

初稿 创新点：从综合热分析和微观角度直接确认了镁精炼熔剂与 MgO 等夹杂之间并非化学结合，而是物理结合的“核壳结构”，为学术界和工程界进一步澄清精炼熔剂与固态夹杂之间是“化学结合还是物理结合”争议提供新实验结果支持，为后续炉内底渣的高效分离与回收利用提供了理论支撑。

DOI: <https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20260148>

镁精炼熔剂与固态杂质的结合机制研究

孔凡洪¹, 游国强^{*1,2,3}, 董颖磊¹, 王强¹, 喻兵¹, 赵勇⁴, 廉学华⁴

(1 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

(2 明月湖实验室轻量化材料与工程研究院, 重庆 401135)

(3 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400030)

(4 新疆金盛镁业有限公司, 新疆 839000)

摘 要：针对镁精炼熔剂与固态夹杂之间的作用机制不完全明确的现状，以镁精炼熔剂、MgO 粉末、二者混合物、精炼环节产生的炉内底渣为对象，分别采用 DSC/TG 综合热分析、XRF、XRD、SEM 和 TEM 等手段进行了多尺度表征研究，结果表明：在本研究条件下 1) 镁精炼熔剂与 MgO 等固态夹杂之间的结合机制为“物理结合”，而非化学结合；2) 镁精炼熔剂与固态夹杂之间呈现出显著的“核壳包裹”特征：固态夹杂为核，熔剂为壳包裹在外。

关键词：原镁；炉内底渣；MgO 杂质；吸附机制

中图法分类号：TF114

文献标识码：A

文章编号：1002-185X(2017)0?-0???-0?

镁合金作为目前最轻的商用金属结构材料，比强度高、阻尼减振性能优异、导热导电性能优良，被誉为“21 世纪最具发展潜力的绿色金属材料”^[1-4]。同时，我国镁资源储量和金属镁产量均居全球第一^[5]，开发和利用镁对于我国而言具有重要的战略意义。

金属镁化学性质活泼，在高温下易与环境介质中的氧反应生成氧化镁夹杂，对镁材料的性能造成不利影响，必须通过精炼处理加以消除，这对于原镁冶炼、镁合金熔炼和废镁再生等生产企业而言都是必需的工艺环节。当前，工业化的镁及镁合金精炼操作一般向镁熔体加入精炼熔剂（主要成分为 MgCl₂、KCl、NaCl 等），充分搅拌，利用液化后的熔剂“吸附捕获”MgO 等固态夹杂^[6]，然后静置，熔剂-固态夹杂混合物沉降至坩埚底部，与镁熔体分离，实现镁熔体净化。沉降至坩埚底部的熔剂-固态夹杂混合物被称为炉内底渣，其中含有大量的氯化物，如果直接丢弃会造成土壤和水质污染。这些氯化物如果能回收再利用，不仅能显著减少其环境冲击，还能大大降低熔剂的使用成本，成为极具前景的发展方向。从技术层面而言，炉内底渣回收再利用的核心是如何有

效地分离炉内底渣中的熔剂和固态夹杂，这背后涉及的关键科学问题则是熔剂与固态夹杂之间的结合机制如何：如果二者是化学结合，则需要采用化学方式分离之；如果二者是物理结合，则可采用物理方法分离之。

对于熔剂与固态夹杂中间的结合方式，目前研究的研究报道很少，仅在少量较早的文献中有所涉及，且存在两种分歧的观点。一部分研究者认为，精炼熔剂中的 MgCl₂ 是核心精炼组分，主要通过化学吸附机制与固态夹杂结合：MgCl₂ 与 MgO 等固态夹杂发生络合反应（如式 1-2 所示）^[7-8]，通过化学键合生成大颗粒团，进而通过沉降分离实现净化，该过程间接增大了杂质团聚体的有效密度^[9]，使其在重力作用下通过沉降实现与镁液的分离。另有研究者提出了物理吸附的观点：文献^[10-11]认为，熔融的氯盐熔剂凭借其良好的润湿性和流动性，物理包裹和团聚细小的固态夹杂物，形成密度大于镁熔体的复合团簇，最终依靠重力沉降实现分离。然而，上述观点均为理论分析或推测，均缺乏直接实验结果支撑，难以判断两种观点的正确性。



收到初稿日期：

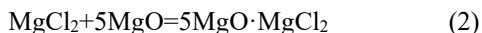
基金项目：新疆自治区重点研发计划项目（2023B01020-1）；宁波市重点研发计划项目（2024Z156）；

重庆市重点研发计划项目(CSTB2024TIAD-KPX0001)

作者简介：孔凡洪，男，2001 年生，硕士生，重庆大学材料科学与工程学院，重庆 400044，电话：13206034593，E-mail:

202309021100T@stu.cqu.edu.cn

通讯作者简介：游国强，男，副教授，重庆大学材料科学与工程学院，重庆 400044，电话：13657676560，E-mail: ygq@cqu.edu.cn



针对上述问题,本研究以原镁冶炼企业精炼环节的炉内底渣(以熔剂和固态夹杂为主的混合物)为对象,采用 DSC/TG 综合热分析和 XRF、XRD、SEM 和 TEM 等显微组织表征手段开展实验研究,以期明确精炼熔剂与固态夹杂的结合机制,结束理论认识的分歧与争议。为镁精炼领域的科学认识提供实证依据,同时为炉内底渣中熔剂的回收再生提供理论支撑。

1 材料和实验

1.1 实验原料

实验原料主要包括:精炼熔剂、MgO 粉末和新疆金盛镁业有限公司原镁重熔精炼环节的炉内底渣,其炉内底渣产生过程如图 1 所示。

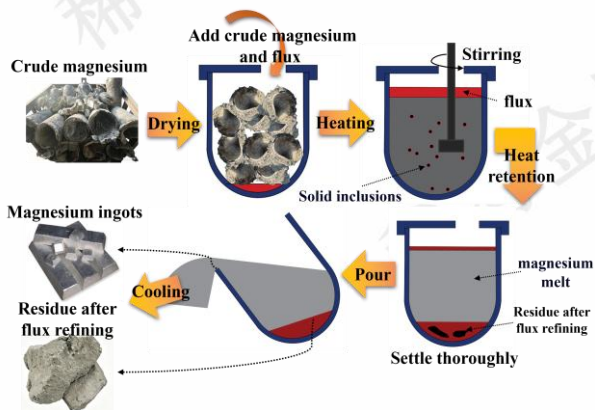


图 1 炉内底渣产生过程

Fig.1 The formation of Residue after flux refining

1.2 实验方法

(1) 综合热分析与定性润湿: 采用德国耐驰 449C 型同步热分析仪,在高纯氩气保护下,对精炼熔剂、MgO 以及二者的混合物(质量比 1:1)样品进行热重与差示扫描量热分析,升温速率 10°C/min,温度范围 25–700/800°C。验证熔剂与 MgO 粉末之间是否存在化学络合反应,采用同样的方法,对炉内底渣也进行了热分析研究;同时为定性评估精炼熔剂对 MgO 的物理包裹润湿能力,将压制成型的熔剂试样置于 MgO 基体上,在高纯氩气保护下,利用高温显微镜以 10°C/min 速率升至 800°C,并通过原位观察熔剂在 MgO 表面的铺展形貌演变,分析润湿角变化。

(2) 成分物相与组织表征: 采用 ARL Perform'X X 射线荧光光谱仪对镁冶炼过程中产生的精炼熔剂、炉内底渣进行元素成分的定性与半定量分析。采用 PANalytical X'Pert Powder 型 X 射线衍射仪对炉内底渣进行物相鉴定。采用 ESCALAB 250Xi 多功能 X 射线

光电子能谱仪对炉内底渣与 MgCl_2 进行 XPS 价态分析。利用 JEOL 7800F Prime 型场发射扫描电子显微镜结合能谱仪观察样品微观形貌,并获取元素面分布信息。采用 Talos F200X 型场发射透射电子显微镜,配备选区电子衍射及能谱分析系统,对熔剂与杂质颗粒的界面及所属物性进行表征。目的是研究炉内底渣中精炼熔剂与固态夹杂之间的关系。

2 实验结果与分析

2.1 精炼熔剂-MgO 的综合分析结果

2.1.1 精炼熔剂-MgO 热分析

热力学分析是判断化学反应是否发生的重要手段。为探究精炼熔剂与 MgO 杂质之间是否存在化学反应,在宏观尺度上对精炼熔剂、MgO 以及二者的混合物(质量比 1:1)样品分别进行了 TG 与 DSC 分析,结果如图 2 所示。

图 2 a TG 曲线所示,精炼熔剂、MgO 以及二者的混合物在 200 °C 前均出现阶段性质量损失,这主要归因于吸附水及氯盐结晶水的逐步脱除。至 300 °C 时,精炼熔剂、MgO 及混合物的质量损失率分别为 87.20%、97.41% 和 90.06%,差异源于各组分挥发特性的不同。值得注意的是,二者混合物的质量损失率介于精炼熔剂与 MgO 之间,表明二者混合后未产生协同挥发效应。

图 2 b DSC 曲线所示,精炼熔剂及其与 MgO 的混合物均在 107.52 °C、162.16 °C 和 407.18 °C 处呈现三个特征吸热峰,分别对应于低共熔氯盐的脱水过程^[12]、固-固相转变及熔融过程。关键发现是,混合物的 DSC 曲线未出现任何新的吸热或放热峰,峰位与精炼熔剂基本一致。特别是,在整个测试温度范围内(室温至 700 °C),未检测到式 1-2 所示的 MgO 与 MgCl_2 发生络合反应的特征热效应。该结果表明,在实验条件下,熔剂与 MgO 之间未发生可被热分析手段检测到的显著化学反应,从而初步排除了精炼熔剂与 MgO 之间发生化学结合的可能性。研究使用的精炼熔剂为多元氯盐(含 MgCl_2),理论上, MgCl_2 与 MgO 的混合物若发生络合反应,应在 DSC 曲线上产生新的特征峰,而研究中熔剂与 MgO 混合物的 DSC 曲线未出现新峰,且底渣的分析也未发现络合物,这间接表明即使在 MgCl_2 体系中,该络合反应在精炼条件下也没有发生或程度极微。

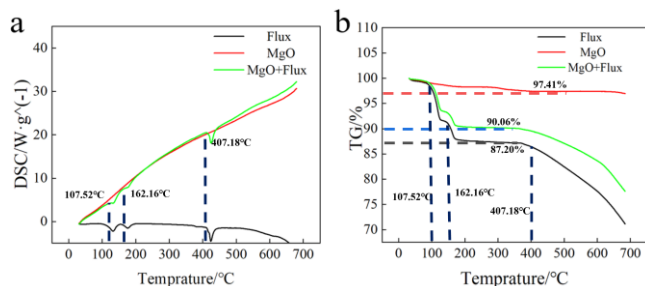


图2 精炼熔剂-MgO 热分析: a.TG 曲线;b.DSC 曲线

Fig.2 Thermal analysis results of flux, MgO, and a 1:1 mixture of MgO and flux: a. TG curves; b. DSC curves.

2.1.2 精炼熔剂-MgO 定性润湿

同时为了验证精炼熔剂-MgO 定性润湿关系, 本节通过高温显微观察法, 定性研究了精炼熔剂在 MgO 陶瓷基体表面的润湿行为。实验选取了从室温至 800°C 的五个关键温区进行原位观察, 结果如图 3 所示。

在室温 (25°C) 及 450°C 时, 熔剂试样呈固态柱状, 与 MgO 基体界面分明, 未观察到明显的铺展现象。此时, 熔剂与基体之间不存在液相流动, 接触角接近 180°, 表明在固态下熔剂无法润湿 MgO 表面。当温度升高至 550°C 时, 熔剂达到熔点并发生相变, 由固态转变为液态。如图所示, 试样轮廓开始变得圆润, 底部边缘出现明显的铺展迹象, 接触角显著减小。这说明随着液相的出现, 熔剂与 MgO 基体之间的界面张力发生变化, 润湿过程开始启动。

当温度进一步升高至实际精炼温度 650°C 及 800°C 时, 熔剂在 MgO 表面展现出极佳的铺展性。如图 3 d 所示, 熔剂液滴已充分摊开, 高度显著降低, 接触角降至极低水平 (目测<30°), 表现出优异的润湿性能。根据杨氏方程, 高温下熔剂粘度的降低以及固-液界面能的减小, 共同促进了熔剂在 MgO 表面的自发表展。

综上所述, 定性润湿实验证实了精炼熔剂在实际工况下对 MgO 夹杂物具有极强的润湿能力。这种良好的润湿性是熔剂能够有效吸附、物理包裹 MgO 夹杂物并将其从镁液中分离出去的热力学基础。

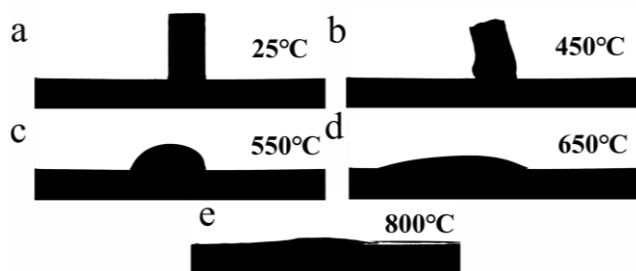


图3 精炼熔剂-MgO 定性润湿结果

Fig.3 Qualitative wetting results of the refining flux on MgO

2.2 炉内底渣 XRF 和 XRD 分析结果

为进一步验证熔剂与 MgO 等固态夹杂在实际精炼条件下的相互作用和结合机制, 对实际精炼过程中产生的炉内底渣进行多尺度表征, 结果如下。

精炼熔剂与炉内底渣的 XRF 检测结果如表 1 所示。与原始熔剂相比, 炉内底渣中 Mg、O 及 Si、Fe 等非金属杂质元素含量显著增加, Cl 和 K 含量相对降低。这应该与底渣中富集 MgO 等固态夹杂有关。

表 1 熔剂与炉内底渣的 XRF (Wt.%)

Table 1 Elemental composition of Residue after flux refining (Wt.%)

Substance	Cl	Mg	O	K	Si	Fe	Other element
Flux	42.14	14.57	7.83	15.45	0.05	0.06	Bal.
Smelting slag	32.80	30.20	18.79	3.19	0.63	0.38	Bal.

炉内底渣 XRD 结果如图 4 所示。结果显示含有 $MgCl_2$ 、 MgO 及共晶盐 $KMgCl_3$ 的特征衍射峰, 但未检测到 $MgO \cdot MgCl_2$ 、 $5MgO \cdot MgCl_2$ 等络合物的特征峰。该结果表明: 熔剂与杂质间未发生化学反应。

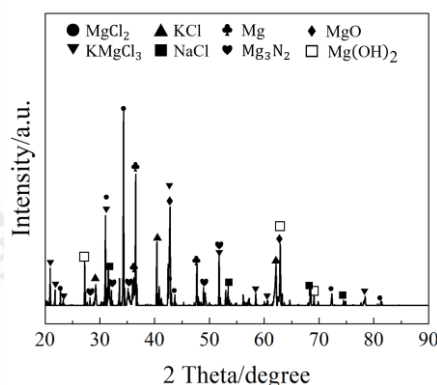


图4 炉内底渣 XRD

Fig.4 XRD pattern of Residue after flux refining

2.3 炉内底渣综合热分析结果

进一步对炉内底渣进行综合热分析, 结果如图 5 所示。TG 曲线显示底渣总失重率为 11.21%, 低于原始精炼熔剂的 30%, 这主要归因于底渣中富集了大量难熔的固态夹杂, 其中具有吸水性的熔剂含量更低。DSC 曲线在 121.63 °C、160.73 °C、211.63 °C、378.66 °C 和 645.96 °C 处呈现明显的吸热峰。结合氯盐的物理化学特性分析, 前三个低温吸热峰源于吸附水及结晶水的脱除^[12]; 378.66 °C 处的吸热峰与该多元熔剂体系 424 °C 的理论熔点^[13]较为接近, 推测为残留盐组分的熔融吸热; 而 645.96 °C 处的高温吸热峰则对应于炉内底渣中少量残留金属镁的熔化过程^[14]。

总之 TG 曲线较低的失重率, 表明炉内底渣中已富

集了大量高熔点的氧化物夹杂。DSC 特征峰的分析不仅验证了底渣中残留金属镁的存在,也揭示了其内部复杂的多相结构。

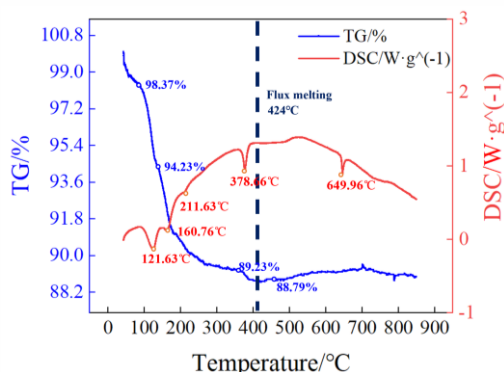


图5 炉内底渣热分析

Fig.5 Thermal analysis of Residue after flux refining

2.4 炉内底渣 SEM 和 TEM 结果

在明确了物相组成的基础上,通过 SEM/EDS 对炉内底渣的微观形貌进行观察,结果如图 6 所示。结果显示, MgO 颗粒与熔剂组分形成了尺寸大于 50 μm 的明显团聚体。这种物理团聚显著增大了杂质颗粒的有效粒径与质量,使其能够依靠重力沉降实现与镁熔体的分离。

为更清晰“熔剂-固态夹杂”界面物相状态,采用高分辨透射电镜进行表征,结果如图 7 所示。TEM 明场像如图 7 a 所示,微米/亚微米级颗粒呈立方形貌,表面包裹着灰色物质。EDS 面扫描如图 7 e-f 所示,清晰揭示了颗粒的“核-壳”结构:内核富集 Mg、O 元素,外壳层则显著富集 Cl 元素。图 6 c-d SAED 进一步确证,内核为 MgO,外壳层为 MgCl_2 ,未发现 $\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2$ 或 $5\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2$ 等络合物,进一步证实了二者为物理包裹,而非化学键合。

同时对炉内底渣、 MgCl_2 进行 XPS 分析,采用 C 峰标定,其 Cl 精细谱如图 7 b 所示, MgCl_2 其自旋轨道分裂双峰(2p_{3/2} 和 2p_{1/2})分别对应 199.5 eV 和 200 eV,而炉内底渣 Cl 分裂双峰并无显著性偏移,其 Cl 结合形式应与 MgCl_2 无较大差异。

综合 TEM/EDS/SAED 结果以及与 XPS (图 7 b) /XRD (图 4) 物相分析的高度一致性,共同构成了强有力的间接证据,表明在本实验体系中未发生显著的界面化学反应,可以推断:熔剂与 MgO 等固态夹杂的相互作用以物理吸附为主。其机理在于,熔融的熔剂通过表面张力驱动的润湿作用,将 MgO 颗粒物理包裹,形成“MgO 核心-氯化物外壳”的核壳结构。这种包裹机制使弥散分布的细小杂质有效团聚,且形成的团聚体整体密度显著高于镁熔体(约 1.54 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) [15],从而在重力作用下快速沉降于炉底。

2.5 讨论与分析

一些研究者^[7-8]支持 MgCl_2 与 MgO 之间为化学结合:熔剂中主要成分 MgCl_2 与原镁的主要杂质 MgO 生成 $\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 / 5\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2$ 等络合物,推测为在氯化物熔盐的强极性环境下, MgCl_2 与 MgO 发生络合反应。另一些研究者^[10-11]则支持 MgCl_2 与 MgO 之间为物理结合:熔融氯盐熔剂凭借其优异的润湿性和流动性,推测熔融氯盐熔剂通过物理包裹与团聚细小的 MgO 固态夹杂。上述研究均停留在宏观的理论分析及推测层面,未提供直接实验结果支撑,难以判断其正确性。

本研究针对新疆金盛镁业有限公司原镁重熔精炼环节炉内底渣及相应原料的研究中,综合热分析(DSC/TG)未检测到特征反应热峰,XRD 图谱中未发现络合物相,且 XPS 精细谱显示 Cl 元素结合能峰位未发生显著偏移,证实镁精炼熔剂与 MgO 等固态夹杂之间表现为物理结合而非化学结合。并且 XPS/TEM/SAED 表征结果显示,熔剂与固态夹杂结合呈现出显著的“核壳包裹”结构,即固态夹杂(MgO)作为内核被精炼熔剂(氯化物)外壳物理包裹,内核与外壳之间呈现明显的物理界面。因此本文认为镁精炼熔剂与 MgO 固态夹杂之间的结合机制为“物理结合”,并且镁精炼熔剂与固态夹杂之间结合为熔剂包裹固态夹杂的“核壳包裹”形式。

进一步,综合宏观热分析与微观界面表征结果,并结合 Huang 等研究者^[11]关于熔剂通过降低界面张力增强夹杂颗粒润湿性的热力学计算结论,本文构建了镁精炼熔剂与固态杂质相互作用的完整机理模型,如图 8 所示。

在精炼初始阶段,如图 8 a 所示,熔融熔剂凭借其较低的表面张力(约 0.1 N/m)以及其发挥表面活性剂效应,实现了熔剂与镁液的润湿,同时利用镁液与 MgO 杂质间的不润湿性,促使熔剂优先吸附并铺展于 MgO 颗粒表面^[11]。随后,在搅拌作用下,熔剂对 MgO 颗粒进行深度的物理包裹,如图 8 b 所示。这一交互过程将原本弥散分布于镁液中的细小杂质团聚,最终形成典型的“核壳结构”,如图 8 c 所示。XRD/XPS/TEM 结果进一步证实, MgO 内核与氯化物外壳之间存在清晰的物理界面,未观察到晶格畸变或过渡相,确证了二者之间为物理吸附,而非化学吸附。

综上所述,熔剂与固态夹杂交互作用机制遵循“吸附-润湿-包裹-沉降”的动态路径。形成的核壳团聚体不仅显著增大了杂质的有效粒径,且整体密度远高于镁熔体。在重力作用下,团聚体遵循 Stokes 沉降理论^[16]快速沉降至炉底,形成炉内底渣,从而实现了杂质的高效去除。

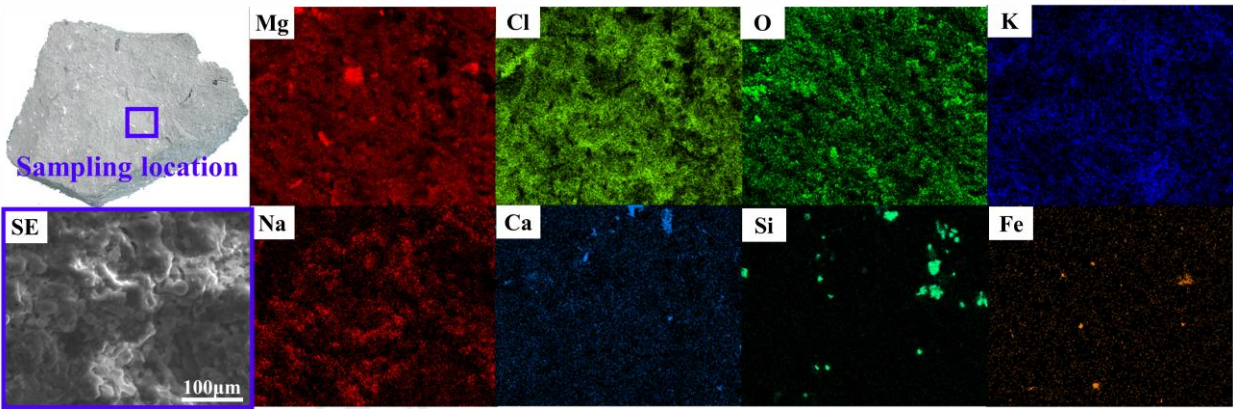


图 6 炉内底渣 SEM/EDS 显微组织
Fig.6 SEM morphology and EDS mapping of Residue after flux refining

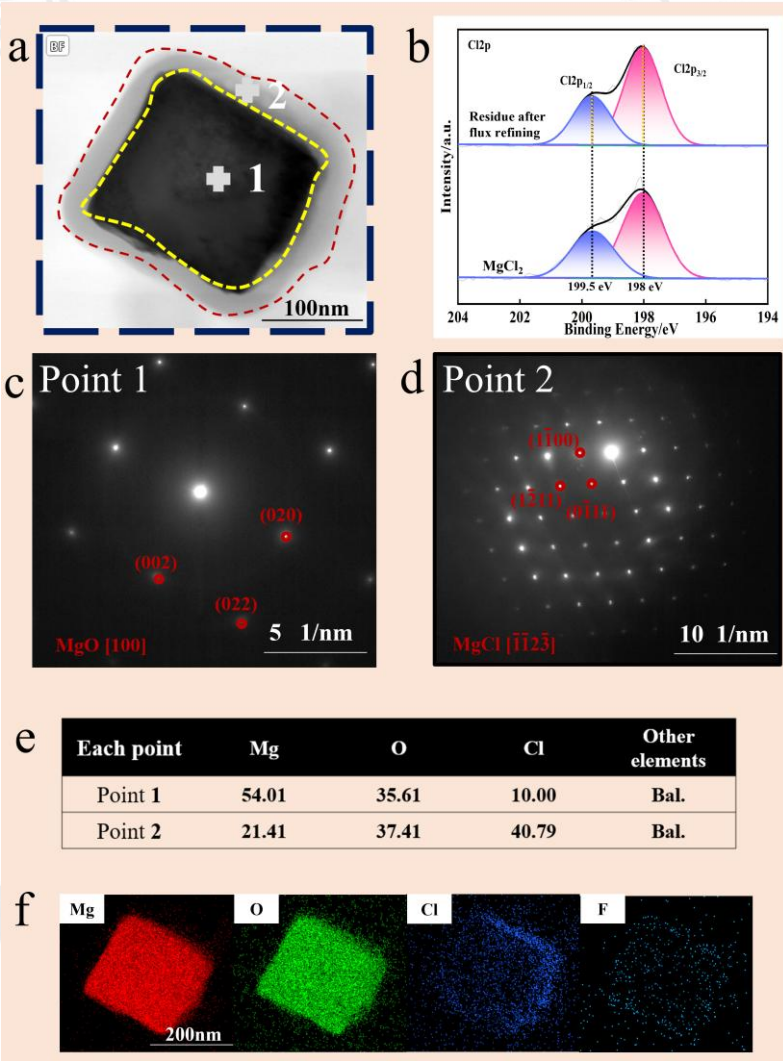


图 7 炉内底渣粉末：(a) TEM 显微组织；(b) 炉内底渣 XPS；(c) 点 1 SAED；(d) 点 2 SAED；(e) 外层能谱；(f) 杂质颗粒能谱
Fig.7 analysis of Residue after flux refining: a. general TEM microstructure; b.XPS of Residue after flux refining; c. and d. SAED patterns from point 1 and point 2; e. EDS spectrum of the outer layer; and f. EDS spectrum of the impurity

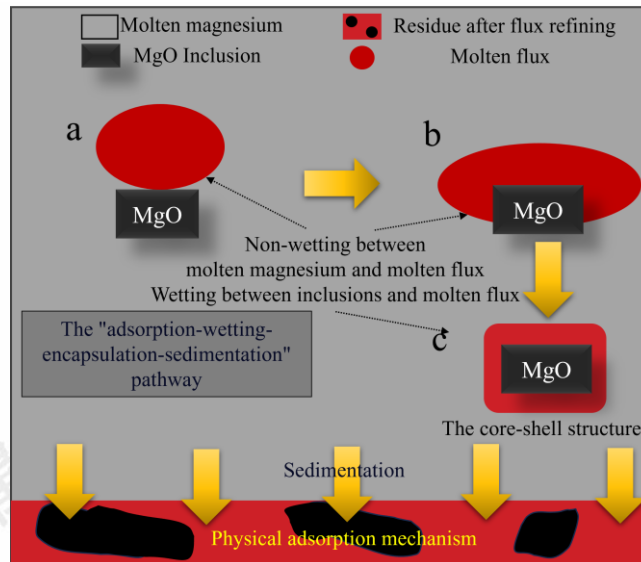


图 8 镁精炼熔剂与固态杂质的结合机理：(a) 初始状态；(b) 熔剂包裹固态夹杂物；(c) 核壳结构示意图

Fig.8 Schematic illustration of the interaction mechanism between refining flux and solid inclusions in magnesium: (a) Initial stage; (b) Molten flux encapsulating solid inclusions; (c) Sedimentation of the encapsulated inclusions; (d) Schematic diagram of the core-shell structure.

3 结论

在本实验条件下得到以下结论：

(1) 综合热分析 (DSC/TG) 中未检测到特征反应热峰, XRD 图谱中未发现络合物相, 且 XPS 精细谱显示 Cl 结合能峰位未发生显著偏移, 表明镁精炼熔剂与 MgO 等固态夹杂之间表现为物理结合, 而非化学结合, 二者界面不存在化学键合或络合反应。

(2) XPS/TEM/SAED 结果显示熔剂与固态夹杂的

结合呈现出显著的“核壳包裹”结构: MgO 固态夹杂作为内核, 被精炼熔剂 (氯化物) 外壳所包裹的形貌, 内核与外壳之间为明显的物理界面。

(3) 熔剂与固态夹杂交互作用遵循“吸附-润湿-包裹-沉降”的动力学路径。熔融熔剂利用低表面张力优先润湿 MgO 颗粒, 通过物理包裹显著增大杂质有效粒径。形成的核壳团聚体密度大于镁熔体, 依据 Stokes 沉降理论在重力作用下快速沉降。

4 参考文献

- [1] Liu Z(刘泽宇), Hu J(胡佳其), Wang S(王帅), et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J],2025,54(05): 1377-1396.
- [2] Guo C(郭传平), Gao D(高冬芳), Li X(李羨), et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J],2024,53(08):2390-2404.
- [3] Yang Y, Xiong X, Chen J, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J],2025,13(05):1855-1858.
- [4] Yuan Y, Chen X, Xiong X, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J],2025,13(10):4689-4732.
- [5] Luo A A. *Journal of Magnesium and Alloys*[J],2025,13(01):1-3.
- [6] Shahsanaei M, Atapour M, Shamanian M, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J],2025,13(06):2591-2605.
- [7] Xu R(徐日瑶). Production Technology of Magnesium Smelting by Silicothermic Process(硅热法炼镁生产工艺学)[M]. 1st ed. Hunan: Central South University Press, 2003.
- [8] Wang S, Wang Y, Ramasse Q M, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2024, 12(03): 980-996.
- [9] Yu R, Tian Y, Yang B, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J],2025,13(11):5688-5699.
- [10] Cao H, Huang M, Wang C, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J],2019,7(3): 370-380.
- [11] Huang Y, Xu S, Sun J, et al. *Materials Science & Engineering A*[J],2024,904:146710.
- [12] Xu R(徐日瑶), Zhu T(诸天柏). *Light Metals(轻金属)*[J], 1994(6): 38-42.
- [13] Tong X, Wu G, Zhang L, et al. *Materials Characterization*[J],2021,171:110727.
- [14] Lee H, Pyun J, Han I, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J],2025,13(05):1859-1878.
- [15] Wang L, Liang D, Yu R, et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2024, 12(12): 4828-4867.
- [16] Liao Z M, Lin F, Liu L, et al. *Journal of Fluid Mechanics*[J],2025,1015:A55.

Research on the Interaction Mechanism between Magnesium Refining Flux and Solid Inclusions

Kong Fanhong¹, You Guoqiang^{*1 2 3}, Wang Qiang¹, Dong Yinglei¹, Yu Bing¹, Zhao Yong⁴, Lian Xuehua⁴

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(2. Institute of Lightweight Materials and Engineering, Mingyue Lake Laboratory, Chongqing 401135, China)

(3. National Engineering Research Center for Magnesium Alloy Materials, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(4. Xinjiang Jinsheng Magnesium Industry Co., Ltd., Xinjiang 839000, China)

Abstract: Aiming at the current lack of clarity regarding the interaction mechanism between magnesium refining fluxes and solid inclusions, this study conducted multi-scale characterization on magnesium refining flux, MgO powder, their mixtures, and the furnace bottom slag generated during the refining process. Techniques including DSC/TG thermal analysis, XRF, XRD, SEM, and TEM were employed. The results indicate that, under the conditions of this study: 1) The bonding mechanism between the magnesium refining flux and solid inclusions (such as MgO) is physical bonding rather than chemical bonding; 2) A significant "core-shell encapsulation" characteristic is observed, where the solid inclusion acts as the core and is encapsulated by the flux shell.

Key words: Crude magnesium; Residue after flux refining; MgO inclusion; adsorption mechanism

Funding Project: Xinjiang Autonomous Region Key R&D Project (grant number 2023B01020-1), Ningbo Key R&D Project (grant number 2024Z156, Chongqing R&D Project (grant number CSTB2024TIAD-KPX0001)

The Author: KONG Fanhong, male, born in 2001, Master's student, School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China, Tel: +86-13206034593, E-mail: mailto:202309021100T@stu.cqu.edu.cn.

Corresponding Author: YOU Guoqiang, male, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China, E-mail: ygq@cqu.edu.cn.