

**本 科 生 毕 业 论 文（设计）**



**题目 热水驱动铜氨电池的实验探究**

**姓名与学号 方家浩 3150102584**

**指导教师 张绍志（副教授）**

**年级与专业 2015级能源与环境系统工程**

**所在学院(系) 能源工程学院**

**热水驱动铜氨电池的实验研究**

方家浩

浙江大学能源工程学院 杭州 310027

**摘 要**

**关键词**：扩散吸收；混合制冷剂；模拟计算；实验；性能（3～5个关键词）

**Study on the Low Temperature Refrigeration System Operating with New Mixed Refrigerants without Mechanical Work Input**

Wang Shikuan

Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

# Abstract

Energy and environment attracts attentions of people nowadays. It is significant for the refrigeration system to reach low temperature that the diffusion absorption refrigerator (DAR) doesn’t need any mechanical work input but heat. The conventional DAR uses ammonia/water/hydrogen as the working substance, which is unable to reach low temperature due to the confine of the thermodynamic properties of the working substance. Based on the review and analysis of DAR systems at home and abroad, this paper investigated a new DAR system to reach low temperature operating with binary refrigerant R23/R32/R134a, DMF as absorbent, He as inert gas. Theoretical and experimental studies are conducted on the new system. Main contents of the research are as follows:

1. A review of the development of the DAR cycle and research status of the working substances of the DAR.
2. The operating principle and features of the new DAR cycle operating with binary refrigerant were presented. The influences of different parameters on the performance of the system were analyzed in detail after simulation and calculation.
3. The layouts of the components of the system were designed. The structural diagram of the bubble pump with separator and the layout of the system were drawn.

**Keywords：**Diffusion Absorption; Mixed Refrigerant; Simulation; Experiment; Performance

目 录

[Abstract IV](#_Toc6929723)

[**1引言** 1](#_Toc6929724)

[1.1 背景 1](#_Toc6929725)

[1.2已往的研究 2](#_Toc6929726)

[**1.2.2卡琳娜循环余热发电技术** 3](#_Toc6929727)

[**1.2.3温差发电技术** 4](#_Toc6929728)

[1.3最新的研究成果 4](#_Toc6929729)

[1.4本文的主要内容 9](#_Toc6929730)

[**2 氨基流动电池装置设计和初步实验** 10](#_Toc6929731)

[2.1热再生氨基电池理论计算 10](#_Toc6929732)

[2.1.1 离子活度 10](#_Toc6929733)

[**3主体内容二** 11](#_Toc6929734)

[3.1 主题内容二的展开 11](#_Toc6929735)

[3.2 主题内容二的继续展开 12](#_Toc6929736)

[**4总结** 14](#_Toc6929737)

[**参考文献** 15](#_Toc6929738)

[**作者简介** 17](#_Toc6929739)

附件一：图纸等材料名称

附件二：图纸等材料名称

（注：图纸等其它无法装订的资料以附件一、二形式，装入“本科生毕业论文”资料袋。）

**1引言**

## 背景

在科学技术高度发达的今天，能源成为了人类社会安身立命的重要保障。工业革命之后，以煤炭和石油为代表的传统不可再生能源成为了推动人类文明向前发展的重要动力，但与此同时也带来了大规模的环境污染：全球气候变暖、雾霾泛滥、海洋污染等等一系列问题正困扰着人类社会的继续发展。因此，提高能源利用率、积极探索新能源成为了目前科学技术发展的重大命题，其中高效利用低品位能源是一种有效合理的途径。

我们通常把余热能源分为高温、中温、低温三类，温度高于650℃的为高温余热，230℃～650℃之间的为中温余热，低于230℃的为低温余热。对于中高温余热的回收再利用，方式很多且技术已经相当成熟。而对于以烟气、蒸汽、高温冷却水等形式存在的低温余热，由于其品位不高，回收利用率则低很多，甚至无法回收[1]。

目前低品位能源的利用主要有：有机朗肯循环余热发电[2]、卡琳娜循环余热发电技术[3]、温差发电技术[4]、半导体温差发电[5]、热电化学系统[6]等。

本文主要针对热点化学系统中的热再生化学电池（TRB）进行实验分析。热再生化学电池（TRB）在连续放电中，利用低品位热能来再生电池的溶液并使两极重新发生氧化还原反应。热再生化学电池在把低品位能源转化、储存为电能的过程中不会产生额外的碳排放，而且其成本也较低因此成为了低品位能源利用的一个重要途径[7]。目前国内外关于热再生化学电池的研究主要集中在对电池电解液、电极材料及其相关参数的研究。为了解决热再生化学电池存在的效率较低、成本较高、连续电能输出困难等问题，研究人员提出了热再生氨基电池（TRAB）和氨基流动电池（AFB）。

理论电动势是原电池性能的一个重要衡量指标。根据能斯特方程，电池电动势可写成[8]

（1-1）

其中 a 为反应物或生成物活度，v 是各反应物或生成物在反应式的系数，是不同温度下电池标准电动势，z 为转移电子数，R、F 分别为气体常数和法拉第常数。

又由能斯特方程可推出标准电动势与其反应平衡常数关系为

(1-2)

上式表明，不同温度下的原电池电动势可以通过总反应的平衡常数求得，而不同温度下的反应常数的计算又与反应物及生成物的比热容有关[9]。

对于热再生氨基电池，其总反应的化学方程式为

若Kf过高，将导致该反应的化学平衡朝着生成四氨合铜络合物的方向移动，这就导致了溶液再生NH3的困难，从而造成电解液溶液很难再生，最终导致原电池反应很难形成有效循环、连续进行，因此需要控制Kf[10]。

因此四氨合铜络合物[]的比热容数据对于电池电动势的计算有着重要的意义。但是在文献阅读中发现：过往的研究中很少涉及铜氨络合物的比热容，因此为了补充四氨合铜络合物的比热容的相关数据，本次研究中拟利用 DSC法测量常压下组分四氨合铜络合物在溶液度范围为 0-1.2M、温度范围为 70-100℃ 的比热容数据，并拟合出其比热容的计算公式。

## 1.2已往的研究

以往关于低品位能的利用主要有有机朗肯循环余热发电[2]、卡琳娜循环余热发电技术[3]、温差发电技术[4]、半导体温差发电[5]、热电化学系统[6]等。

**1.2.1 有机朗肯循环（ORC）**

有机朗肯循环（ORC），即采用有机物作为循环工质的朗肯循环。有机物工质本身具有在较低温度下即可气化产生较高压力的性质，适用于推动透平机械做功，故ORC余热发电系统可在较低的气体或液体温度下实现有效发电。

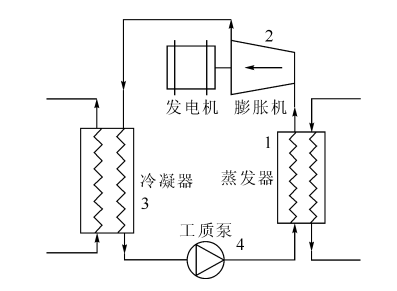


图1.有机朗肯循环工作原理示意图[2]

ORC余热发电系统的工作原理：首先高温高压的工质蒸汽在膨胀机中绝热膨胀，即绝热膨胀阶段；将经过膨胀机的低温、低压工质蒸汽送入冷凝器中冷却，即定压冷却阶段；将过冷液体工质通入工质泵，绝热加压成高压液体，即绝热加压阶段；中高压液体工质进入蒸发器中被加热，形成过热蒸汽，即定压加热阶段；之后高温高压工质蒸汽再次进入膨胀机，从而完成一个循环过程[11]。

**1.2.2卡琳娜循环余热发电技术**

卡琳娜循环是一系列以氨水为工质的热力循环的总称。由AlexanderI.Kalina于1984年6月在美国动力学术会议上首次提出。针对不同温度的热源情况，不同形式的卡琳娜循环的应用范围不同[3]。

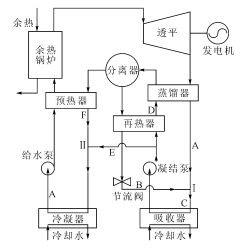


图2.一级蒸馏卡琳娜循环系统工作原理示意图[3]

与传统水蒸气朗肯循环相比，氨水工质的沸点比较低，易于蒸发，在低温热源加热下就能气化为蒸气，所以可以利用其回收中低温余热能源；另外，氨水作为混合工质，其蒸发冷凝过程是变温过程，存在温度滑移现象，相比于纯工质而言，这使得其在换热过程中能很好的与热源变温特性相匹配，从而可以减小换热过程的不可逆损失，提高热能利用率。

与有机朗肯循环（ORC）相比，氨水属于自然工质，价格低廉，易于制取，而且其对环境破坏力较弱，环保性能优于有机工质；另外氨(NH3)的分子量为17.031。水(H2O)的分子量为18.015，二者差距非常小，所以氨水蒸汽透平在结构设计上可以借鉴技术已经相对成熟的蒸汽透平，这在一定程度上可以使氨水透平得到快速发展[12]。

**1.2.3温差发电技术**

温差发电技术是一种清洁、环保的发电形式，可以将海洋能、太阳能、工业余热废热等低品位能源转化为电能。温差发电技术是基于热电材料的塞贝克效应发展起来的一种发电技术，其工作原理是将2种类型（P型和N型）的热电材料一端相连成为1个PN结，并将其置于高温状态形成高温端，另两端形成低温端，由于高、低温端的空穴（电子）浓度存在差异，在热激发作用下，电子以及空穴会以扩散的形式向浓度低的低温端运动，进而形成了电动势，热电材料利用高温端与低温端间的温差，将热能直接转化为电能[13]。

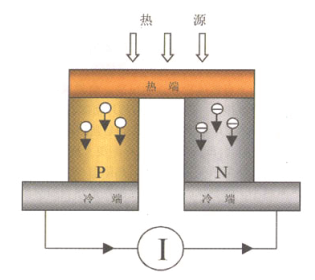


图3.温差发电原理示意图[14]

## 1.3最新的研究成果

**1.3.1热再生氨基电池（TRAB）**

2015年，宾夕法尼亚州立大学 Bruce E Logan 团队提出了基于铜基氧化还原对[Cu2+/Cu, Cu(NH3)42+/Cu]回收低品位热能源（蒸馏温度为 70.6℃）的热再生氨基电池（TRAB）[15]。

TRAB以铜电极作为正负极，以硝酸铜的水溶液作为电解液，通过在负极室加入氨或氨水混合物，与铜反应产生电势差。其总反应方程式为：

阴极：

阳极：

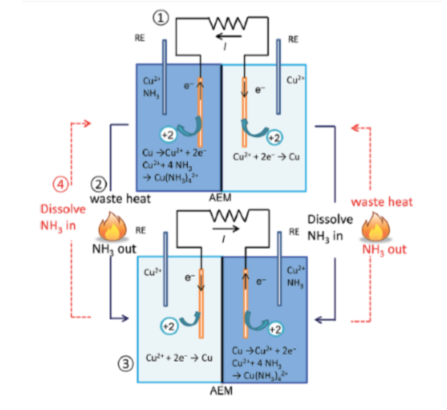


图 1-1 TRAB循环过程[8]

此循环系统有四个步骤：1.初始铜离子溶液和铜氨络合物溶液发生原电池反应产生电能；2.利用废热使电解液再生；3.阴阳极互换，由再生的电解液再次产生电能；4.利用废热再生电解液。

整个反应完成，释放电能。通过精馏塔用废热把氨从阳极分离出来再生电解液。然后富氨气流被重新溶解于原阴极液中对电池进行再充电，并且在下一次循环中把Cu重新沉积在电极上，从而实现了阴阳极的互换。在外电路负载从断路到短路变化可测得最大功率密度和能量密度。在单个TRAB 电池中向阳极液中添加氨（硝酸铜电解液中添加 2M 氨溶液）可以产生 最高达115±1W/m2的电能密度（取决于单个铜网电极的投影面积），以及 453Wh/m3 的能量密度（标准化到全部电解液体积、调节外阻以产生最大电流条件），热电转换效率 0.86%，相对卡诺效率 3.8%。加上第二块电池可以使得电压 和最大电流同时加倍。再生氨并添加到原阴极液中（充电）后能够产生 60±3W/m2的最大电能密度以及约 29%的平均放电能力效率（捕捉到的电能比起始溶液中的化学能）[7]。

Fang Zhang等提出提高操作温度能够提高热回收和反应动力。实验结果表明最大电能产量与操作温度成线性关系，在37℃和72℃下电能产量分别为143±6W/m2 和236±8W/m2，电能产量的增加是由过电势的降低、反应动力的提升等电极性能的提升造成的。较高的温度同时降低了加热电解液和氨蒸馏过程，即再充电过程所需的能量。然而高温下随着AEM选择性的降低，TRAB自放电增加， 因此在高温下选用选择性更好的离子交换膜能进一步提升电池性能[16]。

**1.3.2氨基流动电池（AFB）**

宾夕法尼亚大学在提出TRAB之后，为解决其存在的不能输出连续电能、电极距离较远引起电阻较大等问题，又提出了一种新型的氨基流动电池（AFB）。AFB与TRAB的工作原理相同，都是基于铜电极的交替溶解、沉淀循环以及在电极间的存在的氨浓度梯度。AFB系统与TRAB在操作上的不同之处在于AFB基于连续流动，而TRAB的电解液没有流动；同时在结构上，AFB是由固体铜板，垫片，以及离子交换膜堆叠而成的紧密结构，电解液在其中连续地流过非常薄的间隔板（1.5mm）。当电池对串联连接在一起时，双极铜板同时作为阴阳极使用。由于这种构造，与先前的TRAB相比，AFB具有更高的面积（膜）和体积功率密度，能量密度和热能效率 [15]。

AFB的功率密度取决于电解液的浓度。对于膜面积为8\*10-4m2的AFB，在阳极液浓度为3M NH3、0.2M Cu(NO3)2、3M NH4NO3，阴极液浓度为 0.2M Cu(NO3)2、3M NH4NO3 时达到最高的功率密度；同时，由于传质的加强，电解液流速从 1mL/min 提高到 4mL/min，功率密度也可得到较大提升。在相同的铜电极面积下，AFB获得的最大功率密度为45W/m2，小于TRAB(115W/m2)，但是这主要是因为TRAB 采用的是丝网电极，而AFB 中采用的是平板铜电极；在相同的反应器体积下，电池的最大功率密度从0.3kW/m3（TRAB）提高到15kW/m3 （AFB）；同时AFB的热能效率为0.7%（相对卡诺效率5%，高于TRAB的3.8%）[15]。

同时，AFB具有良好的可扩展性，当并联连接电池对从1对扩展到4对时，最大电流可以从90mA提高到290mA，最大电能几乎线性地从17mW提高到62mW；当电池用双极铜板电极串联连接时，电池电压从0.4V提高到1.6V，最大电流从90mA提高到100mA。同时，实验结果显示多个电池对串联连接时，其产生电能与单个电池对产生电能的对应倍乘相近，这就表明 AFB 具有非常好的可拓展性[15]。

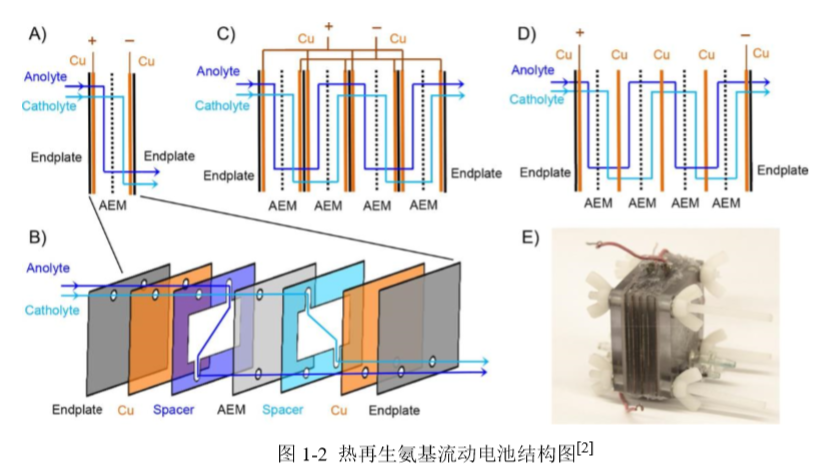


图1-2 热再生氨基流动电池结构图

（A）1个电池对（B）平板和流程的构型；（C）4个电池对并联连接；（D）中间铜板同时作为阳极和阴极的串联连接的4个电池对；（E）四个串联连接电池对的AFB实体图。

**1.3.3盐溶液比热容**

基于现在可获得的公开发表的模型，对于盐溶液比热容的计算是比较困难的。虽然近年来发布了许多的计算模型，其中Pitzer方程依然是最著名和精确的。但是Pitzer方程十分复杂，而且Pitzer方程预测参数化空间以外的比热容的能力很差。对此Marc Laliberte等人提出了简单的经验模型[17]：

首先要想知道溶液的比热容必须要知道水的比热容。而水的比热容可以通过下式计算：

)

(1-3)

其中和分别是水在三个不同温度t1、t2和t3下的比热容，且t1、t2和t3均匀分布且递增。t不必在t1到t3中，但如果是，则插值的精度会明显增加。

在求的水的比热容之后，我们即可求得水溶液的比热容

（1-4）

是溶液的热容，是水的热容，是溶质的热容。是水的质量分数，是溶质的质量分数。关于的计算比较复杂，可以通过下列的式子计算： （1-5）

（1-6）

其中～为经验系数。关于～的初始值，Marc Laliberte等人发现，如果这些初始猜测来自实际拟合而不是任意数字，则可以获得更好的结果。因此建议使用已知适用的溶质系数和测得数据质量良好的系数。对于温度系数（热容量a2）不同的情况，应该进行三到五次不同的猜测拟合。

Marc Laliberte等人测量了79种溶质约6600个点的参数，且计算比热容与实验比热容之间的平均误差仅为-0.0003kJ·kg-1·K-1,同时标准误差仅为0.010 kJ·kg-1·K-1。

G. NAZARI 和 E. ASSELIN也提出过盐溶液比热容的计算公式：

(1-7)

其中由于e和g为常数，溶液的熵在相同温度下也是常数，因此上式还可以表示为：

（1-8）

对于铁氨混合物：

（1-9）

对于钴单 - 四胺：

（1-10）

对于钴-五胺和六胺

（1-11）

对于铜镍钴

（1-12）

## 1.4本文的主要内容

本文研究内容主要包括以下几个方面：

（1）以为 1.8V 发光二极管（LED）供电为目标，设计、采购搭建、调试低品位热再生电池（氨基流动电池）实验装置，尤其需要解决装置的密封问题，并获得初步试验数据；

（2）在常压下利用 DSC 法测定铜氨络合物浓度为 0-1.2M，温度范围为 70℃-100℃的比热容数据。采用标准物质比热进行二次修正后，拟合出了铜氨络合物溶液比热容关于其浓度及温度的关系式，计算出拟合公式与实验值的偏差，表明该拟合在一般精度要求下可用于指导铜氨络合物溶液比热容计算。

改造实验装置完成后，首先进行热水驱动铜氨电池的实验研究，研究氨水浓度和电解液组成对电池输出的影响。对于四氨合铜络合物比热容的测量，选择温度为70℃-100℃，以2℃为一个步长，采用DSC法分别测量铜氨络合物浓度分别为0、0.05M、0.2M、0.4M、0.8M、1.2M 时的溶液比热容数据，记录不同测试样品与标准样品的实际升温速率，铝盘质量，样品质量等数据，并采用一定的修正方法，对测量结果进行修正，提高其准确性。

**2 氨基流动电池装置设计和初步实验**

## 2.1热再生氨基电池理论计算

在本研究中，铜氨电池的设计、工作都建立在常温常压的条件下，根据文献[18]中Zhang F等人的研究，不同的氨水浓度和电解液组成对电池的性能有着较大的影响，因此对热再生氨基电池在不同氨水浓度和电解液组成下的化学平衡常数、电池电动势的研究具有重要意义。

关于低品位热再生氨基电池的理论计算主要包括一下几个方面：离子活度计算、化学反应平衡常数计算、电极电势计算。这一部分的主要参考文献为[19]。

## 2.1.1离子活度

在本研究中，离子活度系数的计算可采用MBM模型。1972年，Bromley 提出了一种计算单一电解质离子平均活度系数的公式，即Bromley公式[20, 21]：

(2-1)

式中：A为德拜-修格尔系数，在不同温度下其计算公式为[22]：

(2-2)

其中，Na为阿伏伽德罗常数，取值为6.022\*1023mol-1；e为单位电荷数，取值为4.8024\*10-10；k0为玻尔兹曼常数，取值为1.38\*10-23J/K；T为温度，单位K；D为水的介电常数，单位为C2/(N\*m)，计算公式为：

(2-3)

I为溶液总离子强度，单位kg/mol，z+、z-分别为正负离子所带的电荷数；B为相互作用参数并随电解质的变化而变化。Bromley在文章中给出了多种电解质的B值。

Borge等对Bromley公式模型进行了改进，使公式适用于以摩尔浓度为单位的体系中，即修正的Bromley公式（Modified Bromley Model, MBM）[23]。随后。Giannopoulou等人提出了适用于Cu-NH3-H2O三元体系的MBM公式计算离子的活度系数[24]：

(2-4)

本文所进行的理论计算选择式2-4。

## 2.1.2化学反应平衡常数

化学平衡是指在一定条件下的可逆反应中，化学反应的正逆反应速率相等，反应物与生成物的各组分浓度不再变化的状态。化学反应平衡常数就是用来描绘这一平衡状态的参数。

对于某可逆反应，其平衡常数为：

(2-5)

其中c(A)、c(B)、cC)、c(D)为平衡时各组分的浓度。在本次研究的化学反应平衡常数计算中，用溶液中的各组分活度代替各组分浓度，即：

(2-6)

根据Gibbs-Helmholtz方程：

(2-7)

以及

(2-8)

得到

(2-9)

对于热再生氨基电池中的电极反应

不同温度下反应平衡常数计算公式为

**3主体内容二**

## 3.1 主题内容二的展开

**有关表的说明**

（1）表的表号应在文中引出，以先见文后见表为原则。

（2）表号一般按章编排，如第1章第1表，可写成表1.1；第2章第2表，可写成表2.2。附录中的表，用表A1、B1等。

（3）每一表应有简短确切的表名，表名与表号间空一格。表名后不加标点。表名连同表号置于表上居表左对齐书写。

（4）表标题（表名与表号）与表之间无需空行，但表上方、表下方与正文要有一行的间距，也可根据排版需要适当调整表与正文之间的间距。

（5）表号与表名一律用宋体五号字；表中内容与表注采用五号字，宋体。

（6）表不设有左右边框，上下边框必须具备并加粗，其它框线根据表中内容自行设定，原则上使用三线表格。

（7）必要时，应将表中的符号、标记、代码，以及需要说明事项，以最简练的文字，横排于表标题下，作为表注，也可以附注于表下，附注前空两格写出阿拉伯数字圈码（如注：①），后空一格写注文，同时在表中加注之处的右上角加一相应的圈码，如①、②等。）

（8）表的各栏均应标明“量或测试项目、标准规定符号、单位”。如果全表内都用一种计量单位，则可将单位移至表头右上角书写。只有在无必要标注的情况下方可省略。表中的缩略词和符号，必须与正文中一致。

（9）表内同一栏的数字必须上下对齐。表内不宜用“同上”、“同左”、“…”和类似词，一律填入具体数字或文字。表内“空白”代表未测或无此项，“—”或“……”代表未发现，“0”代表实测结果确为零。

（10）同一表格需要转页时，转页部分不必写表号与表名，但要重复书写表头，并在表头右上方写“（续）”字。

（11）表应有自明性。（即只看表，表名，不阅读正文，就可以理解表意）

## 3.2 主题内容二的继续展开

**有关公式的说明**

1）公式缩格书写。若公式前有简短的文字说明（如解、证、令、假定、由此得等），文字顶格书写，公式末不加标点。

（2）公式序号写在公式右侧行末顶边线，并加圆括号。（当有续行时，应标注于最后一行的行末顶边线）公式与序号之间不加连点线。

（3）公式较长必须转行时，只能在＋，－，±，×，÷，＜，＞等符号后断开，而在下一行开头不应重复这一符号。上下式尽可能在符号“ ＝”处对齐。

（4）公式序号一般按章编排，如第1章第1公式，可写成（1.1）；第2章第2公式，可写成（2.2）。附录中的公式，用 (A1)、(B1)等。

（5）文中引用公式时，一般用“见式（1.1）”、“见式（2.1）～（2.4）”。

（6）公式与正文间要有一行的间距，也可根据排版需要适当调整公式与正文之间的间距。

（7）小数点用“·”来表示。大于999的整数和多余三位数的小数，一律用半个阿拉伯数的小间隔分开，不用千位撇。对于纯小数应将零列于小数点之前。示例：

应该写成94 652.023 567；0.314 325

不应写成94,652.023,567；0.314,325

（8）应注意区别各种字符，如拉丁文、希腊文、俄文、德文花体、草体；罗马数字和阿拉伯数字；字符的正斜体、黑白体、大小写、上下角标（特别是多层次，如“三踏步”）、上下偏差等。

（9）公式及式中物理量的注释的书写格式采用下列注释方法：

如对于公式：

*P*=*KFv*/1000

注释方式为：

式中： *P——*电动机功率，单位为kW；

*K——*安全系数，*K*=1.2～1.5；

*F——*链传动限力式辊子输送机积放状态下链条的最大牵引力，单位为N；

*v——*输送速度，单位为m/s；

*——*驱动装置效率，=0.65～0.85。

**4总结**

结论要求明确、精练、完整、准确。

**参考文献**

“参考文献”四字采用小三号宋体加粗，后面所附的文献遵照《信息与文献 参考文献著录规则》GB/T7714-2015，采用五号宋体，行间距为单倍行距，文献排列顺序按照在论文正文中出现的先后循序进行，并在正文中将参考文献引用的位置标注出来，二者编号应该是一致。参考文献格式示例如下：

**著作图书**

[1] 刘国钧, 陈绍业, 王凤哲. 图书馆目录[M]. 北京：高等教育出版社, 1957

[2] 机械工程手册编委会编. 机械工程手册：第六卷传动设计卷[M]. 北京：机械工业出版社, 1997

[3] Engel P A. Impact Wear of Materials[M]. 2nd ed. New York: Elsevier, 1986

**翻译图书**

[4] (德)拉达伊D著. 焊接热效应:温度场与变形[M]. 熊第京等译. 北京：机械工业出版社, 1997

**期刊**

[5] 陶仁骥. 密码学与数学[J]. 自然杂志, 1984, 7（3）：627～629

**学位论文**

[6] 张筑生. 微分半动力系统的不变集[D] . 北京：北京大学数学系数学研究所, 1983

**网络文献**

[7]董辅礽. MBO全面推广尚有困难[EB/OL]. (2002-12-12) [2003-04-07]. <http://www.china.com.cn/chinese/FI-c/245710.htm>

**作者简介**（居中，小二号宋体加粗）

(正文采用小四号宋体、1.5倍行距、英文使用Times New Roman)

包括教育经历、工作经历、攻读学位期间发表的论文和完成的工作等。

**References:**

[1]. 梅映新, 李志与夏焕锦, 低品位热能回收发电应用研究. 船电技术, 2012(S1): 第1-3页.

[2]. Legmann, H. Recovery of industrial heat in the cement industry by means of the ORC process. 2002.

[3]. Zhang, X., M. He and Y. Zhang, A review of research on the Kalina cycle. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012. 16(7): p. 5309-5318.

[4]. 汤广发, 李涛与卢继龙, 温差发电技术的应用和展望. 制冷空调与电力机械, 2006(06): 第8-10+3页.

[5]. Bell, L.E., Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. Science, 2008. 321(5895): p. 1457-1461.

[6]. Lee, S.W., et al., An electrochemical system for efficiently harvesting low-grade heat energy. Nature Communications, 2014. 5: p. 3942.

[7]. Zhang, F., A thermally regenerative ammonia-based battery for efficient harvesting of low-grade thermal energy as electrical power. Energy & environmental science, 2015. 8(1): p. 343-349.

[8]. 无机化学与化学分析. 2005.

[9]. 热再生氨化学电池的电极反应及基本循环研究, 2018.

[10]. Vicari, F., et al., On the regeneration of thermally regenerative ammonia batteries. Journal of Applied Electrochemistry, 2018. 48(12): p. 1381-1388.

[11]. Al-Sulaiman, F.A., F. Hamdullahpur and I. Dincer, Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production. Renewable Energy, 2012. 48: p. 161-172.

[12]. Arslan, O., Exergoeconomic evaluation of electricity generation by the medium temperature geothermal resources, using a Kalina cycle: Simav case study. International Journal of Thermal Sciences, 2010. 49(9): p. 1866-1873.

[13]. 黄惠兰, 陈强与李刚, 低品位能源发电系统研究进展. 热力发电, 2015(08): 第8-13页.

[14]. 赵建云等, 温差发电技术的研究进展及现状. 电源技术, 2010(03): 第310-313页.

[15]. Zhu, X., et al., A Thermally-Regenerative Ammonia-Based Flow Battery for Electrical Energy Recovery from Waste Heat. ChemSusChem, 2016. 9(8): p. 873-9.

[16]. Rahimi, M., et al., Electrical power production from low-grade waste heat using a thermally regenerative ethylenediamine battery. Journal of Power Sources, 2017. 351: p. 45-50.

[17]. Laliberté, M., A Model for Calculating the Heat Capacity of Aqueous Solutions, with Updated Density and Viscosity Data. Journal of chemical and engineering data, 2009. 54(6): p. 1725-1760.

[18]. Zhang, F., Enhancing Low-Grade Thermal Energy Recovery in a Thermally Regenerative Ammonia Battery Using Elevated Temperatures. ChemSusChem, 2015. 8(6): p. 1043-1048.

[19]. 热再生氨化学电池的电极反应及基本循环研究, 2018.

[20]. Bromley, L.A., Approximate individual ion values of β (or B) in extended Debye-Hückel theory for uni-univalent aqueous solutions at 298.15 K. The Journal of Chemical Thermodynamics, 1972. 4(5): p. 669-673.

[21]. Bromley, L.A., Thermodynamic Properties of Strong Electrolytes Aqueous Solutions. Aiche Journal, 2010. 19(2): p. 313-320.

[22]. 电解质溶液理论导论. 1964.

[23]. Borge, G., et al., Development of a Modified Bromley's Methodology (MBM) for the estimation of ionic media effects on solution equilibria Part 1. Calculation of the interaction parameters in the molar and molal scales at 25°C. Journal of Biological Chemistry, 1985. 260(8): p. 5121.

[24]. Giannopoulou, I., D. Panias and I. Paspaliaris, Electrochemical modeling and study of copper deposition from concentrated ammoniacal sulfate solutions. Hydrometallurgy, 2009. 99(1): p. 58-66.

**校对报告**

当前使用的样式是 [Numbered(Multilingual)]

当前文档包含的题录共34条

有15条题录存在必填字段内容缺失的问题

参考文献 [1] ：字段(卷)内容缺失;

参考文献 [8] ：字段(作者)内容缺失;

字段(版本)内容缺失;

字段(丛书标题)内容缺失;

字段(丛书编辑)内容缺失;

字段(卷)内容缺失;

字段(出版地点)内容缺失;

字段(出版社)内容缺失;

字段(页数)内容缺失;

参考文献 [9] ：字段(作者)内容缺失;

字段()内容缺失;

字段()内容缺失;

字段()内容缺失;

字段(大学)内容缺失;

字段(城市)内容缺失;

字段(页数)内容缺失;

参考文献 [2] ：字段(会议名称)内容缺失;

字段(会议地点)内容缺失;

字段(出版社)内容缺失;

字段(会议名称)内容缺失;

字段(会议地点)内容缺失;

字段(出版社)内容缺失;

参考文献 [4] ：字段(卷)内容缺失;

字段(卷)内容缺失;

参考文献 [6] ：字段(期)内容缺失;

字段(期)内容缺失;

参考文献 [11] ：字段(期)内容缺失;

参考文献 [13] ：字段(卷)内容缺失;

参考文献 [14] ：字段(卷)内容缺失;

参考文献 [16] ：字段(期)内容缺失;

参考文献 [19] ：字段(作者)内容缺失;

字段()内容缺失;

字段()内容缺失;

字段()内容缺失;

字段(大学)内容缺失;

字段(城市)内容缺失;

字段(页数)内容缺失;

参考文献 [22] ：字段(作者)内容缺失;

字段(版本)内容缺失;

字段(丛书标题)内容缺失;

字段(丛书编辑)内容缺失;

字段(卷)内容缺失;

字段(出版地点)内容缺失;

字段(出版社)内容缺失;

字段(页数)内容缺失;