专 题 综 述

文章编号:1001-2060(2015)05-0659-07

太阳能热发电系统中熔融盐技术的研究与应用

徐海卫¹ 常 春² 余 强²

(1.中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司,北京102209;2.中国科学院电工研究所 中国科学院太阳能热利用及光伏系统重点实验室,北京100190)

摘 要:将针对碳酸盐、硝酸盐等几种主要熔融盐的组成、特 性及最新低熔点的研究进展做了对比;重点探讨了国内外熔 融盐传热、蓄热技术的进展及应用,给出了熔融盐传热计算 关联式。本文认为采用熔融盐技术可以将电站系统运行参 数提高到540 ℃以上,系统发电效率和储热效率大幅提高, 发电成本相比导热油工质电站的发电成本降低2%,采用熔 融盐技术的塔式太阳能热发电系统应用前景广阔。继续开 展和完善低熔点熔融盐配方及熔融盐强化换热与蓄热研究, 提高蓄热系统可靠性是熔融盐技术下一步研究的重点。

关键 词:熔融盐;太阳能热发电;低熔点;传热;蓄热

中图分类号: TK513.5 文献标识码: A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.001

引 言

全球环境污染与能源危机问题日趋尖锐,太阳 能热发电作为一种具有规模化低成本前景的清洁能 源发电技术引起国内外广泛关注。太阳能热发电也 称为 CSP(聚光型太阳能热发电),是利用平面或曲 面反射镜将太阳能聚集起来,通过吸热装置转换为 热能,再经过热功转换过程发电^[1]。由于太阳能自 身具有间歇性与不稳定性的特点,所以高效传热蓄 热技术是太阳能热发电利用中的关键技术环节^[2], 成为当前电力和能源领域的研发和投资热点。在 水/水蒸气、导热油、熔融盐、液态金属等诸多介质 中,熔融盐具有价格低、使用温度范围广、可传热蓄 热一体化等优点,被普遍作为传热蓄热介质首选。 熔融盐是盐类的熔融态液体,包括无机盐的熔融体、 氧化物熔体和熔融有机物。熔融盐作为太阳能热发 电传热蓄热介质的优势具体体现为:使用温度上限 可达 600 ℃以上,远高于导热油的温度上限 400 ℃, 可有效提高系统发电效率;较低的蒸汽压(约2× 10⁵ Pa),远低于水/水蒸汽及导热油的工作压力(1 ×10⁶-2×10⁷ Pa),显著提高了系统的可靠性;具有 较好的热稳定性和化学稳定性,与导热油相比,使用 寿命从2 a提升到 20 a以上;成本低、易获得,可规 模化应用。国内外对熔融盐及其传热蓄热技术在太 阳能热发电中的应用开展了广泛的研究,并取得了 显著效果。

1 熔融盐种类与主要特性

常用熔融盐是由碱金属或碱土金属与卤化物、 SO₄²⁻、CO₃²⁻、NO₃⁻及PO₄³⁻组成^[3]。熔融盐被用 作传热蓄热介质时 需要注意以下几点:(1)熔融盐 易凝固;(2)熔融盐劣化性;(3)熔融盐腐蚀性; (4)熔融盐热物性变化对介质流动传热性能影响。 开发研制低腐蚀性、低熔点、高许用温度的熔融盐配 方是熔融盐技术的关键。表1列出了部分常用熔融 盐的熔化温度与熔化热^[4]。

1.1 碳酸盐

碳酸盐腐蚀性小,熔解热大。按不同比例混合 可以得到不同熔点的共晶混合物。缺点是熔点普遍 较高且液态碳酸盐粘度大。 K_2CO_3 和 Na_2CO_3 共晶 混合物应用前景相对较好, K_2CO_3 与 Na_2CO_3 共晶 量比 3:2 的比例混合组成的共晶混合物熔点为 704 °C,熔化热为 364.17 kJ/kg,使用温度上限为 830 °C。将 Na_2CO_3 、 K_2CO_3 和 Li_2CO_3 3 种碳酸盐按 照物质的量比30.6:26.8:42.5配置混合碳酸盐,混

收稿日期: 2015-04-07; 修订日期: 2015-06-16

基金项目:中国华能集团科技项目(HNKJ13-H21) 国家能源应用技术研究及工程示范项目(NY20130103)

作者简介:徐海卫(1982-),男 江苏南通人,中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司高级工程师.

合共熔物熔点为 393 ℃^[5]。通过静态熔融的方法 制备了 Na, CO3 - K, CO3新型熔盐^[6] 质量比为 1:1, 当添加 NaCl 为 22.81% (质量分数) 后,得到改性熔

融盐 其熔点比二元碳酸熔盐降低了133 ℃ 熔化热 为二元碳酸熔盐的1.9倍 而且混合熔盐在850 ℃以 下时具有较好的热稳定性。

		Cl -	Br -	NO ₃ -	CO3 ²⁻	F -	Cl -	Br ⁻	NO ₃ ⁻	CO3 ²⁻
Li	849	610	550	253	732	1041	416	203	373	509
Na	996	801	742	307	858	794	482	255	177	165
Κ	858	771	734	335	900	507	353	215	88	202
Cs	703	645	638	409	793	143	121	111	71	
Mg	1263	714	711	426	990	938	454	214		698
Ca	1418	772	742	560	1330	381	253	145	145	
Sr	1477	875	657	645	1490	226	103	41	231	
Ba	1368	961	857	594	1555	105	76	108	209	

表1 部分熔融盐的熔化温度及熔化热 Tab. 1 Melting temperatures and melting heat of partial molten salt

1.2 氯化物

氯化物种类繁多,可以按要求制成不同熔点的 混合盐,熔化热较大,腐蚀性极强。文献[7]以 MgCl₂、NaCl、KCl 为原料^[7], 配置了 36 种不同配比 的混合氯化盐,当 MgCl₂、NaCl、KCl 的质量比为 2:7:1时,该混合共熔氯化盐的熔点为399.6℃。

1.3 氟化物

氟化物主要为碱金属及碱土金属氟化物 是非 含水盐。当 LiF 与 BeF,以质量百分比 53% 与 47% 混合共熔氟化盐的熔点是 363.5 ℃。氟化物的缺点 主要为由液相转变为固相时体积形变大,如 LiF 由 液相变为固相时,其固相体积是液相体积的23%; 热导率低。

1.4 硝酸盐

已经在太阳能热发电系统有过验证的硝酸盐有 二元混合硝酸盐 Solar Salt(40 wt% KNO, 60 wt% NaNO₃) ,三元混合硝酸盐(40 wt% NaNO₂ ,7 wt% NaNO₃,53 wt% KNO₃) 和 HitecXL (48 wt% Ca $(NO_3)_2$, 7 wt% NaNO₃, 45 wt% KNO₃) $_{\circ}$ Solar Salt 的使用温度范围是 238 - 600 ℃ 亚硝酸混合物的使 用温度范围是 142 - 535 ℃, HitecXL 的使用温度范 围是 140 – 500 ℃。由于含有 NaNO₂, Hitec 在 455 – 500 ℃时缓慢分解为 NaNO₃、Na,O 和 N₂; 如果与空 气接触 Hitec 在 455 ℃以上时也会发生 NaNO,的氧 化反应 使得 Hitec 由于组份变化而熔点升高。近 年来 熔融盐介质的研究工作主要集中于采用新的 配方和添加剂 制备更低熔点和更高许用温度的新 型熔融盐。Raade 研制开发了多种组份的低熔点混 合硝酸盐^[8]: LiNO₃(8 wt%)、KNO₃(23 wt%)、 $NaNO_{3}(6 \text{ wt\%}) \ Ca(NO_{3})_{2}(19 \text{ wt\%}) \ CsNO_{3}(44)$ wt%)的共熔混合物使用温度范围 65 - 561 ℃;中山 大学通过静态熔融的方法制备了 Hitec^[9] 并在其中 加入 5 wt% 的添加剂 ,结果表明该添加剂保证了混 合熔盐在高温下的稳定性 使其最高使用温度由原 来的 535 ℃提高到 550 ℃ 降低了熔盐中 NO₂⁻含量 的损失。北京工业大学研制开发了多种组份的低熔 点混合硝酸盐^[10]: Ca(NO₃)₂(10 wt%)、KNO₃(60 -70 wt%) \NaNO₃(10 - 20 wt%) \NaNO₂(10 wt%) 的 共熔混合物 使用温度范围 130 - 620 ℃; Ca(NO₃), $(18 - 20 \text{ wt\%}) \text{NeNO}_3(50 - 55 \text{ wt\%}) \text{NeNO}_3(9 - 10)$ wt%)、LiNO₃(18-20 wt%)的共熔混合物使用温度 范围 90 - 600 ℃,继续添加约 10 wt% 的 Na, CO, 组 分 使用温度范围 110-620 ℃。

硝酸盐的腐蚀性低于氯化盐和碳酸盐。熔融盐 中的 Cl⁻ 对金属材料的腐蚀危害较大,因为 Cl⁻ 的 原子半径很小 活性很高 能够与金属物表面的钝化 膜中的阳离子结合生成可溶性的氯化物 从而发生 点腐蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀 而且点腐蚀和缝隙腐 蚀最终都将发展成为应力腐蚀形态 对设备直接构 成破坏性的腐蚀失效。即使是腐蚀性相对较小的

Solar Salt 在高温场合也要使用奥氏体或者双相不 锈钢来应对腐蚀破坏^[11] Solar Salt 对不同合金的腐 蚀性如表 2 所示^[12]。

表 2 Solar Salt 对不同合金的腐蚀性

Tab. 2 The corrosivity of Solar Salt on different alloys

合金名称	温度/℃	腐蚀速率/mm・a ⁻¹		
碳钢	460	0.120		
304 不锈钢	600	0.012		
316 不锈钢	600	0.007		
镍铬铁合金 Incoloy800	600	0.006		

2 熔融盐流动传热机理

目前,开展相关研究工作的机构主要是美国国 家太阳能实验室(SANDIA)、意大利新技术能源和 可持续经济发展局(ENEA)、中国科学院电工研究 所(图1)、北京工业大学、中山大学、东莞理工学院、 华南理工大学等。SANDIA 和 ENEA 的研究主要集 中于熔融盐系统运行可靠性相关问题^[13-14]:如何防 止冻堵、熔融盐管道排空、熔盐管道电伴热、熔融盐 在管道内冷充、熔融盐系统热效率等。针对熔融盐 管道内对流换热机理未有研究报道。



图 1 中国科学院电工研究所 100 kW 熔融盐室内测试平台

Fig. 1 100 kW molten salt test loop of IEECAS

中国科学院电工研究所李鑫等人分别就 100 kW 熔融盐吸热器的热性能^[15-17]、许用热流^[19]、熔 融盐在管道内填充^[20]、熔融盐在周向非均匀受热吸 热管内的流动传热与强化换热规律开展了研究工 作^[21-22]。得到了熔融盐吸热器动态性能测试方法、 吸热器优化设计与运行控制策略以及吸热管壁与管 内熔融盐温度分布规律。熔融盐在管内流动传热及 强化换热的研究结果显示,当 1×10^4 < 雷诺数 *Re* < 3.5×10^4 时,周向非均匀受热与周向均匀受热边界 条件对熔融盐在管内换热能力影响差异不大,通过 实验结果分析得到的努赛尔数 *Nu* - *test* 与数值计算 得到的努赛尔数 *Nu* - CFD、经验传热关联式 Dittus - Bolter(迪图斯 - 波尔特)计算得到的努赛尔数 *Nu* - DB 之间偏差在 ± 10% 内。证明可用 Dittus - Bolter 等经验传热学关联式对周向非均匀边界条件下 的管内传热性能进行计算,如图 2 所示。



图 2 周向非均匀受热吸热管内换热性能

Fig. 2 Heat transfer performance of molten salt in receiver tube with none-uniform heat flux

周向非均匀热流边界条件对金属管壁及近管壁 盐膜温度分布影响较大 图 3 对相同入口温度、相同 质量流量、相同热流密度的周向非均匀受热的光滑 吸热管与内插纽带强化换热管内的温度场做了对比 分析。可以看出 在光滑吸热管内 径向与圆周方向 温度梯度均存在较大温度梯度 ,管外壁与盐膜最大 温度梯度大于 100 ℃,在设计及运行控制时需要预 防熔融盐和不锈钢金属吸热管过热状况发生;使用 内插纽带强化换热可以有效改善周向非均匀受热条 件下管壁及盐膜温度梯度,管外壁与盐膜最大温度 梯度可降低到 50 ℃以内。

研究得到了周向非均匀受热吸热管壁温度分布 表达式为:

$$T_{s,\rho}(\theta) = \frac{q_{\max}r_{s,\rho}\ln\left(\frac{D_{s,\rho}}{D_{s,i}}\right)}{2\lambda_s}(1 - \cos\theta) + T_{f,\rho} + \frac{q_{\max}r_{s,\rho}}{0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}\lambda_f}(1 - \cos\theta)$$
(1)

式中: $T_{s,\rho}(\theta)$ —吸热管管外壁面温度分布 K; q_{max} — 加在吸热管表面的热流密度 ,W/m²; $T_{s,j}$ —吸热管 内壁面平均温度 ,K; $D_{s,\rho}$ —吸热管外直径 ,m; $r_{s,\rho}$ — 吸热管外半径 ,m; $D_{s,j}$ —吸热管内直径 ,也是水力 直径 $m_{\circ} \theta$ —圆心角 ,(°); λ_{s} —金属吸热管的导热 系数 ,W/(m • K); λ_{f} —熔融盐的导热系数 , W/(m•K) 。

9.50e+029.12e+02 8.75e+02 8.37e+02 7.99e+02 7.62e+02 7.24e+026.86e + 026.48e+026.11e+02 5.73e+02(a) 光滑吸热管 9.50e+02 9.12e+02 8.75e+02 8.37e+02 7.99e+02 7.62e+027.24e+026.86e + 026.48e + 026.11e+02 5.73e+02

(b) 内插纽带强化换热器

图 3 周向非均匀受热吸热管内熔融盐 及管壁温度分布



北京工业大学马重芳、吴玉庭等人分别以硝酸 锂和混合硝酸盐为工质,实验得到了不同工况下光 滑吸热管内充分发展湍流和过渡流通用无量纲准则 方程式^[23-25]。通过实验研究结果与经典传热学关 联式进行比较发现,熔融盐在管内强迫对流换热特 性仍然适用于 Sieder – Tate(单机流体强制对流换热 实验关联式简称齐德・泰勒关联式)方程,Petukhov 方程,Hausen 方程以及 Gnielinski 方程。该团队还 通过试验测定了周向为均匀受热的 3 种参数横纹管 内混合熔融盐的对流传热系数和流动阻力系数,拟 合得到了横纹管内换热量和阻力 2 个参数间的通用 无量纲准则关系式,并对横纹管的强化换热效果进 行了评价^[26]。通过实验研究测定了以熔融盐为工 质的横纹管内的传热系数。结果表明,当雷诺数 *Re* 相同时 横纹管的努赛尔数 *Nu* 要高于光滑管,且横 纹管的横纹槽节距为 9 的努赛尔数 *Nu* 在测试的横 纹管中最大(另两组横纹槽节距分别为 5 和 16)。

东莞理工大学杨晓西教授和中山大学丁静教授 等团队分析研究了高温熔融盐强化传热管传热与流 动特性^[27-28],得到了吸热器结构参数^[29]、管内雷诺 数 *Re* 和熔融盐普朗特数 *Pr* 对于螺旋槽管和横纹管 管内强化传热效果的影响^[30-31]。研究结果显示,采 用熔融盐作为传热蓄热工质,螺旋槽管和横纹管比 光滑管可以有效提高管内传热系数,且槽深增加有 利于强化换热。螺旋槽管与横纹管对熔融盐强化换 热倍数随着雷诺数 *Re* 数增加呈现缓慢下降趋势。

3 熔融盐蓄热系统

熔融盐蓄热系统目前有3种应用形式:双罐显 热蓄热系统、单罐斜温层显热蓄热系统和相变蓄热 系统。熔融盐双罐显热蓄热系统是当前太阳能热发 电系统中应用最广的大规模蓄热形式^[32],已经在 23座槽式、塔式太阳能热发电站中运行,典型电站 如表3所示。

双罐蓄热系统又可分为直接蓄热、与间接蓄热 两种形式。在双罐直接蓄热系统中,聚光集热系统 中传热介质与蓄热系统中的蓄热介质同为熔融盐, 图 4 为采用熔融盐双罐蓄热的塔式太阳能热发电电 站,电站运行最高温度可达 565 ℃。在双罐间接蓄 热槽式太阳能发电系统(如图 5 所示)中,导热油 A 作为一次换热工质,经导热油泵驱动,流过槽式集热 场,与真空集热管发生热量交换。被加热的高温导 热油流过一次换热器,导热油与熔融盐发生热量交 换,将熔融盐从低温加热到高温,并储存在高温熔融 盐罐中。由于受到聚光集热系统传热介质导热油最 高温度不超过 400 ℃的限制,即使蓄热介质为熔融

盐 蓄热系统的最高工作温度仅为 393 ℃。

表 3 具有典型熔融盐双罐蓄热系统的太阳能热发电站

电站名称	由計勾称	取火米刑	佐地公氏	茶坊社約	工作温	<u> </u> 度/℃	林苔ミナ
	家九天空	包然月顶	首次仍科	下限	上限	备热形式	
	Andasol1	槽式	A 导热油*	熔融盐	293	393	双罐间接蓄热
	Archimede	槽式	熔融盐	熔融盐	290	550	双罐直接蓄热
	Gemasolar	塔式	熔融盐	熔融盐	288	565	双罐直接蓄热

Tab. 3 Typical solar thermal power plant with two - tank molten salt storage system

* Dowtherm A 导热油是联苯 - 联苯醚混合物。



图 4 熔融盐双罐蓄热系统 Gemasolar 塔式 太阳能热发电站,西班牙

Fig. 4 Two-tank molten salt storage system of Gemasolar solar power tower plant Spain



图 5 槽式太阳能热发电站熔融盐 双罐间接蓄热系统

Fig. 5 Indirect two-tank molten salt storage system of solar parabolic trough power plant

目前,熔融盐双罐间接蓄热系统的成本为50-80 美元/(kW・h),而熔融盐双罐直接蓄热系统的 成本为30-50 美元/(kW・h)^[1]。双罐蓄热系统 对蓄热罐材料与蓄热介质熔融盐使用量大,蓄热系 统高温状态运行成本相对较高。为了降低双罐熔融 盐蓄热系统的投资成本,各国开展了单罐斜温层蓄 热系统研发。在单罐斜温层蓄热系统充放热过程 中,冷盐与热盐会相互接触,在接触区形成斜温层, 斜温层会在蓄热罐内上下移动。为了缩短斜温层的 距离 防止冷、热盐对流混合 ,一般会在蓄热罐内填 充固体材料来增加斜温层效应。Pacheco 等人针对 以熔融盐为蓄热介质的单罐斜温层蓄热系统进行了 理论模拟和实验分析^[33] 证明了熔融盐单罐斜温层 蓄热系统的可行性,可较双罐蓄热系统降低约35% 的投资成本。Yang Zhen 等人建立了适用不同蓄热 量的单罐熔融盐斜温层模型^[34-38] 对充放热效率进 行了分析,并与 Pacheco 等人研究结果进行对比验 证,提出了熔融盐单罐斜温层蓄热器的设计方 法^[33]。为了进一步提高系统蓄热能力,左远志等人 提出了一种相变蓄热和斜温层蓄热复合的新型混合 蓄热系统^[39],并建立了实验系统,对其蓄放热性能 进行了深入研究 从温度分布、蓄热量、蓄热能力、系 统熵产和蓄热有效性出发,多角度定义了单罐斜温 层蓄热系统的蓄热性能 比较全面的解释了蓄热器 的蓄热性能评价方法,计算得到了斜温层温度分布 规律 得出了系统热量随时间的变化规律。当相变 填充物具有较大的单位体积热容时,系统的最大蓄 热量也较大 斜温层厚度较小 ,蓄热有效性较大 ,但 是系统产生的熵产也较大,不可逆损失较大。当填 充物具有较大的导热系数时 斜温层厚度较大 系统 的熵产比较大,蓄热时间增加。沈向阳介绍了一个 带有6h设计蓄热容量、发电功率为55 MW的槽式 太阳能热发电站^[40],如果采用混合硝酸盐 HitecXL 作为传热蓄热工质 相比采用高温导热油 Therminol VP-1(也是联苯-联苯醚混合物),基于工作温度 的提高及泵功的减少 年净发电量可以提高 7.6%, 均一化发电成本可降低 2%。同等蓄热量前提下, 应用单罐斜温层蓄热,可比双罐蓄热系统减少投资

35% 左右,显示出熔融盐单罐斜温层蓄热技术在太阳能高温热利用中的优越性及应用前景。

4 结 论

熔融盐作为传热蓄热介质具有很多突出优点, 可以简化换热环节,提高系统运行温度,降低吸热、 蓄热设备的工作压力。国内外许多学者对熔融盐组 份、传热蓄热性能进行了广泛研究 使得熔融盐作为 传热蓄热介质的特性有所提高 推动了熔融盐技术 及产业的发展。熔融盐技术在太阳能热发电领域实 现了验证,可以显著提高系统运行温度和发电效率, 减少系统投资成本,展现了重大应用前景。目前使 用的混合熔融盐配方还存在熔点高、许用温度上限 偏低等问题,还不能完全满足太阳能热发电的需求。 关于混合熔融盐宏观性能与熔融盐种类、组份、混合 方法等还缺乏系统深入的研究,理论体系尚未完全 建立。此外,有必要针对新型低熔点熔融盐的稳定 性、流动传热特性开展研究工作与实验验证。最后, 对于熔融盐单罐斜温层及相变蓄热设备开发与系统 验证也是熔融盐蓄热技术下一步工作的重点。

参考文献:

 [1] 王志峰.太阳能热发电站设计[M].北京:化学工业出版 社 2014.
 WANG Zhi-feng. Solar thermal power plant design [M]. Beijing,

Chemical Industry Press 2014

- [2] 杨敏林 杨晓西 林汝谋 等. 太阳能热发电技术与系统[J]. 热能动力工程. 2008 23(3): 221 225.
 YANG Min-lin, YANG Xiao-xi, LIN Ru-mou et al. Thermal power generation technologies and their systems. [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2008 23(3): 221 225
- [3] 崔海亭 杨 锋. 蓄热技术及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版 社 2004.

CUI Hai-ting ,YANG Feng. Technologies and application of thermal storage [M]. Beijing ,Chemical Industry Press 2004.

- [4] 路 阳 彭国伟,王智平,等. 熔融盐相变储热材料的研究现状 与发展趋势[J]. 材料导报 A: 综述篇 2011 25(11):38-43.
 LU Yang, PENG Guo-wei, WANG Zhi-ping et al. A review on research for molten salt as a phase change material [J]. Materials Review 2011 25(11):38-43.
- [5] 张寅平 胡汉平 孔祥冬 等.相变贮能理论和应用[M].合肥: 科技技术大学出版社,1996.

ZHANG Yan-ping ,HU Han-ping ,KONG Xiang-dong et al. Theory and application of phase change energy storage [M]. Hefei ,Science and technology of China press ,1996.

[6] 廖 敏,丁 静,魏小兰,等.高温碳酸熔盐的制备及传热蓄热

性质[J]. 无机盐工业. 2008 AO(10):15-17.

LIAO Min ,DING Jing ,WEI Xiao-lan ,et al. Preparation and heat transfer and thermal storage property of high-temperature carbonate molten salt[J]. Inorganic Chemicals Industry 2008 AO(10): 15 – 17.

- [7] 孙李平,吴玉庭,马重芳.太阳能高温蓄热熔融盐优选的实验研究[J].太阳能学报.2008 29 (9):1092-1095.
 SUN Li-ping, WU Yu-ting, MA Chong-fang. Experimental study on optimization of molten satl for solar high temperature heat storage [J]. ActaEnergiaeSolaris Sinica 2008 29(8):1092-1095.
- [8] RaadeJW , Padowitz D. Development of molten salt heat transfer fluid with low melting point and high thermal stability [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME. 2011 ,133 (3):1-6.
- [9] 彭 强 魏小兰,丁 静 等. 多元混合熔融盐的制备及性能研究[J]. 太阳能学报 2009 30 (12):1621-1626. PENG Qiang, WEI Xiao-Jan, DING Jing, et al. Research on the preparation and properties of multi-component molten salts [J]. Ac-taEnergiae Solaris Sinica 2009 30 (12):1621-1626.
- [10] 马重芳,吴玉庭,任 楠.低熔点混合熔盐传热蓄热介质[P]. 中华人民共和国: 201310000651.6 2013.
 MA Chong-fang,WU Yu-ting,REN Nan. The low melting point of mixed molten salt heat transfer and storage medium[P]. The People's Republic of China: 201310000651.6 2013.
- [11] Bradshaw R W Carling R W. A review of the chemical and physical properties of molten alkali nitrate salts and their effect on materials used for solar central receiver [R]. Sandia National Laboratories, Livermore SAND87 – 8005 ,1987.
- [12] 常春,肖澜,王红梅,等. 储热材料在太阳能热发电领域中的应用与展望[J]. 新材料产业 2012 7:12-19. CHANG Chun,XIAO Lan,WANG Hong-mei, et al. Application and aspects of thermal storage materials in solar thermal power field[J]. Advanced Materials Industry 2012(7):12-19.
- [13] Pacheco J E. Assessment of molten salt solar central receiver freeze-up and recovery events [J]. Solar Engineering ,1996 85 – 90.
- [14] Fritz Z ,Rodrigo M Javier G B ,et al. Object-oriented modeling for the transient performance simulation of parabolic trough collectors using molten salt as heat transfer fluid [J]. Solar Energy , 2013 95: 192 - 215.
- [15] Li X ,Kong W Q ,Wang Z F et al. Thermal model and thermo dynamic performance of molten salt cavity receiver [J]. Renewable Energy 2010 35(5):981-988.
- [16] Zhang Q Q, Li X, Chang C, Wang Z F, Liu H. An experimental study: Thermal performance of molten salt cavity receivers [J]. Applied Thermal Engineering 2013 50: 334 – 341.
- [17] 王建楠 李 鑫 常 春.太阳能塔式热发电站熔融盐吸热器 过热故障的影响因素分析[J].中国电机工程学报 2010 30 (29):107-114.

WANG Jian-nan ,LI Xin ,CHANG Chun. Analysis of the Influence Factors on the Overheat of Molten Salt Receiver inSolar Tower Power Plants [J]. Proceedings of the CSEE 2010 30(29):107 – 114.

[18] 张强强,李 鑫,常 春,等. 多云气象条件下熔融盐腔式吸热器的热性能分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(8):
 1291-1296.
 ZHANG Qiang-qiang, LI Xin, CHANG Chun, et al. Thermal Per-

formance Analysis of Molten Salt Cavity Receivers Under Cloudy Conditions [J]. Proceedings of the CSEE ,2014 ,34 (8): 1291 – 1296.

- [19] Liao Z R ,Li X ,Xu X ,Chang C ,Wang ZF. Allowable flux density on a solar central receiver [J]. Renewable Energy 2014 62:747 -753.
- [20] Liao Z R ,Li X ,Wang Z F ,Chang C ,Xu X. Phase change of molten salt during the cold filling of a receiver tube [J]. Solar Energy 2014 ,101:254 – 264.
- [21] 常春 涨强强 李鑫.周向非均匀热流边界条件下太阳能高温吸热管内湍流传热特性研究[J].中国电机工程学报,2012,32(17):104-109.
 CHANG Chun, ZHANG Qiang-qiang, LI Xin. Turbulent heat

transfer characteristics in solar thermal absorber tubes with circumferentially non-uniform heat flux boundary condition [J]. Proceedings of the CSEE 2012 32(17):104 – 109.

- [22] 常春,李石栋,李鑫,等.周向非均匀热流边界条件下混 合熔融盐在太阳能高温吸热管内的强化换热研究[J].中国 电机工程学报 2014 34(20):3341-3346.
 CHANG Chun, LI Shi-dong, LI Xin, et al. Enhanced Heat Transfer Characteristics of Molten Salt in Solar Thermal Absorber TubesWith Circumferentially Non-uniform Heat Flux Boundary Condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (20): 3341 - 3346.
- [23] Wu Y T ,Liu B ,Ma C F ,Guo H. Convective heat transfer in the laminar-turbulent transition region with molten salt in a circular tube [J]. Experimental Thermal and Fluid Science ,2009 ,33: 1128 - 1132.
- [24] Liu B ,Wu Y T ,Ma C F. Turbulent Convective Heat Transfer with Molten Salt in a Circular Pipe [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer 2009 36(9): 912 – 916.
- [25] Wu Y T Chen C Liu B ,Ma C F. Investigation on forced convective heat transfer of molten salts in circular tubes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer ,2012 ,39 (10): 1550-1555.
- [26] Chen C ,Wu Y T ,Wang S T ,Ma C F. Experimental Investigation on Enhanced Heat Transfer in Transversally Corrugated Tube With Molten Salt [J]. Experimental Thermal and Fluid Science , 2013 47: 108 – 116.
- [27] 沈向阳 涨奇淄,陆建峰,等. 熔盐吸热管非稳态对流换热特性[J]. 化工学报 2012 63(S1): 36-40. SHEN Xiang-yang ZHANG Qi-zi, LU Jian-feng ,et al. Unsteady convective heat transfer performances of molten salt in receiver tube [J]. CIESC Journal 2012 63(S1): 36-40.
- [28] Yang XP ,Yang XX ,Ding J ,Shao YY ,Fan HB. Numerical simulation study on the heat transfer characteristics of the tube receiver

of the solar thermal power tower [J]. Applied Energy ,2012 ,90: 142 – 147.

- [29] 杨小平 杨晓西,丁 静,等.高温熔盐吸热器的传热研究和系统设计[J].节能技术 2012 30(1): 3-6.
 YANG Xiao-ping,YANG Xiao-xi, DING Jing, et al. The study on the heat transfer of the molten salt receiver and system design [J]. Energy Conservation Technology 2012 30(1): 3-6.
- [30] 沈向阳 陆建峰,丁 静,等. 熔盐在螺旋槽管和横纹管内强 化传热特性[J]. 工程热物理学报 2013 34(6):1149-1152. SHEN Xiang-yang ,LU Jian-feng ,DING Jing ,et al. Heat transfer enhancement of molten salt in spirally corrugated tube and transversely corrugated tube [J]. Journal of engineering thermophysics 2013 34(6):1149-1152.
- [31] Lu J F Shen X Y ,Ding J et al. Transition and turbulent convective heat transfer of molten salt in spirally grooved tube [J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2013 47(5):180-185.
- [32] Herrmann U ,Kelly B ,Price H. Two-tank molten saltstorage for parabolic trough solar power plants [J]. Energy ,2004 ,29 (5 – 6): 883 – 893.
- [33] Pacheco J E Showalter S K Kolb W J. Development of a molten-salt thermocline thermal storage system forparabolic trough plants
 [J]. Journal of Solar Energy Engineering ,2002 ,124 (2): 153 159.
- [34] Yang Z ,Garimella S V. Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline [J]. Solar Energy 2010 84: 974 - 985.
- [35] Yang Z, Garimella S V. Molten-saltthermalenergystorageinthermoclinesunderdifferentenvironmentalboundaryconditions [J]. AppliedEnergy 2010 &7: 3322 - 3329.
- [36] Scott F ,Yang Z ,Garimella S V. Anintegratedthermalandmechanicalinvestigationofmolten-saltthermocline energystorage [J]. AppliedEnergy 2011 88: 2098 – 2105.
- [37] Yang Z ,Garimella S V. Cyclicoperationofmolten-saltthermalenergystorageinthermoclines forsolarpowerplants [J]. AppliedEnergy, 2013 ,103: 256 – 265.
- [38] Xu C ,Wang Z ,He Y ,et al. Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of apacked-bed molten salt thermocline thermal storage system [J]. Applied Energy ,2012 ,92 (1):65-75
- [39] 左远志,李熙亚. 熔融盐斜温层混合蓄热单罐系统及其实验研究[J]. 化工进展 2007 26(7):1018-1022. ZUO Yuan-zhi, LI Xi-ya. Scheme and experiments of a molten-salt hybrid thermocline thermal storage system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress 2007 26(7):1018-1022.
- [40] 沈向阳,丁 静,彭 强,等.高温熔盐在太阳能热发电中的应用[J].广东化工 2007,11(34):49-53.
 SHEN Xiang-yang ,DING Jing ,PENG Qiang et al. Application of high temperature molten salt to solar thermal power [J]. Guang-dong Chemical Industry 2007,11(34):49-53.

(陈 滨 编辑)

太阳能热发电系统中熔融盐技术的研究与应用 = Study and Applications of the Melted Salt Technologies in Concentrating Solar Power Generation Systems [刊 汉]XU Hai-wei (Clean Energy Technology Research Institute Co. Ltd. , China Huaneng Group , Beijing , China , Post Code: 102209) , CHANG Chun , YU Qiang (Chinese Academy of Sciences Key Laboratory on Solar Energy Heat Utilization and Photovoltaic Systems , Electrical Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30(5). - 659 - 665

Melted salts and their heat transfer and accumulation technologies are regarded as an important means to further enhance the solar energy heat power generation efficiency. A contrast was made of the advances in the study of the composition characteristics and latest low melting points of several main salts such as carbonate salt and nitrate salts etc. The emphasis was put on an exploratory study of the advances and applications of the melted salt heat transfer and accumulation technologies in both domestics and abroad and a melted salt heat transfer calculation correlation formula was given. It is believed that to use the melted salt technologies can enhance the operating parameter of the system to over 540 °C and heighten the power generation efficiency and heat accumulation efficiency by a large margin with the cost of power generation being reduced by 2% when compared with that of any power plant using heat conduction oil as the working medium. Therefore the tower type solar energy heat power generation systems adopting the melted salt technologies will have a wide application prospect. The focus for the future studies will be to continue developing and improving the low melting point melted salt formula ,studying the melted salt intensified heat exchange and accumulation and enhancing the reliability of heat accumulation systems. **Key words**: melted salt solar energy heat power generation low melting point heat transfer heat accumulation

板式换热器内 Cu-水纳米流体流动和传热特性数值模拟 = Numerical Simulation of the Flow and Heat Transfer Characteristics of a Cu-water Nano-fluid Inside a Plate Type Heat Exchanger [刊,汉]SUN Bin, ZUO Rui-liang ZHANG Guan-nan (College of Energy Source and Power Engineering Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015, 30 (5). – 666 – 671

As a cold fluid ,the Cu-water nano-fluid was applied in a plate type heat exchanger system and a large-scale universal CFD (computational fluid dynamics) software was used to perform a three dimensional numerical simulation of a Cu-water nano-fluid plate type heat exchange system at various concentrations and obtain the distribution in a space