



低品位余热利用技术的研究现状、困境和新策略

李海燕¹, 刘静^{1,2}

1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190
2. 清华大学医学院生物医学工程系, 北京 100084

摘要 能源是经济发展和社会进步的重要基础,在能源消耗不断攀升从而带来诸多社会和环境问题的现实背景下,节能减排已成为当今人类的共识。低品位余热利用作为节能减排中的重要部分,具有巨大的发展潜力。但当前技术中固有的材料性能、封装工艺、换热器性能等障碍,在一定程度上阻碍了它的进一步发展。本文针对这一事实,评估了国内外在低品位余热利用方面的研究态势,特别就热能传递与利用的关键环节进行了深入剖析。在此基础上,提出充分利用室温金属流体优异的传热性能和低功耗驱动特性,部分取代传统工业余热利用过程中通常采用的水冷介质,以发展新一代高效余热利用和发电装备。阐述了无水换热器的概念,并提炼出其中的关键科学技术问题。随着室温金属流体换热器技术的研究深入,可望引申出一个全新的工业余热应用领域,相应研究必将对节能、节水和降耗,以及环境保护等方面带来深远的影响。

关键词 节能减排;低品位热能;余热利用;液态金属;无水换热器;水资源保护

中图分类号 TK11*5

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)17-0112-06

Current Research Status, Difficulties and New Strategy in Utilization of Low Grade Heat

LI Haiyan¹, LIU Jing^{1,2}

1. *Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*
2. *Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Abstract Energy is an important factor in the economic and social progress of human society. Facing social and environmental problems induced by increasing energy consumption, the energy conservation and emission reduction becomes a consensus. As an important component of energy technology, the low-grade waste heat recovery technique has a great potential. However, the current techniques suffer from a number of difficulties, such as the poor performance of materials, the low level of encapsulation techniques, and the limitation of heat exchangers, which hampers its progress to some extent. This paper reviews the domestic and international researches on the utilization of low-grade waste heat, especially, the key links between heat transfer and utilization. Based on the assessment of the current techniques, the application of room temperature liquid metals is proposed, for their excellent heat transfer performance and low power driving property, to partly replace water, as is usually adopted in the conventional waste heat recovery process. In this way, a new generation device with high efficiency in recovery of waste heat and power generation can be developed. The concept of water free heat exchanger is discussed, together with the key scientific and technological issues. With the development of the liquid metal heat exchanger technology, it is expected that a new field of utilizing industrial waste heat would emerge, which would bring about deep impact in many respects such as energy and water conservation, energy consumption reduction and environmental protection.

Keywords energy conservation and emission reduction; low-grade thermal energy; waste heat recovery; liquid metal; water free heat exchanger; water resource conservation

收稿日期: 2010-06-07; 修回日期: 2010-08-16

作者简介: 李海燕, 博士研究生, 研究方向为新能源、制冷与低温工程, 电子信箱: hetun231@gmail.com; 刘静(通信作者), 研究员, 研究方向为新能源、制冷与低温工程、生物医学工程, 电子信箱: jliu@mail.ipc.ac.cn

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的重要基础,也是经济发展的原动力。但2008年金融危机为世界能源市场带来了一场巨大的考验,受其影响,全球一次能源需求增速放缓。现行能源政策受到了严重挑战,如不加以改观,到21世纪末全球气温可能上升6℃,为了实现全球温度上升控制在2℃以内的目标,低碳能源革命时代必将悄然而至,廉价能源时代则将一去不复返^[1]。

随着经济高速增长,中国的能源消费量与日俱增,现已成为世界上仅次于美国的能源消费大国,其中工业能源消费量占总消费量的70%以上^[2]。中国政府于2008年哥本哈根会议前夕提出节能减排目标:到2020年,单位GDP二氧化碳排放比2005年下降40%~45%,非化石能源消费占一次能源消费的比重达15%左右,森林面积比2005年增加4000万hm²,森林蓄积量比2005年增加13亿m³(图1)^[3]。中国是以煤炭为基本能源的国家,煤炭比重长期保持在65%以上,而非化石能源占一次能源消费的比重仅约8%,因此面对环境污染、资源和能源短缺等硬性约束,必须寻求新的能源发展道路,才有可能突破经济增长的“瓶颈”。

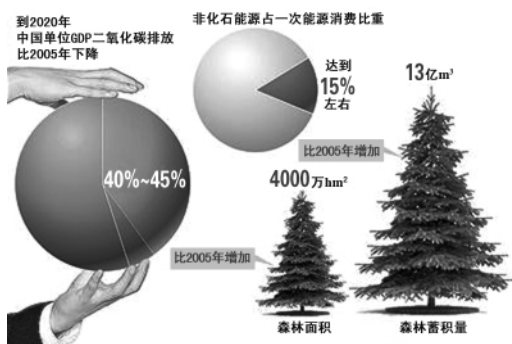


图1 中国节能减排目标和现状

Fig. 1 Object and current situation of China's energy conservation and emission reduction

目前,中国能源利用率仅为约30%,大量余热以各种形式被排放到大气中,可再生能源在能源结构中所占比例不足8%。因此,回收利用余热在提高中国一次能源利用率方面具有举足轻重的作用。目前,中国回收利用的余热主要来自高温烟气的显热和生产过程中排放的可燃气,中低温余热(即低品位余热)基本上还没有回收^[4]。相对于煤、石油、天然气等高位能源而言,低品位余热在相同单位内包含的能量很低,利用难度大。但从能源利用的格局来看,低品位余热将作为产能和用能的关键环节,对节能减排的战略起到重要作用。现有的低品位余热的回收利用中普遍采用水冷介质,受到水资源、运输、地域等多方面的限制,一定程度上阻碍了余热的大规模应用。2010年初,中国南方多省市及东南亚多个国家和地区遭受严重旱灾,使这一问题显得尤为突出。因此,

寻找可重复利用的新型无水高效传热介质是推进低品位余热利用的关键所在。本文在回顾国内外低品位余热利用方面的研究进展并评述其所面临困境的基础上,提出并论述了采用室温金属流体实现大规模余热利用的具有一定普遍意义的全新解决策略。

1 工业余热利用概况

工业余热主要指工矿企业热能转换设备及用能设备在生产过程中排放的废热、废水、废气等低品位能源,利用余热回收技术将这些低品位能源加以回收利用,提供工业、生活热水或者为建筑供热,不仅可以减少工业企业的污染排放,还可以大幅度降低工业企业原有的能源消耗^[5]。

工业余热资源十分丰富且广泛存在于各种生产过程中,特别在煤炭、石油、钢铁、化工、建材、机械和轻工等行业更是如此(图2),被视为继煤、石油、天然气、水力之后的第5大常规能源。在中国,各主要工业部门的余热资源率平均达7.3%,而余热资源回收率仅34.9%,回收潜力巨大^[6]。因此,充分利用余热资源是实现工业节能减排战略目标的主要手段之一。



图2 主要产热行业

Fig. 2 Major heat production industry

注:(a),煤炭;(b),石油;(c),钢铁;(d),化工;(e),建材;(f),机械;(g),造纸;(h),纺织。

Notes: (a), coal industry; (b), petroleum industry; (c), iron and steel industry; (d), chemical industry; (e), construction industry; (f), machinery industry; (g), tissue industry; (h), textile industry.

1.1 石油行业

目前,中国油田采出水总量在几亿立方米以上,常规油田采出水温度为 38~43℃,稠油油田采出水温度为 60~65℃,蕴藏着大量的热能资源^[7]。面对余热回收利用的巨大潜力,许多油田进行了积极的探索,如大庆、辽河等油田将热泵回收采出水余热技术用于站内生活采暖,并提取采出水中的余热用于油水分离及原油输送过程的加热,收到明显的经济和社会效益^[8]。随着原油价格上涨及能量优化研究的深入,炼油工业中低温余热的回收利用也越来越受到重视,正成为炼厂节能的重点方向之一^[9]。

1.2 钢铁行业

钢铁企业余热的主要来源有焦炭及烧结、转炉、加热炉的烟气^[10],采用余热锅炉对这些烟气进行冷却,可以回收大量的蒸汽,这些蒸汽可用于发电、采暖等生产、生活领域。从图 3 可以看出,钢铁企业的各工序的余热回收利用潜力都在 30% 以上,而余热资源总量相当大,可见实现余热回收具有十分广阔的前景。

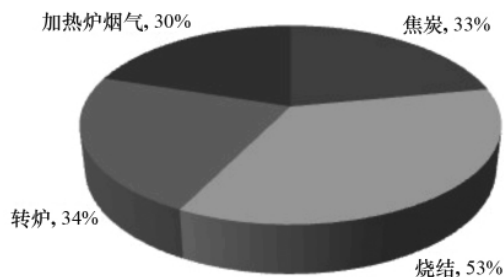


图 3 钢铁企业各工序余热资源回收利用潜力

Fig. 3 Potential waste heat recovery in various processes in steel and iron enterprises

1.3 水泥行业

水泥窑存在大量的余热,窑尾一级预热器排出的废气带走的热损失和窑头冷却机废气带走的热损失占总热量的近 50%。水泥窑的余热除了工艺自身利用外,还有很大一部分热量,一般将其用于余热发电,目前广泛采用的是纯低温余热发电技术。另外,将余热转换后供给吸收式制冷机,用于企业或居民区的中央空调,也是一种有效的余热利用方式^[11]。

1.4 其他行业

除以上各主要高能耗行业外,余热利用在汽车、船舶、造纸、纺织、酿酒、橡胶、冶金、铸造、建材、玻璃窑、陶瓷窑、油脂生产、海水净化、冷藏冷冻等行业和领域中也日渐得到重视,出现了许多与生产相结合的余热利用方法。

2 最新研究进展和困境

2.1 研究进展

2.1.1 吸收式系统

溴化锂吸收式热泵在工厂余热回收中的应用已经越来越

广泛,它可以回收利用工厂低温余热热源的热量,将低品位热转变为高品位热,广泛应用于有余热资源或有低温热源的石油、石化、制药、酿造和钢铁等行业^[12]。另外,在炼油工业、天然气和热电冷三联供系统中,可以配置吸收式系统实现对各种低温余热的高效利用。

2.1.2 吸附式系统

吸附式制冷技术作为一种余热利用的新技术,其研究开发正日益成熟。它可以将太阳能或余热等低品位热源作为驱动热源,采用对环境友好的工质对,设备结构简单,一次性投资少,运行费用低,使用寿命长,无运动部件,无噪音,无环境污染,特别适用于有大量低品位余热排放的工业过程及有频繁震动的移动机械上^[13]。

2.1.3 新型材料

针对冶金、玻璃、水泥、陶瓷等行业中高能耗的窑炉,回收烟气余热的传统做法是利用耐火材料的显热变化来储热,这种储热设备的体积大、储热效果不明显。改用相变储热材料,是研究较为广泛的一种方法^[14-17],这样储热设备体积可减小 30%~50%^[18],还可起到稳定运行的作用。目前正在研究的新型相变材料有潜热型功能热流体、纳米复合相变储能材料、定型相变蓄能材料和无机盐/陶瓷基复合相变蓄能材料等^[17]。

采用热电材料进行温差发电,也是工业余热的一个应用领域,如利用炼钢高炉等工业废热和利用汽车发动机的余热进行温差发电。文献[19]通过模型证明了采用热电材料将余热直接转换成电,理论上可以到达卡诺循环效率的 40%。

另外,金属氢化物在空调、供热方面的应用也逐渐引起人们的重视^[20]。

2.1.4 热管技术

热管是一种由管壳和工质组成的高效导热元件,以相变(蒸发与凝结)换热作为传热的主要方式,具有传热能力大、温度控制能力强、传热效率高等特点。现在热管换热器已在电力、冶金、石化、玻璃陶、电子、轻工等行业的余热回收领域获得了广泛的应用。在钢铁企业中,有别于以往烟气通过各种换热器和余热锅炉转化为蒸汽或者热水进行热利用的方式,热管废热发生器能够直接利用烟气余热^[21]。

2.1.5 热声技术

热声热机是通过热声效应实现热能与声能的相互转化的装置。从声学角度来说,热声效应是由于处于声场中的固体介质与振荡的流体之间相互作用,使得距固体壁面一定范围内沿着(或逆着)声传播方向产生一个时均热流,并在这个区域内产生或者吸收声功的现象^[22]。热声热机可利用低品位热源,将难以利用的余热(如铝电解槽中槽壳侧部温度为 300℃的余热)转化成便于利用的电能,这也是它应用到工业中的立足点。

2.2 困境和展望

尽管众多先进的技术在一定程度上推动了余热利用的发展,但各自的缺陷也在一定程度上制约了余热利用技术的进一步推广应用。在溴化锂吸收式制冷系统中,溴化锂对金

属材料有腐蚀性,且会出现结晶导致换热性能下降甚至换热器无法正常运行;与吸收式制冷系统相比,吸附式制冷系统不存在结晶问题,但需要采用风冷、水冷方式进行冷却,受到风能和水能的制约;各种新型材料在蓄能、热转换方面表现出优良的特性,但是如果不采取合理的散热,很难达到理想的蓄能和发电水平;热管制作工艺,如芯体材料的制备、工质封装等相当复杂,对安装、维护、工作温度等有特殊要求,这使其应用受到很大限制;利用热声技术进行余热转化的过程中,需要先将热源的热量通过换热器传到热声介质,而常规的水冷换热器在运行和维护方面存在一定的不便。

中国工业余热回收利用水平虽已有较大提高,但这些余热利用技术面临的障碍,很大程度上限制了中国工业余热利用的规模,致使中国工业余热回收利用水平与国际先进水平仍存在较大差距。为突破这一困境,除进一步对相关技术进行深入研究,攻克材料性能、封装工艺等技术难关之外,对换热设备及换热工质进行改进,也是今后较长时期的一个重要发展方向。

3 液态金属工业余热利用技术——一个全新的领域

3.1 液态金属余热利用换热器技术的提出和特点

在至今所发展的各种余热利用方法中,基本上都是用水作为冷却工质。但是能被人们生产和生活利用的水资源不仅短缺而且地区分布极不平衡,年际差别很大,再加上污染严重,造成水资源严重不足。中国为此启动了“引黄工程”、“南水北调”等水资源利用项目,但是对于这些项目未能惠泽的众多地区,尤其是交通不便的偏远地区,水源紧缺、运输困难成为制约其余热利用技术发展的关键问题。因此,发展非水冷却工质的换热器成为推广余热利用技术、促进经济发展的重要课题。刘静等^[23-26]首次将低熔点金属及其合金流体引入到计算机芯片热管理领域,从而开启了旨在解决高端芯片热障的液态金属散热方法。笔者实验室前期开展的一系列研究,揭示了室温金属流体换热器高效的传热特性和低功耗驱动优势。实际上,这种先进的传热方式,不仅限于以高热流密度芯片著称的IT行业,在工业及生活领域随处可见的大量低热流密度、低品位热能传递及应用上,也可以发挥关键作用。这主要源于液态金属散热技术所体现出来的一系列独特价值。

归纳起来,液态金属传热方式具有如下特点及优势。

1) 适用于换热器的室温金属流体工质工作温区广,比如最典型者镓基合金的最低熔点可达 -19°C ,最高沸点则高达 2400°C ,这使其可用于发展传热性能稳定的单相换热器,从而广泛适用于大量室温区的工业余热利用领域。

2) 具有远高于单相水的对流换热系数,这种高效的换热能力有助于发展体积紧凑的换热器。

3) 可采用电磁泵驱动,无任何机械运动部件,由此发展的换热器运行稳定可靠且无噪音。

4) 作为金属介质,液态金属传热流体可采用电磁泵驱动,因此换热器运行无机械损耗,效率高,功耗低,节能效果明显。

5) 典型的金属流体如镓基合金流体性质稳定,常温下不与空气或水反应,无毒性,且饱和蒸汽压低,不易蒸发;表面张力大,不易泄漏。

6) 金属流体成本虽高,但容易回收,在高回收率的情况下液体成本极低,而且金属流体换热器维护方便,不涉及水处理及由此可能产生的可能污染问题,总的运行成本较低,这使其可广泛用于大量工业领域。

以上特点,实际上确保了液态金属换热器作为未来一大类优质换热器存在的可能。目前,这种新型换热器在余热利用领域的普及,在很大程度上并非是受成本和技术阻碍,实际上是受到了观念的制约。

3.2 液态金属在工业领域替换现有工质的可行性分析

液态金属以其出色的换热性能,正在IT行业崭露头角。在工业领域,传统工质受到水源、处理、运输等方面的限制越来越突出,将液态金属拓展应用于工业领域,成为一个可预见的趋势。为适应这一趋势,对液态金属在工业领域替换现有工质水的可行性进行如下分析。

1) 许多金属的沸点通常非常高,一般大于 2200°C ,这就保证了液态金属在较宽的温度范围是真正的单相流体,工作压力始终保持低位,与水冷相比,避免了流动中压力的突然变化,而且因温度过高导致设备烧毁的可能性要低得多,从而提高了工作回路的可靠性和安全性,简化了设备的设计和制造,并进一步简化了设备的操作。

2) 水的导热系数约 $0.6\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,而液态金属或其合金的导热系数比水大几十倍,在快速导热方面比水更具优越性。这一性质令其在一些核反应堆(主要用液态钠或钾作为冷却介质)中表现出色,而且在一些对质量要求较高的机械部件(如汽轮机叶片)的制造过程中,熔解铝可以将其快速冷却到 660°C ,从而有效地防止缺陷形成。

3) 在常见的水冷却系统中,需要水泵驱动循环正常运行,但水泵的可靠性较差,其机械局限性不可忽略,如方向依赖性、活动部件和噪声等。如果采用电渗透泵,由于电极电势高,可能会引起水分子的解离。而液态金属特有的导电特性可由电磁泵驱动:当流体流过磁场时,插在液态金属中的一对电极引入直流电,通过磁场的电流对液态金属产生洛伦兹力,从而推动液态金属在冷却回路中循环流动。由于电磁泵中无运动部件,大大提高了系统的可靠性,而且电磁泵体积更小,放置位置灵活,使机组更易于小型化,无运动部件的泵结构,也使得泵体功耗大大降低。

4) 水的表面张力是 $0.072\text{N}/\text{m}$,这一数值比许多液态金属的低,所以与水相比,液态金属更不易泄漏,不需要重新充注。另外,虽然许多金属的质量比热都小于水,但体积比热却接近水,如水的体积比热是 $4200\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$,而液体镓的体积

比热为 $2158\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$,加之其在室温下蒸汽压力低、导热系数高、工作温度范围大,并且与氧气和水不易发生化学反应,种种优点令其非常有希望成为在换热器中替代水的液态金属。例如:镓不可燃、无毒,其纯金属和大部分天然形成的化合物不溶于水,因此不会被人体皮肤吸收,甚至有研究发现镓具有杀菌活性,可用作药用抗生素^[27],这些特性使镓较其他大部分液态金属更安全;镓过冷度较大,在远低于室温的温度下,仍可保持液态,如果将其密封在碳纳米管中,甚至在 -80°C 的低温下都能保持液态^[28];镓的动力黏度大约是水的1.5倍,驱动耗功更小。

5) 与水相比,虽然液态金属相对成本较高,但由于其可循环利用,清洁无污染,维护费用和处理费用远远低于水,从而使得液态金属换热器的运行成本大大低于水冷换热器。而且换热性质卓越的镓相对较便宜,所以镓或其合金在工业领域将大有作为。

目前在工业领域,由于水作为冷却工质的工业设备受到较大程度的限制,而液态金属长期以来一直在同步加速器和核反应堆的冷却过程中表现卓越,导热系数高、单位体积比热高、运动黏度低、蒸汽压力低的液态金属,尤其是镓或其合金具有安全无毒的特性,可以替换现有系统中的水工质,从而使换热器能摆脱对水的依赖。基于这一理念,笔者提出无水换热器的概念。当前,水资源不足带来的严重问题使得对无水技术的探索提升到一个新的高度,可以看到,随着以金属流体作为高效传热介质的无水换热器的推广应用,必将显著推进相关行业的技术进步。

3.3 面向工业应用的液态金属换热器研究和应用中的关键科学技术问题

液态金属换热器的研究刚处于起步阶段,与任何新技术面临的情况类似,存在一些关键科学技术问题有待突破。

1) 低熔点液态金属及其合金流体的研究还不充分,其物理性质、温度效应、相变机制、热物性与组分的关系等有待进一步研究。

2) 金属流体流动和传热特性的理论建模及试验方法,强化换热方案的提出和优化,强化换热极限的预测,新型传热机制如室温金属与常规流体基础传热机制异同规律,以及液态金属及其合金在各种流道包括微流道中的强化流动和传热关系式规律需要揭示。

3) 金属流体的电磁驱动方法、复杂多场(电磁场、流场、热场等)耦合问题的理论建模、数值计算和预测。

4) 低熔点液态金属与基底或管材的相互作用机制,腐蚀规律的揭示及解决方法。

5) 低熔点金属合金组成的相图规律,室温金属流体混合工质实现最低熔点、最大强化换热及最小流动阻力时所对应的热工学规律。

6) 不同介质(如液态金属-水混合物,液态金属-液态金属混合物,液态金属-空气混合物等)的换热器特性、应用形式和应用场合,以及与不同余热利用对象的匹配关系。

4 结语

随着能源形势日趋严峻,节能减排越来越成为当前工业及其他部门面临的重要问题。低品位余热是节能减排的重要组成部分,其利用技术对可持续发展和环境保护具有深远影响。但当前余热利用技术基本上沿用水作为冷却工质,在偏远缺水地区受到较大应用限制。为此,笔者提出以液态金属代替水用于余热利用等工业领域,以实现高效换热,而且不受空间地域限制。随着液态金属在国民经济各部门的推广应用,相应的产业结构可能会出现对应调整,能源体系可能也会随之发生变化。在此基础上,有必要建立专业研究机构,对液态金属余热利用技术的特性及应用进行系统深入地研究,并将其充分应用于实践。此方面工作的推进可望开辟出一个工业余热换热器研究与应用的新前沿,发展出一大类崭新的以低熔点金属及其合金流体作为流动传热工质的高性能无水换热器系统,通过解决由此引申出的一系列热物性、流动、传热学、换热器设计等问题,推动液态金属换热器这一先进学科方向的进展,从而为世界范围内节能减排的发展做出贡献。

参考文献 (References)

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook 2009 [R]. Paris: IEA, 2009.
- [2] 中国科学院学部. 我国工业节能现状调研和对策[J]. 中国科学院院刊, 2010, 25(3): 307-308.
Academic Divisions of Chinese Academy of Sciences. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(3): 307-308.
- [3] 鹰麟. 哥本哈根会议 [EB/OL]. [2009-12-05]. <http://www.hudong.com/wiki/%E5%93%A5%E6%9C%AC%E5%93%88%E6%A0%B9%E4%BC%9A%E8%AE%AE>.
Ying Lin. COP15 United Nations Climate Change Conference Copenhagen 2009[EB/OL]. [2009-12-05]. <http://www.hudong.com/wiki/%E5%93%A5%E6%9C%AC%E5%93%88%E6%A0%B9%E4%BC%9A%E8%AE%AE>.
- [4] 林芃, 王如竹, 马强. 低品位热能的远距离输送技术 [J]. 制冷学报, 2009, 30(5): 1-7.
Lin Peng, Wang Ruzhu, Ma Qiang. *Journal of Refrigeration*, 2009, 30(5): 1-7.
- [5] 天津市金大地能源工程技术有限公司. 工业余热利用技术[EB/OL]. [2009-12-06]. <http://www.jindadi.net/html/content.asp?cls=19&id=70>.
Tianjin Golden Earth Energy Engineering Technology Co., Ltd. Technology of industrial waste heat utilization [EB/OL]. [2009-12-06]. <http://www.jindadi.net/html/content.asp?cls=19&id=70>.
- [6] 孟嘉. 工业烟气余热回收利用方案优化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学能源与动力学院, 2008.
Meng Jia. Optimization research for the recovery and utilization of waste heat in the industrial flue gas [D]. Wuhan: School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- [7] 陈由旺, 余绩庆, 林冉, 等. 油气田节能技术发展现状与展望 [J]. 中外能源, 2009, 14(9): 88-94.
Chen Youwang, Yu Jiqing, Lin Ran, et al. *Sino-Global Energy*, 2009, 14(9): 88-94.

- [8] 耿建安, 李华玉. 油田热污水余热利用的可行性分析及尝试[J]. 制冷与空调, 2004, 4(2): 67-70.
Geng Jian'an, Li Huayu. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2004, 4(2): 67-70.
- [9] 许金林. 我国炼油企业节能潜力分析及技术措施[J]. 炼油技术与工程, 2006, 36(4): 47-50.
Xu Jinlin. *Petroleum Refinery Engineering*, 2006, 36(4): 47-50.
- [10] 张立宏, 蔡九菊, 吴增福, 等. 钢铁企业余热蒸汽现状及潜力分析[C]//全国能源与热工 2006 学术年会. 张家界, 2006: 473-480.
Zhang Lihong, Cai Jiujie, Wu Zengfu, et al. Present status and potential analysis of steel and iron enterprise afterheat steam [C]//2006 Proceedings of National Energy & Thermotechnical Technique. Zhangjiajie, 2006: 473-480.
- [11] 黄劝根. 水泥厂余热制冷空调的应用技术[J]. 水泥工程, 2005(3): 80-82.
Huang Quangen. *Cement Engineering*, 2005(3): 80-82.
- [12] 董素霞, 岳永亮, 黄贺. 吸收式制冷机在节能减排形势下的应用[J]. 制冷与空调, 2008, 8(3): 99-104.
Dong Suxia, Yue Yongliang, Huang He. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2008, 8(3): 99-104.
- [13] 王学生. 太阳能加热输送原油系统及余热驱动的物理化学复合吸附式制冷研究 [D]. 上海: 上海交通大学太阳能发电和制冷工程研究中心, 2004.
Wang Xuesheng. Study on solar energy system for heating crude oil and combined physical and chemical adsorption refrigeration driven by the waste heat[D]. Shanghai: Engineering Research Center of Solar Power & Refrigeration, Shanghai Jiaotong University, 2004.
- [14] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13: 318-345.
- [15] Nomura T, Okinaka N, Akiyama T. Waste heat transportation system, using phase change material (PCM) from steel works to chemical plant [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(11): 1000-1006.
- [16] 张奕, 张小松. 石蜡在管外凝固过程的理论和实验分析[J]. 化工学报, 2008, 59(6): 1360-1365.
Zhang Yi, Zhang Xiaosong. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, 59(6): 1360-1365.
- [17] 沈学忠, 张仁元. 相变储能材料的研究和应用[J]. 节能技术, 2006, 24(5): 460-463.
Shen Xuezhong, Zhang Renyuan. *Energy Conservation Technology*, 2006, 24(5): 460-463.
- [18] 王志强, 曹明礼, 龚安华, 等. 相变储热材料的种类、应用及展望 [J]. 安徽化工, 2005(2): 8-11.
Wang Zhiqiang, Cao Mingli, Gong Anhua, et al. *Anhui Chemical Industry*, 2005(2): 8-11.
- [19] Vanderpool D, Yoon J H, Pilon L. Simulations of a prototypical device using pyroelectric materials for harvesting waste heat [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(21-22): 5052-5062.
- [20] Muthukumar P, Groll M. Metal hydride based heating and cooling systems: A review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(8): 3817-3831.
- [21] 杨猛, 董辉, 杜涛. 钢铁企业余热吸收制冷[J]. 节能, 2009(9): 39-42.
Yang Meng, Dong Hui, Du Tao. *Energy Conservation*, 2009(9): 39-42.
- [22] 金滔, 陈国邦, 沈漪. 热声驱动的脉管制冷机 [J]. 太阳能学报, 2002, 23(2): 192-195.
Jin Tao, Chen Guobang, Shen Yi. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2002, 23(2): 192-195.
- [23] 刘静, 周一欣. 以低熔点金属或其合金作流动工质的芯片散热用散热装置: 中国, CN02131419.5[P]. 2002-10-10.
Liu Jing, Zhou Yixin. Device for CPU chips heat dissipation with liquid metal or its alloy with a low melting point as coolant: China, CN02131419.5[P]. 2002-10-10.
- [24] Liu J. Development of new generation miniaturized chip-cooling device using metal with low melting point or its alloy as the cooling fluid[C]//Proceedings of the International Conference on Micro Energy Systems. Guangzhou: Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, 2005: 89-97.
- [25] Ma K Q, Liu J. Heat-driven liquid metal cooling device for the thermal management of a computer chip [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2007, 40: 4722-4729.
- [26] Deng Y G, Liu J, Zhou Y X. Study on liquid metal cooling of photovoltaic cell [C]//Proceedings of the Inaugural US-EU-China Thermophysics Conference. Beijing: ASME, 2010: 1-7.
- [27] Kaneko Y, Thoendel M, Olakanmi O, et al. The transition metal gallium disrupts pseudomonas aeruginosa iron metabolism and has antimicrobial and antibiofilm activity [J]. *Journal of Clinical Investigation*, 2007, 117(4): 877-888.
- [28] Chen X S, Zhao J J, Sun Q. Surface thermal stability of nickel clusters [J]. *Physica Status Solidi B*, 1996, 193(2): 355-361.

(责任编辑 吴晓丽)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在研读相当数量文献资料的基础上, 全面、深入、系统地论述某一方面的问题, 并对所综述的内容进行归纳、分析、评价, 以反映作者的观点和见解。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

自 2004 年第 8 期起, “卷首语”栏目每期邀请一位院士撰写一篇寄语性文章。本栏目诚邀中国科学院院士和中国工程院院士继续就重大科技现象、事件, 以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等, 撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿, 每篇文章约 2200 字, 同时提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。