

文章编号: 1008-8857(2022)02-0117-07

DOI: 10.13259/j.cnki.eri.2022.02.008

纳米流体在电子冷却中的应用研究进展

李嘉煜, 张 华

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 随着新型电子元件产生热量的增加, 纳米流体特性与微通道特性的结合成为研究热点。这种技术的发展可以使电子设备进一步小型化, 并提高能源效率。从纳米颗粒材料和散热器几何结构两方面综述了近年来纳米流体在电子冷却中的应用研究进展, 总结了这一领域未来的研究机会和存在的挑战。研究发现, 将纳米流体作为新型冷却液应用于不同的散热器中可以提升电子冷却技术的工作效率。

关键词: 纳米流体; 电子冷却; 散热器结构

中图分类号: TK01 **文献标志码:** A

Progress in the application of nanofluids in electronic cooling

LI Jiayu, ZHANG Hua

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, china)

Abstract: With the increase of heat generated by new electronic components, the combination of nanofluid characteristics and microchannel characteristics has become a research hotspot. The development of this technology can further miniaturize electronic equipment and improve energy efficiency. In this paper, the application of nanofluids in electronic cooling is reviewed from the aspects of radiator structure and nanomaterials. The future research opportunities and challenges in this field are summarized. It is found that the application of nanofluids in different radiators and heat pipes can greatly improve the electronic cooling technology in the future.

Keywords: nanofluids; electronic cooling; radiator structure

近年来, 电子工业和半导体技术取得了长足的发展, 但其在高性能、高热流密度的产品冷却方面仍然存在一些根本性的问题。事实上, 普通的冷却方法和常用的冷却液都不能满足高热量电子芯片的冷却要求。因此, 高效率的电子设备需要采用新的方法和具有良好热性能的冷却液来散

热, 以达到预期的效率和可靠性^[1]。研究表明, 以液体为冷却剂的微通道冷却系统是现代电子冷却中最有效的方法^[2]。

与传统冷却液相比, 含有固体纳米颗粒的悬浮液(简称纳米流体)显示出更大的热属性^[3]。研究人员回顾了在不同领域对纳米流体进行的研究

收稿日期: 2020-09-18

第一作者: 李嘉煜(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 热管换热。E-mail: 617741094@qq.com

究,例如纳米流体的摩擦系数和对流换热^[4]、将纳米流体用于沸腾传热^[5]、纳米流体中的粒子迁移^[6]、纳米流体中的传质^[7]。研究表明,纳米流体在传热系统中具有优异的特性^[8]。此外,在散热器中使用纳米流体的研究报告也证明,与普通液体相比,这种新型悬浮液在电子冷却方面的效果更好。综上所述,微型通道系统和新型流体可以大大提高散热效率,并可以满足高热量电子设备的冷却要求。因此,基于纳米流体的散热器是下一代电子冷却设备中很有前途的候选者。

本文概述了纳米流体在电子冷却中的应用研究进展。从纳米颗粒材料、散热器几何结构两方面进行阐述。同时,对该领域存在的不足和挑战进行分析和讨论,并提出今后的研究方向。

1 电子冷却所用的纳米材料

1.1 碳基纳米颗粒

Nazari等^[9]研究了氧化铝和碳纳米管组成的纳米流体的冷却性能,并将所得结果与普通流体(水和乙二醇)进行了比较。结果表明,采用体积分数为0.5%氧化铝的纳米流体的对流换热系数大于普通流体。

Ali等^[10]利用含有石墨烯纳米板(GNPs)的纳米流体评估针翅式散热器对热阻、对流换热系数、对数平均温差的角度效应,研究了与正 x 轴分别呈 22.5° 、 45° 和 90° 夹角的三个通道倾角的散热器,其中通道倾角为 22.5° 的散热器具有优越的热性能。

Ebrahimi等^[11]提出了一种采用碳纳米管纳米流体评价微通道散热器冷却性能的数值方法。研究表明,随着碳纳米管纳米层厚度的增加,微通道散热器的温度梯度减小。

以上研究成果表明,碳基纳米流体显著改善了散热器的热性能。然而,将碳基纳米流体应用于实际时存在的一个基本问题就是其在水介质中的稳定性差。它们具有天然的疏水性,因此不能像水一样分散在极性液体中。为了提高纳米颗粒的分散性,人们对其进行了酸处理,使其具有亲水性。然而,有机溶剂和强酸通常会造环境污染、腐蚀以及影响人们健康等问题,因此,采用

绿色环保的方法对纳米颗粒进行功能化是非常重要的。

1.2 氧化物纳米颗粒

在不同的纳米颗粒中,球形氧化物纳米颗粒已被大量应用于纳米流体的合成。这类纳米颗粒具有稳定性好、成本低、导热性好等优点。在下文中将对电子冷却中使用的氧化物纳米颗粒材料如氧化铝、二氧化钛和二氧化硅等进行评述。

Hassani等^[12]研究了不同翅片间距对V形纳米流体电子冷却散热器传输特性的影响。在纳米颗粒的体积分数分别为0.5%、1.0%时,对含氧化铝纳米颗粒的水和水基纳米流体分别进行了实验研究。结果表明,由于翅片表面温度的降低和出口冷却液温度的升高,采用间断翅片可以获得较好的传热效果。同时,由于散热器翅片孔隙率的增加,压力损失显著降低。

Kamyar等^[13]研究了分别填充水-氧化铝和水-TiSiO₄纳米流体的两相闭式热虹吸管的传热性能。结果表明,两种纳米流体均能降低传热热阻,降低程度分别为65%(氧化铝体积分数为0.05%)、57%(TiSiO₄体积分数为0.075%),且均在提高传热系数、降低蒸发器壁温等方面有促进作用。

Ambreen等^[14]研究了纳米流体和不同翅片截面形状对微型针翅式散热器传热特性的综合影响,测试了具有相同翅片直径和高度的方形、圆形和六边形三种翅片结构,并模拟了体积分数为4.31%、粒径为30 nm含二氧化钛纳米颗粒的水性纳米流体。结果表明,利用纳米流体进行冷却时,圆形翅片表现出最高效的热性能,其次是六边形和方形翅片,而水冷时,方形翅片的传热性能最低。

Escher等^[15]将含水二氧化硅纳米颗粒悬浮液用于进行电子冷却的微通道散热器中。他们制作了三种尺寸的微通道,并将其热性能描述为流量的函数。结果表明,采用纳米流体可以提高微通道的换热效率。

1.3 磁性纳米颗粒

磁性纳米流体(MNFs)或铁流体是指磁性纳米颗粒和非磁性基液的悬浮液。用于制备MNFs的磁性纳米颗粒通常由金属(铁磁材料)如钴、

铁、镍及其氧化物如四氧化三铁、尖晶石型铁氧化物等构成。这类纳米流体具有强化传热特性, 且具有与普通液体一样的流动性和与其他磁性材料相似的磁性。MNFs 的这些优良特性使其能应用于可利用外加磁场来管理液体运动、热交换和颗粒运动等的环境中, 因此这些悬浮液在传热工程、生物工程等领域具有很大的应用潜力。在电子冷却领域, 研究人员也对这类纳米流体进行了相关研究。

Gandomkar 等^[16]通过实验评估了铁基磁性纳米流体对两种不同材质的脉动热管 (PHPs) 热效率的有效性。实验热管分别由玻璃和铜制成。结果表明, 磁性纳米流体在玻璃热管中的稳定性较高, 且相较于铜热管, 在玻璃热管中磁性纳米流体的磁场应用效果更好。

Jahani 等^[17]研究了微脉动热管 (MPHPs) 中不同工作流体 (包括水、铁流体和银纳米流体) 在电子冷却过程中对热阻的影响。实验结果表明, 水的最佳充液比为 40%, 而纳米流体的最佳充液比为 60%。在大多数情况下, 采用纳米流体的 MPHPs 比采用水的 MPHPs 具有更小的热阻。

可以发现, 将 MNFs 应用于电子冷却的相关研究较少, 但是这类纳米流体具有优异的性能, 因此需要对其进行更为深入的研究, 以便详细了解 MNFs 在散热器中的特性。

1.4 混合纳米流体

混合纳米流体是一种通过分散纳米颗粒而产生的新型纳米流体, 它以复合态或混合态形式存在。制备混合纳米流体的目的是提高热交换率, 改善热导率, 并利用其某些特定的属性。事实上, 采用两种或两种以上不同材料制备得到的纳米流体可以结合它们各自的特点, 使其具有很好的应用前景。为了更好地冷却电子芯片, 一些学者也在一些特定情况下采用混合纳米流体进行相关研究。

Selvakumar 等^[18]将含有氧化铝-铜纳米颗粒的混合纳米流体应用于薄通道铜散热器中。研究结果表明, 与基液相比, 混合纳米流体的对流换热系数显著提高。此外, 采用混合纳米流体代替水时, 泵送功率的增加小于对流换热系数的增加。

Bahiraei 等^[19]研究了含有银纳米颗粒和石墨烯纳米板的混合纳米流体的有效性和第二定律属性, 同时设计了一种新型分配式散热器, 并将其与两种常用散热器的结构进行了比较。结果表明, 在考虑不可逆性和传热性能的情况下, 新型分配式散热器具有更好的散热效果。此外, 使用纳米流体时新型分配式散热器的散热效果明显优于使用水时的效果。

Khaleduzzaman 等^[20]对不同纳米粒子在电子冷却中的热性能进行了比较, 并评估了微通道中纳米流体的换热效率。所使用的三种不同纳米流体分别为碳化硅-水、氧化铜-水和氧化铝-水纳米流体。氧化铜-水和氧化铝-水纳米流体的换热效率最大增幅分别为 11.36%、11.98%。此外, 三种纳米流体作为工作流体, 其中氧化铜-水纳米流体的换热效率最大增幅为 8.51%, 氧化铝-水纳米流体和碳化硅-水纳米流体的换热效率最大增幅分别为 6.44%、5.60%。

最后, 控制纳米颗粒的大小和形状是制备纳米颗粒过程中的一个重要挑战, 特别是在实际应用中, 例如在散热器中使用纳米流体时这些因素都会对其热性能产生很大影响。

2 纳米流体电子冷却散热器的不同结构

散热器是由各种高导热性材料制成。本节讨论纳米流体电子冷却处理器的各种结构, 包括传统的平行通道、热管、冲击射流、波状通道。

2.1 平行通道

平行通道是纳米流体电子冷却中最常用的散热器结构, 这些散热器通常有圆形或矩形通道。

Al-Rashed 等^[21]分别通过数值模拟和实验研究了采用平行通道纳米流体对中央处理器 (CPU) 冷却效率的影响, 工作流体分别为水和氧化铜-水纳米流体。结果表明, 在使用纳米流体而不是纯水的情况下, 换热效率增幅高达 7.7%。

Sohel 等^[22]评估了使用三种不同纳米流体圆形通道的传统微通道的传热性能, 并比较了二氧化钛-水、氧化铝-水和氧化铜-水纳米流体的传热性能。结果表明, 采用氧化铜-水纳米流体作

为冷却液时热效率明显提高,而采用氧化铝-水纳米流体和二氧化钛-水纳米流体时热效率增幅较小。

Lelea^[23]对传统微通道散热器中氧化铝-水纳米流体的流动和共轭传热进行了数值模拟。以方形流道、水力直径为 50 μm 的通道为例,当颗粒粒径增大时,强化传热作用减弱。然而,对于更大的抽运功率,对于粒径大于 28 nm 的纳米颗粒,传热增量保持不变。

综上,大多数对传统散热器的研究均表明,纳米流体增强了电子冷却过程中的传热特性,但也有些研究认为纳米流体对散热器的热性能没有显著影响。由于传统散热器的温度均匀性较差,可以将其与相变材料(PCMs)一起使用,以改善其热性能。微通道散热器是一种很有前途的电子冷却结构,应对它们进行更为详细的评估,以便在电子工业领域中对其加以利用。

2.2 热管

采用纳米流体冷却电子设备的另一种设备类型是热管,其工作原理为基于封闭金属结构内的相变传热。

Yousefi 等^[24]在考虑倾角影响并采用纳米流体的情况下,对 CPU 冷却热管的热性能进行了实验研究。研究表明,由于热管的毛细效应和沸腾限制,倾角对冷却过程会有影响。此外,对热管热阻的影响存在一个明显的阈值倾角。

Wan 等^[25]研究了电子冷却用纳米流体微环热管(mLHP)的传热特性。实验研究中采用的纳米流体由铜纳米粒子和纯水制备。用纳米流体代替纯水后,蒸发器壁温和总热阻分别降低了 12.8%、21.7%,传热系数提高了 19.5%。

Wang 等^[26]利用不同体积分数的水-铜纳米流体作为 mLHP 中的工作流体,并将其用于电子冷却。通过实验研究了纳米颗粒的热性能,研究发现热通量和沸腾温度是纳米颗粒体积分数的非单调函数。此外,在纳米颗粒体积分数为 1.5% 时可达到最高沸腾温度。

Asirvatham 等^[27]研究了水-银纳米流体对热管传热性能的增强作用。当纳米颗粒体积分数为 0.009% 时,热阻显著降低了 76.2%,蒸发传热系数提高了 52.7%。纳米颗粒的应用使器件的

工作范围比应用纯水时拓宽了 21%。

针对倾角或重力对 CPU 冷却器中采用纳米流体的热管的热效率的影响进行的研究非常有限。鉴于这些参数对热效率有显著的影响,建议在今后的研究中应予以充分考虑。此外,关于纳米流体热管中热虹吸沸腾的研究也非常少,也应考虑对其进行更为精确的研究。

2.3 冲击射流

强化局部传热的一种有效方法是在受热面上采用冲击射流。冲击射流广泛应用于纸张干燥、涡轮叶片冷却、玻璃回火、金属板退火等工艺领域。冲击射流冷却有利于小边界层的形成。这一小边界层是由射流核心撞击目标表面的驻点流动造成的。鉴于冲击射流具有合适的特性,一些研究人员将其用于纳米流体对电子芯片的冷却中。

Nguyen 等^[28]研究了氧化铝-水纳米流体分别在水平、均匀和圆形表面上的受限和淹没冲击射流中的传热性能,以实现电子冷却。研究发现,在距离表面 5 mm 和纳米颗粒体积分数为 2.8% 时使用中等喷嘴进行电子冷却可以获得最大的传热系数。然而,体积分数大的纳米流体不适合在受限冲击射流状态下强化传热。

Li 等^[29]采用两种类型的铜-水纳米流体(直径分别为 25、100 nm 的铜颗粒)进行喷射冲击冷却,并研究了雷诺数、纳米颗粒体积分数、流体温度、喷嘴-板间距和纳米颗粒尺寸对纳米流体冲击射流换热性能的影响。结果表明,纳米颗粒显著提高了铜-水纳米流体的对流换热系数,体积分数为 3% 的铜-水纳米流体的对流换热系数比纯水的高 52%。实验结果表明,悬浮纳米颗粒几乎不会造成额外的压力损失。此外,还提出了一种新的关联式来预测系统的传热。

值得注意的是,冲击射流适用于相关表面冲击位置的局部冷却。然而,在纳米流体领域,研究人员只研究了电子冷却中的单射流,却没有研究将多股冲击射流用于宽平面的冷却,应对此方向给予重视。

2.4 波状通道

波状通道是一种通过改变平面直通道来获得更大热交换量的新型结构,其劣势是压力损失较大。考虑到波状通道对热系统的积极效应,有学

者对将这种通道应用于采用纳米流体冷却电子器件的散热器中的效果进行了评估。

Sakanova 等^[30]在用于电子冷却的微通道散热器中采用波状通道结构,分别研究了采用3种体积分数为1%~5%的纳米流体时的传热特性。结果表明,在以水作为冷却液的情况下,波状通道的换热量比通常的直通道散热器的换热量有较大的提高,而采用纳米流体来代替水对波状改性的影响并不明显。结果表明,金刚石-水纳米流体具有最大的换热量和最小的热阻。

由于对将纳米流体应用于散热器波状通道中的研究很少,因此无法得出适用于实际情况的一般结论。因此,需要进行更多的研究来更好地表征纳米流体在这种几何结构中的传热行为。

3 结 论

本文从纳米颗粒材料和散热器结构两方面综述了纳米流体在电子冷却中的应用研究进展。数值模拟和实验研究均表明,纳米流体在降低散热器热阻、提高对流换热系数、提升温度均匀性等方面与常规冷却剂相比更为有效。今后的研究方向和存在的挑战如下:

纳米颗粒材料方面:

(1) 碳基纳米流体在水介质中的稳定性差,需采用绿色环保的方法对纳米流体进行功能化,使其发挥更大的效能,而含有生物制备的石墨烯纳米管的纳米流体可以作为电子制冷的合适候选材料;

(2) 具有热磁效应的散热片在电子冷却领域有着巨大的潜力。由于磁场、磁流体流动和散热器中 MNFs 的温度分布之间会有适当的关联,建议在未来的研究中,对热沉中热磁对流的磁黏性影响进行综合评价;

(3) 使用含有碳基纳米颗粒和磁性纳米材料的混合纳米流体可以有效提升散热效果。利用磁性纳米颗粒对碳纳米管进行功能化,使得混合纳米流体不仅具有高的传热效率,而且在外加磁场的作用下效果是可控的。建议加强对在不同的散热器中使用这些混合纳米流体进行研究。

散热器结构方面:

(1) 传统的平行通道散热器应与相变材料结合使用,以提高其传热性能。该领域的研究可以从三个方面进行:寻找冷却设备的最佳几何结构、缩短特征长度以及提高冷却液的热性能。也应对电子处理器冷却装置的热设计进行修改,以便与纳米流体相适应;

(2) 由于影响散热器换热特性的原因很多,目前还没有一个可用于预测散热器中的纳米流体换热增强的公式。研究人员需要精确地研究纳维-斯托克斯方程在不同散热器中的连续性假设和适用性,以用于模拟微通道中纳米流体的传热和流动行为;

(3) 在不同的散热器中,采用机械泵输送液体会导致能耗增加、运动部件产生不必要的振动和噪声等问题,从而降低了冷却装置的运行可靠性,因此装置的维修问题应予以考虑;

(4) 电子冷却中流体通道的尺寸非常小,相比于其他工业领域,纳米颗粒的团聚问题在电子冷却中显得更为重要。

参考文献:

- [1] SHARMA C S, TIWARI M K, MICHEL B, et al. Thermofluidics and energetics of a manifold microchannel heat sink for electronics with recovered hot water as working fluid[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 58(1-2): 135 - 151.
- [2] ARANI A A A, AKBARI O A, SAFAEI M R, et al. Heat transfer improvement of water/single-wall carbon nanotubes (SWCNT) nanofluid in a novel design of a truncated double-layered microchannel heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 780 - 795.
- [3] HOSSEINI S M, SAFAEI M R, GOODARZI M, et al. New temperature, interfacial shell dependent dimensionless model for thermal conductivity of nanofluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 207 - 210.
- [4] SUNDAR L S, SINGH M K. Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20: 23 - 35.
- [5] WU J M, ZHAO J Y. A review of nanofluid heat

- transfer and critical heat flux enhancement: Research gap to engineering application[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2013, 66: 13 – 24.
- [6] BAHIRAEI M. Particle migration in nanofluids: a critical review[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 109: 90 – 113.
- [7] ASHRAFMANSOURI S S, ESFAHANY M N. Mass transfer in nanofluids: a review[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 82: 84 – 99.
- [8] IMANI-MOFRAD P, HERIS S Z, SHANBEDI M. Experimental investigation of the effect of different nanofluids on the thermal performance of a wet cooling tower using a new method for equalization of ambient conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 158: 23 – 35.
- [9] NAZARI M, KARAMI M, ASHOORI M. Comparing the thermal performance of water, Ethylene Glycol, Alumina and CNT nanofluids in CPU cooling: Experimental study[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 57: 371 – 377.
- [10] ALI H M, ARSHAD W. Effect of channel angle of pin-fin heat sink on heat transfer performance using water based graphene nanoplatelets nanofluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 465 – 472.
- [11] EBRAHIMI S, SABBAGHZADEH J, LAJEVARDI M, et al. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids containing cylindrical nanoparticles (carbon nanotubes)[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2010, 46(5): 549 – 553.
- [12] HASSANI S M, KHOSHVAGHT-ALIABADI M, MAZLOUMI S H. Influence of chevron fin interruption on thermo-fluidic transport characteristics of nanofluid-cooled electronic heat sink[J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 191: 436 – 447.
- [13] KAMYAR A, ONG K S, SAIDUR R. Effects of nanofluids on heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65: 610 – 618.
- [14] AMBREEN T, KIM M H. Effect of fin shape on the thermal performance of nanofluid-cooled micro pin-fin heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 245 – 256.
- [15] ESCHER W, BRUNSCHWILER T, SHALKEVICH N, et al. On the cooling of electronics with nanofluids[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2011, 133(5): 051401.
- [16] GANDOMKAR A, SAIDI M H, SHAFII M B, et al. Visualization and comparative investigations of pulsating Ferro-fluid heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 116: 56 – 65.
- [17] JAHANI K, MOHAMMADI M, SHAFII M B, et al. Promising technology for electronic cooling: nanofluidic micro pulsating heat pipes[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2013, 135(2): 021005.
- [18] SELVAKUMAR P, SURESH S. Use of Al_2O_3 -Cu/water hybrid nanofluid in an electronic heat sink[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(10): 1600 – 1607.
- [19] BAHIRAEI M, HESHMATIAN S. Efficacy of a novel liquid block working with a nanofluid containing graphene nanoplatelets decorated with silver nanoparticles compared with conventional CPU coolers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 1233 – 1245.
- [20] KHALEDUZZAMAN S S, RAHMAN S, SELVARAJ J, et al. Nanofluids for thermal performance improvement in cooling of electronic device[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 832: 218 – 223.
- [21] AL-RASHED M H, DZIDO G, KORPYŚ M, et al. Investigation on the CPU nanofluid cooling[J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 63: 159 – 165.
- [22] SOHEL M R, SAIDUR R, SABRI M F M, et al. Investigating the heat transfer performance and thermophysical properties of nanofluids in a circular micro-channel[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 42: 75 – 81.
- [23] LELEA D. The performance evaluation of Al_2O_3 /water nanofluid flow and heat transfer in microchannel heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(17-18): 3891 – 3899.
- [24] YOUSEFI T, MOUSAVI S A, FARAHBAKHS B, et al. Experimental investigation on the performance of CPU coolers: effect of heat pipe inclination angle and the use of nanofluids[J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, 53(12): 1954 – 1961.
- [25] WAN Z P, DENG J, LI B, et al. Thermal performance of a miniature loop heat pipe using water-copper nanofluid[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 712 – 719.
- [26] WANG X W, WAN Z P, TANG Y. Heat transfer mechanism of miniature loop heat pipe with water-copper nanofluid: thermodynamics model and experimental study[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2013, 49(7): 1001 – 1007.

- [27] ASIRVATHAM L G, NIMMAGADDA R, WONGWISE S. Heat transfer performance of screen mesh wick heat pipes using silver-water nanofluid[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60: 201 - 209.
- [28] NGUYEN C T, GALANIS N, POLIDORI G, et al. An experimental study of a confined and submerged impinging jet heat transfer using Al_2O_3 -water nanofluid[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(2): 401 - 411.
- [29] LI Q, XUAN Y M, YU F. Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu-water nanofluid[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36: 426 - 433.
- [30] SAKANNOVA A, KEIAN C C, ZHAO J Y. Performance improvements of microchannel heat sink using wavy channel and nanofluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 89: 59 - 74.



信息

国内首台 MW 级飞轮储能装置投入使用

4月11日,国内首台1 MW飞轮储能装置,在青岛地铁3号线万年泉路站完成并网、投入应用。该项目由湘电动力有限公司等单位联合研制,拥有完全自主知识产权。

湘电动力在飞轮储能装置研制过程中突破高能量密度飞轮电机一体化设计与制造、低损耗、高可靠性、大承载力、混合磁轴承等关键核心技术。该装置投入使用后,预计每台年节电约50万kW·h,30年寿命周期可节电1500万kW·h。据估算,青岛地铁全面应用飞轮储能装置后,可降低能耗15%,线网可年节电5000万kW·h,减少CO₂排放约5万t。

我国实现超低排放的煤电机组超10亿kW

4月24日,在电力规划设计总院举办的全国煤电“三改联动”典型案例和技术推介会上,国家能源局副局长余兵介绍,“十三五”以来,我国煤电机组排放的烟尘、氮氧化物、二氧化硫等大气污染物不到全社会总量的10%,我国已建成全球最大的清洁煤电供应体系。

“十四五”时期,煤电节能降碳改造规模不低于3.5亿kW、供热改造规模力争达到5000万kW、灵活性改造完成2亿kW。

截至2021年底,我国煤电装机达到11.1亿kW,占总发电装机容量的比重为46.7%。2021年我国煤电的度电煤耗大约为305g,超临界和超超临界机组占比超过50%。

我国首个海上特超稠油储量规模化开发油田投产

中国海油4月23日发布消息,中国首个海上超稠油热采开发油田——中国海油旅大5-2北油田投产。旅大5-2北油田位于我国渤海辽东湾海域,为超稠油,平均水深约32m。稠油是一种密度大、黏度高、流动性差且容易凝固的原油。旅大5-2北油田的地层原油黏度是渤海已开发最稠原油的20倍以上,常温下接近固体形态,开采难度极大。

我国海上稠油集中分布在渤海地区,渤海已落实原油探明地质储量42亿t,其中,地层原油黏度大于350mPa·s的稠油约占15%。目前,渤海超3000万t的原油年产量中,非常规稠油产量占比不足1%,将稠油储量变产量,对于加大国内油气勘探开发具有重要意义。

(王波)

信息

全国首座光伏直供换电站正式竣工投运

5月20日,国家能源集团宁夏电力有限公司所属国能浙能宁东发电有限公司“换电重卡绿色交通(物流)示范项目”正式投入使用。该项目是全国首座光伏直供换电站。

该项目一期共建成投运两座换电站,投资5190万元,占地772m²,可服务100台换电重卡,厂内分布式光伏所发绿电直接提供换电站电量补给,换电站实行无人化值守,车辆可在3~5min内实现全自动换电。

国内首套重型燃气轮机成功并网

5月17日19时07分,国内首套重型燃气轮机R0110燃机在深圳电厂成功并网,标志着我国已完整掌握了重型燃气轮机的自主设计、生产、调试、改造等全过程关键技术。R0110燃机是我国首台自主研发、具有完全自主知识产权的10万kW级燃气轮机,它打破了国外燃机技术垄断,填补了相应的技术空白,解决了燃机核心技术“卡脖子”问题,它的成功并网发电标志着中国成为世界上第五个具备重型燃气轮机研制能力的国家。

江苏金坛盐穴压缩空气储能国家示范工程满负荷试运行

5月15日,世界首个非补燃压缩空气储能电站——江苏金坛盐穴压缩空气储能国家试验示范项目整套设备实现连续4d满负荷、满时长“储能—发电”试运行,各项指标优良,标志着大规模压缩空气储能技术全流程验证成功。该项目已具备投入商业运行的条件。

该项目是我国空气储能领域唯一的国家示范项目,是世界首座非补燃式压缩空气储能电站,也是国内首次利用盐穴资源的发电项目。电站一期建设1套6万kW×5h非补燃式压缩空气储能发电系统,发电年利用小时数约1660h,储能容量30万kW·h,换电效率达60%以上,投运后将为江苏电网提供±6万kW调峰能力,每年增加调峰电量约1亿kW·h。

全球首条35kV低频海底电缆入海

5月6日,全国首条35kV低频海底电缆在浙江台州上大陈岛顺利入海。本次敷设的海缆从上大陈岛开始,到路桥金清为止。该工程实现大陈岛与大陆柔性互联,并实现风机低频送出,使得大陆侧电网和大陈岛间的电能形成高效互济,改善风电经海缆送出过程中存在的充电无功大、损耗高等问题,减少风电资源的浪费,是一次积极的科技探索和仿真实践,也是大陈岛作为全国新型电力系统全域示范窗口建设的重要举措。

H2Fly公司氢电飞机实现首次商业飞行

4月12日,德国氢动力初创公司H2Fly的四座HY4氢动力客机从斯图加特基地飞到弗里德里希港,飞行距离123km,标志着氢动力客机首次两个商业机场之间实现飞行。

该飞行活动旨在积累氢燃料电池驱动的HY4在不同环境条件下长距离飞行的经验,此次飞行高度达到2204m,创下了氢动力客机新的飞行高度记录。HY4采用双机身设计,于2016年首飞,至今已完成90多次飞行,均采用了气态氢存储。

(王波)