积在蜂窝体的入口处, 呈棉絮状, 在极限工作时间点前后, 并没有完全堵塞。压差阻力的突然陡增, 说明工作状况接近极限时间点;

(4) 入口温度具有稳定下降的趋势, 也符合 Boltzmann 方程规律, 与碳黑沉积曲线相交之点, 说明

蜂窝体的有效放热或蓄热时间应该在其极限工作时间之内。

还要说明的是, 蜂窝体的极限工作时间是针对特定的实验条件而言, 它确实可以揭示一种规律。但烟气中含碳黑浓度等因素对蜂窝体的碳黑沉积规律会产生何种程度的影响, 以及如何减少烟气中的碳黑浓度, 应继续深入探讨。由此根据不同的燃料, 合理地组织燃烧, 并在高温蓄热式工业炉窑上开发和安装合适的蜂窝体, 确定合理的蓄热换向时间, 进一步节能和减少污染排放, 使蜂窝体应用在国内外达到一个新的水平。

参考文献:

- [1] TANIGAWA T, TSUJI H, MITSUKAWA H. 高性能工業炉開發プロジェクトの變遷と高温空氣燃燒技術の展望[J]. 工業加熱, 2002, 37(5): 13-22.
- [2] RYOZO ECHIGO. ガスエンタルピとふく射エネルギー間の効果的變換方法と工業用炉への應用[J]. 日本機械学会論文集(B編), 1982, 48(435): 2315-2323.
- [3] 須藤淳. ハニカム型蓄熱燃燒システム. 省エネルギー設備機器要覧[J]. 特集 蓄熱式燃燒システムのポテンシャル, 1998, 9-13.

(渠 源 编辑)

一种钢制高效脱硫除尘器

采用钢制水浴式高效脱硫除尘器是一种技术成熟、综合投资小、运行稳定的好方案。笔者曾参与某企业生产的 LKTL 型钢制水浴式高效脱硫除尘器的开发应用过程, 并在某一家单位投入使用后, 经过一段时间运行, 排烟含尘量、含硫量均小于国家现行的 GWPB3-1999《锅炉大气污染物排放标准》的有关规定, 效果较好, 受到用户良好评价。

含尘气体由入口进入除尘器, 气流转弯向下冲击于水面, 部分较大的尘粒落入水中, 当含尘气体以 $18 \sim 25 \text{ m/s}$ 的速度通过上、下叶片间的“S”形通道时, 激起大量的水花, 使气水充分接触, 绝大部分细微的尘粒混入水中, 使含尘气体得以充分的净化。再经过 2 个“S”形布置的挡水板, 由于离心力的作用, 获得尘粒的水又返回集灰室。泥浆则由集灰室的排浆阀连续或定期排出。补充水和脱硫洗涤剂由供水管路自动补充。脱硫洗涤剂是由石灰或 NaOH、 Na_2CO_3 组成, 由加药补水箱补充。集灰室的 pH 值取 8 ~ 10。除尘器的水位由溢流箱控制。当水位高出溢流箱的溢流堰时, 水便流进水封并由溢流管排出。设在溢流箱盖上的水位自动控制调节装置能保证水面在 3 ~ 10 mm 范围内变动, 从而提高除尘器的效率和节约用水。溢流箱上部用通气管与净气分雾室连通, 确保两者具有相同的水面。溢流箱的水通过插入除尘器下部的走通管流动, 以保持溢流箱的水面平衡。水室及溢流箱宜由耐酸碱腐蚀的衬胶碳钢或不锈钢制作。

对于小容量的工业燃煤锅炉, 采用钢制水浴式高效脱硫除尘器进行脱硫除尘具有较高脱硫效果和优越的技术经济性。

钢制水浴式高效脱硫除尘器在烟气脱硫除尘方面, 具有广泛的应用前景。

(王子德 供稿)

The organic pollutants generated by the combustion of coal, such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), are highly carcinogenic, mutagenic and teratogenic, and have thus attracted widespread public attention. The authors have studied the generation of PAHs during the combustion of various kinds of coal and identified the relationship existing between the PAHs emissions during coal combustion and the content of PAHs in raw coal. Also researched is the influence of the constituent content of fixed carbon, volatile substance and ash in coal on PAHs emissions during the process of coal combustion. **Key words:** coal, polycyclic aromatic hydrocarbons, combustion, pollutant emissions

管道喷射烟气脱硫的试验研究 = **Experimental Study of Flue Gas Desulfurization by Using an In-duct Sorbent Injection** [刊, 汉] / HUANG Zhen, FENG Bin, LI Da-ji (Key Lab of Education Ministry on Clean Coal Combustion and Power Generation Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), LU Ping (Power Engineering Institute of Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 128—131

A systematic research was conducted of the influence of various factors on the effectiveness of flue gas desulfurization. Such factors include: approach saturation temperature, SO₂ inlet concentration, atomizing airflow rate of nozzles, injected layered lime slurry and pressurized slaked sorbent, etc. The results of the study indicate that the adoption of an enhanced Ca/S ratio, a reduced ΔT , a layered water spray and pressurized slaked sorbent can be conducive to increasing the desulfurization efficiency. Under the condition of a Ca/S ratio of 2.5 the desulfurization efficiency with the use of pressurized slaked sorbent can exceed 65%. **Key words:** flue gas desulfurization, in-duct sorbent injection, desulfurization efficiency, Ca/S ratio

蜂窝体中碳黑沉积规律的实验研究 = **Experimental Investigation of Soot Carbon Deposition Mechanism in Honeycomb Regenerators** [刊, 汉] / XING Gui-ju (Anshan University of Science & Technology, Anshan, China, Post Code: 114002), HU Sheng-teng, FU Wei-biao (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 132—135

Under a method of soot carbon production with the use of fuel oil cracking measured was the pressure difference generated during the passing of soot carbon-containing flue gases through a honeycomb body as well as the variation of inlet temperatures. On this basis it was discovered that the deposition of soot carbon in the honeycomb body complies with Boltzmann variation law. Such a discovery is helpful in providing valuable reference data for the applied research of high-temperature and low-oxygen regenerative combustion and for the development of new types of regenerators. **Key words:** honeycomb, soot carbon, pressure difference, deposition, regenerative combustion

强化传热管束狭窄空间内 R-11 的沸腾换热特性 = **Boiling Heat Exchange Characteristics of R-11 in the Narrow Spaces of an Intensified Heat-transfer Tube Bank** [刊, 汉] / LIU Zhen-hua, YI Jie (Institute of Power and Energy Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 136—138

An experimental investigation was conducted of the intensified boiling heat transfer of R-11 in the narrow spaces of a compact heat-transfer tube bank consisting of rolled surfaces. The results of the investigation confirm that the full-liquid type of evaporative heat-transfer device comprising the above-cited tube bank offers a good heat-transfer performance. Its working principle is based on the utilization of the narrow spaces of the intensified heat-transfer tube bank for an early conversion of natural convection heat transfer into a thriving nucleate boiling heat transfer. The experimental results also confirm that the boiling heat-transfer intensification effect of the two kinds of intensified techniques as offered by 1) the narrow spaces formed by the tube bank and 2) the intensified heat-transfer surfaces should not be viewed as a version of simple superimposition. **Key words:** composite intensified heat transfer, boiling heat transfer, narrow space