

Research Progress of the Application and Properties of Molten Salt to Solar Thermal Power

Lijuan Wang^{1,2*}, Quanying Yan^{1,2}

¹Beijing Engineering Research Center for Efficient and Integrated Utilization of Building Energy, Beijing

²Beijing Municipality Key Lab of Heating, Gas Supply, Ventilating and Air Conditioning Engineering, Beijing

Email: wanglijuan0920@126.com

Received: Apr. 18th, 2015; accepted: May 5th, 2015; published: May 12th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The molten salt heat storage material with low viscosity, good fluidity, low system pressure, high specific heat capacity, strong heat storage capacity, low cost and many other advantages, has become a good choice for solar heat storage medium. This paper introduced the present situation of domestic and foreign researches about the types and thermal properties of molten salt in detail. The application prospect of molten salt for storing heat was prospected.

Keywords

Solar Thermal Power, Molten Salt, Heat Storage Material, Thermal Properties

熔融盐在太阳能热发电中的应用及性能研究现状

王立娟^{1,2*}, 闫全英^{1,2}

¹北京市建筑能源高效综合利用工程技术研究中心, 北京

²北京市供热供燃气通风及空调重点实验室, 北京

Email: wanglijuan0920@126.com

*通讯作者。

收稿日期：2015年4月18日；录用日期：2015年5月5日；发布日期：2015年5月12日

摘要

熔盐储热材料具有粘度低，流动性能好，系统压力小，比热容高，蓄热能力强，成本较低等诸多优点，已成为太阳能高温传热蓄热介质的良好选择。本文从熔融盐的种类和热物性研究方面就国内外的研究现状做了详细介绍，展望了熔融盐作为储热材料的应用前景。

关键词

太阳能热发电，熔融盐，储热材料，热物性

1. 引言

能源是一个国家经济发展、社会进步的动力，是人类生存和发展的物质基础。其对经济社会发展的制约日益突出，对赖以生存的自然环境的影响也越来越大，然而，全球传统能源资源却面临严重危机。2014年6月，BP发布了《2014年世界能源统计报告》[1]。报告指出，2013年全球经济维持低速增长，全球能源消费增长速度有所增加。2013年全球一次能源消费总量增长2.3%，石油依然是世界主导性燃料，占全球一次能源消费量的32.9%。其中，2013年中国一次能源消费为2852.4百万吨油当量，比2012年增加4.7%，占世界一次能源消费的22.4%。2013年中国发电量为5361.6十亿千瓦时，比2012年增加7.8%，占世界发电量的23.2%。2013年中国CO₂排放量为9524.3百万吨，比2012年增加4.2%，占世界CO₂排放量的27.1%。

能源的过度消费带来的环境污染，尤其是雾霾问题的出现，已经对我国过渡依赖常规能源发展经济提出了挑战。发展可再生能源、清洁能源是缓解我国能源紧缺和环境污染的战略举措。太阳能因其储量的无限性、利用的清洁性等特点，具有良好的发展前景。我国的太阳能资源非常丰富，特别是青藏高原西部和南部的太阳能资源尤为丰富，位居世界第二位。

太阳能发电分为光热发电和光伏发电，两者相比较而言，太阳能光伏发电只能与蓄电结合，蓄电成本太高，无法大规模蓄能，光伏发电不稳定，对电网冲击大；太阳能热发电可与大规模熔盐蓄热相结合，可提供稳定的和符合用户要求的高品质电能。因此，阳光+熔盐是人类能源问题的最终解决方案。本文将从熔融盐的种类和热物性研究方面就国内外的研究现状做详细介绍，并展望熔融盐作为储热材料的应用前景。

2. 熔盐高温传热蓄热在太阳能热发电中的应用

目前对太阳能热发电领域中高温熔盐的研究大多倾向于将其用作显热储热材料。欧美等发达国家已经对聚光太阳能热发电进行了大量的研究，并有一些示范电站或商业化电站[2]。太阳能热发电系统主要有三大类型[3]：槽式系统、塔式系统、碟式系统。

在国外大规模应用的熔盐一般是Solar salt (40% KNO₃-60% NaNO₃)、Hitec (40% NaNO₂-7% NaNO₃-53% KNO₃)、HitecXL (48% Ca(NO₃)₂-45% KNO₃-7% NaNO₃)等[4]。1981年，在意大利建成Eurelios塔式太阳能热电站[5]，1983年，在西班牙建好的CESA-1电站[5]，这两个电站均采用Hitec盐作为传热蓄热介质，为熔盐蓄热提供了大量宝贵的资料，而第一个直接用来加热熔融盐的塔式电站系统是法国的THEMIS电站和美国的MSEE/Cat B试验装置[5]。1984年，在美国Albuquerque建立了750 kW的熔盐

发电试验装置(MESS) [6], 其传热和蓄热介质为硝酸盐; 1996年, 在美国加利福尼亚的 Mojave 建成 Solar Two 太阳能试验电站[7]-[10], 该电站采用 Solar Salt 作为传热和蓄热介质; 2006年, 在西班牙 Granada 省内建造了 50 MW 的槽式聚光太阳能热发电系统 Andasol1, 及后期建成并投入使用的 Andasol2 和 Andasol3, 三者均采用 Solar Salt 熔盐作为蓄热介质; 2008年美国启动的太阳能热发电项目中, 有8项都和熔融盐有关, 并有一个子项目是投入150万美元研发熔点更低、沸点更高的新型熔融盐。

美国华达州完成110 MW 熔盐储能太阳能发电[11], 该项目2011年9月开工, 先前预计2013年正式投入使用。聚光塔高达165米, 由540英尺面积反光镜提供热效率转换, 而工程熔盐存储热量约10~15小时, 保证夜间也可正常发电。Antoni Gil 等[12]对太阳能热电厂高温蓄热技术进展进行了详细的介绍, 将蓄热系统分为两罐熔盐法, 两罐合成油法, 单罐温度分层法, 带有填充材料的单罐温度分层法等, 并对世界各地最主要的太阳能发电厂所采用的技术和蓄热材料进行了分类。

此外, 在 Hitec 盐的基础上, 人们还发展了一种所谓的商业化可售盐 HitecXL, 其传热蓄热性能已经在 PSA 和 Themis 电站中得到了分析。虽然熔盐已成为太阳能高温传热蓄热介质的良好选择, 但广泛应用于太阳能热发电系统的熔盐主要还是 Solar Salt 和 Hitec 盐。

在国内太阳能热发电示范工程主要有浙江中控10 MW 塔式太阳能示范电站、益科博1 MW 太阳能示范电站、华能南山0.5 MW 线性菲涅尔系统以及八达岭延庆塔式电站等, 其中延庆电站在塔式热发电的核心技术方面, 完成了基于能量梯级利用的塔式太阳能热发电站总体设计技术, 解决了太阳间歇性对发电系统稳定性的影响、常规储热的高热损, 在高精度、低成本定日镜研制、过热蒸汽吸热器设计技术、太阳能塔式热发电站集中控制系统、太阳能热发电实验平台方面也取得了突破。

我国首座太阳能光热发电高温熔盐储能系统运行成功[13]: 2013年8月, 中国第一座高温熔融盐储能系统在太阳宝公司建成, 储热达20 MWh。自2013年11月份开始, 熔融盐化盐系统开始工作, 经过半个多月的时间, 400多度的熔融盐全部融化进入系统, 经过3个多月的多次运行与调试, 完全达到设计标准。进入2014年3月份以来, 根据公司研发中心的要求, 熔盐温度再次提升至550度, 经过20多天的运行调试, 整个系统运行稳健, 各项指标正常。该项目[14]的成功运行, 填补了国内空白, 标志着中国太阳能光热发电已经进入熔融盐储能时代, 中国已经成为少数几个掌握高温熔融盐储能技术的国家之一。太阳宝作为最早介入太阳能光热发电高温熔盐储能系统研发生产的领军企业, 将继续推动和引领我国太阳能热发电高温熔融盐储能的商业化发展趋势。

3. 太阳能高温蓄热介质

太阳能高温传热蓄热技术是太阳能热发电系统中的关键核心技术, 因此, 选择合适的高温传热蓄热介质就显得尤为重要。近些年来, 熔盐由于液体温度范围宽, 粘度低, 流动性能好, 蒸气压小, 对管路承压能力要求低, 相对密度大, 比热容高, 蓄热能力强, 成本较低等诸多优点, 已成为太阳能高温传热蓄热介质的良好选择。表1给出了熔盐以及其他工质作为传热蓄热介质的优缺点[14]。

要使太阳能能够持续稳定的被利用, 就必须很好的解决蓄能问题, 掌握太阳能高温蓄热技术, 是太阳能利用的薄弱环节和亟待解决的关键问题。熔盐代替导热油是解决热工水力学问题的根本技术途径。下面介绍几种常见的熔融盐[15]。

碳酸盐: 碳酸盐的价格较低, 相变潜热高, 腐蚀性小, 比热和密度大, 具有良好的传热和蓄热能力, 能够满足太阳能热发电高温传热蓄热的要求。 K_2CO_3 是无色单斜晶体, 熔点为 $891^\circ C$; Na_2CO_3 在常温下是白色粉末, 熔点为 $854^\circ C$ 。两者价格低廉、热稳定性比较好, 是碳酸盐材料的首选。59 mol% Na_2CO_3 -41 mol% K_2CO_3 混合熔盐最低共熔温度 $710^\circ C$, 比热容约为 $0.92 J/(g \cdot ^\circ C)$, 相变潜热约为 $364 J/g$, 在低于 $830^\circ C$ 时性质稳定。在 $400^\circ C \sim 850^\circ C$ 的高温温度段, 碳酸盐具有很大的优势, 但是碳酸盐的熔点较高且液态碳

Table 1. Advantages and disadvantages of several kinds of heat transfer medium
表 1. 几种传热工质的优缺点

传热工质	优点	缺点
水/水蒸气	经济方便、可直接带动汽轮机，省去了中间换热环节	系统压力大(10 MPa 以上)，蒸汽传热能力差，容易发生烧毁事故
导热油	流动性好，凝固点低，传热性能较好	价格贵、使用寿命短(3~5 年)、使用温度低、泄露易着火有污染，压力高(10 bar 左右)
液态金属	流动性好、传热能力强、使用温度高且温度范围广	价格昂贵、腐蚀性强，易泄露、易着火甚至爆炸、安全性能差
热空气	经济方便、能够直接带动空气轮机、使用温度可达千度以上	传热能力差，热容小，散热造成温度快速下降，高温难以维持
熔盐	传热无相变，传热均匀稳定，传热性能好、系统压力小、使用温度高、价格低、安全可靠	容易凝固冻堵管路

酸盐的粘度较大，有些碳酸盐容易分解，一定程度上限制了其规模化应用。

氟盐：氟盐主要为碱金属或碱土金属氟化物，及某些其他金属的难溶氟化物等，它们通常具有很高的熔点、较小的粘度及很大的熔融热，属高温型储热材料。氟盐作为蓄热工质时，一般为几种氟化物复合形成低共熔物，来调整其相变温度及储热量，如当 $\text{NaF}:\text{CaF}_2:\text{MgF}_2 = 65:23:12$ 时，相变温度为 745°C 。氟盐与金属容器材料的相容性也比较好的。氟化物作为高温相变材料时有两个严重的缺点：一是由液相转变为固相时有较大的体积收缩，如 LiF 高达 23%；二是热导率低。这两个缺点导致氟盐传热蓄热时容易出现“热松脱”(Thermal Ratcheting)和“热斑”(Thermal Spots)现象。

硝酸盐：硝酸盐突出的优点是价格低廉、腐蚀性较小及在 50°C 以下不会分解。缺点则是使用温度偏低(最高使用温度不超过 60°C)，相变潜热较小(只有 $20\sim 30 \text{ kcal/kg}$)，且热导率低(仅为 $0.7 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$)，因此使用时易发生局部过热。

氯盐：氯盐种类繁多，价格通常也比较低廉，可以根据需要制备成不同熔点的混合熔盐，而且相变潜热比较大，液态粘度小，还具备良好的热稳定性，所以很适合作为高温传热蓄热材料，缺点是高温腐蚀性非常强。

4. 高温熔盐的热物性研究现状

熔融盐热物性是熔融盐蓄热系统设计计算的基础数据，也是配制和筛选性能优良传热蓄热熔盐配方的主要依据。近年来，国内外对其进行了大量的研究。

在国外，美国橡树岭国家实验室对各种熔融盐的理化特性以及其与结构材料的相容性进行了深入研究[16]；数个日本公司与美国公司及美国威斯康星大学对包括 LiF-NaF-KF 、 LiF-BeF_2 、 KCl-MgCl_2 在内的几种熔融盐的理化特性进行了深入研究[17]；美国 Sandia National Laboratory 实验室[18]一直致力于研究混合熔盐的物性和开发新型低熔点混合熔盐，为熔盐在太阳能热发电系统中的应用提供了大量的宝贵资料。

Petri Randy J 等[19] [20]给出了碳酸熔盐体系的熔点、相变潜热、价格等数据，并从整个太阳能集热系统的试验研究、成本预算方面进行了深入探讨，认为碳酸熔盐作为蓄热材料具有一定可行性。Araki 等[21]对碳酸熔融盐的导热性能进行了研究。Kourkova L 等[22]拟合了 Li_2CO_3 在 $303.15\sim 563.15 \text{ K}$ 的比热曲线。

氟化盐也日益成为研究的热点之一，80.5%氟化锂 - 19.5%氟化钙(摩尔百分比)是目前高温熔盐相变采用较多的材料，美国自由号空间站 CBC 装置选用了该种蓄热介质。D. F. Williams 等[23]人对氟化盐作

为传热介质做了研究,得到 LiF-NaF-KF(46.5-11.5-42, mol%),其熔点为 454°C,高温条件下热稳定性好。他们还在温度为 1100°C 的条件下测量了氟化盐对金属的腐蚀情况,得到了 LiF 的腐蚀性最小,NaF 和 KF 的腐蚀性相当的结论。

Sandia National Laboratories [18]开发了一种新型混合硝酸盐,其熔点降到 100°C 以下。关于三元硝酸盐 Hitec,由于具有更低的熔点(142°C)而被广泛应用在太阳能热发电传热蓄热系统中。该盐在同样的压力下拥有更高的操作温度,更低的蒸气压,其导热系数是有机介质的两倍。此外,高温下该盐粘度接近水在常温时的粘度,适合在太阳能热发电、化工处理、金属处理、油裂解等方面用作传热蓄热介质[24][25]。然而不幸的是,该盐在高温有氧气氛下并不稳定。此外,Takahashi 等[26]人利用 DSC 对 LiNO₃, NaNO₃ 和 KNO₃ 的比热和潜热进行了测量,并且给出了比热的多项式拟合方程。Tufeu 等[27]人利用同心圆柱法对硝酸盐(NaNO₃, KNO₃, NaNO₂)的纯净物和混合物的导热系数分别在一个大气压条件下进行了测量。Nunes 等人采用多种方法对混合熔盐的粘度进行了研究。

由于氯化盐具有很强的腐蚀性,国外对其的研究非常少,缺少一些基本热物性数据。

在我国,北京工业大学马重芳教授、吴玉庭教授的团队配制了 130 多种混合熔盐配方,特别是配制出了熔点在 100°C 左右的低熔点熔盐,其最高使用温度超过 600°C [28]-[30]。该团队测定了 130 多种混合熔盐的比热容、密度、熔点、沸点(分解温度)、熔化潜热等热物性数据,揭示了熔盐组分和温度对混合熔盐热物性的影响机理,并获得了这些物性参数与温度的试验关联式。

中山大学丁静教授领导的课题组在新型混合盐的配制、提高熔盐分解温度等方面做了大量研究工作,他们成功研究出了多种添加剂,可以使二元混合熔盐熔点大幅度降低的同时不改变混合熔盐的热稳定性,甚至还能够进一步提高混合熔盐的最高使用温度,还研究了碳酸盐和氯化物的制备及传热蓄热性质[31]-[33]。

任楠等[34][35]按照不同混合比例配制了 36 种三元混合碳酸盐(碳酸钾-碳酸锂-碳酸钠)。采用差示扫描量热法和热重法测量了混合熔盐的熔点、分解温度和比热容,并拟合了比热容与温度的函数关系式。并在 Solar Salt 的基础上,通过改变组分配比和添加两种添加剂对 Solar Salt 的物性进行改性和优化,得到了一种新型低熔点混合熔盐。对混合熔盐潜热、显热蓄热能力和经济成本进行了估算,给出了性能优良,成本低廉的配比;程晓敏等[36]研究了以 K₂CO₃-Na₂CO₃-Li₂CO₃为基础体系, BaCO₃和 SrCO₃两种盐作为添加剂的四元碳酸盐的热物性,对其储热能力进行对比分析,得到熔点低、分解点高、相变潜热大的四元混合碳酸盐。为熔盐相变材料在中高温储热领域的应用提供了依据。

杜威[37]选取了四种常见的氟盐(LiF、NaF、KF、MgF₂)对 59% mol Na₂CO₃-41% mol K₂CO₃混合熔盐进行添加改性,用静态熔融法制备样品,用 DSC 研究其熔点、相变潜热和偏析/凝固温度等,并研究其在 800°C 高温下对 304、316L 两种常见不锈钢的腐蚀性。

陈永昌等[38]利用研制的高温黏度测定仪对几种高温熔盐的黏度-温度特性进行了实验研究,证明了研制高温熔盐黏度仪及测量方法的可靠性。并对 HITEC 熔盐进行改性研究,得到两种新高温熔盐并测定得到了黏度-温度特性曲线。且经过改性后的高温熔盐黏度显著降低,有利于降低熔盐传热管路的阻力。

刘斌等[39]测量了四种不锈钢金属在混合氯化熔盐中的腐蚀情况,对腐蚀结果进行了分析,并与硝酸盐的腐蚀结果进行了比较,为进一步选择熔盐和研究熔盐对流换热特性打下了基础。胡宝华等[40]以氯化物为原料配置了多种混合熔盐,并通过热物性表征得出氯化物的混合熔盐具有较低的熔点,合适的潜热值及高温下良好的热稳定性的特点,为氯化物熔盐在太阳能高温利用中的使用提供了宝贵数据。

目前,关于熔盐的研究,基本是将多种熔盐按照一定的配比混合使用可以形成多种新型混合共晶熔盐,这些混合熔盐可以根据成分比的不同获得各种熔点和温度使用区的熔盐工质,可以很好地

避免硝酸盐使用温度低、氯化盐熔点温度高等缺点，同时保留熔融盐好的热稳定性和化学稳定性、低饱和蒸汽压、大的比热容等优点。

5. 结论与展望

近年来，国内外对熔融盐的研究基本集中在熔融盐的热物性研究及其测量方法，按不同比例混合后的混合熔盐性能和加入不同添加剂后热物性变化情况上。由于熔融盐具有使用温度较高、热稳定性好、比热容高、对流传热系数高、粘度低、饱和蒸汽压低、价格低等“四高三低”的优势，熔融盐作为一种性能优良的高温传热蓄热介质，在太阳能热发电、核电等高温传热蓄热领域具有非常重要的应用前景，具有很大的研究意义。

基金项目

北京市自然科学基金(3122012)，能源与动力工程专业建设项目。

参考文献 (References)

- [1] BP 公司 (2014) 2014 年 BP 世界能源统计年鉴. BP 公司.
- [2] Fuel from the Sky: Solar Power's Potential for Western Energy Supply (NREL/BK-550-32160).
- [3] 陈昕, 范海涛 (2012) 太阳能光热发电技术发展现状. *能源与环境*, **1**, 90-92.
- [4] 魏高升, 邢丽婧, 杜小泽, 杨勇平 (2014) 太阳能热发电系统相变储热材料选择及研发现状. *中国电机工程学报*, **3**, 325-331.
- [5] Herrmann, U. (2002) Survey of thermal energy storage for parabolic trough power plants. *Journal of Solar Engineering*, **124**, 145-152.
- [6] Doug, B. and John, W. (2005) Testing of thermo cline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough power plants. *Journal of Solar energy Engineering*, **127**, 109-116.
- [7] Kelly, B.D. (2000) Lesson learned, project history, and operating experience of the solar two project. Sandia National Laboratories Report, SAND2000-2598, November 2000.
- [8] Zavoico, A.B. (1994) Solar power tower design basic document. Sandia National Laboratories.
- [9] Pacheco, J., Bradshaw, R., Dawson, D., et al. (2002) Final test and evaluation results from the solar two project. Solar Thermal Technol. Dept., Sandia Nat. Labs., NM, Tech. Rep. SAND2002-0120.
- [10] Reilly, H. and Kolb, G. (2001) Final evaluation of molten-salt power towers including results of the Solar Two project. Solar Thermal Technol. Dept., Sandia Nat. Labs., NM, Tech. Rep. SAND2001-3674.
- [11] CSPTIME 太阳能热发电网. <http://www.csptime.com/portal.php>
- [12] Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., et al. (2010) State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part I-Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 31-55.
- [13] 中国电力电子产业网. <http://www.china5e.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=13&id=867950>.
- [14] 郭洁 (2014) 太阳宝: 率先开启熔融盐储能发电新篇章. *国际融资*, **7**, 20-21.
- [15] 路阳, 彭国伟, 王智平, 王克振, 马榕彬 (2011) 熔融盐相变储热材料的研究现状及发展趋势. *材料导报*, **21**, 38-42.
- [16] Williams, D.F., Toth, L.M. and Clano, K.T. (2006) Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high-temperature reactor. ORNL/TM-2006/12, USA.
- [17] Soha, M.S., Ebner, M.A., Sabarwall, P., Sharpe, P. (2010) Engineering database of liquid salt thermophysical and thermochemical properties. Idaho National Laboratory Report, No. INL/EXT-10-18297, USA.
- [18] Bradshaw, R.W. and Siegel, N.P. (2008) Molten nitrate salt development for thermal energy storage in parabolic trough solar power systems. *Proceedings of ES2008, Energy Sustainability 2008*, Jacksonville, 10-14 August 2008, 55-67.
- [19] Petri, R., Claar, T.D. and Marianowski, L.G. (1979) Evaluation of molten carbonates as latent heat thermal energy storage materials. *Proceeding of the Intersociety Energy Conversation Engineering Conference*, Boston, 5-10 August 1979, 487-493.

- [20] Petri, R. (1983) High-temperature salt-ceramic thermal storage phase-change media. *Proceeding of the Intersociety Energy Conversation Engineering Conference*, Orlando, 21-26 August 1983, 1769-1774.
- [21] Araki, N., Matsuura, M., Makino, A., Hirata, T. and Kato, Y. (1988) Measurement of thermophysical properties of molten salts: Mixtures of alkaline carbonate salts. *International Journal of Thermophysics*, **9**, 1071-1080.
- [22] Kourkova, L. and Sadovska, G. (2007) Heat capacity, enthalpy and entropy of Li_2CO_3 at 303.15-563.15K. *Thermochimica Acta*, **452**, 80-81.
- [23] Williams, D.F., Wilson, D.F., Toth, L.M., Caja, J. and Keiser, J.R. (2003) Research on molten fluorides as high temperature heat transfer agents. *Proceedings of the Global 2003, Embedded Topical in 2003 American Nuclear Society Winter Meeting*, New Orleans, 16-20 November 2003.
- [24] Nunes, V.M.B., Lourenco, M.J.V., Santos, F.J.V. and de Castro, C.A.N. (2003) Importance of accurate data on viscosity and thermal conductivity in molten salts applications. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **48**, 446-450.
- [25] Eck, M. and Hennecke, K. (2007) Heat transfer fluids for future parabolic trough solar thermal power plants. *Proceedings of ISES World Solar Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement*, Beijing, 18-21 September 2007, 1806-1812.
- [26] Takahashi, Y., Sakamoto, R. and Kamimoto, M. (1988) Heat capacities and latent heats of LiNO_3 , NaNO_3 , and KNO_3 . *International Journal of Thermophysics*, **9**, 1081-1090.
- [27] Tufeu, R., Petitet, J.P. and Denielou, L. (1985) Experimental determination of the thermal conductivity of molten pure salts and salt mixtures. *International Journal of Thermophysics*, **6**, 315-330.
- [28] Ren, N., Wu, Y.T., Wang, T. and Ma, C.F. (2011) Experimental study on optimized composition of mixed carbonate for phase change thermal storage in solar thermal power plant. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **104**, 1201-1208.
- [29] Wu, Y.T., Ren, N., Wang, T. and Ma, C.F. (2011) Experimental study on optimized composition of mixed carbonate salt for sensible heat storage in solar thermal power plant. *Solar Energy*, **85**, 1957-1966.
- [30] Ren, N., Wu, Y.T. and Ma, C.F. (2011) Preparation and experimental study of molten salt with low melting point. *Proceeding of Solar PACES 2011 Conference*, Granada, 20-23 September 2011.
- [31] 廖敏, 魏小兰, 丁静, 胡宝华, 彭强 (2010) LNK 碳酸熔盐热物性能研究. *太阳能学报*, **7**, 863-867.
- [32] 廖敏, 丁静, 魏小兰, 杨晓西, 杨建平 (2008) 高温碳酸熔盐的制备及传热蓄热性质. *无机盐工业*, **10**, 15-17.
- [33] 彭强, 魏小兰, 丁静, 杨建平, 杨晓西 (2009) 多元混合熔融盐的制备及其性能研究. *太阳能学报*, **12**, 1621-1626.
- [34] 任楠, 王涛, 吴玉庭, 马重芳 (2011) 混合碳酸盐的 DSC 测量与比热容分析. *化工学报*, **S1**, 197-202.
- [35] 任楠 (2011) 混合碳酸盐和低熔点熔盐的配制与热物性实验研究. 硕士学位论文, 北京工业大学, 北京, 1-18.
- [36] 程晓敏, 陶冰梅, 朱闯, 李元元 (2014) 四元碳酸盐相变储热材料的制备及热物性研究. *化工新型材料*, **6**, 49-51.
- [37] 杜威 (2013) 碳酸盐-氟盐高温熔盐的性能研究. 硕士学位论文, 东北大学, 沈阳, 14-28.
- [38] 陈永昌, 吴玉庭, 任楠, 马重芳 (2012) 高温传热熔融盐黏度特性的实验研究. *中国科学: 技术科学*, **2**, 150-154.
- [39] 刘斌, 叶猛, 吴玉庭, 马重芳 (2008) 混合氯化熔融盐的腐蚀性实验. *工程热物理学报*, **12**, 2131-2133.
- [40] 胡宝华, 丁静, 魏小兰, 彭强, 廖敏 (2010) 高温熔盐的热物性测试及热稳定性分析. *无机盐工业*, **1**, 22-24.