第 58 卷 第 12 期
2007 年 12 月

化 工 学 报
Journal of Chemical Industry and Engineering (China)

Vol. 58 No. 12
December 2007

研究论文

电磁流体中㶲的传递和转换关系

王松平[1]，陈清林[2]

([1] 青岛大学师范学院，山东 青岛 266071；[2] 华南理工大学强化传热与过程节能教育部重点实验室，广东 广州 510640)

摘要：审视了多组分黏性电磁流体（包含热传输、对流、电磁能传输、质量传输和化学反应过程）的动量传递方程、质量传递方程、能量传递方程，重新构建了电磁流体的熵传递方程。通过定义热㶲、压㶲、化学㶲、动能㶲、势能㶲、电磁㶲，重新构建了不同形式㶲传递的分量方程及其总㶲传递方程。通过分解这些传递方程，揭示了不同形式㶲之间可逆与不可逆的传递和转换关系，为理解不可逆传递过程的机制、正确计算不可逆性的㶲损及其改善电磁流体传递过程的性能和用能效率提供了有效的途径。

关键词：电磁流体；能量传递；㶲传递；㶲损

中图分类号：TK 124 **文献标识码**：A **文章编号**：0438－1157（2007）12－2964－06

Transfer and inter-conversions between different forms of exergy in electromagnetic fluids

WANG Songping[1]，CHEN Qinglin[2]

([1] *Normal College*，*Qingdao University*，*Qingdao* 266071，*Shandong*，*China*；
[2] *Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation*，*Ministry of Education*，
South China University of Technology，*Guangzhou* 510640，*Guangdong*，*China*)

Abstract：The mass，momentum，energy transfer equations of a multi-component electromagnetic fluid were reviewed subject to viscous processes，heat transfer by conduction，radiation，and convection，electromagnetic energy transfer，matter diffusion and chemical reactions. These transfer equations were used to reestablish the entropy transfer equation for the electromagnetic fluid，and further to reconstitute the differential component equations for different forms of exergy and the differential equation for total exergy in the fluid by the definitions of thermal，pressure，chemical，kinetic，potential and electromagnetic forms of exergy. These component equations revealed the relations of transfer and inter-conversions between the different forms of exergy，including the breakdown into reversible and irreversible conversions，which provided an approach to comprehending the irreversible exergy transfer mechanism，to calculating correctly the exergy destruction due to reversibility，and to improving the efficiency and performance of electromagnetic fluid transfer process.

Key words：electromagnetic fluids；energy transfer；exergy transfer；exergy destruction

引 言

能量的传递和转换广泛地存在于化工过程，能量具有“质”和“量”的双重属性，㶲即是其能质的度量，因此研究㶲的传递和转换以正确地理解不可逆过程机制和计算㶲损是能量有效利用并改善传

2007－02－07 收到初稿，2007－08－06 收到修改稿。

联系人及第一作者：王松平（1959—），男，博士，教授。

基金项目：国家自然科学基金项目（20376078）。

Received date：2007－02－07.

Corresponding author：Prof. WANG Songping. **E－mail**：wangsongping@qdu.edu.cn

Foundation item：supported by the National Natural Science Foundation of China (20376078).

递过程性能的重要途径。对㶲传递规律的研究，Gaggioli[1-2]做了开创性的工作，通过建立通常流体的㶲传递微分方程，可以描述㶲传递过程的细节。对㶲传递过程的唯象研究，Soma[3-4]首先提出了㶲传递和㶲传递系数概念。近年来，对㶲传递方程组的建立及其求解、唯象传递方程的建立及其应用等方面均取得了一系列的进展[5-10]。对通常流体内不同形式㶲之间的传递和转换的研究，Dunbar 等[11]通过分解不同形式㶲的传递方程，给出了不同形式㶲之间可逆和不可逆转换之间的关系，表明了不可逆转换的数量关系。对于电磁流体，例如在电火箭发动机、磁流体发电机、等离子体和高电介质中的化学反应中，必须考虑电磁能（或㶲）与其他形式的能（或㶲）之间的传递和转换，正确理解和计算电磁流体中不同形式的能（或㶲）之间的传递和转换，对于理解和控制能的利用、降低不可逆过程能量损耗具有重要的意义。本文通过核查电磁流体中的各种传递方程，重新建立不同形式㶲的分量传递方程，通过分析不同形式㶲之间的传递和转换规律，确定㶲损和不可逆过程之间的定量关系，进一步获得电磁流体的总㶲传递方程。

1　电磁流体中的传递方程

考虑由 K 组分 R 个化学反应组成的黏性电磁流体体系，其中包含有热传递、质量传递、电磁能传递、外势场作用。为了在电磁流体中应用非平衡态热力学重新构建熵传递方程、㶲传递方程，有必要重新审视电磁流体中的质量传递方程、动量传递方程、能量传递方程。

1.1　质量传递方程

在不考虑电磁质量转换的情况下，在电磁流体中质量传递方程与通常流体的质量传递方程相同[12-13]

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t}+\nabla\cdot\boldsymbol{j}_k^{\circ}=\sum_{j=1}^{R}\nu_{kj}J_j \tag{1}$$

或表达为随体微分形式

$$\frac{\mathrm{d}\rho_k}{\mathrm{d}t}+\rho_k\nabla\cdot\boldsymbol{V}+\nabla\cdot\boldsymbol{j}_k=\sum_{j=1}^{R}\nu_{kj}J_j \tag{2}$$

其中，J_j 是第 j 个化学反应的化学反应率；ν_{kj} 是化学计量系数；$\boldsymbol{j}_k^{\circ}=\rho_k\boldsymbol{V}_k$，为 k 组分的质量流；$\boldsymbol{j}_k=\boldsymbol{j}_k^{\circ}-\rho_k\boldsymbol{V}$，为扩散流；$\boldsymbol{V}=\sum\rho_k\boldsymbol{V}_k\Big/\rho,\rho=\sum\rho_k$。

利用质量分数 $\omega_k=\rho_k/\rho$，式（2）可写为

$$\rho\frac{\mathrm{d}\omega_k}{\mathrm{d}t}+\nabla\cdot\boldsymbol{j}_k=\sum_{j=1}^{R}\nu_{kj}J_j \tag{3}$$

总质量守恒方程为

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{V})=0 \tag{4}$$

或表达为随体微分形式

$$\dot{\rho}+\rho\nabla\cdot\boldsymbol{V}=0 \tag{5}$$

1.2　动量传递方程

考虑电磁流体，动量传递方程可表达为下列形式[14]

$$\frac{\partial\rho\boldsymbol{V}}{\partial t}+\frac{\partial\boldsymbol{g}}{\partial t}=-\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}+\boldsymbol{P}+\boldsymbol{T})+\sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{F}_k \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{g}=\boldsymbol{D}\times\boldsymbol{B}$ 是电磁场动量；$\boldsymbol{P}$ 是流体应力张量，对非弹性流体 $\boldsymbol{P}=P\boldsymbol{I}+\boldsymbol{P}_{\mathrm{nv}}+\boldsymbol{P}_{\mathrm{sv}}$，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{nv}}$、$\boldsymbol{P}_{\mathrm{sv}}$ 和 P 分别是正交黏性应力部分、剪切黏性应力部分和热力学压力部分；$\boldsymbol{F}_k$ 是 k 组分单位质量不包括电磁力的外力；$\boldsymbol{T}$ 是电磁场张量，其表达式为[15]

$$\boldsymbol{T}=\frac{1}{2}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B})\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{E}\boldsymbol{D}+\boldsymbol{H}\boldsymbol{B})-\frac{1}{2}\left[E^2\rho\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}-B^2\rho\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\frac{1}{\mu}\right)\right]\boldsymbol{I} \tag{7}$$

式（6）的随体微分形式是

$$\rho\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}}{\mathrm{d}t}=-\nabla\cdot(\boldsymbol{P}+\boldsymbol{T})-\frac{\partial\boldsymbol{g}}{\partial t}+\sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{F}_k \tag{8}$$

1.3　能量传递方程

以 $\boldsymbol{V}$ 点乘式（8），并利用关系 $\boldsymbol{V}\cdot(\nabla\cdot\boldsymbol{P})=\nabla\cdot(\boldsymbol{P}\cdot\boldsymbol{V})-\boldsymbol{P}:\nabla\boldsymbol{V}$，$\boldsymbol{j}_k=\rho_k\boldsymbol{V}_k-\rho_k\boldsymbol{V}$，式（9）[15]

$$-\nabla\cdot\boldsymbol{T}=\frac{\partial\boldsymbol{g}}{\partial t}+(\rho_{\mathrm{e}}\boldsymbol{E}+\boldsymbol{j}_{\mathrm{e}}\times\boldsymbol{B})+\left\{\frac{1}{2}\left[B^2\nabla\left(\frac{1}{\mu}\right)-E^2\nabla\varepsilon\right]+\nabla\frac{1}{2}\left[E^2\rho\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}-B^2\rho\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\frac{1}{\mu}\right)\right]\right\}=\frac{\partial\boldsymbol{g}}{\partial t}+\boldsymbol{f}_{\mathrm{e,m}}+\boldsymbol{f}_{\mathrm{media}} \tag{9}$$

可以得到电磁流体的动能传递方程为

$$\rho\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\boldsymbol{V}^2}{2}\right)=-\nabla\cdot(\boldsymbol{P}_{\mathrm{sv}}\cdot\boldsymbol{V})-\boldsymbol{V}\cdot(\nabla\cdot\boldsymbol{P}_{\mathrm{n}})+\boldsymbol{P}_{\mathrm{sv}}:\nabla\boldsymbol{V}+\sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot\boldsymbol{f}_k+\sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot\boldsymbol{f}'_k-\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot\boldsymbol{F}_k+\rho_{\mathrm{e}}\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{E}+\boldsymbol{V}\cdot(\boldsymbol{j}_{\mathrm{e}}\times\boldsymbol{B})+\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{f}_{\mathrm{media}} \tag{10}$$

其中，$\boldsymbol{f}_{\mathrm{e,m}}=\rho_{\mathrm{e}}\boldsymbol{E}+\boldsymbol{j}_{\mathrm{e}}\times\boldsymbol{B}$，是 Lorentz 力；$\boldsymbol{f}_{\mathrm{media}}=\frac{1}{2}\left[B^2\nabla\left(\frac{1}{\mu}\right)-E^2\nabla\varepsilon\right]+\nabla\frac{1}{2}\left[E^2\rho\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}-B^2\rho\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\frac{1}{\mu}\right)\right]$，是 Maxwell 张力[15]。

电磁流体的电磁能方程仍然保持下列形式[14-15]

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{2}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\frac{1}{2}\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B}\right)=-\nabla\cdot(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})-\boldsymbol{j}_{\mathrm{e}}\cdot\boldsymbol{E} \tag{11}$$

将电流密度 $\boldsymbol{j}_e=\rho_e\boldsymbol{V}+\sigma_e\boldsymbol{E}+\sigma_e(\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{B})$ 代入式(11)可得到电磁能方程的另一种形式

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{2}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\frac{1}{2}\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B}\right)=-\nabla\cdot(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})-\left[\frac{\boldsymbol{j}_e^2}{\sigma_e}-\frac{\rho_e(\boldsymbol{j}_e\cdot\boldsymbol{V})}{\sigma_e}\right]-\boldsymbol{V}\cdot(\boldsymbol{j}_e\times\boldsymbol{B}) \tag{12}$$

不考虑电磁流体的电磁质量转换，势能传递方程与通常流体的势能平衡相同[12]

$$\frac{\partial\rho\phi}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho\phi\boldsymbol{V}+\sum_{k=1}^{K}\phi_k\boldsymbol{j}_k\right)=\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k^*\nabla\phi_k+\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\phi_k\nu_{kj}J_j=-\sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot\boldsymbol{f}_k+\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\phi_k\nu_{kj}J_j \tag{13}$$

或表达为随体微分形式

$$\rho\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-\nabla\cdot\left(\sum_{k=1}^{K}\phi_k\boldsymbol{j}_k\right)-\sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot\boldsymbol{f}_k+\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\phi_k\nu_{kj}J_j \tag{14}$$

其中，$\boldsymbol{f}_k$ 是有势力；ϕ_k 是相应的势能；$\boldsymbol{F}_k=-\nabla\phi_k+\boldsymbol{f}'_k=\boldsymbol{f}_k+\boldsymbol{f}'_k$，$\boldsymbol{f}'_k$ 是作用到流体上的非保守体力。

单位质量电磁流体的总能定义为

$$En=u+\frac{V^2}{2}+\phi+\frac{1}{2\rho}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B})=Ts-Pv+\sum_{k=1}^{K}\mu_k\omega_k+\frac{V^2}{2}+\phi+\frac{1}{2\rho}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B}) \tag{15}$$

式(15)右端各项分别为单位质量电磁流体的热能(Ts)、压能($-Pv$)、化学能($\sum\mu_k\omega_k$)、动能($V^2/2$)、势能(ϕ)、电磁能$[(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B})/2\rho]$。

应用能量平衡的定义，则电磁流体体系的总能量传递方程可以表达为下列形式

$$\frac{\partial\rho En}{\partial t}+\nabla\cdot[\rho(u+V^2/2+\phi)\boldsymbol{V}]=-\nabla\cdot\boldsymbol{j}_q-\nabla\cdot(\boldsymbol{P}\cdot\boldsymbol{V})-\nabla\cdot\sum_{k=1}^{K}\phi_k\boldsymbol{j}_k-\nabla\cdot(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})+\sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot\boldsymbol{f}'_k+\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\phi_k\nu_{kj}J_j \tag{16}$$

如果外力是保守力，则 $\boldsymbol{f}'_k=0$，并且势能在每一个化学反应中保守，有 $\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\phi_k\nu_{kj}J_j=0$，则式(16)可以简化为以下能量守恒方程

$$\frac{\partial\rho En}{\partial t}+\nabla\cdot\left[\rho(u+V^2/2+\phi)\boldsymbol{V}+\boldsymbol{j}_q+\boldsymbol{P}\cdot\boldsymbol{V}+\sum_{k=1}^{K}\phi_k\boldsymbol{j}_k+\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}\right]=0 \tag{17}$$

结合式(10)~式(16)，则可以得到电磁流体体系的内能方程

$$\frac{\partial\rho u}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u\boldsymbol{V})=-\nabla\cdot\boldsymbol{j}_q-\nabla\cdot(\boldsymbol{P}_n\cdot\boldsymbol{V})-\boldsymbol{P}_{sv}:\nabla\boldsymbol{V}+\boldsymbol{V}\cdot(\nabla\cdot\boldsymbol{P}_n)+\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot\boldsymbol{F}_k+\left[\frac{\boldsymbol{j}_e^2}{\sigma_e}-\frac{\rho_e(\boldsymbol{j}_e\cdot\boldsymbol{V})}{\sigma_e}-\rho_e\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{E}-\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{f}_{media}\right] \tag{18}$$

1.4 熵传递方程

假定体系的局域热力学平衡条件成立，并且不考虑电磁质量转换，则 Gibbs-Duhem 方程和 Gibbs-Duhem 关系成立

$$u=Ts-Pv+\sum_{k=1}^{K}\mu_k\omega_k \tag{19}$$

$$s\mathrm{d}T-v\mathrm{d}P+\sum_{k=1}^{K}\omega_k\mathrm{d}\mu_k=0 \tag{20}$$

由式(19)和式(20)得到

$$\rho\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{T}\left(\rho\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+\rho P\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}-\rho\sum_{k=1}^{K}\mu_k\frac{\mathrm{d}\omega_k}{\mathrm{d}t}\right) \tag{21}$$

将式(3)、式(5)和式(18)代入式(21)，则可得到电磁流体的熵传递方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}+\nabla\cdot\boldsymbol{j}_s=g_s \tag{22}$$

其中，$\boldsymbol{j}_s$ 是熵流密度，g_s 是熵产率，分别定义为

$$\boldsymbol{j}_s=\frac{\boldsymbol{j}_q}{T}-\frac{1}{T}\sum_{k=1}^{K}\mu_k\boldsymbol{j}_k \tag{23}$$

$$g_s=\frac{1}{T}\left[-\boldsymbol{P}_{nv}:\nabla\boldsymbol{V}-\boldsymbol{P}_{sv}:\nabla\boldsymbol{V}-\boldsymbol{j}_s\cdot\nabla T-\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot\nabla\mu_k-\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\mu_k\nu_{kj}J_j+\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot\boldsymbol{F}_k+\left(\frac{j_e^2}{\sigma_e}-\frac{\rho_e\boldsymbol{j}_e\cdot\boldsymbol{V}}{\sigma_e}\right)-\rho_e\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{E}-\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{f}_{media}\right] \tag{24}$$

可以看出，电磁流体的熵传递方程与通常流体的熵传递方程形式相同，但内涵有所不同。式(24)右端的第 1～6 项与通常流体的熵产率相同，第 7～9 项分别是电功转换、电场、Maxwell 张力作用到以质量平均速度运动的流体微元不可逆的熵产率。显然，若不考虑电磁场的作用，则式(24)可简化为通常流体的熵产率。

2 㶲传递方程

定义单位质量电磁流体体系的㶲为

$$Ex=(T-T_0)s-(P-P_0)v+\sum_{k=1}^{K}(\mu_k-\mu_{k0})\omega_k+\frac{V^2}{2}+\phi+\frac{1}{2\rho}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B}) \tag{25}$$

式(25)右端各项分别为热㶲[$(T-T_0)s$]、压㶲

$[-(P-P_0)v]$、化学㶲 $[\sum(\mu_k-\mu_{k0})\omega_k]$、动能㶲($V^2/2$)、势能㶲($\phi$) 和电磁㶲$[(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D}+\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B})/2\rho]$。应用这个定义，可以导出不同形式㶲 的传递和转换方程。

2.1 热㶲传递方程

应用热㶲的定义和式（22），则可以得到热㶲的传递方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[(T-T_0)s]=-\nabla\cdot\left[\left(1-\frac{T_0}{T}\right)T\boldsymbol{j}_s\right]+\rho s\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}+\frac{T_0}{T}(\boldsymbol{j}_s\cdot\nabla T)+\left(1-\frac{T_0}{T}\right)\left[-\boldsymbol{P}_{\mathrm{nv}}:\nabla\boldsymbol{V}-\boldsymbol{P}_{\mathrm{sv}}:\nabla\boldsymbol{V}-\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot\nabla\mu_k-\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\mu_k\nu_{kj}J_j+\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot\boldsymbol{F}_k+\left(\frac{j_{\mathrm{e}}^2}{\sigma_{\mathrm{e}}}-\frac{\rho_{\mathrm{e}}\boldsymbol{j}_{\mathrm{e}}\cdot\boldsymbol{V}}{\sigma_{\mathrm{e}}}\right)-\rho_{\mathrm{e}}\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{E}-\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{f}_{\mathrm{media}}\right]\tag{26}$$

式（26）右端的第 1 项是经由热传导、热辐射和质量扩散传输的㶲；第 2 项是与压㶲、化学㶲在 Gibbs-Duhem 关系约束下的可逆的相互转换部分；第 3 项是由于熵流传输热㶲不可逆的降级部分；第 4 项内各分项分别是压㶲［见式（27)］、动能㶲［见式（10)］、化学㶲［见式（28)］、外力扩散功［见式（10)］、电功［见式（12)］、Maxwell 张力作用到以质量平均速度运动的流体微元［见式（10)］不可逆转换为热㶲部分。可以看出，若不考虑电磁场的作用，则式（26）可简化为通常流体的热㶲传递方程[11]。

2.2 压㶲传递方程

应用压㶲的定义、式（25）和关系式 $P(\nabla\cdot\boldsymbol{V})=\nabla\cdot(\boldsymbol{P}_{\mathrm{n}}\cdot\boldsymbol{V})-\boldsymbol{V}\cdot(\nabla\cdot\boldsymbol{P}_{\mathrm{n}})-\boldsymbol{P}_{\mathrm{nv}}:\nabla\boldsymbol{V}$，可以得到压㶲的传递方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[-(P-P_0)v]=-\nabla\cdot[(\boldsymbol{P}_{\mathrm{n}}-P_0\boldsymbol{I})\cdot\boldsymbol{V}]-\rho v\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{V}\cdot(\nabla\cdot\boldsymbol{P}_{\mathrm{n}})+(\boldsymbol{P}_{\mathrm{nv}}:\nabla\boldsymbol{V})\tag{27}$$

式（27）与文献［11］中的式（33）一致。式（27）右端的第 1 项是经由正交应力传输的㶲，第 2 项是与热㶲、化学㶲在 Gibbs-Duhem 关系约束下的可逆的相互转换部分，第 3 项是与动能㶲可逆的相互转换［见式（10)］，第 4 项是由于流体摩擦压㶲不可逆的转换为热㶲部分，能级降低了 $(1-T_0/T)$ 倍［见式（26)］。

2.3 化学㶲传递方程

应用化学㶲的定义、式（3）及其关系式 $\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\mu_{k0}\nu_{kj}J_j=0$，可以得到化学㶲 传递方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\sum_{k=1}^{K}(\mu_k-\mu_{k,0})\omega_k\right]=-\nabla\cdot\left[\sum_{k=1}^{K}(\mu_k-\mu_{k,0})\boldsymbol{j}_k\right]+\sum_{k=1}^{K}\rho\omega_k\frac{\mathrm{d}\mu_k}{\mathrm{d}t}+\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot\nabla\mu_k+\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\mu_k\nu_{kj}J_j\tag{28}$$

式（28）与文献［11］中的式（34）一致。式（28）右端的第 1 项是经由化学扩散传输的㶲，第 2 项是与热㶲、压㶲在 Gibbs-Duhem 关系约束下的可逆的相互转换部分，第 3 项和第 4 项为由于扩散和化学反应化学㶲不可逆的转换为热㶲部分，能级降低了 $(1-T_0/T)$ 倍［见式（26)］。

2.4 动能㶲、势能㶲、电磁㶲传递方程

动能㶲、势能㶲、电磁㶲传递方程分别等价于动能、势能、电磁能传递方程，分别是式（10)、式（14）和式（12)。

式（10）右端的第 1 项是经由剪切应力传输的㶲；第 2 项是动能㶲与压㶲可逆的相互转换部分［见式（27)］；第 3 项是动能㶲不可逆的转换为热㶲部分，但能级降低了 $(1-T_0/T)$ 倍［见式（26)］；第 4 项是动能㶲与势能㶲可逆的相互转换部分［见式（14)］；第 5 项是非保守力对流体做功的动能㶲；第 6 项是外力对扩散的功不可逆转换为热㶲的部分，能级降低了 $(1-T_0/T)$ 倍［见式（26)］；第 7 项和第 9 项是电场力、Maxwell 张力作用到以质量平均速度运动的流体微元的功不可逆转换为热㶲的部分［见式（26)］；第 8 项是动能㶲与电磁㶲可逆的相互转换部分［见式（12)］。显然，若不考虑电磁场的作用，则式（10）可简化为通常流体的动能㶲传递方程。

式（14）右端的第 1 项是经由扩散传输的是势能㶲；第 2 项是势能㶲与动能㶲可逆的相互转换部分［见式（10)］；第 3 项是由于化学反应势能㶲的变化。

式（12）右端的第 1 项是电磁㶲的传输；第 2 项是电磁㶲不可逆的转换为热㶲部分，能级降低了 $(1-T_0/T)$ 倍［见式（26)］；第 3 项电磁㶲与动能㶲可逆的相互转换部分［见式（10)］。

2.5 电磁流体体系的总㶲传递方程

热㶲传递方程（26)、压㶲传递方程（27)、化学㶲传递方程（28)、动能㶲传递方程（10)、电磁㶲传递方程（12)、势能㶲传递方程（14）是不同㶲形式传递的分量方程，组合这 6 个方程得到总㶲的传递方程

$$\frac{\partial \rho Ex}{\partial t} = \Big\{ -\nabla \cdot [(T-T_0)s\rho \boldsymbol{V}] - \nabla \cdot \left[\left(1-\frac{T_0}{T}\right)T\boldsymbol{j}_s\right] + \frac{T_0}{T}(\boldsymbol{j}_s \cdot \nabla T) + \rho s\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} + \left(1-\frac{T_0}{T}\right)\Big[-\boldsymbol{P}_{\rm nv} : \nabla \boldsymbol{V} - \boldsymbol{P}_{\rm sv} : \nabla \boldsymbol{V} - \sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k \cdot \nabla \mu_k - \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\mu_k\nu_{kj}J_j + \sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k \cdot \boldsymbol{F}_k + \left(\frac{\boldsymbol{j}_{\rm e}^2}{\sigma_{\rm e}} - \frac{\rho_{\rm e}\boldsymbol{j}_{\rm e}\cdot \boldsymbol{V}}{\sigma_{\rm e}}\right) - \rho_{\rm e}\boldsymbol{V}\cdot \boldsymbol{E} - \boldsymbol{V}\cdot \boldsymbol{f}_{\rm media}\Big]\Big\} + \Big\{-\nabla \cdot [-(P-P_0)v\rho \boldsymbol{V}] - \nabla \cdot [(\boldsymbol{P}_{\rm n} - P_0\boldsymbol{I})\cdot \boldsymbol{V}] + \boldsymbol{V}\cdot(\nabla \cdot \boldsymbol{P}_{\rm n}) + (\boldsymbol{P}_{\rm nv} : \nabla \boldsymbol{V}) - \rho v\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}\Big\} + \Big\{-\nabla \cdot \Big[\sum_{k=1}^{K}(\mu_k - \mu_{k,0})\omega_k\rho \boldsymbol{V}\Big] - \nabla \cdot \Big[\sum_{k=1}^{K}(\mu_k - \mu_{k,0})\boldsymbol{j}_k\Big] + \sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot \nabla \mu_k + \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\mu_k\nu_{kj}J_j + \sum_{m=1}^{K}\rho\omega_k\frac{\mathrm{d}\mu_k}{\mathrm{d}t}\Big\} + \Big[-\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{V}V^2/2) - \nabla \cdot (\boldsymbol{P}_{\rm sv}\cdot \boldsymbol{V}) - \boldsymbol{V}\cdot(\nabla \cdot \boldsymbol{P}_{\rm n}) + \boldsymbol{P}_{\rm sv} : \nabla \boldsymbol{V} + \sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot \boldsymbol{f}_k + \sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot \boldsymbol{f}'_k - \sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot \boldsymbol{F}_k + \rho_{\rm e}\boldsymbol{V}\cdot \boldsymbol{E} + \boldsymbol{V}\cdot(\boldsymbol{j}_{\rm e}\times \boldsymbol{B}) + \boldsymbol{V}\cdot \boldsymbol{f}_{\rm media}\Big] + \Big[-\nabla \cdot (\rho\phi \boldsymbol{V}) - \nabla \cdot \Big(\sum_{k=1}^{K}\phi_k\boldsymbol{j}_k\Big) - \sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot \boldsymbol{f}_k + \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\phi_k\nu_{kj}J_j\Big] + \{-\nabla \cdot (\boldsymbol{E}\times \boldsymbol{H}) - [\boldsymbol{j}_{\rm e}^2/\sigma_{\rm e} - \rho_{\rm e}(\boldsymbol{j}_{\rm e}\cdot \boldsymbol{V})/\sigma_{\rm e}] - \boldsymbol{V}\cdot(\boldsymbol{j}_{\rm e}\times \boldsymbol{B})\} \tag{29}$$

式（29）明显地表明了不同㶲形式之间的传递和转换关系，包含可逆的转换和不可逆的转换及其㶲能级降低的数量和形式。利用 Gibbs-Duhem 关系，式（29）简化为

$$\frac{\partial \rho Ex}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{j}^{\circ}_{\rm ex} = -d_{\rm ex} + \sum_{k=1}^{K}\rho_k\boldsymbol{V}_k\cdot \boldsymbol{f}'_k + \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\phi_k\nu_{kj}J_j \tag{30}$$

其中

$$\boldsymbol{j}^{\circ}_{\rm ex} = \rho \boldsymbol{V}\Big[(T-T_0)s - (P-P_0)v + \sum_{k}(\mu_k - \mu_{k0})\omega_k + \frac{V^2}{2} + \phi\Big] + \left(1-\frac{T_0}{T}\right)T\boldsymbol{j}_s + (\boldsymbol{P}_{\rm n} - P_0\boldsymbol{I})\cdot \boldsymbol{V} + \sum_{k=1}^{K}(\mu_k - \mu_{k,0})\boldsymbol{j}_k + (\boldsymbol{P}_{\rm sv}\cdot \boldsymbol{V}) + \sum_{k=1}^{K}\phi_k\boldsymbol{j}_k + (\boldsymbol{E}\times \boldsymbol{H}) \tag{31}$$

是电磁流体体系的㶲流，其右端第 1 项是流体对流传输㶲流，第 2 项是经由热传导、热辐射和扩散引起的热㶲流，第 3 项是由正交应力引起的压㶲流，第 4 项是扩散引起的化学㶲流，第 5 项是扩散引起的势能㶲流，第 6 项是由剪切应力引起的动能㶲流，第 7 项是电磁能传输引起的电磁㶲流。

$$d_{\rm ex} = \frac{T_0}{T}\Big[-\boldsymbol{P}_{\rm nv} : \nabla \boldsymbol{V} - \boldsymbol{P}_{\rm sv} : \nabla \boldsymbol{V} - \boldsymbol{j}_s\cdot \nabla T - \sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot \nabla \mu_k - \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{R}\mu_k\nu_{kj}J_j + \sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{j}_k\cdot \boldsymbol{F}_k + \left(\frac{\boldsymbol{j}_{\rm e}^2}{\sigma_{\rm e}} - \frac{\rho_{\rm e}\boldsymbol{j}_{\rm e}\cdot \boldsymbol{V}}{\sigma_{\rm e}}\right) - \rho_{\rm e}\boldsymbol{V}\cdot \boldsymbol{E} - \boldsymbol{V}\cdot \boldsymbol{f}_{\rm media}\Big] \tag{32}$$

是电磁流体的㶲损率，其中前 6 项与通常流体的㶲损率相同，第 7～9 项分别是电功转换、电场、Maxwell 张力作用到以质量平均速度运动的流体微元不可逆的㶲损率。式（30）右端的第 2 项是非保守力的功㶲，第 3 项是由于化学反应势能㶲的变化。容易看出，若不考虑电磁场的作用，则式（30）～式（32）可分别简化为通常流体的㶲传递方程、㶲流表达式和㶲损率表达式。

3　结　论

通过重新审视多组分电磁流体的质量传递方程、动量传递方程、能量传递方程，其中包含黏性过程，对流、热传导、热辐射引起的热传输过程，电磁能传输过程，质量扩散过程和化学反应过程，重新构建了电磁流体的熵传递方程，利用这些方程进一步构建了不同形式㶲的传递方程和总㶲传递方程。分析了不同形式㶲之间的传递和转换规律，得到了不同形式㶲传递和转换的定量关系，给出了由于不可逆过程熵产（或㶲损）的表达式，从而获得了不同过程、不同㶲形式传递和转换的深刻理解，定量探明了电磁流体能量的传递和转换中能量耗散的不可逆来源，为电磁流体能量的传递和转换及其合理利用指明了方向。需要指出，以上是对电磁流体体系中不同形式㶲之间传递和转换的一般规律研究，对于实际问题的应用需要在给定的工况和边界条件下，结合质量传递方程、动量传递方程、能量传递方程求解电磁流体的㶲传递方程，这是较复杂和有待进一步研究的问题。

符　号　说　明

$\boldsymbol{B}$——磁感应强度，T
$\boldsymbol{D}$——电位移矢量，$\mathrm{C \cdot m^{-2}}$
$d_{\rm ex}$——㶲损率，$\mathrm{J \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}}$
$\boldsymbol{E}$——电场强度，$\mathrm{V \cdot m^{-1}}$
$\boldsymbol{F}_k$——k 组分单位质量体系受到的外力，$\mathrm{N \cdot kg^{-1}}$
$\boldsymbol{g}$——电磁动量，$\mathrm{C \cdot T \cdot m^{-2}}$
g_s——熵产率，$\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}}$
$\boldsymbol{H}$——磁场强度，$\mathrm{A \cdot m^{-1}}$

$\boldsymbol{I}$——单位张量

J_j——单位体积第 j 反应化学反应率，$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$

$\boldsymbol{j}_e$——电流密度，$A \cdot m^{-2}$

$\boldsymbol{j}_{ex}$——㶲流密度，$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$

$\boldsymbol{j}_k$——k 组分质量扩散流，$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$

$\boldsymbol{j}_q$——热通量，$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$

$\boldsymbol{j}_s$——熵流密度，$J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$

$\boldsymbol{P}$——流体应力张量，$N \cdot m^{-2}$

P——热力学压力，$N \cdot m^{-2}$

$\boldsymbol{T}$——电磁场张量，$C \cdot T \cdot m^{-2}$

T——温度，K

u——单位质量体系的内能，$J \cdot kg^{-1}$

$\boldsymbol{V}$——质量平均速度，$m \cdot s^{-1}$

$\boldsymbol{V}_k$——k 组分速度，$m \cdot s^{-1}$

ε——介电常数，$F \cdot m^{-1}$

μ——磁导率，$H \cdot m^{-1}$

μ_k——化学势，$J \cdot kg^{-1}$

ρ_k——质量密度，$kg \cdot m^{-3}$

ρ_e——电荷密度，$C \cdot m^{-3}$

σ_e——电导率，$S \cdot m^{-1}$

ϕ_k——单位质量体系 k 组分的势能，$J \cdot kg^{-1}$

ω_k——k 组分质量分数

References

[1] Gaggioli R A. The concept of available energy. *Chemical Engineering Science*, 1961, **16**: 87-96

[2] Gaggioli R A. The concept of thermodynamic friction, thermal available energy, chemical available energy and thermal energy. *Chemical Engineering Science*, 1962, **17**: 523-530

[3] Soma J. The new energy hyperequation and its implication. *Energy Engineering*, 1985, **82** (2): 62-70

[4] Soma J. Exergy transfer: a new field of energy endeavor. *Energy Engineering*, 1985, **82** (4): 11-22

[5] Wang S P, Chen Q L, Yin Q H, Hua B. Exergy destruction due to mean flow and fluctuating motion in turbulent flows. *Energy*, 2003, **28** (8): 809-823

[6] Wang S P, Chen Q L, Yin Q H, Hua B. A phenomenological equation of exergy transfer and its application. *Energy*, 2005, **30** (1): 85-95

[7] Xiang Xinyao (项新耀). Exergy transport equation and exergy transfer analysis. *Journal of Daqing Petroleum Institute*(大庆石油学院学报), 1998, **22** (2): 1-5

[8] Qiao Chunzhen (乔春珍), Xiang Xinyao (项新耀), Wu Zhaoyun (吴照云). Description of exergy transfer in the two dimensional thermal conduction process. *Journal of Engineering Thermophysics*(工程热物理学报), 2003, **24** (2): 202-204

[9] Li Yourong (李友荣), Zheng Congming (郑丛明), Wu Shuangying (吴双应). An investigation on fundamental characteristics of heat exergy transfer. *Journal of Chongqing University*(重庆大学学报), 1998, **21** (3): 1-5

[10] Wu Shuangying (吴双应), Chen Yan (陈燕), Li Yourong (李友荣), Zeng Danling (曾丹苓). Exergy transfer characteristics of forced convective heat transfer through a smooth duct subjected to constant heat flux. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2006, **57** (3): 509-514

[11] Dunbar W R, Lior N, Gaggioli R A. The component equations of energy and exergy. *Journal of Energy Resources Technology*, 1992, **114**: 75-83

[12] de Groot S R, Mazur P. Non-equilibrium Thermodynamics. New York: North Holland Publishing Co., 1962: 9-13

[13] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Transport Phenomena. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2001: 18-36

[14] Cramer K R, Pai S I. Magnetofluid Dynamics for Engineers and Applied Physicists. New York: McGraw-Hill, 1973: 16-33

[15] Jackson J D. Classical Electrodynamics. New York: John Wiley & Sons, 1975: 36-116