再生铝元素控制及回收模式研究进展

高　弘[1]，胡　波[1]，肖志鹏[2]，江　俊[3]，杨吉斌[3]，杨万章[4]，李德江[1]，曾小勤[1]

（1. 上海交通大学材料科学与工程学院，轻合金精密成型国家工程研究中心&金属基复合材料全国重点实验室，上海 200240；
2. 上海交通大学内蒙古研究院，内蒙古呼和浩特 010010；
3. 云南云铝润鑫铝业有限公司，云南红河 651400；
4. 云南铝业股份有限公司，云南昆明 650500）

摘要：再生铝是绿色低碳金属的重要代表，在“双碳”战略驱动下产业规模持续扩大，然而合金元素的精准控制仍是制约其高值化利用的核心技术瓶颈。本文聚焦铝合金回收过程中的元素行为与调控策略，系统梳理了近年来国内外在该领域的关键研究进展，依据元素在回收过程中的富集或损耗特征，将其划分为易富集有害元素（Fe）与易流失强化元素（Mg、Zn）两大类，并分别归纳其控制原理与技术路线；在此基础上，结合降级回收、保级回收与升级回收三类典型应用场景，剖析不同回收模式对元素控制的需求差异。针对Fe杂质，物理去除（离心分离、电磁搅拌）与富Fe相变质细化（添加Mn/Cr/稀土、超声波处理）两条技术路线各有适用条件，但前者成本较高、后者引入新组元可能增加体系复杂性；Mg的氧化烧损可通过微量Be添加或超重力分离有效抑制，而Zn可借助真空电磁挥发实现脱除，但二者在回收中均存在选择性调控难题。在回收模式层面，降级回收仍为主流，但“合金到合金”的保级回收因资源效率高而成为发展共识；三层液相电解和固态电解可将废铝提纯至高纯铝，然而成本和工艺复杂度限制其规模推广。未来应着力发展以一体化压铸为代表的高品质再生铝保级利用技术，并推动人工智能辅助成分预测与动态补料调控的工程化应用，加速构建绿色低碳的高效铝资源循环体系。

关键词：再生铝；元素控制；富Fe相；回收模式；人工智能

中图分类号：TG146.21　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）09-0964-15

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0123

Research Progress on Elemental Control and Recycling Modes of Recycled Aluminum

GAO Hong[1], HU Bo[1], XIAO Zhi-peng[2], JIANG Jun[3], YANG Ji-bin[3], YANG Wan-zhang[4], LI De-jiang[1], ZENG Xiao-qin[1]

(1. National Engineering Research Center of Light & Alloy Net Forming and the State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Inner Mongolia Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3. Yunnan Yunlv Runxin Aluminum Industry Co., Ltd., Honghe 651400, Yunnan, China; 4. Yunnan Aluminium Co., Ltd., Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: Recycled aluminum is a key green low-carbon metal, and its industrial scale continues to expand under the “dual carbon” goals. However, precise control of alloying elements remains a core technical bottleneck restricting its high-value utilization. This review focuses on elemental behavior and control strategies during aluminum recycling, systematically summarizing recent domestic and international research progress. Based on their enrichment or loss characteristics during recycling, the elements are classified into two categories-easily enriched harmful elements (Fe) and easily lost strengthening elements (Mg, Zn), with their control principles and technical routes discussed separately. Furthermore, three typical application scenarios—downcycling, closed-loop, and upcycling recycling—are analyzed to illustrate the differing elemental control requirements across various recycling modes. For Fe impurities, the two

基金项目：内蒙古自治区—上海交通大学科技合作专项“科技兴蒙”上海交通大学行动计划专项项目（No. KJXM2025-02-02），云南省重点研发计划项目（No.202503AA080029），云南省曾小勤专家工作站（No.202505AF350043）。

收稿日期：2026–03–17 收到初稿，2026–04–21 收到修订稿。

作者简介：高弘（1999–），男，硕士，主要研究方向为铝合金高温氧化行为。E-mail：gao-hong@sjtu.edu.cn

通信作者：胡波，男，助理研究员，博士。E-mail：1969220462@sjtu.edu.cn

李德江，男，研究员，博士。E-mail：lidejiang@sjtu.edu.cn

引用格式：高弘，胡波，肖志鹏，等 . 再生铝元素控制及回收模式研究进展 [J]. 铸造，2026，75（9）：964–978.

Gao Hong，Hu Bo，Xiao Zhipeng，et al. Research progress on elemental control and recycling modes of recycled aluminum [J]. Foundry，2026，75（9）：964–978.

technical routes-physical removal (centrifugal separation, electromagnetic stirring) and Fe-rich phase modification/refinement (addition of Mn/Cr/rare earths, ultrasonic treatment)-each have their own applicable conditions, but the former is costly and the latter may increase system complexity by introducing new components. The oxidative burn off of Mg can be effectively inhibited by trace Be addition or supergravity separation, while Zn can be removed via vacuum electromagnetic volatilization; however, both elements present selective control challenges during recycling. In terms of recycling modes, the downcycling recycling remains dominant, yet the “alloy to alloy” closed loop recycling has gained consensus as the most resource efficient direction; three layer molten salt electrolysis and solid state electrolysis can upgrade scrap to high purity aluminum, but their high cost and process complexity limit large scale application. Future efforts should focus on developing high quality closed loop recycling technologies for recycled aluminum, such as those enabled by integrated die casting, and promote the engineering application of AI assisted composition prediction and dynamic replenishment control, thereby accelerating the establishment of a green, low carbon and efficient aluminum resource circulation system.

Key words: recycled aluminum; elemental control; Fe rich phase; recycling mode; artificial intelligence

铝作为一种轻质金属（密度2.7 g/cm^3），兼具优异的导电导热性、良好的延展性和突出的耐蚀性，已广泛应用于各工业领域。特别是在新能源汽车产业快速发展的背景下[1]，其需求持续增长[2-3]。然而，原铝生产仍面临高能耗和高污染问题[4]，年耗能约13×10^{18} J（占全球能耗1%），每生产1吨原铝约排放4.2吨CO_2，其单位碳排放强度显著高于钢铁和铜[5-6]。2025年，中国铝工业的碳排放量高达约5.32亿吨，占全国总排放量的5%。此外，冶炼过程中还会产生红泥、废铝槽衬等对生态环境构成潜在威胁的固态废料[7-9]。因此，推动铝的资源化回收利用对于降低铝土矿消耗和减少碳排放具有重要意义。相较于原铝生产，再生铝工艺可减少约93%的碳排放，并将吨铝综合能耗降至5~7 GJ[10-12]。据统计，每回收1吨废铝，可节约8吨铝土矿、14 000 kW·h电能及6 300 L石油，减少7.6 m^{3}填埋废物，并降低350 kg CO_2排放[13-14]。对于铝土矿资源有限，对外依存度持续上升的中国而言（仅占全球储量的3.5%），加强废铝回收利用还有助于缓解地缘政治不稳定带来的资源供应链风险。

铝合金通常含有多种合金元素，其多组元特征使回收过程面临杂质控制难与成分稳定性的挑战。尤其在废料来源复杂、种类多样的条件下，合金成分的比例调控更加困难。成分的不可控波动会降低再生铝合金的强度、硬度与耐蚀性，部分废料甚至因成分偏差过大而无法满足标准要求，最终只能废弃，从而影响整体回收效率。若元素控制不当，不仅会损害再生铝产品质量，还将削弱其市场竞争力，并推高生产成本。

基于上述背景，本文从元素控制视角系统综述铝回收过程中的关键科学问题，根据Fe等元素在回收过程中的富集或损耗趋势进行分类，深入探讨铝合金再生中的元素调控机制。同时，总结当前再生铝的主要应用领域，重点分析降级回收、保级回收与升级回收三种典型回收模式。本研究旨在为提升铝合金回收效率与再生品质提供理论支撑与实践参考。

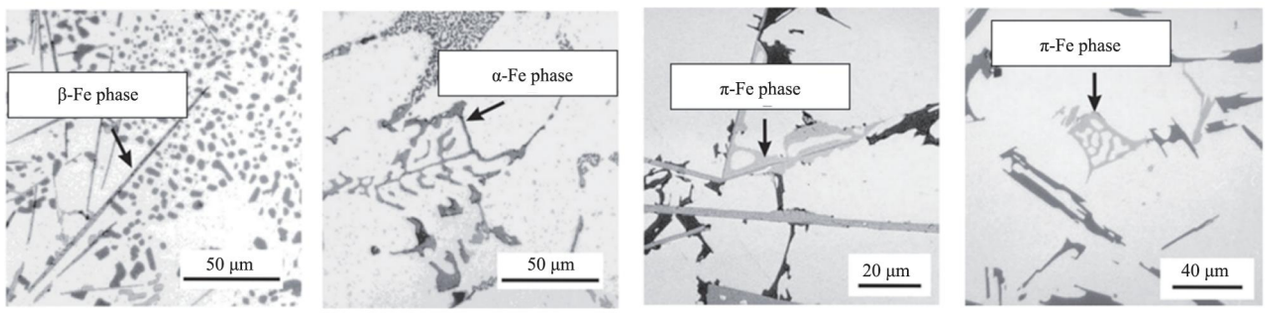
1 再生铝中的Fe杂质

铝合金废料中元素的精准控制面临诸多挑战，其根本原因在于铝合金体系的成分复杂性与来源多样性。废铝通常来源于汽车、建筑、电子等行业的报废产品，这些废料往往混杂多种牌号的铝合金，导致其初始元素组成存在显著差异。同时，在铝合金服役周期内，不同使用环境与操作条件不可避免地会引入杂质元素，进一步加剧了回收过程中最终成分调控的难度[15]。此外，现有分拣与分离技术在应对复杂铝合金废料时仍难以实现高效、精准的归类与分离，使得废料中元素成分波动较大，直接影响再生铝产品的质量稳定性与再利用价值。

1.1 铝合金中 Fe 的危害

Fe是再生铝中最常见且难以避免的杂质元素，其来源广泛，涉及冶炼、加工及服役等多个环节。由于Fe在固态铝中的固溶度极低，最大溶解度仅为0.05 wt.%[16]，因此在凝固过程中，Fe几乎全部以析出相的形式存在，形成多种富Fe金属间化合物[17]。这些化合物主要以Al-Fe-Si三元相形式存在，包括α-Al_8Fe_2Si相、α-$Al_{15}Fe_3Si_2$相、β-Al_5FeSi相、δ-Al_4FeSi_2相[18]、γ-Al_8FeSi相、q-AlFeSi相和π-$Al_8FeMg_3Si_6$相[19]，其典型形貌与分布特征如图1所示[20]。

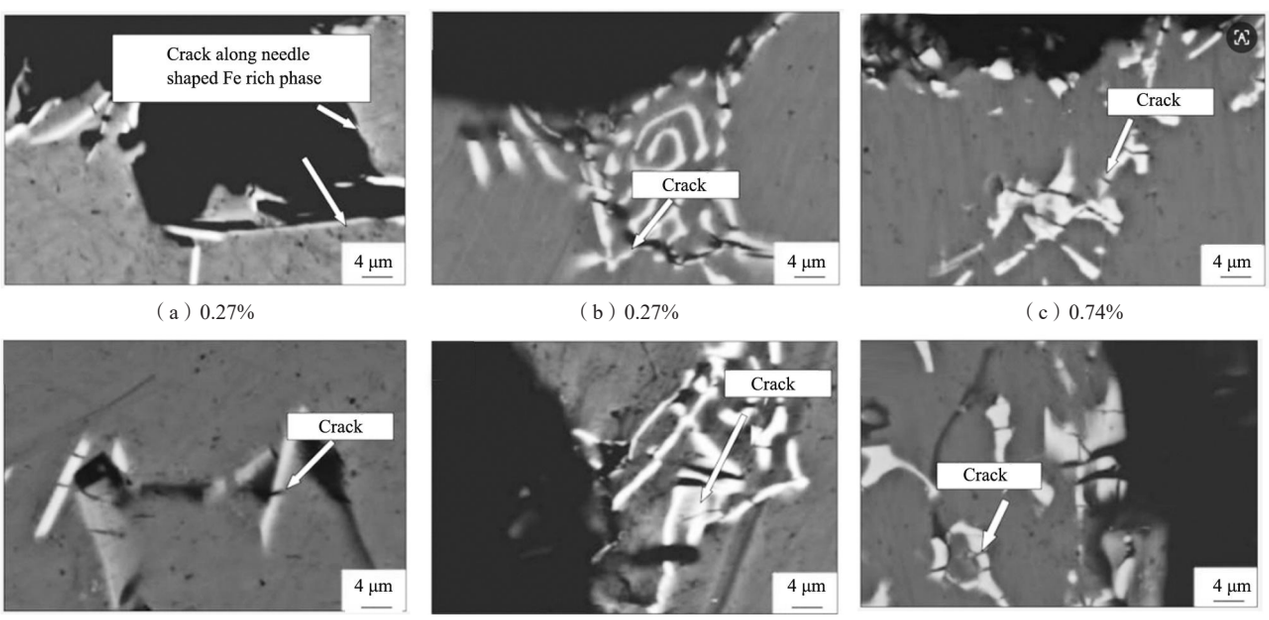
其中，针片状β-AlFeSi相易割裂铝基体，显著降低合金的强度和延展性。Yang[21]研究了Fe含量对Al-1Mg-0.64Si-0.2Cu合金力学性能的影响（图2），结果表明针状及板状富Fe相是导致裂纹萌生和脆性断裂的主要原因。由于富Fe相与铝基体的界面结合较弱，裂纹易于沿这些相界面扩展，最终引发断裂。因此，有效控制铝合金中的Fe含量至关重要。目前，主要控制措施包括降低合金中的Fe含量以及对有害富Fe相进行改性处理。



（a）β-Fe相　（b）α-Fe相　（c）π-Fe相　（d）π-Fe相

图1　铝硅合金中Fe相的典型形态

Fig. 1 Typical morphologies of Fe phases in the Al-Si alloys



（a）0.27%　（b）0.27%　（c）0.74%

（d）0.74%　（e）1.44%　（f）1.44%

图2　含不同质量分数Fe的AlMgSiCu合金的拉伸断裂裂纹

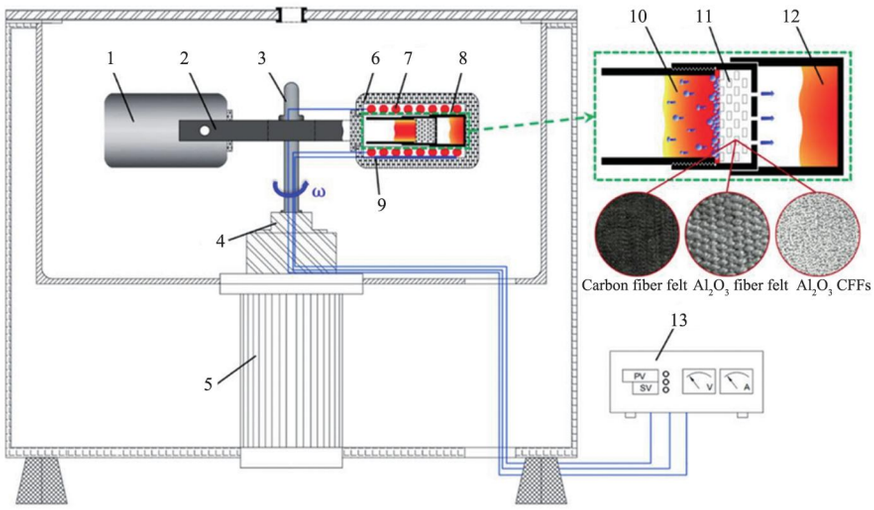
Fig. 2 Tensile fracture cracks of the AlMg1SiCu alloy containing different mass fractions of Fe

1.2　Fe 元素的物理去除方法

为降低再生铝合金中的Fe含量，现有多种物理或化学沉淀分离技术。主要包括重力沉降[22]、过滤[23]、离心力[24]和电磁力[25]等。这些技术通常结合化学与物理手段，以实现夹杂物与基体合金的有效分离。其中，利用富Fe相与铝熔体之间的密度差采用离心力将他门分离的方法应用最为广泛。

离心分离法是最常见的一种分离手段，其原理是利用离心力促进富Fe金属间化合物的形成和析出，起到净化合金的作用。其中超重力离心分离技术是一种高效的离心分离法。其核心装置由离心旋转器、电阻加热炉及配重系统组成，可产生稳定可调的超重力场，从而实现熔融铝的深度净化，原理与结构如图3所示[26]。研究表明，采用超重力技术处理1060铝合金时（图4[26]），不同过滤器处理效果存在一定差异，其中Al_2O_3陶瓷泡沫过滤器Fe和Si的去除率分别可达83.98%和49.67%。在工业应用中，将超重力场与Al_2O_3陶瓷泡沫过滤器联用，虽然可进一步提升去除效果，但该组合工艺会相应增加处理成本。

电磁搅拌（EMS）是一种利用电磁力去除废料铝熔化过程中Fe的方法。这一过程基于富Fe相与熔体之间电导率的显著差异，通过EMS产生的离心力促进了富Fe金属间化合物的形成和析出[27]，从而净化合金，如图5所示[28]。EMS通过加速富Fe金属间化合物的沉降，从废铝中有效去除Fe。EMS诱导的离心力使富Fe化合物沉淀得更快，由于Al的电导率较高，沿相同方向运动，而富Fe化合物的离心力较弱，则向相反方向移动并沉淀在坩埚底部。EMS还通过促进液态原子快速聚集成固态金属间化合物的核，减少了富Fe化合物形成的反应时间。这导致了相较于传统方法，Fe去除



1. 配重　2. 固定轴　3. 离心轴　4. 导电滑环　5. 电机　6. 加热炉　7. 电阻线圈　8. 石墨坩埚　9. 热电偶
10. 合金样品　11. 过滤器　12. 过滤后的合金　13. 温度控制器

图3　离心装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the centrifugal device

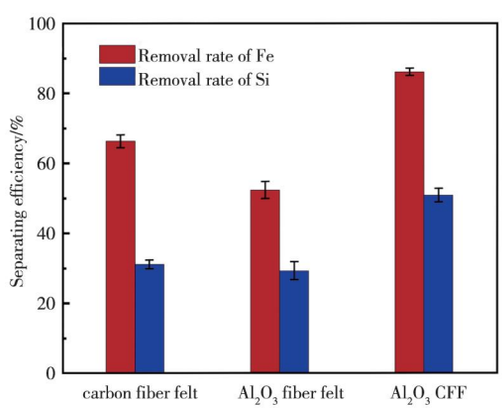


图4　不同过滤器对1060铝合金废料超重力净化分离效率的影响

Fig. 4 The effects of different filters on the separation efficiencies of ultragravity purification of 1060 aluminum alloy waste

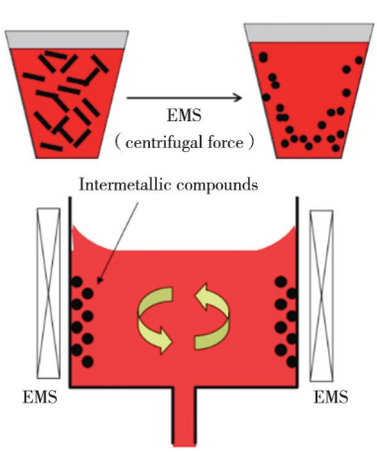


图5　电磁搅拌示意图

Fig. 5 Electromagnetic stirring（EMS）schematic

效率的提高。然而，该方法也存在设备制造复杂和操作难度高的问题。近年来，随着人工智能的发展，机器学习方法开始用于优化离心分离与电磁搅拌的关键参数（如重力系数、频率、保温时间等）。通过建立工艺参数与Fe去除效率之间的预测模型，可实现动态调控，提高杂质去除的稳定性和经济性。

1.3　控制有害富 Fe 相

由于完全去除铝合金中的Fe元素较为困难，因此目前研究已将重点转向消除铝合金中富含Fe的有害相的影响。铝合金中有害的富Fe相主要是针状的β-Fe相。因此，控制Fe元素影响的一种有效方法是将β-Fe相转化为其他无害的富Fe相。目前，控制回收铝中富Fe相的主流方法是首先将有害的粗针状β-Fe相转变为危害较小的α-Fe并细化Fe相。

1.3.1　有害Fe相的变质改性

添加中和元素（或称变质元素）是调控富Fe相形貌的主要手段，常用元素包括Mn、Cr和Be等。其中，Mn不仅能促进β-Fe相向α-Fe相（如α-Al_{15}（Fe, Mn）$_3Si_2$）转变，还能在一定程度上发挥强化作用[29]，从而改善合金塑性。苗赛男等[30]对Fe元素含量为0.3 wt.%的A356合金添加不同Mn和Cr元素导致富Fe相形貌变化进行了研究，结果表明，Mn、Cr元素的添加量对铝合金中富Fe相的形貌演变具有显著的调控作用。当Mn、Cr含量不足时，难以将有害针状β-Fe相完全转化为危害较小的α-Fe相，导致组织改善效果有限；而当Mn、Cr添加过量时，由于Al、Si等基体元素过剩，Fe元素被置换后可与多余的Al、Si、Mn和Cr结合形成新的富Fe相，

反而导致富Fe相的数量增加、尺寸粗化。现有研究指出，在Fe含量为0.3%的条件下，当Fe、Mn和Cr三者的比例控制为Fe：Mn：Cr =5：3：1时，合金中富Fe相的形貌最为理想，有利于实现组织优化与性能提升。Ferraro等[31]通过使用Sludge因子（*SF*）研究了二次压铸铝合金中污泥颗粒的演变。*SF*方程可以预测在铝合金中是否形成富Fe颗粒，其表达式为：

$$SF=(1\times wt.\%Fe)+(2\times wt.\%Mn)+(3\times wt.\%Cr) \quad (1)$$

结果表明，随着Fe和Mn含量的增加，初级富Fe颗粒的数量增加，而添加Cr后形成大量二次富Fe颗粒。Qiu等[32]进一步总结了不同*SF*值下富Fe相的形貌演变规律，其示意图如图6所示[32]。

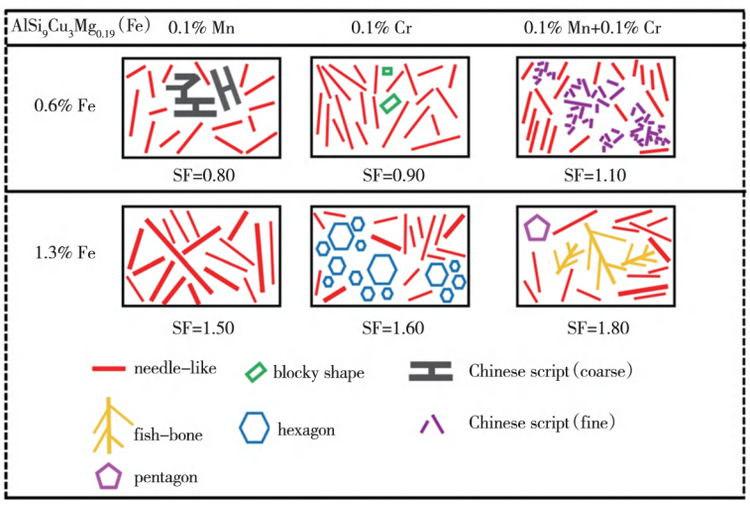


图6 $AlSi_9Cu_3Mg_{0.19}$（Fe）合金中富Fe相演变的示意图

Fig. 6 Schematic illustration of the evolution of Fe-rich phases in the $AlSi_9Cu_3Mg_{0.19}$（Fe）alloy

1.3.2 Fe相细化方法

细化Fe相是控制合金中有害Fe相不良影响的一种有效途径。由于其独特的化学性质，稀土元素常被添加到各种合金系统中以调控其微观结构[33-38]。研究表明，稀土元素不仅能促进β-Fe相向α-Fe转变，还可细化α-Al相并间接细化富Fe相。Liu[39]在针对W319合金的研究中表明，添加La不仅可以将大型富Fe相打碎，同时通过促进β-Fe向危害较小的α-Fe转化，减少富Fe金属间化合物的负面影响。类似地，Shi[40]报告称，将0.3 wt.%的Ce掺入Al-1Fe合金中，导致Al-Fe相分解为短小且分散的相，从而提高了合金的拉伸强度和延展性。Luo[41]发现，在Al-5Fe合金中添加Ce降低了主要Al_5Fe相的形成温度并提高了共晶转变温度。此外，稀土元素的添加破坏了共晶α-Al相的结晶过程，减少了沿优选密排（111）平面内的内在生长并促进沿亚紧密堆积（200）平面生长。

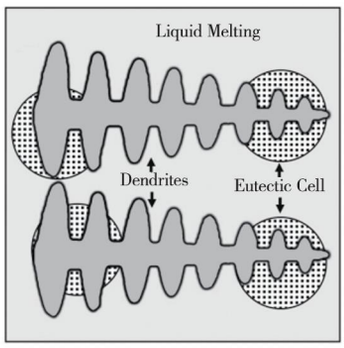
然而，引入中和元素改变了合金的成分，可能导致其他不利后果。因此，寻找消除有害β-Fe相的替代方法已成为一个关键研究领域。Zhao利用常规显微镜和同步辐射X射线微成像技术，表征了超声波熔体加工（USP）对两种多组分铝合金（Al-5.0Cu-0.6Mn-0.5（1.0）Fe）中金属间化合物和孔隙的三维结构的影响，发现USP有效减小了合金中富Fe相的尺寸，并指出，超声波气泡空化攻击了富Fe相、Al_2Cu和α-Al树枝晶，造成了破碎和熔化，破碎的α-Al树枝晶作为新的晶粒形成的成核位点，最终减小了富Fe相的尺寸，其示意图如图7所示[42-43]。在另一项类似研究中，Zhang[43]采用超声处理方法修饰Al-12Si-2Fe合金中的针状富Fe相。结果表明，720 ℃处理后，亚稳态的α-AlSiFe相取代了针状的β-AlSiFe相，显著减小了富Fe相的尺寸。

2 铝合金回收中易损失元素的控制

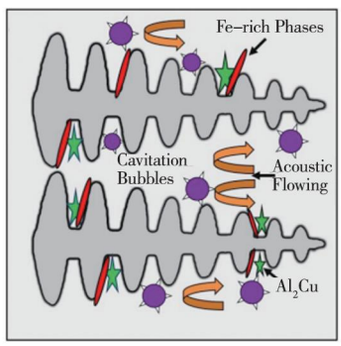
铝合金中含有多种强化元素，其中部分元素在回收过程中易发生烧损或挥发，导致成分偏离目标值。为满足再生合金的性能要求，通常需在熔炼后期补加相应合金元素，这无疑会增加生产成本。本节以Mg和Zn两种典型强化元素为对象，系统阐述其在铝合金回收过程中的浓度控制方法及相关研究进展。

2.1 铝合金中的 Mg 元素及其控制手段

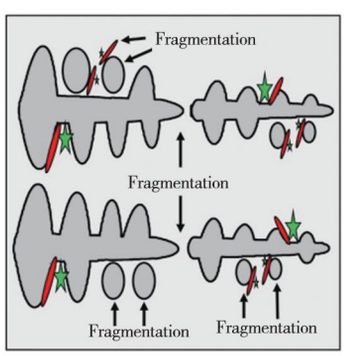
Mg是铝合金中最重要的固溶强化元素之一，其添加可显著提升合金的耐腐蚀性能与力学性能[44-46]。图8展示了Mg含量对Al-Mg合金力学行为的影响规律[44]。由图可知，当Mg含量从0.5%增加至2.0%时，合金的屈服强度提高了约100 MPa（增幅达45%），充分说明Mg含量的微小波动即可对合金性能产生显著影响[44，47]。



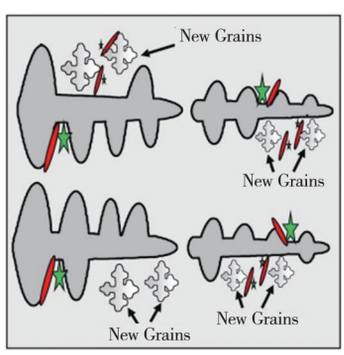
（a）通过α-Al枝晶附近的共晶胞形成金属间相



（b）α-Al基体和金属间化合物相中的声流和空化气泡不断破裂



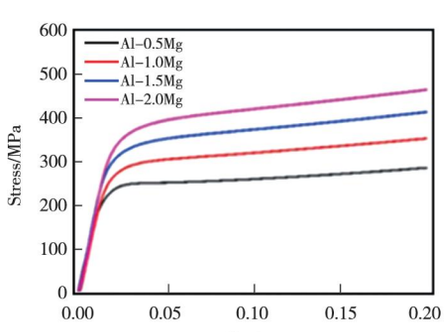
（c）基体和金属间化合物相碎裂



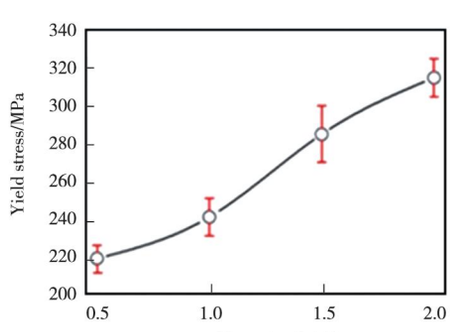
（d）破碎颗粒生长为新颗粒

图7 超声波颗粒（USP）诱导细化机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the USP-induced refining mechanism



（a）Al-Mg合金压缩测试后的工程应力-应变曲线



（b）屈服强度随Mg含量变化的曲线

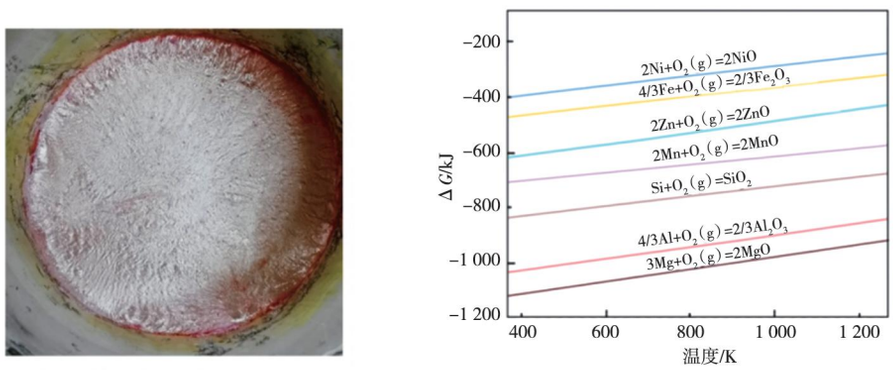
图8 Mg含量对Al-Mg合金力学行为的影响规律

Fig. 8 Effect of magnesium content on mechanical behavior of the Al-Mg alloys

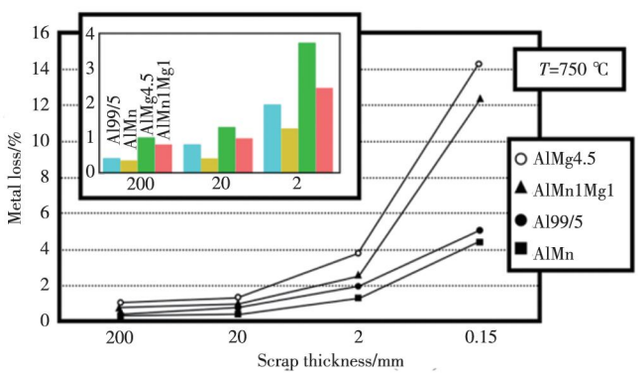
在铝合金回收过程中，由于Mg化学性质活泼，重熔精炼阶段易发生严重氧化烧损，并在熔体表面形成明显的氧化膜，如图9（a）[49]所示。利用HSC Chemistry 6软件计算了100~1 000 ℃范围内铝合金中常见元素与1 mol氧反应的标准吉布斯自由能（ΔG^{θ}），结果如图9（b）所示。在100~1 000 ℃区间内，Al、Si、Mn、Ni、Zn和Sr等元素氧化物的ΔG^{θ}值均高于Mg，表明Mg在热力学上优先与氧发生反应。实际回收过程中，铝合金熔炼温度通常超过700 ℃，为去除Fe、Si等杂质需进行长时间精炼和保温，这进一步加剧了Mg的氧化损失。Mg在高温下暴露时间越长，与炉气中O_2、N_2和H_2O（g）等组分接触的机会越多，发生界面反应的几率增大，从而导致Mg含量显著波动。

综上所述，Mg含量的波动对再生铝合金性能影响显著，而回收过程中Mg的烧损又难以完全避免。因此，如何有效控制Mg的烧损已成为含Mg铝合金回收领域的关键科学问题。

目前，抑制Mg烧损最有效的方法是添加微量Be。研究表明，相比于无Be样品，在5XXX系铝合金中添加2×10^{-6}的Be，可在500~750 ℃范围内将氧化质量增益降低70%~90%[50]。其作用机制在于Be能显著阻碍Mg通过致密氧化层的向外扩散，而对氧化反应本身的影响相对有限。Meng[51]提出采用超重力分离技术处理废旧Al-Mg合金，研究发现高重力系数可提高杂质在



（a）Al-5Mg-2Si-Mn铝合金在熔化过程中发生氧化　（b）373.15~127.15 K，铝合金中常见元素与氧气反应的ΔG^{θ}



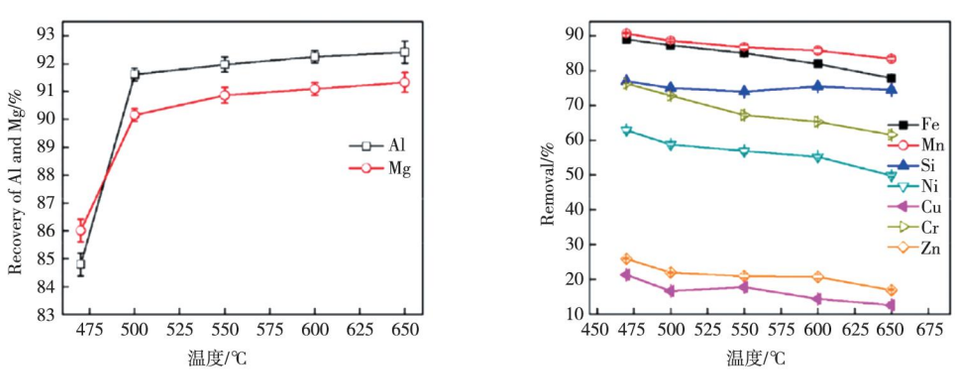
（c）750 ℃时几种铝合金中Mg的烧损率

图9　Al-Mg合金熔体氧化现象、元素氧化吉布斯自由能及 Mg 烧损率对比

Fig. 9 Comparison of melt oxidation phenomenon，element oxidation Gibbs free energy，and Mg burn-off rate of the Al-Mg alloys

合金底部的富集浓度，同时提升Al和Mg的回收率。在T=500 ℃、重力系数G=600、t=1 min条件下，Al和Mg的回收率分别达到91.6%和90.1%，Fe和Mn的去除率分别为87.4%和88.2%。放大尺寸的离心分离器已展现出工业化应用潜力，但仍需进一步评估其能量消耗（图10[51]）。此外，Gokhan Ozer等[52]发现，向高Mg废熔体中添加尖晶石型熔渣可有效抑制Mg的氧化。

需要指出的是，目前关于含Mg铝合金回收过程中Mg氧化的系统性研究仍较为有限，尤其在烧损机理的理论阐释方面尚不完善，存在成膜阶段的动态演变过程及生成物组成尚未明确以及增厚阶段的前沿界面推进机制尚不清晰等问题，有待进一步深入探索。近年来，随着汽车底盘一体化压铸技术的兴起，高性能Al-Mg-Si系铝合金在汽车工业中的应用将大幅增加，开展Mg氧化控制研究对于推动轻量化汽车发展具有重要意义。此外，人工智能方法可辅助预测Mg在不同熔炼条件下的烧损率。基于历史数据训练的神经网络模型，能根据炉料成分、温度、保温时间和炉气气氛快速推荐最佳的补偿添加量，从而减少过度补加带来的成本浪费。



（a）温度对Al和Mg回收率的影响　（b）温度对Al和Mg杂质去除率的影响

图10　温度对Al和Mg的回收率以及杂质去除率的影响

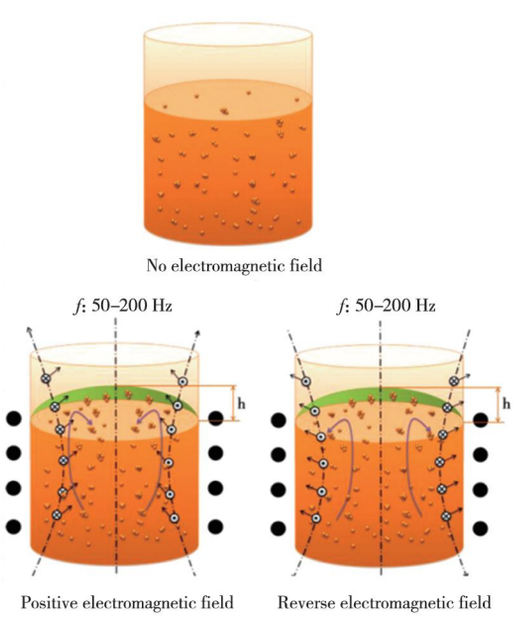
Fig. 10 The effect of temperature on the recovery rate of Al and Mg，and the impurity removal rate

2.2 铝合金中的 Zn 元素及其控制手段

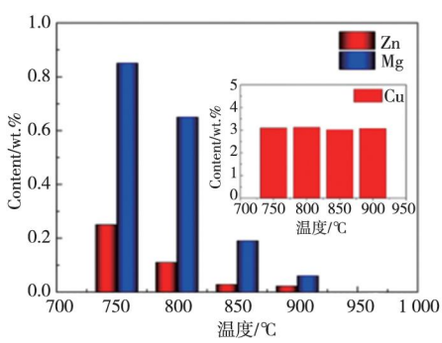
Zn是铝合金中常用的合金化元素之一，其主要作用是通过形成沉淀强化相实现时效硬化，从而显著提高合金的强度和硬度[53-54]。在高强度的7XXX系铝合金中，Zn与Mg等元素协同作用，赋予合金优异的抗拉强度和耐磨性[55]。此外，在特定环境条件下，适量Zn有助于改善铝合金的耐腐蚀性能[56]。然而，Zn含量过高可能会降低合金的延展性，因此在铝合金设计过程中需要严格控制Zn的比例。Wang和Li[57]综述了Zn在Al-Zn-Mg-Cu系合金中的作用，指出Zn含量增加促进强化相析出，从而提高力学性能；但过量Zn易引发热裂，导致性能劣化。因此，在回收过程中精准控制Zn含量对于平衡强度与韧性至关重要。

利用Zn沸点较低的特性，可在回收过程中通过挥发去除多余Zn。Qian等[58]将真空电磁法应用于2024与7075铝合金混合废料（质量比1∶1）的Zn去除研究。结果表明，在Zn挥发过程中，有益元素如Mg也会同时被去除。当温度从750 ℃升高至900 ℃时，Zn和Mg的去除率均有所提高，且Zn较Mg更易挥发。在900 ℃保温60 min后，Zn和Mg的含量分别降至约0.03%和0.05%。对比50 Hz与200 Hz两种电磁频率发现，高频（200 Hz）高功率（10 kW）模式更有利于快速深度脱Zn，其初始去除速率可达0.28%/min（图11[58]）。

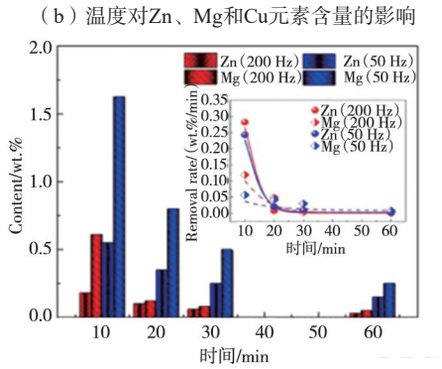
由于Zn在熔炼精炼过程中易于挥发，直接回收7XXX系等含Zn合金时往往会造成显著的Zn损失，从而增加补料成本。因此，控制Zn的挥发损失是提高该系合金回收效率的关键。Smalcerz等[59]分析了熔融铝合金中Zn的挥发动力学，测定了Zn的总传质系数k_{Zn}、液相侧传质系数β_l及挥发速率常数k_e。研究表明，使用氯化盐等添加剂可将Zn转化为不易挥发的化合物或将其富集于渣相，从而实现Zn的“钝化”而非自由挥发。另一方面，在Zn挥发阶段结束后快速降温或引入冷表面，可促使Zn蒸汽冷凝，从而减少挥发损失。目前，关于二次铝合金回收过程中Zn损失机制的研究仍较为薄弱，未来有必要开展更系统的探索。



（a）电磁场对铝合金熔体的搅拌作用示意图



（b）温度对Zn、Mg和Cu元素含量的影响



（c）精炼时间与电磁频率对Zn/Mg去除效率的影响

图11 电磁场辅助铝合金熔体精炼的脱锌效果及元素行为分析

Fig. 11 Electromagnetic field-assisted degassing and removal of Zn from aluminum alloy melt and analysis of elemental behavior

3 再生铝的回收模式与案例

由于不同行业对铝合金成分与性能的差异化需求，催生了多种回收路径，相应地，各场景下合金元素的控制要求也有所不同。本节选取饮料包装、汽车制造和航空航天工程三个典型领域，系统分析其再生铝回收实践，探讨各回收模式的特点、技术挑战与发展趋势，并进一步介绍提升回收效率的创新技术及其对构建循环经济体系的支撑作用。

3.1 合金到合金的降级回收：以铝罐为例

降级回收通常对杂质元素的容忍度较高，工艺实

施相对简单。以铝罐为例，因其使用寿命短、合金牌号相对集中，具备较高的直接回收率，部分国家回收率可达97%[60]。铝罐常用合金牌号如表1所示，主要包括3004和3104合金，二者均为Al-Mn-Mg系合金，具有良好的强度和耐腐蚀性能，可有效保障包装容器的结构完整性。

表1 铝罐中常用的合金牌号

Tab. 1 Common alloy grades used in the aluminum cans w_B/%

合金	Al	Mn	Mg	Si	Fe	Cu	Zn	Ti
3004	95.8~98.5	1.0~1.5	0.8~1.3	≤0.3	≤0.7	≤0.3	≤0.25	≤0.1
3104	94.0~98.0	1.0~1.5	0.8~1.3	≤0.3	≤0.7	≤0.2	≤0.25	≤0.1

铝罐回收面临的主要挑战在于表面涂层、印刷油墨及残留物对熔体纯度的污染[61]。此外，铝箔包装常附着标签或食品残渣会进一步影响回收料的洁净度。为解决上述问题，先进的分选与清洗技术正逐步推广应用，包括光学分选、磁选及化学处理等，以实现杂质分离与合金归类，确保再生铝质量[62]。

尽管存在技术挑战，铝包装行业在回收体系建设方面已取得显著进展[63]。多国建立了高效的回收网络，并实施押金退还等经济激励措施，鼓励消费者参与铝罐回收。同时，更清洁的熔炼技术与高效分选设备的研发持续推动污染控制水平的提升[52]。部分制造商还积极探索“可回收性设计”理念，从源头减少涂层和油墨的使用，降低后续回收处理的复杂度。

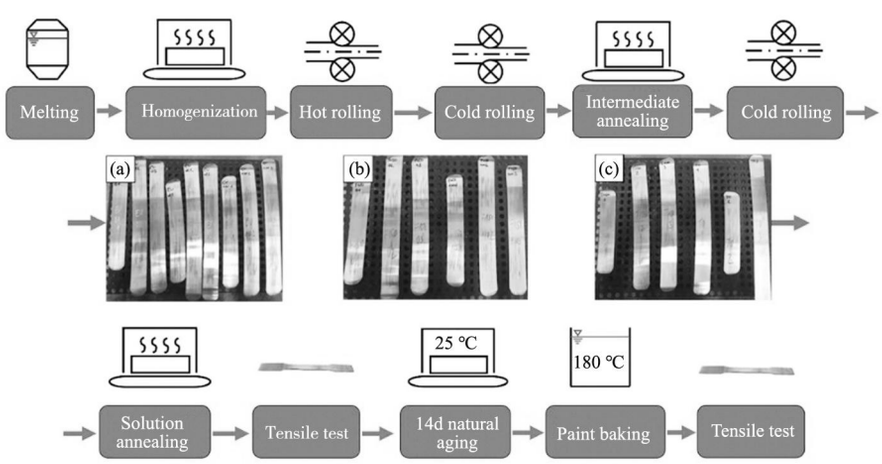
3.2 合金到合金的保级回收：以汽车和航空航天领域为例

实现从废合金到再生合金的直接保级回收，是提升铝合金回收效率的关键方向。该模式的核心在于通过精准去除杂质并补偿烧损元素，使再生合金成分满足原始牌号要求。然而，由于铝合金废料来源复杂、合金种类繁多，该方法在实际应用中面临诸多挑战。以汽车行业为例，车辆中铝合金零部件数量庞大、牌号多样，尤其铸造合金与变形合金的混杂，显著增加了分离难度[64-65]。

针对汽车用铝废料成分复杂的问题，Patrick Krall等[66]基于拆解数据和现有车型信息，构建了典型废铝成分谱，并开展重熔回收试验。结果表明，所制备的再生板材具备良好的轧制性能、屈服强度和伸长率，已接近商用汽车板合金水平，验证了直接保级回收的技术可行性。试验流程如图12所示[66]。

航空航天工业同样存在铝合金保级回收的典型案例[67]。铝合金在飞机构件中占比高达60%~80%[68-70]，其轻量化特性显著提升了燃油效率和有效载荷能力[71-72]。图13[69，73]展示了各类变形铝合金在民用飞机中的应用比例及其在波音777、C919及H-1火箭中的典型应用。

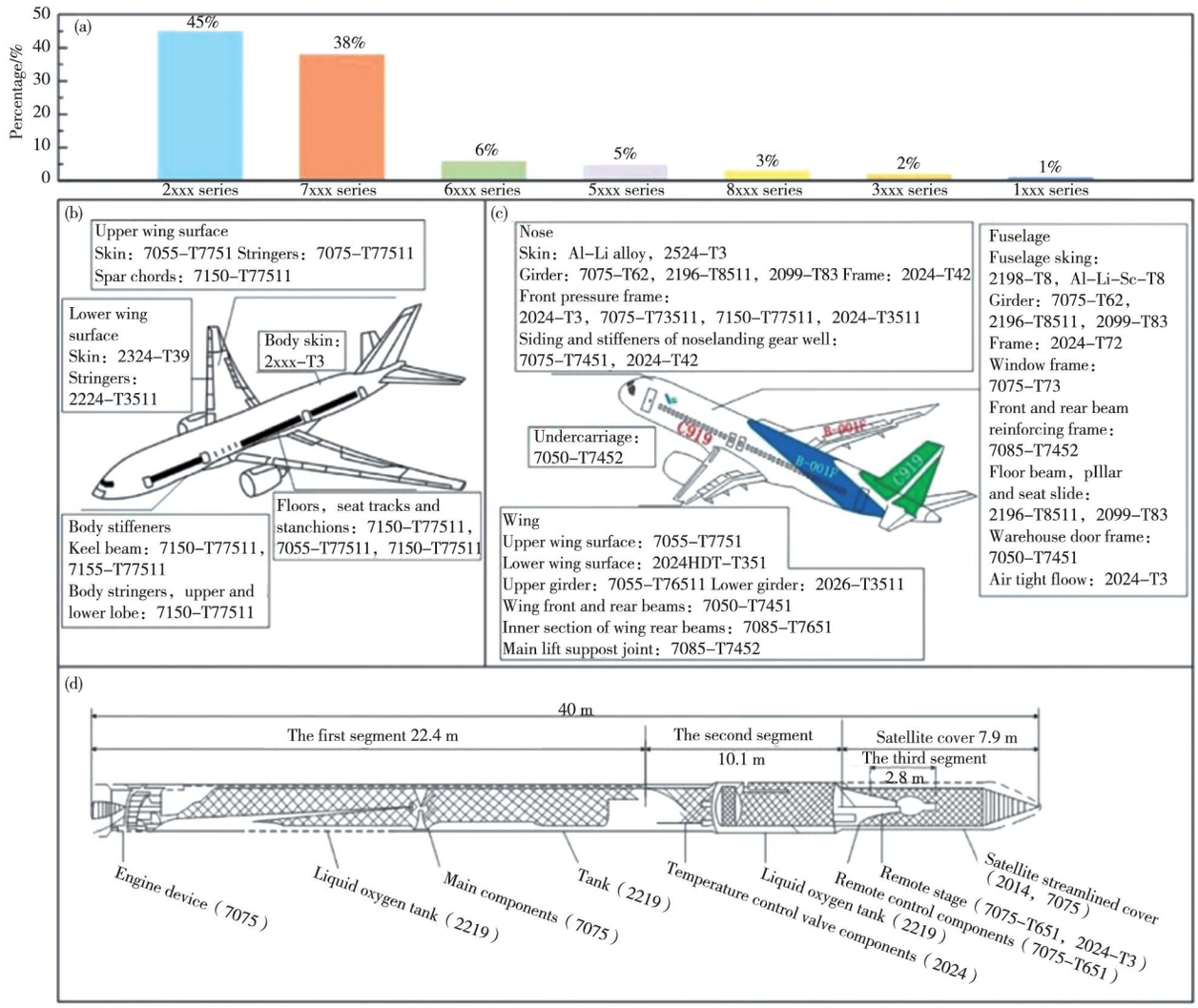
在航空航天领域，2XXX系和7XXX系铝合金占据主导地位（图13）。这两类合金富含Cu、Zn等元素，退役飞机中该类合金废料的累积量巨大。然而，由于混合废料成分复杂，回收过程中易发生交叉污染，导致熔体Zn含量超标。大规模拆解在成本和效率方面仍



（a）用于欧盟汽车的冷轧板；（b）皮卡车用铝板；（c）电动汽车用铝板

图12 从熔炼到拉伸测试的处理流程

Fig. 12 Scheme of processing from melting to tensile tests



（a）各种变形铝合金在民用飞机中的应用比例；（b）铝合金在波音777中的应用；（c）铝合金在中国商飞C919中的应用；（d）铝合金在日本H-1火箭中的应用

图13 不同系列变形铝合金在民用飞机与航天装备中的应用比例及实例

Fig. 13 Application proportion and examples of different series of wrought aluminum alloys in civil aircraft and aerospace vehicles

存在制约[74]。若以混合废料为原料生产7XXX系合金，仅需补加适量Zn即可满足成分要求；但若目标为2XXX系合金，则需将Zn含量降至0.05%~0.25%的严格范围，往往需添加大量纯铝稀释，显著增加成本。因此，该类合金保级回收的核心在于Zn的精准脱除与控制。相对而言，7XXX系合金的再生更具可行性，可通过熔配调整Zn含量实现保级利用。

然而，要实现规模化保级回收，仍需应对废料成分波动大、合金牌号混杂等挑战。基于机器学习的成分预测模型可辅助分析废料元素组成，并动态推荐纯铝稀释比例或合金补加量。此外，通过构建废料来源、工艺参数与再生合金性能之间的映射关系，AI可辅助决策最优的熔炼路径，从而在满足目标牌号成分窗口的前提下，最小化生产成本。

3.3 合金到高纯铝的升级回收：纯铝制备路径

由于Al化学性质活泼，常规重熔过程难以有效脱除合金元素，随着循环次数增加，杂质元素持续富集，导致再生铝难以满足高端应用对材料纯度的苛刻要求。同时，精炼过程中合金元素烧损量的精确补偿也面临较大技术难度。因此，目前大部分废铝以降级方式回收利用。将废铝提纯至高纯铝，是实现废铝升级回收的重要技术路径之一。

熔盐电解法是一种环保、高效且经济的金属提纯技术[75-76]。层液相电解精炼法已在工业高纯铝制备中得到成功应用。图14为该工艺的电解槽结构示意图[81]，清晰展示了利用密度差形成的三层体系：底部为高密度阳极合金熔体层（如Al-Cu中间合金，密度

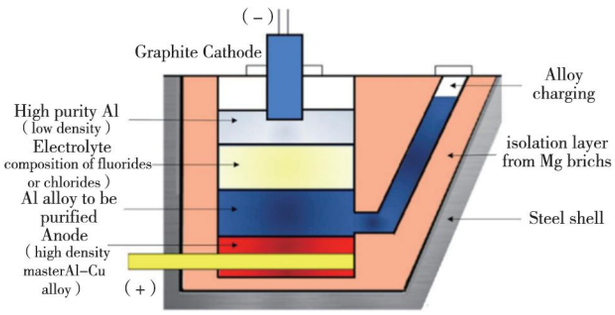


图14　三层熔盐电解槽结构示意图

Fig. 14 Schematic diagram of a three-layer electrolytic cell structure

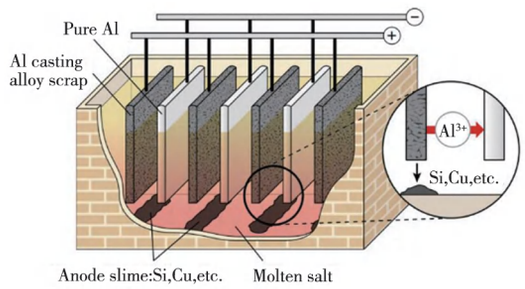


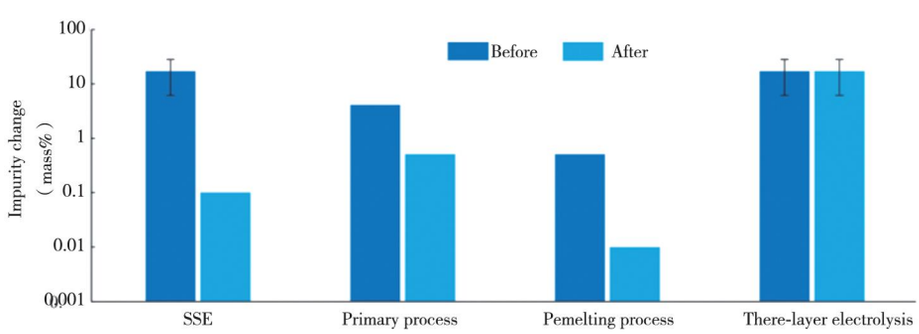
图15　SSE工艺的示意图和ASSSE工艺的电化学原理

Fig. 15 The schematic diagram of the SSE process and the electrochemical principle of the ASSSE process.

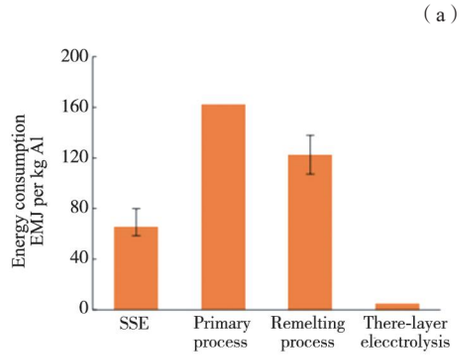
3.4~3.7 g/cm^3），中间为电解质层（密度2.7~2.8 g/cm^3），上层为阴极析出的高纯铝层（密度2.3 g/cm^3）[77-80]。电解过程中，Al离子选择性在阴极还原沉积，杂质元素则保留在阳极或电解质中，从而实现Al的深度提纯，可将纯度由99.50%提升至99.99%。常用电解质体系为氟化物或氯化物混合盐，具备高化学稳定性、低挥发性和适宜的熔点范围[80-81]。

固态电解（Solid-state Electrolysis，SSE）是另一种新兴的金属废料提纯技术，研究表明其对Al的提纯效率可达99.99%以上[82]。在SSE过程中，Al在直流电场作用下发生选择性溶解-沉积，杂质元素依其电荷与扩散系数发生定向迁移。为保持铝处于固态，电解质熔点需低于铝合金熔点。图15[82]展示了用于Al-Si-Cu合金纯化的SSE工艺原理示意。图16[82]系统比较了SSE工艺与原铝生产、三层液相电解及传统重熔工艺在提纯效率、能耗与反应温度等方面的差异，显示出SSE在具有将铝废料升级为纯度和质量与初级铝相当的铝同时，其能耗不到原铝生产工艺的一半，且SSE工艺可在远低于铝合金熔点的温度下运行，显著降低了热负荷。

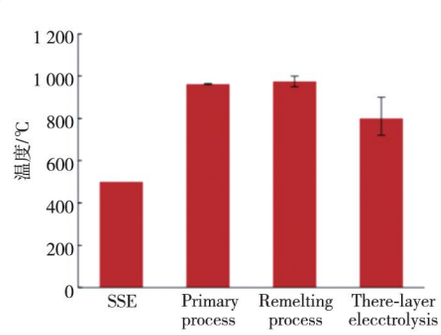
除液相提纯路径外，固态回收（Solid-state Recycling，SSR）也为废铝高值化利用提供了新思路[83]。相较于传统重熔工艺，SSR可节省40%的材料损耗及26%~31%的能耗[84-85]，回收率高达99.8%，且几乎不产生环境污染。该工艺通过热挤压、高压扭转等塑性变形手段，破碎废铝表面氧化膜并促进新鲜金属界面间的冶金结合，实现直接固相再生[86-87]。Jure Krolo等[88]研究表明，SSR法制备的再生铝合金可采用TIG和MIG工艺进行焊接，焊缝质量与传统铸轧材料相当，展现



（a）杂质变化



（b）能量消耗



（c）温度的比较

图16　固态电解还原工艺与其他工业铝工艺的比较

Fig. 16 Comparison of the SSE reduction process with other industrial aluminum processes

出良好的工程应用前景。

4 结论与展望

本文系统梳理了铝合金回收过程中元素控制的核心挑战与技术路径，得出以下主要结论：

（1）元素控制是实现铝合金高值化回收的关键。根据元素在回收过程中的行为特征，可将其划分为易富集的有害元素（如Fe）和易烧损挥发的强化元素（如Mg、Zn）。当前，有害元素的去除与富集抑制、易失元素的补偿调控仍是制约再生铝高质量应用的技术瓶颈，亟待开展系统深入的机理性研究。

（2）受限于元素控制难度，当前铝合金回收多以降级利用模式为主。尽管三层液相电解、固态电解等提纯技术可将废铝再生为高纯铝，但其工艺复杂、成本较高，难以大规模推广。相较之下，“合金到合金”的直接保级闭环回收模式具有更高的资源效率与经济效益，伴随一体化压铸等成形技术的快速发展，该模式有望在车用等高增长领域率先实现规模化应用，成为提升再生铝利用价值的重要方向。

（3）人工智能技术在铝合金保级回收中展现出广阔应用前景。基于大数据驱动与多源信息融合，人工智能可实现对复杂废料成分的快速识别与动态预测，指导合金成分的在线调控与补料优化，从而提升再生铝成分控制的精度与效率。随着传感检测、过程控制及机器学习算法的持续演进，人工智能将进一步赋能再生铝的智能化分选与冶炼，为实现绿色低碳、高效闭环的资源循环体系提供关键支撑。

参考文献：

[1] 夏天，吴时雨. 新能源汽车底盘副车架一体化压铸技术研发与应用 [J]. 铸造，2024，73（12）：1751–1756.

[2] Meng X，Xie Y，MA X，et al. Towards friction stir remanufacturing of high-strength aluminum components [J]. Acta Metallurgica Sinica（English Letters），2023，36（1）：91–102.

[3] Chen M，Hou T，Cheng S，et al. A comprehensive exploration of the relationship between microstructure optimization and strength enhancement in low-density 5Al-5Mn steel [J]. Acta Metallurgica Sinica（English Letters），2025，38（7）：1219–1236.

[4] Liu L Y，Ji H G，Lu X F，et al. Mitigation of greenhouse gases released from mining activities：a review [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials，2021，28（4）：513–521.

[5] Barlat F，Brem J C，Yoon J W，et al. Plane stress yield function for aluminum alloy sheets - part 1：theory [J]. International Journal of Plasticity，2003，19（9）：1297–1319.

[6] Das S. Achieving carbon neutrality in the global aluminum industry [J]. Jom，2012，64（2）：285–290.

[7] Zheng Z，Xie M，Yu G，et al. Preparation of lithium-ion battery anode materials from graphitized spent carbon cathode derived from aluminum electrolysis [J]. International Journal of Minerals，Metallurgy and Materials，2024，31（11）：2466–2475.

[8] Wang J，Guo S，Liu X M，et al. Utilization of red mud and coal gangue for underground backfill material：hydration and environmental characteristics [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials，2025，32（6）：1358–1371.

[9] Li X，Zhu N，Xi Y，et al. Efficient AlN decomposition and Al species transformation in secondary aluminum dross through co-sintering with waste sodium acetate [J]. International Journal of Minerals，Metallurgy and Materials，2025，32（5）：1079–1090.

[10] Sevigné-itoiz E，Gasol C M，Rieradevall J，et al. Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market [J]. Resources Conservation and Recycling，2014，89：94–103.

[11] Bertram M，Ramkumar S，Rechberger H，et al. A regionally-linked，dynamic material flow modelling tool for rolled，extruded and cast aluminium products [J]. Resources Conservation and Recycling，2017，125：48–69.

[12] Gutowski T G，Sahni S，Allwood J M，et al. The energy required to produce materials：constraints on energy-intensity improvements，parameters of demand [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences，2013，371（1986）：20120003.

[13] 刘金城. 铸造工艺和铸件可回收性在汽车产品生命同期计算中占据优势 [J]. 铸造，2021，70（1）：125–126

[14] Antrekowitsch H，Hanko G，Ebner P. Recycling of different types of magnesium scrap [C]// Proceedings of Magnesium Technology 2002，TMS Annual Meeting. Seattle：TMS，2002：43–48.

[15] Zhang Y，Sun M，Hong J，et al. Environmental footprint of aluminum production in China [J]. Journal of Cleaner Production，2016，133：1242–1251.

[16] 于明轩，范超，张骏，等. Fe含量对再生铝硅合金组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺，2024，53（14）：108–113.

[17] Ganjehfard K，Taghiabadi R，Noghani M T，et al. Tensile properties and hot tearing susceptibility of cast Al-Cu alloys containing excess Fe and Si [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials，2021，28（4）：718–728.

[18] Jiao X Y，Liu C F，Guo Z P，et al. The characterization of Fe-rich phases in a high-pressure die cast hypoeutectic aluminum-silicon alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology，2020，51：54–62.

[19] Zhang L F，Gao J W，Damoah L N W，et al. Removal of iron

from aluminum：a review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review，2012，33（2）：99–157.

[20] Taylor J A，Schaffer G B，Stjohn D H. The role of iron in the formation of porosity in Al-Si-Cu-based casting alloys：part II. a phase-diagram approach [J]. Metallurgical and Materials Transactions A：Physical Metallurgy and Materials Science，1999，30（6）：1651–1655.

[21] 杨宁源，周慧慧，张志豪. Fe含量对Al-1.04wt.%Mg-0.64wt.%Si-0.23wt.%Cu合金析出相、力学性能和腐蚀性能的影响 [J]. 材料科学与工艺，2021，29（3）：64–74.

[22] De moraes H L，De oliveira J R，Espinosa D C R，et al. Removal of iron from molten recycled aluminum through intermediate phase filtration [J]. Materials Transactions，2006，47（7）：1731–1736.

[23] 张海涛，唐威，王东涛，等. 铝合金中Fe元素的危害及其去除方法研究进展 [J]. 轻合金加工技术，2021，49（7）：7–14.

[24] Xiao T，Lv G Q，Bao Y，et al. Electromagnetic separation of coarse Al-Si melts：the migration behavior of iron-rich phase and continuous growth of primary silicon [J]. Journal of Alloys and Compounds，2020，819：153006.

[25] Raabe D，Ponge D，Uggowitzer P J，et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap：the science of "dirty " alloys [J]. Progress in Materials Science，2022，128：100947.

[26] Sun B L，Sun N J，Wang L，et al. Efficient purification of scrap 1060 aluminum alloys contaminated with Fe and Si by super-gravity separation [J]. Process Safety and Environmental Protection，2023，177：486–495.

[27] Huo Y K，Zhao L H，An H H，et al. Model prediction of the effect of in-mold electromagnetic stirring on negative segregation under bloom surface [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials，2020，27（3）：319–327.

[28] Lee G，Kim M，Park J. Elimination of iron in molten aluminum scrap by electromagnetic stirring technique; Proceedings of the Proceedings of the 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing [C]// Cham，Springer International Publishing，2016.

[29] 熊孝经，吴晓鹏，张唯，等. Al-Mn-Sc合金的选区激光熔化工艺优化及室温与高温力学性能研究 [J]. 铸造，2024，73（5）：626–631.

[30] 苗赛男，郑长清，周亚伟，等. 再生铝合金中富Fe相形貌的改善 [J]. 铸造，2024，73（12）：1699–1703.

[31] Ferraro S，Fabrizi A，Timelli G. Evolution of sludge particles in secondary die-cast aluminum alloys as function of Fe，Mn and Cr contents [J]. Materials Chemistry and Physics，2015，153：168–179.

[32] Qiu Z Q，Meng X C，Yuan Q H，et al. Morphological evolution of Fe-rich phases in the $AlSi_9Cu_3Mg_{0.19}$（Fe）alloy with the addition of minor Mn and Cr [J]. Acta Metallurgica Sinica-English Letters，2018，31（6）：629–640.

[33] Gao H，Guan K，Cui R J，et al. Effect of lanthanum on microstructure of a nickel-based single crystal superalloy [J]. China Foundry，2025，22（1）：55–64.

[34] Zhao Z，Guan K，Cui R，et al. Effect of Y on oxidation behavior of directionally solidified Ni-based single-crystal superalloy [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2024，37（1）：100.

[35] Guan K，Huang Z H，Cui R J，et al. Effects of yttrium on microstructure and mechanical properties of a directionally solidified single crystal superalloy [J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing，2019，752：86–92.

[36] Yue C Y，Zheng B W，Su M，et al. Effect of Y and Ce micro-alloying on microstructure and hot tearing of as-cast Al-Cu-Mg alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica-English Letters，2024，37（6）：939–952.

[37] Guo F，Zheng C W，Wang P，et al. Effects of rare earth on austenite–ferrite phase transformation in a low-carbon Fe-C alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica（English Letters），2023，36（1）：141–146.

[38] 窦志昂，楼岳，吴剑，等. 工业纯铝熔体稀土合金化对Fe杂质的影响与机制分析 [J]. 铸造，2025，74（11）：1518–1523.

[39] Liu X X，Wang B，Li Q，et al. Quantifying the effects of grain refiners Al-Ti-B and La on the microstructure and mechanical properties of W319 alloy [J]. Metals，2022，12（4）：627.

[40] Shi Z M，Gao K，Shi Y T，et al. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al-1Fe binary alloys [J]. Materials Science and Engineering A，2015，632：62–71.

[41] Luo S X，Shi Z M，Li N Y，et al. Crystallization inhibition and microstructure refinement of Al-5Fe alloys by addition of rare earth elements [J]. Journal of Alloys and Compounds，2019，789：90–99.

[42] Zhao Y L，Song D F，Lin B，et al. 3D characterization of ultrasonic melt processing on the microstructural refinement of AlCu alloys using synchrotron X-ray tomography [J]. Materials Characterization，2019，153：354–365.

[43] Zhang Y B，Kateryna S，Li T J. Effect of ultrasonic treatment on formation of iron-containing intermetallic compounds in Al-Si alloys [J]. China Foundry，2016，13（5）：316–321.

[44] Kalsar R，Yadav D，Sharma A，et al. Effect of Mg content on microstructure，texture and strength of severely equal channel angular pressed aluminium-magnesium alloys [J]. Materials Science and Engineering A：Structural Materials Properties Microstructure and Processing，2020，797：140088.

[45] Wang H，Li Y D，Zhang M，et al. Preheating-assisted solid-state friction stir repair of Al-Mg-Si alloy plate at different rotational speeds [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials，2024，31（4）：725–736.

[46] Son K T，Cho C H，Kim m G，et al. Two-stage dynamic recrystallization and texture evolution in Al-7Mg alloy during hot torsion [J]. International Journal of Minerals，Metallurgy and Materials，2024，31（8）：1900–1911.

[47] Luo Z，Zhang X，Liu Z，et al. Mechanical properties and interfacial characteristics of 6061 Al alloy plates fabricated by hot-roll bonding [J]. International Journal of Minerals，

Metallurgy and Materials，2024，31（8）：1890–1899.

[48] Doutre D，Kvithyld A. Handbook of recycling（second edition）[M]. Elsevier：2024.

[49] Hu B，Li D J，Ying T，et al. Oxidation mechanism of molten Al-5Mg-2Si-Mn alloy [J]. Journal of Materials Science，2020，55（26）：12554–12567.

[50] Smith N，Gleeson B，Kvithyld A，et al. Effects of 2 ppm beryllium on the oxidation of a 5XXX aluminum alloy at temperatures between 500 and 750 ℃ [J]. Light Metals，2017（2）：1465–1474.

[51] Meng L，Wang Z，Wang L，et al. Novel and efficient purification of scrap Al-Mg alloys using supergravity technology [J]. Waste Management，2021，119：22–29.

[52] Ozer G，Yuksel C，Comert Z Y，et al. The effects of process parameters on the recycling efficiency of used aluminium beverage cans（UBCS）[J]. Materials Testing，2013，55（5）：396–400.

[53] Zhu Z，Jiang X，Wei G，et al. Influence of Zn content on microstructures，mechanical properties and stress corrosion behavior of AA5083 aluminum alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica（English Letters），2020，33（10）：1369.

[54] 张恩图，郝建飞，夏鹏，等. 细化变质对免热处理压铸Al-Zn-Si-Cu合金组织及性能的影响 [J]. 铸造，2024，73（6）：746–752.

[55] Yu X W，Chen J H，Ming W Q，et al. Revisiting the hierarchical microstructures of an Al-Zn-Mg alloy fabricated by pre-deformation and aging [J]. Acta Metallurgica Sinica（English Letters），2020，33（11）：1518–1526.

[56] Yuan L L，Guo M X，Wang Y，et al. Synergistic effect of gradient Zn content and multiscale particles on the mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys with coupling distribution of coarse-fine grains [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials，2024，31（6）：1392–1405.

[57] Zhu M J，Ding D Y，Gao Y J，et al. Effect of Zn content on tensile and electrochemical properties of 3003 Al alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2010，20（11）：2118–2123.

[58] Wang J，Li F G. Research status and prospective properties of the Al-Zn-Mg-Cu series aluminum alloys [J]. Metals，2023，13（8）：1329.

[59] Qian G Y，Wang Z，Sun Z，et al. Thermal decoating and composition controlled of aerospace aluminum alloys waste for aircraft recycling [J]. Materials Review，2021，35（1A）：01023–01029.

[60] Smalcerz A，Wecki b，Blacha L，et al. Kinetics of zinc evaporation from aluminium alloys melted using VIM and ISM technologies [J]. Materials，2021，14（21）：6641.

[61] Niero M，Olsen S I. Circular economy：to be or not to be in a closed product loop? a life cycle assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements [J]. Resources，Conservation and Recycling，2016，114：18–31.

[62] Lakind J. Can coatings for foods and beverages：issues and options [J]. International Journal of Technology Policy and Management，2012，13（1）：80–95.

[63] Gaustad G，Olivetti E，Kirchain R. Improving aluminum recycling：a survey of sorting and impurity removal technologies [J]. Resources Conservation and Recycling，2012，58：79–87.

[64] Rabah M A. Preparation of aluminium-magnesium alloys and some valuable salts from used beverage cans [J]. Waste Management，2003，23（2）：173–182.

[65] 王科学，王东波，黄勇，等. 铝合金材料在汽车轻量化领域应用的研究现状 [J]. 铝加工，2022，（6）：3–6.

[66] Krall P，WeiBensteiner I，Pogatscher S. Recycling aluminum alloys for the automotive industry：breaking the source-sink paradigm [J]. Resources，Conservation and Recycling，2024，202：107370.

[67] 吴一平，徐明英，许玉贤，等. 废飞机铝合金重熔再生技术的研究 [J]. 轻金属，1993（4）：56–57.

[68] Hu H，Zhao F，Wu D，et al. Digital model for rapid prediction and autonomous control of die forging force for aluminum alloy aviation components [J]. International Journal of Minerals，Metallurgy and Materials，2025，32（9）：2189–2199.

[69] Starke E A，Staley J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft [J]. Progress in Aerospace Sciences，1996，32（2–3）：131–172.

[70] Wang b，Li J，Xie Z，et al. High corrosion and wear resistant electroless Ni-P gradient coatings on aviation aluminum alloy parts [J]. International Journal of Minerals，Metallurgy and Materials，2024，31（1）：155–164.

[71] Ren J，Wang R C，Feng Y，et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc（7055）alloy processed by modified powder hot extrusion with post aging [J]. Vacuum，2019，161：434–442.

[72] Manes A，Pagani M，Saponara M，et al. Metallographic characterisation of Al6061-T6 aluminium plates subjected to ballistic impact [J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing，2014，608：207–220.

[73] Murphy A G，Mathiesen R H，Houltz Y，et al. Direct observation of spatially isothermal equiaxed solidification of an Al-Cu alloy in microgravity on board the maser 13 sounding rocket [J]. Journal of Crystal Growth，2016，454：96–104.

[74] Sabaghi M，Cai Y，Mascle C，et al. Sustainability assessment of dismantling strategies for end-of-life aircraft recycling [J]. Resources Conservation and Recycling，2015，102：163–169.

[75] 袁亚，俞小花，谢刚，等. 熔盐电解质体系及在制备铝合金中的研究进展 [J]. 中国有色冶金，2024，53（1）：24–33.

[76] Zhang L W，Nie Z R，Xi X L，et al. Electrochemical separation and extraction of cobalt and tungsten from cemented scrap [J]. Separation and Purification Technology，2018，195：244–252.

[77] Wu J X，Djavanroodi F，Gode C，et al. Melt refining and purification processes in Al alloys：a comprehensive study [J]. Materials Research Express，2022，9（3）：032001.

[78] Solheim A，Kjos O S，Gudbrandsen H，et al. Separation

of aluminum from more noble elements in an electrolysis cell with side-by-side geometry [J]. Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science，2021，52（3）：1550–1555.

[79] Kondo M，Maeda H，Mizuguchi M. The production of high-purity aluminum in Japan [J]. Jom-Journal of the Minerals Metals & Materials Society，1990，42（11）：36–37.

[80] 王祝堂. 话说再生铝 [J]. 金属世界，1996（3）：33–37.

[81] Wu J，Djavanroodi F，Gode C，et al. Melt refining and purification processes in Al alloys：a comprehensive study [J]. Materials Research Express，2022，9（3）：032001.

[82] Lu X，Zhang Z Y，Hiraki T，et al. A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap [J]. Nature，2022，606：511–515.

[83] Ferretti I，Zanoni S，Zavanella L，et al. Greening the aluminium supply chain [J]. International Journal of Production Economics，2007，108（1–2）：236–245.

[84] Gronostajski J，Marciniak H，Matuszak A. New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling [J]. Journal of Materials Processing Technology，2000，106（1–3）：34–39.

[85] Altharan Y M，Shamsudin S，Al-alimi S，et al. A review on solid-state recycling of aluminum machining chips and their morphology effect on recycled part quality [J]. Heliyon，2024，10（14）：e34433.

[86] Misiolek W Z，Haase M，Ben khalifa N，et al. High quality extrudates from aluminum chips by new billet compaction and deformation routes [J]. Cirp Annals，2012，61（1）：239–242.

[87] Anilchandra A R，Surappa M K. Microstructure and tensile properties of consolidated magnesium chips [J]. Materials Science and Engineering A：Structural Materials Properties Microstructure and Processing，2013，560：759–766.

[88] Krolo J，Spada V，Bilusic M，et al. Welding of solid-state-recycled aluminum alloy：comparative analysis of the mechanical and microstructural properties [J]. Applied Sciences-Basel，2025，15（3）：1222.

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）