

文章编号: 1004 - 0609(2005)12 - 2003 - 06

CeCl₃ 对含 Ce 镁合金精炼过程中 Ce 损耗量的影响^①

高洪涛, 吴国华, 樊 昱, 丁文江, 朱燕萍

(上海交通大学 材料科学与工程学院 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 采用含 CeCl₃ 的净化熔剂对含 Ce 的镁合金进行精炼, 研究了 CeCl₃ 对合金中 Ce 损耗量的影响规律。结果表明: 当熔剂中不含 CeCl₃ 时, 合金中的 Ce 损失高达 27.7%; 而当 CeCl₃ 的含量达到 15% 时, 合金中的 Ce 损失仅为 4.5%, CeCl₃ 处理使镁合金中稀土相均匀分布, 使 Mg₁₇Al₁₂ 相细化, 但相组成没有明显变化; 随着 CeCl₃ 含量的增加, 合金力学性能提高, 但过多的 CeCl₃ 会在合金中引入熔剂夹杂。并从热力学方面探讨了熔剂与镁液的作用机理, 计算了镁熔体中 Mg 和 Ce 的活度及熔剂熔体中 MgCl₂ 和 CeCl₃ 的活度。结果表明, 由于 CeCl₃ 抑制了合金中 Ce 与熔剂中 MgCl₂ 的反应, 从而降低了 Ce 的损耗。

关键词: 镁合金; Ce 损耗; 精炼; 热力学

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Effect of CeCl₃ on loss of Ce in magnesium alloy during refining

GAO Hong-tao, WU Guo-hua, FAN Yu, DING Wen-jiang, ZHU Yan-ping

(State Key Laboratory of Metal Matrix Composites,

School of Materials Science and Engineering,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The effect of CeCl₃ in flux on the loss of Ce in magnesium alloy during refining was investigated. The results show when there is no CeCl₃ in the flux, the loss of Ce in the magnesium alloy AZ91 is 27.7%. When CeCl₃ is added by 15% in the flux, the loss of Ce is only 4.5%, CeCl₃ can also make Ce-containing phases distribute evenly and Mg₁₇Al₁₂ phase refine, but the phase composition of the experimental alloys can not change obviously. The mechanical properties of the alloys are improved by CeCl₃ processing with the increase of CeCl₂ content, and excessive CeCl₃ will produce flux inclusions. Furthermore, the reactions between flux and magnesium melt were studied thermodynamically. The activities of Mg and Ce in magnesium alloy and MgCl₂ and CeCl₃ in flux were calculated. The results show that CeCl₃ restrains the reaction between Ce in magnesium alloy and MgCl₂ in flux. Therefore, the loss of Ce in magnesium alloy decreases.

Key words: magnesium alloy; loss of Ce; refining; thermodynamic

镁合金以其优良的性能得到广泛应用^[1-3], 但是由于镁合金在高温下易于燃烧, 从而在铸造过程中产生夹杂, 因此镁合金常需要净化^[4]。普通含 MgCl₂ 的熔剂对普通镁合金有很好的净化效果, 但对于含 Ce (常见的稀土合金化元素^[5, 6]) 的镁合金

不能使用含 MgCl₂ 的熔剂进行净化, 因为 MgCl₂ 会与稀土元素 Ce 反应, 导致昂贵稀土 Ce 大量损耗^[7-9]。Emley^[10] 和张承甫^[11] 用 CaCl₂ 代替熔剂中 MgCl₂ 或添加其它辅助物以减少稀土 Ce 损失, 但净化效果难以保证。

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50474005); 国家高技术研究发展计划(2002AA331120)

收稿日期: 2005 - 03 - 03; 修订日期: 2005 - 08 - 24

作者简介: 高洪涛(1976 -), 男, 博士研究生

通讯作者: 高洪涛, 电话: 021 - 62932239; 传真: 021 - 62932113; E-mail: hunter@sjtu.edu.cn

通过在含 $MgCl_2$ 的普通熔剂中加入活性稀土化合物 $CeCl_3$ ，以达到既能良好地除杂，又能降低昂贵 Ce 损耗的目的，但该方面的研究尚未见报道。本文作者研究了 $CeCl_3$ 对含 Ce 镁合金精炼过程中 Ce 损耗量的影响规律，并从热力学上进行了探讨，对于发展含稀土镁合金的熔剂精炼技术具有十分重要的理论和实践价值。

1 实验

采用工业镁合金 AZ91、纯铈 ($\geq 99.9\%$)。实验熔剂由自行开发的普通镁合金精炼剂 JDMJ 与化学纯 $CeCl_3$ 混合而成，其组分分别列于表 1 和 2。

表 1 精炼剂 JDMJ 的组分

Table 1 Composites of JDMJ flux
(mass fraction, %)

$MgCl_2$	KCl	NaCl	X
47	22	19	12

X is some additives

表 2 实验熔剂的组分

Table 2 Composites of JC series fluxes
(mass fraction, %)

Flux	JDMJ	$CeCl_3$
JC9505	95	5
JC9010P	90	10
JC8515	85	15
JC8020	80	20

在坩埚电阻炉中熔炼镁合金 AZ91，加入 1% 铈制成含稀土 Ce 的镁合金。然后分别用 2% 的实验熔剂在 730~740 $^{\circ}C$ 对该稀土镁合金进行精炼处理。合金化学成份采用电感等离子耦合光谱仪 (ICP, IRIS Advantage 1000) 测定。合金组织与相成分采用光学显微镜 (OM, Olympus PME3) 和带能谱的电子显微镜 (SEM, Philip SEM515) 分析。采用 X 衍射仪 (XRD, D/max IIIA) 进行相组成分析。拉伸实验在 Zwick/Roell 材料实验机上进行。

2 结果与分析

2.1 Ce 损耗量

实验熔剂精炼后合金中的 Ce 含量如图 1 所示。 Ce 损耗量如表 3 所示。

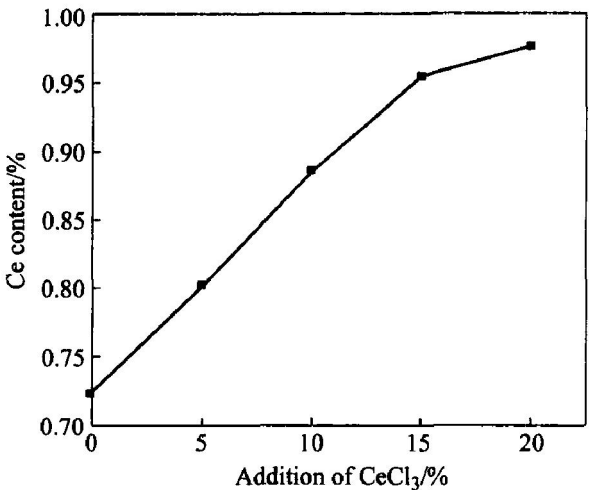


图 1 熔剂中 $CeCl_3$ 的含量与精炼后合金中 Ce 含量的关系

Fig. 1 Relationship between Ce content in alloys after purification and content of $CeCl_3$

表 3 合金中 Ce 的损耗量

Table 3 Mass loss of Ce in experimental alloy

Flux	Mass loss of Ce / %
JDMJ	27.7
JC9505	19.8
JC9010	11.4
JC8515	4.5
JC8020	2.2

从图 1 和表 3 可以看出，随着熔剂中 $CeCl_3$ 含量的增加，精炼后合金中的稀土 Ce 含量几乎呈直线增加，不含 $CeCl_3$ 的 JDMJ 熔剂精炼后，合金中 Ce 含量只有 0.723%，损耗量达 27.7%；而当采用含 15% $CeCl_3$ 的 JC8515 熔剂精炼后，合金中的 Ce 含量为 0.955%，损耗量仅为 4.5%。由此可见， $CeCl_3$ 可以显著减少熔剂精炼过程中 Ce 的损耗。

2.2 组织力学性能

图 2 所示为 $CeCl_3$ 处理实验镁合金前后的微观组织。由图 2 可看出，净化处理前，稀土相多偏聚在 $Mg_{17}Al_{12}$ 相，且分布不均匀，粗大杆状很多；而净化处理后，稀土相分布更均匀，粗大杆状相应减少，但是相组成并没有明显变化 (见图 3)。

图 4 所示为 $CeCl_3$ 用量对处理后的镁合金力学性能的影响。由图 4 可看出，随着 $CeCl_3$ 加入量增加，合金的抗拉强度 (σ_b) 和延伸率 (δ) 都明显提高，这是由于处理后，镁合金中的夹杂减少，同时

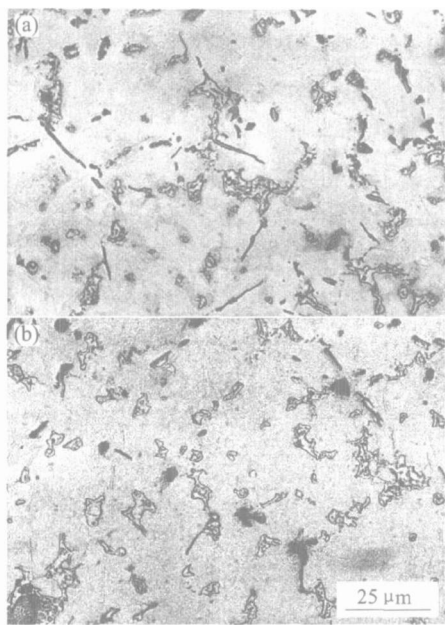


图 2 CeCl_3 处理前(a)和
处理后(b)含 Ce 镁合金的微观组织

Fig. 2 Microstructures of Mg alloys with Ce
before (a) and after (b) CeCl_3 processing

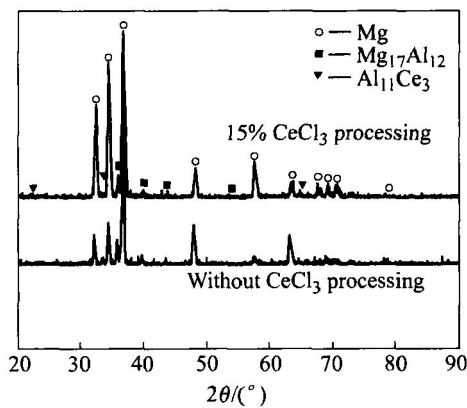


图 3 经 CeCl_3 处理后含 Ce 镁合金相组成的
X 射线衍射谱

Fig. 3 XRD patterns of Mg alloys with
Ce after CeCl_3 processing

$\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相细化及稀土相均匀化所致。由于过量的 CeCl_3 熔剂夹杂引入, 从而导致力学性能降低, 结果如图 5 所示。由图 5 可看出, 能谱分析结果中包含氯离子, 可以肯定为熔剂夹杂。能谱分析结果如表 4 所列。

3 讨论

在含 CeCl_3 的熔剂对含 Ce 镁合金的精炼过程

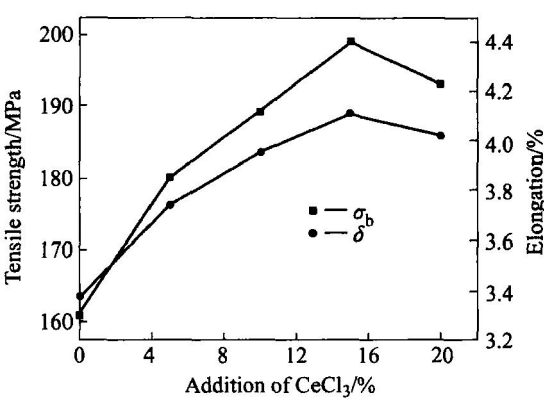


图 4 CeCl_3 添加量对镁合金力学性能的影响

Fig. 4 Effect of CeCl_3 addition on
tensile properties of Mg alloys

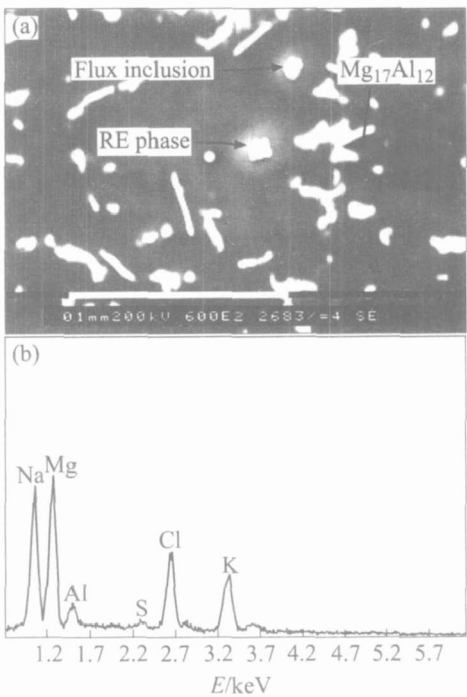


图 5 熔剂夹杂的 SEM 像(a)及其能谱分析(b)

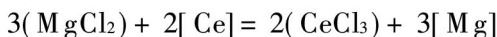
Fig. 5 SEM image(a) and EDS analysis
result (b) of flux inclusion

表 4 熔剂夹杂的能谱分析结果

Table 4 EDS analysis results of inclusion in flux

Element	Mass fraction/ %	Molar fraction/ %
Na	25.70	30.28
Mg	34.47	38.41
Al	7.46	7.49
S	1.39	1.18
Cl	16.40	12.53
K	14.59	10.11
Total	100.00	100.00

中, 反应如下:



$$\Delta G^\ominus = -270\,078 + 170.46T \lg T - 1\,203.19T$$

反应式中圆括弧表示物质在熔剂中, 方括弧表示物质在镁熔体中。

使用相关热力学数据^[12, 13], 在标准状态下, 该反应的标准 Gibbs 自由能变化可计算得

$$\Delta G^\ominus = -503.051\,8 \text{ kJ/mol}$$

负值说明标准状态下该反应可以发生, 即合金中的 Ce 会和熔剂中的 MgCl_2 反应。而在实际状态下, 该反应的标准 Gibbs 自由能变化为

$$\Delta G = \Delta G^\ominus + RT \ln \frac{\alpha_{\text{Mg}}^3 \cdot \alpha_{\text{CeCl}_3}^2}{\alpha_{\text{MgCl}_2}^3 \cdot \alpha_{\text{Ce}}}$$

式中 α_{Mg} , α_{MgCl_2} , α_{Ce} 和 α_{CeCl_3} 分别是 Mg, MgCl_2 , Ce 和 CeCl_3 的活度。

上述物质的活度可分别计算如下。

1) 镁合金熔体中 Mg 的活度

计算镁熔体中 Mg 的活度时, 为简便, 可假定为 Mg-Al 二元体系, 采用熔化自由能法计算。

第一步, 先用标准熔化 Gibbs 自由能求液相线上 Mg 的活度 $\alpha_{\text{Mg}}^{\text{L}}(873 \text{ K})$ (根据图 6 所示相图可知 AZ91 中的液相线温度约为 600°C , 即 873 K)。

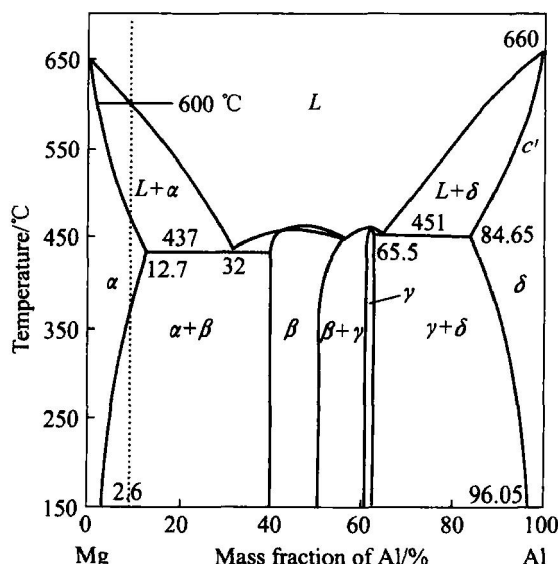


图 6 Mg-Al 相图^[14]

Fig. 6 Phase diagram of binary Mg-Al alloy

在液相线上, Mg 的熔化自由能

$$\Delta_{\text{fus}} G_{\text{Mg}}^\ominus(873 \text{ K}) = -RT \ln \alpha_{\text{Mg}}^{\text{L}}(873 \text{ K})$$

在熔点处, Mg 的熔化自由能

$$\Delta_{\text{fus}} G_{\text{Mg}}^\ominus = \Delta_{\text{fus}} H_{\text{Mg}}^\ominus - T_{\text{f, Mg}}^* \cdot \Delta_{\text{fus}} S_{\text{Mg}}^\ominus = 0$$

得

$$\Delta_{\text{fus}} S_{\text{Mg}}^\ominus = \frac{\Delta_{\text{fus}} H_{\text{Mg}}^\ominus}{T_{\text{f, Mg}}^*}$$

假设 Mg 标准熔化焓 $\Delta_{\text{fus}} H_{\text{Mg}}^\ominus$ 和标准熔化熵 $\Delta_{\text{fus}} S_{\text{Mg}}^\ominus$ 随温度变化不大, 则在 873 K 时,

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{fus}} G_{\text{Mg}}^\ominus(873 \text{ K}) &= \Delta_{\text{fus}} H_{\text{Mg}}^\ominus - 873 \Delta_{\text{fus}} S_{\text{Mg}}^\ominus \\ &= \frac{\Delta_{\text{fus}} H_{\text{Mg}}^\ominus \cdot (T_{\text{f, Mg}}^\ominus - 873)}{T_{\text{f, Mg}}^\ominus} \end{aligned}$$

查表得 $\Delta_{\text{fus}} H_{\text{Mg}}^\ominus = 8.71 \text{ kJ/mol}$, 标准态 Mg 的熔点 $T_{\text{f, Mg}}^\ominus = 922 \text{ K}$ 。

从以上各式联合可得液相线上 Mg 的活度为 $\alpha_{\text{Mg}}^{\text{L}}(873 \text{ K}) = 0.938$, 活度系数为 $\gamma_{\text{Mg}}(873 \text{ K}) = 1.021$ 。

第二步, 根据正规溶液性质求实际状态下 Mg 的活度。

设精炼温度为 $1\,008 \text{ K}$, 由 $T_{1\,008 \text{ K}} \ln \gamma_{\text{Mg}}(1\,008 \text{ K}) = T_{873 \text{ K}} \ln \gamma_{\text{Mg}}(873 \text{ K})$

可得 $1\,008 \text{ K}$ 时的 Mg 活度系数 $\gamma_{\text{Mg}}(1\,008 \text{ K}) = 1.018$ 。

因此, 实际状态下 Mg 的活度为 $\alpha_{\text{Mg}} = 0.936$ 。

2) 镁合金熔体中 Ce 的活度

在计算镁熔体中 Ce 的活度时, 可对熔体进行简化, 只考虑 Mg-Ce 二元系, 利用 a 函数进行计算。镁合金熔体中的相关数据如表 5 所列。

根据吉布斯-杜安方程

$$x_{\text{Ce}} dG_{\text{Ce, m}} + x_{\text{Mg}} dG_{\text{Mg, m}} = 0$$

式中 x_{Mg} 和 x_{Ce} 分别为镁熔体中 Mg 和 Ce 的摩尔分数; $G_{\text{Mg, m}}$ 和 $G_{\text{Ce, m}}$ 分别是 Mg 和 Ce 的偏摩尔 Gibbs 自由能。

得

$$x_{\text{Ce}} d \ln \alpha_{\text{Ce}} + x_{\text{Mg}} d \ln \alpha_{\text{Mg}} = 0$$

或

$$x_{\text{Ce}} d \gamma_{\text{Ce}} + x_{\text{Mg}} d \gamma_{\text{Mg}} = 0$$

对上式积分得 $\ln \gamma_{\text{Ce}} = -\alpha_{\text{Mg}} x_{\text{Ce}} x_{\text{Mg}} +$

$$\int_0^{x_{\text{Mg}}} \alpha_{\text{Mg}} dx_{\text{Mg}}$$

式中 $\alpha_{\text{Mg}} = \frac{\ln \gamma_{\text{Mg}}}{(1 - x_{\text{Mg}})^2}$, 称为 a 函数。

为简便起见, 设 a 函数与 x_{Mg} 成线性关系, 则利用表 5 中数据可得 $\ln \gamma_{\text{Ce}} = 1.2464$ 或 $\gamma_{\text{Ce}} = 3.4715$ 。

表 5 镁合金熔体中的相关数据

Table 5 Related data of Mg alloy flux

x_{Mg}	x_{Ce}	α_{Mg}	γ_{Mg}
0.919	0.0019	0.936	1.018

从而得镁熔体中 Ce 的活度 $\alpha_{\text{Ce}} = 0.0066$ 。

3) 熔剂中 CeCl_3 和 MgCl_2 活度的计算

熔剂中主要组成为 MgCl_2 、 KCl 、 NaCl 和 CeCl_3 , 根据 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ 相图(见图 7), 精炼温度下熔剂熔体中存在的主要阳离子为 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 和 Ce^{3+} ; 主要阴离子为 MgCl_4^{2-} 。熔剂中主要物质的摩尔数如表 6 所列。

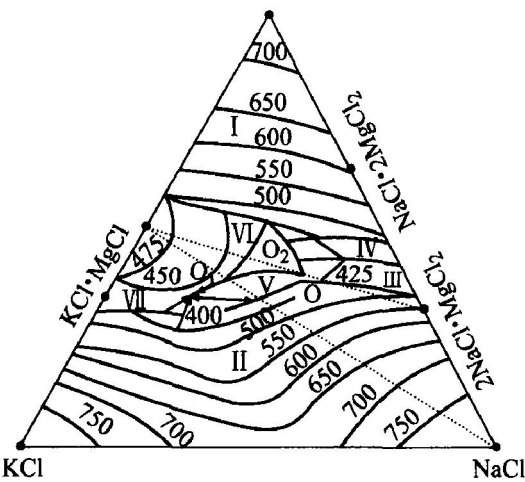


图 7 $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$ 的相图^[15]

Fig. 7 Phase diagram of $\text{MgCl}_2\text{-KCl-NaCl}$

n_{MgCl_2} , n_{KCl} , n_{NaCl} 和 n_{CeCl_3} 分别是 MgCl_2 、 KCl 、 NaCl 和 CeCl_3 的摩尔数。

则阴离子的摩尔数为 $n_{\text{MgCl}_4^{2-}} = \frac{1}{4}[2n_{\text{MgCl}_2} + n_{\text{KCl}} + n_{\text{NaCl}} + 3n_{\text{CeCl}_3}]$
阳离子摩尔数为 $n_{\text{Mg}^{2+}} + n_{\text{K}^+} + n_{\text{Na}^+} + n_{\text{Ce}^{3+}} - n_{\text{MgCl}_4^{2-}}$

Mg^{2+} 的摩尔数为 $n_{\text{Mg}^{2+}} = n_{\text{MgCl}_2} - n_{\text{MgCl}_4^{2-}}$
 Ce^{3+} 的摩尔数为 n_{CeCl_3}
则 Mg^{2+} 的摩尔分数为
$$x_{\text{Mg}^{2+}} = \frac{n_{\text{MgCl}_2} - n_{\text{MgCl}_4^{2-}}}{n_{\text{MgCl}_2} + n_{\text{KCl}} + n_{\text{NaCl}} + n_{\text{CeCl}_3} - n_{\text{MgCl}_4^{2-}}}$$

 Ce^{3+} 的摩尔分数为
$$x_{\text{Ce}^{3+}} = \frac{n_{\text{CeCl}_3}}{n_{\text{MgCl}_2} + n_{\text{KCl}} + n_{\text{NaCl}} + n_{\text{CeCl}_3} - n_{\text{MgCl}_4^{2-}}}$$

利用表 6 中的数据
可得 $x_{\text{Mg}^{2+}} = 0.106$, $x_{\text{Ce}^{3+}} = 0.056$ 。

表 6 熔剂中主要物质的量

Table 6 Mole number of major substance in flux

n_{MgCl_2}	n_{KCl}	n_{NaCl}	n_{CeCl_3}
0.521	0.302	0.308	0.041

为简便, 用摩尔分数代替活度, 即得熔剂熔体中 Mg^{2+} 和 Ce^{3+} 的活度分别为 $\alpha_{\text{Mg}^{2+}} = 0.106$ 和

$\alpha_{\text{Ce}^{3+}} = 0.056$ 。
最后利用活度值 $\alpha_{\text{Mg}} = 0.936$ 、 $\alpha_{\text{Ce}} = 0.0066$ 、 $\alpha_{\text{Mg}^{2+}} = 0.106$ 和 $\alpha_{\text{Ce}^{3+}} = 0.056$ 得

$$\Delta G = \Delta G^\ominus + RT \ln \frac{\alpha_{\text{Mg}} \cdot \alpha_{\text{CeCl}_3}^3}{\alpha_{\text{MgCl}_2}^3 \cdot \alpha_{\text{Ce}}^2}$$

计算实际状态下反应的 Gibbs 自由能变为

$$\Delta G = -966\,827.9 + 8.314 \times 1008 \times \ln(49\,567.6) = -876.2254 \text{ kJ/mol}$$

虽然 Gibbs 自由能仍为负值, 但随着 α_{CeCl_3} 的增加, 反应的热力学倾向将会减弱, 即 CeCl_3 抑制反应向右进行。这就是含 CeCl_3 熔剂降低合金精炼过程中 Ce 损耗的主要原因。若同时考虑动力学方面的因素, 在精炼过程中, Mg 为本体, CeCl_3 与 Mg 的反应动力学条件要比 Ce 与 MgCl_2 反应的动力学条件优越得多。因此, 不管是热力学或者动力学, 在实际条件下, 都不利于反应向右进行。

4 结论

- 1) 含 CeCl_3 的熔剂精炼含 Ce 的镁合金时, 随着 CeCl_3 含量的增加, 合金中 Ce 的损失减少, 当熔剂中不含 CeCl_3 时, 合金中 Ce 损失高达 27.7%; 而当 CeCl_3 的含量达到 15% 时, 合金中 Ce 损失仅为 4.5%。
- 2) CeCl_3 处理使镁合金中稀土相均匀分布, 使 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相细化, 但相组成没有明显变化。同时随着 CeCl_3 加入量的增加, 合金力学性能提高, 但过多的 CeCl_3 会在合金中引入熔剂夹杂。
- 3) 利用熔化自由能法和 α 函数法计算了镁熔体中 Mg 和 Ce 的活度, 利用熔盐离子模型计算了熔剂熔体中 MgCl_2 和 CeCl_3 的活度, 得出 $\alpha_{\text{Mg}} = 0.936$, $\alpha_{\text{Ce}} = 0.0066$, $\alpha_{\text{Mg}^{2+}} = 0.106$ 和 $\alpha_{\text{Ce}^{3+}} = 0.056$ 。根据计算结果, 由于 CeCl_3 强烈地抑制了合金中 Ce 与熔剂中 MgCl_2 的反应, 从而使得含 CeCl_3 熔剂降低镁合金精炼过程中 Ce 的损耗。

REFERENCES

[1] Froes F H, Eliezer D, Aghion E. The science, technology, and applications of magnesium [J]. JOM, 1998, 50(9): 30-34.
[2] Buch F V, Schumann S, Aghion E, et al. Development of a low-cost, temperature and creep resistant magnesium die casting alloy [A]. Kainer K U. Magnesium Alloys and their Applications [C]. Wernheim:

- WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000. 23 - 28.
- [3] 曾荣昌, 柯伟, 徐永波, 等. Mg 合金的最新进展及应用前景[J]. 金属学报, 2001, 37(7): 673 - 685.
ZENG Rong-chang, KE Wei, XU Yong-bo, et al. Recent development and application of magnesium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(7): 673 - 685.
- [4] 卢晨, 吴国华, 蔡超, 等. 镁合金净化技术研究[J]. 金属成形工艺, 2002, 20(5): 5 - 7.
LU Chen, WU Guo-hua, CAI Chao, et al. Study on the purification technology of magnesium alloy[J]. Metal Forming Technology, 2002, 20(5): 5 - 7.
- [5] WANG Qir-dong, LU Yir-zhen, ZENG Xiao-qin, et al. Effects of RE on the microstructures and properties of AZ91 magnesium alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(2): 235 - 239.
- [6] 闵学刚, 孙扬善, 杜温文, 等. Ca、Si 和 RE 对 AZ91 合金的组织 and 性能的影响[J]. 东南大学学报, 2002, 32(3): 409 - 414.
MIN Xue-gang, SUN Yang-shan, DU Wen-wen, et al. Effect of Ca, Si and RE additions on the microstructures and mechanical properties of AZ91 based alloys[J]. Journal of Southeast University, 2002, 32(3): 409 - 414.
- [7] 王渠东, 吕宜振, 曾小勤, 等. 稀土在铸造镁合金中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 1999(1): 40 - 43.
WANG Qir-dong, LU Yir-zhen, ZENG Xiao-qin, et al. Application of rare earth metals in cast magnesium alloy[J]. Special Cast and Nonferrous Alloys, 1999(1): 40 - 43.
- [8] Ferro R, Saccone A, Borzone G. Rare earth metals in light alloys[J]. Journal of Alloy and Compounds, 1995, 220(1 - 2): 161 - 166.
- [9] Suseelan K N, Mittal M C. Rare earths in magnesium alloys[J]. Materials Science Forum, 1988, 30: 89 - 104.
- [10] Emley E F. Principles of Magnesium Technology[M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [11] 张承甫. 液态金属的净化与变质[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.
ZHANG Cheng-fu. Purification and Modification of Liquid Metals[M]. Shanghai: Shanghai Science Press, 1989.
- [12] 梁英教, 车荫昌, 刘小霞, 等. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
LIANG Ying-jiao, CHE Yin-chang, LIU Xiao-xia, et al. Handbook of Inorganic Thermodynamic Data[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993.
- [13] Turkdogan E T. Physical Chemistry of High Temperature Technology[M]. New York: Academic Press, 1980.
- [14] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiao-qin. Theory Foundation and Application of Magnesium Based Light Alloys[M]. Beijing: Mechanical Industrial Press, 2002.
- [15] 李文超. 冶金与材料物理化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
LI Wen-chao. Metallurgy and Materials Physic Chemistry[M]. Beijing: Metallurgy Industrial Press, 1999.

(编辑 李艳红)