DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4027

金属材料可持续发展实施策略——以铝合金为例

邓宇芹[1],夏明许[1,2,3]

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院,上海 200240; 2. 上海交通大学 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室,上海 200240; 3. 宁夏大学 材料与新能源学院,宁夏 银川 750021)

摘　要:金属材料是人类社会发展的战略资源,在国内矿产资源日趋减少及国际资源竞争加剧的背景下,寻求金属材料的可持续发展是保障我国资源安全、满足工业需求的必要措施。铝合金作为第二大金属材料,由于耐蚀性好、回收再生能耗污染小,是最具有回收再生价值的金属材料,但在铝合金可持续发展中存在降级回收这一问题。本文从回收与再生角度进行分析,提出精细化分选与强化提纯除杂的方向,考虑到全生命周期循环,对未来的铝合金设计方向及服役过程加以综述,最后对铝合金未来可持续发展进行了展望,期望以铝合金为代表,为金属材料可持续发展的实施策略提供参考。

关键词:可持续发展;铝合金;回收;再生;设计;服役

中图分类号:TG14; TQ146.2+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)03-0259-11

Strategy for the Sustainable Development of Metal Materials —Taking Aluminum Alloys as an Example

DENG Yuqin[1], XIA Mingxu[1,2,3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Key Lab of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. School of Materials and New Energy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Metal materials are strategic resources for the development of human society. In the context of decreasing domestic mineral resources and the intensification of international resource competition, the sustainable development of metal materials is necessary to ensure the safety of China's resources and meet the needs of industry. As the second largest metal material, aluminum alloy is the most valuable metal material for recycling due to its good corrosion resistance, low pollution and low energy consumption. In the sustainable development of aluminum alloys, there is a problem of recovery from degradation. From the perspective of recovery and regeneration, measures for fine sorting and strengthening purification and impurity removal are proposed. Considering the cycle of the whole life cycle, the future design direction and the service process of aluminum alloys are reviewed. Finally, the future sustainable development of aluminum alloys is proposed, hoping to provide a reference for the implementation of strategies for the sustainable development of aluminum alloy metal materials.

Key words: sustainable development; aluminum alloy; recovery; regeneration; design; service

自第一次工业革命以来,通过开采煤炭作为能源充分燃烧,蒸汽机得以工作,人类对自然资源的利用进程飞快加速,迅速提高了生产效率。自此,煤炭、石油、天然气等不可再生资源作为主要能源被广泛使用。20 世纪 70 年代后爆发的 3 次石油危机,让各国人民意识到经济发展对化石及矿产资源的过度性依赖。世界工业化的进程中,大气、水等环境污染日益严重,20 世纪 30~60 年代先后爆发了马斯河谷、多诺拉、光化学烟雾、伦敦烟雾、四日市、米糠油、水俣病、骨痛病 8 大公害事件,环境问题成为困扰人

收稿日期:2024-02-06

基金项目:国家重点研发计划(2022YFE010769)

作者简介:邓宇芹,2000 年生,博士研究生.研究方向为再生铝方面的研究.Email: dengyuqin@sjtu.edu.cn

通讯作者:夏明许,1976 年生,博士,研究员.研究方向为形核行为与界面控制、凝固过程的控制.Email: mingxu.xia@sjtu.edu.cn

引用格式:邓宇芹,夏明许.金属材料可持续发展实施策略——以铝合金为例[J].铸造技术,2024,45(3):259-269.

DENG Y Q, XIA M X. Strategy for the sustainable development of metal materials—Taking aluminum alloys as an example[J]. Foundry Technology, 2024, 45(3): 259-269.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

类生存和发展的重要课题。因此，以单方面的资源消耗、环境污染为前提推动的经济增长是不长久的，再按照当前的模式发展下去，地球将不堪重负，实现生态、经济、社会协调发展的可持续发展理念应运而生。中国作为最大的发展中国家，政府将可持续发展确立为国家战略，上至国家政策，下至具体实践，通过多种途径推进可持续发展进程[1-2]。

金属材料是人类社会发展的重要支柱，青铜器时代、铁器时代均以金属材料的应用作为标志，金属材料在农业机械、建筑工程、交通车辆、电子信息、航空航天、生物医疗等领域广泛应用，成为人类赖以生存的物质基础。随着我国工业化进程的发展，勘探开采了大量矿产，而金属矿产作为一种不可再生资源，在多年高强度开发下，未来将出现不同程度的枯竭短缺。目前地下 500 m 以内浅铁矿石已开采殆尽，开采深度需增至 1 000 m[3]。此外我国金属矿产对外依赖大，铜、铝对外依存度高达 60%和 50%[4]，部分资源缺失国际定价权。在国内矿产资源日趋减少及国际资源竞争加剧下，寻求金属材料的可持续发展至关重要。

与矿产资源减少对应的是各类报废电子产品、家电等废旧金属的大量堆积。废旧品中金属含量远大于原矿，如 1 t 废手机电池中，可提炼出 100 g黄金，而 1t 黄金原矿中，只能提取出 6 g 黄金[5]。这些废旧金属构成了名副其实的城市矿山，使金属矿产由地下转变为地上资源。与传统的采矿冶炼新钢材相比，从废旧家电中回收废铁，只消耗 10%的原材料、26%的能源，生成 3%的矿废物、14%的大气污染、24%的水污染[6]。以城市矿山的废旧金属二次开发循环利用代替金属原矿开采，不仅可以缓解金属矿产储量紧张的现状，还能节约能源、减少环境污染，是实现金属材料可持续发展的有力途径。《“十四五”循环经济发展规划》明确提出：大力发展循环经济，推进资源节约集约利用，将资源的循环利用上升到新的政策高度。

英国布鲁内尔大学樊中云教授从可持续发展的角度提出全金属循环理念[7]，如图 1 所示。传统冶金过程包括采矿、提炼环节，以得到金属单质，而可持续的金属循环过程以废旧金属品为原料，将其回收、精炼、再制造后，重新投入使用中，材料的整个生命周期形成闭环，即实现金属的可持续发展。全金属循环理念将彻底改变我们使用自然资源的方式，不需要再开采矿石，而是充分利用已经使用过，进入社会经济体系的金属，以满足全球对金属材料的需求。

铝合金具有低密度、高强度、良好的导电导热性以及耐蚀性、优异的加工性能等[8-11]，是除钢以外的第二大常用金属材料。铝合金可以重复使用，历史上生产的铝合金中约有 75%，即 10 亿吨仍然在使用中[12]。一方面，铝耐蚀性好，与空气接触后会形成一层致密的氧化物膜，保护内部金属不受环境腐蚀，在铝合金的日常服役场景中，腐蚀损失极小，可以得到有效回收。另一方面，如图 2 所示，相比钢、铜等金属

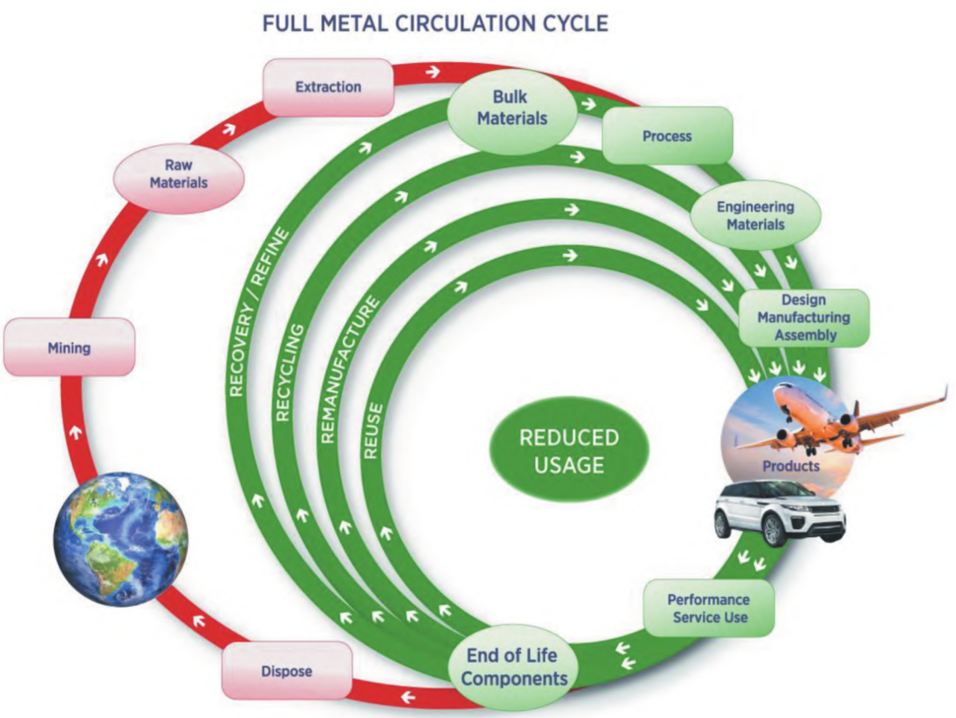


图 1 全金属循环示意图[7]

Fig.1 Schematic diagram of the full metal circulation cycle[7]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

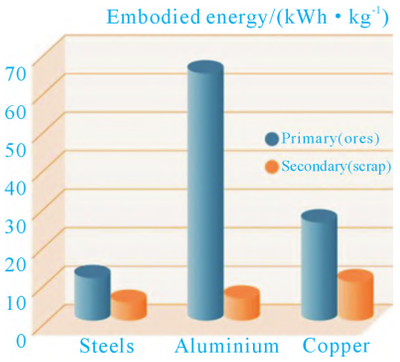


图 2　钢、铝、铜一次与二次生产所需能耗对比[13]

Fig.2　Comparison of the energy consumption required for the primary and secondary production of steel, aluminum, and copper[13]

材料，从铝矿石以及废铝料中提取铝所需的能耗差别尤其明显，重熔废铝料得到再生铝所需的能量，只有开采冶炼得到原生铝的 5%[13]，温室气体排放量仅占原生铝生产的 4.6%[14]。因此在金属的回收利用中，铝再生效益明显。在全球“双碳”政策的执行下，铝的回收与循环利用在节约资源以及保护环境方面具有重大意义。

全球再生铝市场广阔，据统计，2021 年全球总共约生产 1 亿吨铝合金，原生铝锭约占 60%，再生铝锭约占 40%，预计在 2050 年该比例会上升至 50%[13]，如何有效处理好再生铝是世界铝工业的重要课题。废旧铝合金的再生回收是实现可持续发展的首选，因此本文以铝合金为代表，综述了金属材料可持续性发展实施策略，以期为金属材料未来的循环利用提供参考。

1　铝合金回收与再生

1.1　存在的问题

铝合金按其加工工艺特性，可分为铸造铝合金及变形铝合金。其中变形铝合金塑性好，约含有 5% 的合金元素；铸造铝合金铸造性能好，含有 6%~27%(质量分数)的合金元素[15]。在铝合金再生循环利用过程中，不可避免地积累杂质合金元素，超出变形铝合金的成分范围，因此大多变形铝合金只能降级为铸造铝合金使用[16]，如图 3 所示。随着电动汽车的推广，对铸造铝合金的需求逐渐减少，高品位铝合金向下降级循环使用的发展是不可持续的，总有一天会无法向下循环，而成为“死金属”，预计到 2030 年会产生 610 万吨不可回收的废铝料[17]。如何实现再生铝的保级利用，是推动铝合金可持续发展的首要问题。

1.2　回收角度——精细化分选

铝废料来源广泛、相互混杂、成分复杂，需要通过预处理去除金属及非金属杂质，得到符合下一步入炉条件的炉料。预处理步骤中先将废铝破碎，以便下一步分选。之后通过热脱漆、化学脱漆、机械脱漆等方式进行脱漆处理，除去废铝表面的油漆、涂层等有机物杂质。借助不同杂质与废铝的物理差异，如磁性、密度、浮力等将其分开，常见的有利用风选法去除尘土、薄膜、废纸等轻质杂质，磁选法去除钢、铁等，涡流法、重介质分选法、浮选法、抛选法、色选法等去除铜、铅等其他有色金属[19]。

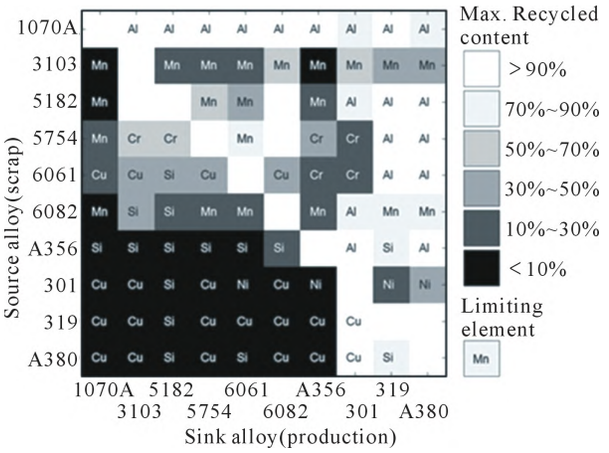


图 3　典型铝合金回收路径的选择和限制[18]

Fig.3　Options and constraints for recycling paths of typical aluminum alloys due to alloying elements[18]

理想的分选操作下，应得到不同牌号的铝合金，如铝硅合金、铝镁合金等，减少后续除杂、成分调整等工作，分别再生成对应牌号的铝合金，从而实现保级利用。但上述分选方式尚不能将铝合金区分开来，新的更加精细化的分选技术正在研发试用中。X 射线荧光法(XRF)、瞬发伽马射线中子活化分析法(PGNAA)、激光诱导击穿光谱法(LIBS)通过收集外部能量激发下发射的特征 X 射线、γ 射线、等离子光谱，根据特征射线或光谱的波长及强度信息获取元素成分[20]，不同成分区间的废铝料归置到不同的类别中，上述光谱技术在铸造铝合金和变形铝合金的分选方面潜力较大。Werheit 等[21]通过三维扫描 LIBS 技术对铸造铝合金和变形铝合金进行分选，正确率大于 96%，8 个不同系别的铝合金之间也能实现分选，正确率大于95%。但光谱技术处理的废料表面需要无油漆、氧化物、泥浆等污染，以保证识别结果的精度[22]。X 射线透射法(XRT)根据不同元素质量吸收系数的差异来获取成分信息，多与 XRF 结合以识别废料[23]。图像分析法通过颜色和形状等对废铝料加以区分，Koyanaka 等[24]开发出轻质金属废料自动分拣系统，三维成像相机在反射光线的运动中重构碎片的 3D 图像，通过碎片的密度和 3D 形状(包括体积、

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

垂直投影面积、长度、宽度、最大高度及重心高度等)的差异,成功分选出铸造铝合金、变形铝合金及镁合金,分选精度高达 90%。

我国废铝分选技术尚未达到机械化及自动化,仍然依靠廉价的人工拆除、分拣。光谱技术、图像处理等作为新开发的分选方式,如何提高这些检测方式的速度与准确度,实现精细化分选是未来的趋势所在。

1.3 再生角度——强化除杂提纯

由于铝废料本身含有一定量的杂质,在后续重熔回收过程中,与炉体、工具、水汽等接触反应,会引入 H、金属等元素及以 Al_2O_3 为主的非金属夹杂物质[25]。这些杂质阻碍铝液的流动,恶化充型能力,形成气孔、缩松等缺陷,同时也是裂纹的萌生源,危害后续铝合金的力学性能[26-27],限制了再生铝的同级利用,严重的甚至会造成产品报废。因此在废铝再生过程中需要经过熔体净化,去除铝废料中杂质元素、夹杂物、气体等,以提高铝合金纯净程度,结合变质处理,减小杂质的危害,使后续成型产品保持优异的性能。

1.3.1 熔体净化

净化方法按照原理可以分为吸附和非吸附两大类。其中吸附类是通过加入熔剂、过滤剂等吸附物质与熔体直接接触,发生物理、化学或机械等作用,以除去杂质,包括熔剂法、气泡浮游法、过滤法等;而非吸附法是依靠杂质与熔体在电磁力、超声波、真空等物理环境下的差异分离,具体可分为电磁净化法、超声波净化法、真空净化法等[28]。非吸附法对装置要求较高,目前在实际生产中应用较少。

熔剂法工艺成熟,是最常用的方法,将熔剂加入铝合金熔体中,通过熔剂与铝熔体中杂质的吸附、溶解等作用使杂质进入渣中,同时气体上浮至表面从而达到除杂、排气的目的。目前常用的熔剂成分有氯盐、氟盐、氧化性盐,也可将多种熔剂复合使用以达到综合的净化效果。Liu 等[29]设计了 NaB_4O_7 与 KBF_4 质量比为 1:1 的熔剂,在去除金属杂质元素的同时,反应生成的 AlB_2 可作为异质形核核心减小共晶硅尺寸。倪红军等[30]开发了一种含有稀土化合物的新型 JDN-1 熔剂,该熔剂可与氢结合形成稀土氢化物,同时达到除气、变质、细化晶粒的效果,力学性能也有所提高。

过滤法是将铝合金熔体通过过滤剂,悬浮的夹杂物质被截留在过滤介质上,从而与熔体分离开来。过滤剂有陶瓷泡沫过滤器(ceramic foam filter, CFF)、深床过滤器(deep bed filter, DBF)以及刚性介质过滤器(rigid media tube filter, RMF),其中陶瓷泡沫过滤精度高、应用广泛[31]。除了去除夹杂物外,过滤器也可通过设计去除其他杂质,Damoah 等[32]发现 HF与 Al_2O_3 陶瓷泡沫过滤器反应,在过滤器表面生成一层 AlF_3 涂层后,该过滤器不仅能去除非金属夹杂物,还能去除溶解的 Ca 杂质元素,去除率高达 99%。

气泡浮游法是向铝合金熔体中通入气体,由于气泡内的氢分压较小,氢气会扩散进入气泡中,随气泡上浮至表面,从而被除去[33]。通入的气体可分为惰性气体(氮气、氩气)、活性气体(氯气)或混合气体。根据气泡通入方式的差异,可分为单管吹气、多孔喷头吹气、旋转喷吹法等。旋转喷吹法是应用最为广泛的方法,研究多集中于装置设计及工艺参数优化。左玉波等[34]开发的新型定子–转子型装置,通过强剪切作用,有效破碎并分散熔体中的气泡,铝中氢含量可由 2.90 μL/g 降低到 1.10 μL/g,显著提高除氢效率。

单一的净化方式难以同时除杂、除气,如过滤法能有效除杂,但除气效果差,气泡浮游法除气效果好,但除杂效果甚微。想同时兼具除杂与除气的效果,开发绿色复合净化技术是熔体处理的趋势所在。

1.3.2 富铁相变质

由于铝矿石中含有一定量的铁,以及在后续重熔等加工过程中铁质工具的使用,再生铝锭中往往含有铁,且随着再生流程与次数的增加,铁含量也会随之升高,而铁是对铝合金性能危害最大的杂质元素。铁在固态铝中的溶解度较低,会与 Al、Si 等形成金属间化合物,即富铁相。常见的富铁相包括 α-Fe 相和 β-Fe 相,α-Fe 相呈汉字状、星状、规则多边形状,对铝合金的危害较小,如图 4 所示;而 β-Fe 相呈针片状,割裂基体,易萌生裂纹,降低力学性能[27],形成缩松缩孔,恶化铸造性能[35-36]。除了降低铁含量外,大多研究通过富铁相变质处理,使针片状的 β-Fe 相转变为汉字状的 α-Fe 相,来减小 Fe 的危害,变质处理包括合金法、熔体过热以及快速冷却等方式。

合金化法是通过添加与 Fe 原子半径相近的 Mn、Cr 等元素,置换出针状 β-Fe 相中的 Fe 原子,促进 α-Al(Mn, Fe)Si 的析出[38];此外还可添加 Sr、Re 等变质元素,使 β-Fe 向 α-Fe 相转变[39-40]。熔体过热法通过将合金加热到液相线温度以上充分过热,使熔体中的 γ-Al_2O_3 转变为有利于 α-Fe 相形核的 α-Al_2O_3[41]。快速冷却法通过提高冷速,减慢 Fe 原子扩散速度,减小富铁相尺寸,此外非平衡凝固可抑制 β-Fe 相的析出[42]。以上方法通常会联立使用,以调控富铁相的形貌,如在低中冷速下,控制 Fe/Mn 比为

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

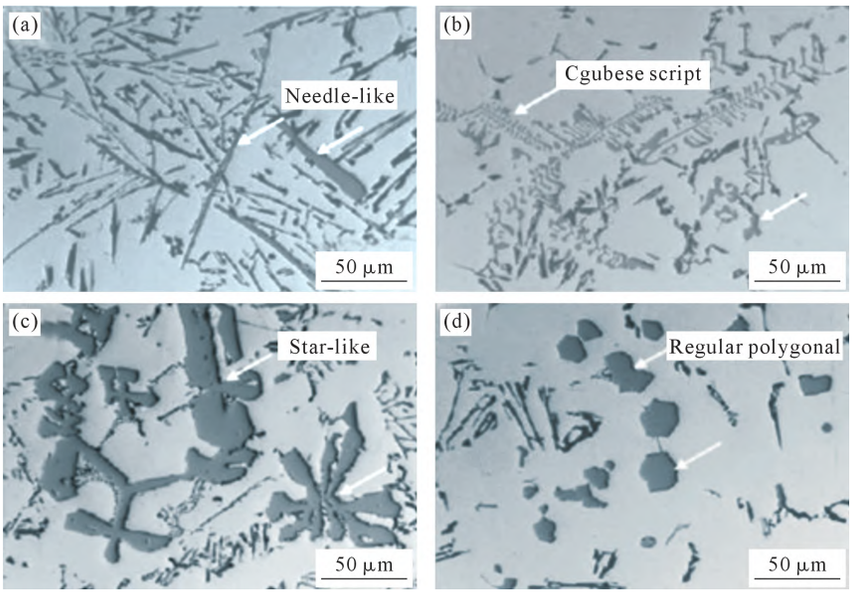


图 4　富铁相形貌：(a) 针片状，(b) 汉字状，(c) 星状，(d) 规则多边形[37]

Fig.4　Morphology of the iron-rich phase: (a) needle-like, (b) Chinese script, (c) star-like, (d) regular polygonal[37]

1，以抑制 β-Fe 相的形成，此时的富铁相含量最低；而在高冷速下，控制 Fe/Mn 比为 1.6，以得到致密稳定的 α-Fe 相[43]。

富铁相的变质工作还有很多问题亟待解决，如多元素合金化下的复合变质机理，Mn 的最优添加量等，未来还需在这些方面开展研究。已有研究发现 β-Fe 相能促进铝合金中共晶硅的形核，细化硅相[44]，未来期待挖掘更多富铁相对铝合金的潜在作用，以实现从降低富铁相危害到利用富铁相改善铝合金性能的转变。

2　铝合金设计

除了回收再生外，铝合金可持续发展的另一个重要环节在于合金的设计，面向可持续发展的需求，在铝合金生产之初将其设计为适于回收，可循环使用的体系。本文具体从交叉合金、提高合金对杂质的耐受度以及材料素化 3 个方面介绍铝合金的设计。

2.1　设计交叉合金

合金设计的一大思路是添加其他元素以合金化来提高材料的性能表现，但多种元素的添加，会使合金成分更加复杂，不利于后续回收再生使用。铝合金共有 1~8 系，不同系之间主要合金元素有所差异，使得各系列铝合金拥有独特的优势性能。如 2 系 Al-Cu 合金硬度高，5 系 Al-Mg 合金耐蚀性、成型性较好，7 系 Al-Zn 合金为超硬铝合金，强度高。交叉合金是通过不同系别铝合金间主要合金元素的交叉，即对性能影响最大的关键合金元素的添加，来综合不同系铝合金的优异性能，以代替各种被过度设计的合金，减少铝合金成分复杂性，同时性能更加综合优异的合金材料在各领域的适应性更广，可作通用合金使用，降低后续分选难度。

Engler 等[45]为提高 5 系 Al-Mg 合金的强度，向其加入质量分数为 0.33%的 Cu，S′-Al_2CuMg 相的析出产生明显的时效硬化效应，克服了铝合金汽车板在油漆高温固化过程中软化的缺点，此外还兼具优异的耐蚀性与成型性。Tunes 等[46]交叉 5 系 Al-Mg 合金与 7 系 Al-Zn 合金，得到 $AlMg_{4.7}Zn_{3.4}$，该合金过时效处理析出的 $Mg_{32}(Zn, Al)_{49}$ 硬化沉淀 T 相在辐照条件下不溶解不收缩(图 5)，提高 T 相占比可达到优异的耐辐照性能，有望发展为太空材料。Samberger等[47]同样在 5 系与 7 系铝合金间交叉，T-$Mg_{32}(Zn, Al)_{49}$ 相颗粒在后续退火过程中可溶解，并在板材加工过程中促进形核，得到低于 4 μm 的等轴晶粒，该尺寸的晶粒有利于铝合金在高温下的成型，实现强度与高温成型性的兼具。Haga 等[48]通过高速双辊铸造，向 5 系变形铝合金中加入质量分数为 2%的 Si，所得冷轧板经退火处理后进行拉伸测试，极限拉伸比为 1.8，伸长率超过 20%，可同时用于压铸与板材成型等多种用途。

目前大多都是在 2、5、7 系铝合金之间进行交叉，未来可在更多不同铝合金之间进行交叉，以扩大性能的调控范围。同时交叉合金的析出序列、析出相与铝基体的相互作用等工作尚存在争议，需要进一步研究。

2.2　提高合金对杂质的耐受度

回收过程中无可避免会引入杂质，降低合金性能，限制铝合金的再次使用，而可持续发展的核心就

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

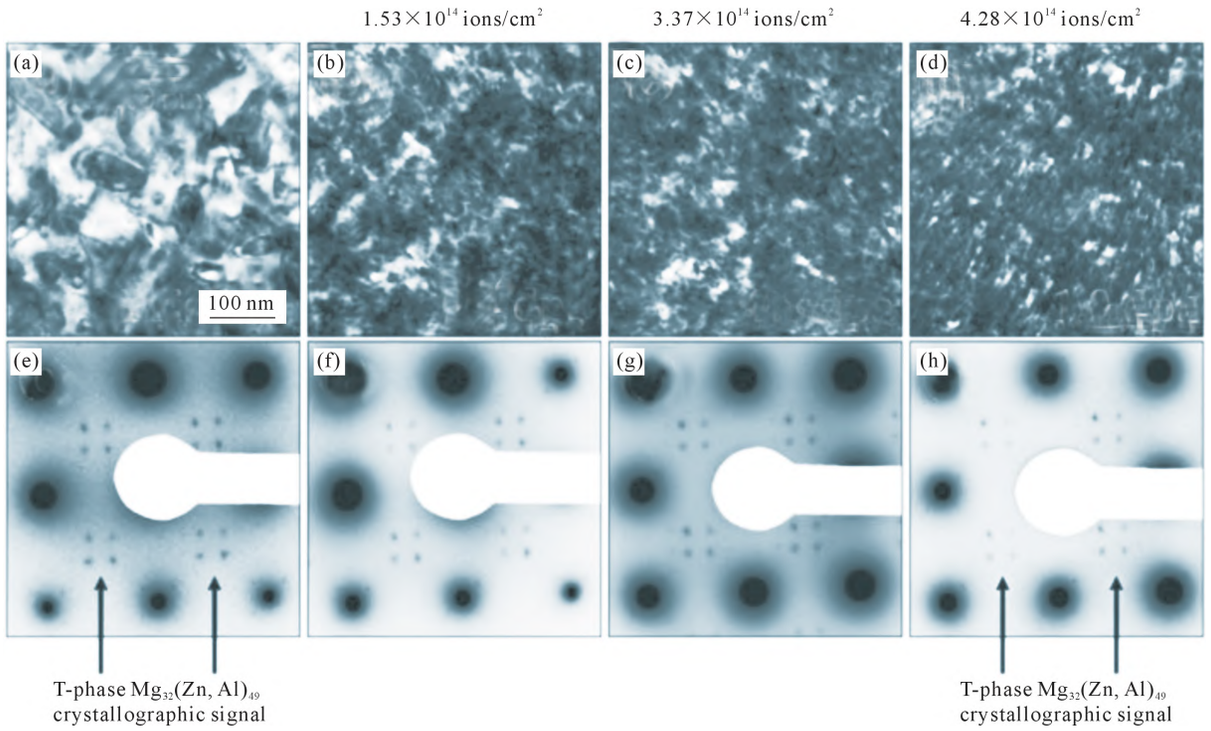


图 5 重离子辐照下 AlMgZn 合金同一区域的 BFTEM 显微照片和 SAED 图谱:(a, e) 0 dpa, (b, f) 0.4 dpa, (c, g) 0.8 dpa, (d, h) 1.0 dpa[46]

Fig.5 BFTEM micrographs and SAED patterns of AlMgZn alloys irradiated by heavy ions in the same region: (a, e) 0 dpa, (b, f) 0.4 dpa, (c, g) 0.8 dpa, (d, h) 1.0 dpa[46]

是无限循环使用。基于此,设计生产与杂质更加兼容的合金体系,即对成分的要求更加宽松,在高杂质含量下,依旧可以达到使用条件的合金体系,提高合金对杂质元素的耐受度,以实现合金的可持续发展。

铝合金作为工程合金,在设计之前,使用性能对杂质的容忍上限也应该加以明确。如汽车外盖所用的铝合金板中考虑到包边性能时,可接受的 Fe 杂质含量最多为 0.8%(质量分数),并需要将淬火速率控制在合理范围内[49]。Freitas 等[50]通过调整工艺,对高杂质的 Al-Si 合金,先后进行喷射成型、旋转锻造以及固溶热处理后,组织得到细化,Si 颗粒球化,部分 θ-Al_2Cu 相溶解,所得铝合金兼具优异的延伸率及抗腐蚀性,克服了杂质对性能的负面影响。除了铝合金体系外,Xu 等[51]所设计的 β-Ti-20Nb-10Zr 合金,存在不同取向的 α 相构成的分层结构以及鱼骨状晶界,可有效减轻裂纹的萌生、扩展等,即使在 2~3 倍更高的 O、C 杂质含量下,也能获得更高的疲劳强度。Chen 等[52]利用激光增材制造可快速冷却的特点,将高含量的 C、N、O 杂质元素,作为间隙原子与 Cr 配位,形成短程有序组合体,如图 6 所示,产生显著的过饱和固溶强化,强塑性均得到提升,开发出耐杂质的过饱和奥氏体不锈钢。这些耐杂质的金属材料设计可为铝合金的设计提供参考。

更耐杂质的合金可反复回收利用,实现真正的可持续发展。与之相应的,以一种元素为主的,含有

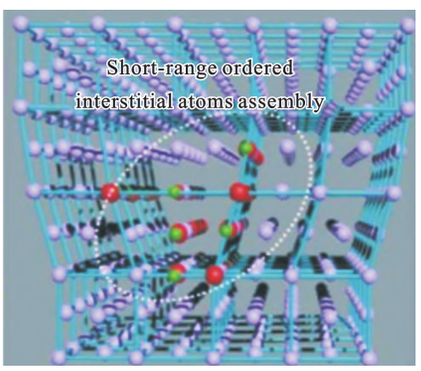


图 6 奥氏体不锈钢短程有序组合体示意图 (Cr, Fe/Ni 及间隙原子分别用棕色、紫色和绿色表示)[52]

Fig.6 Schematic diagram of short-range ordered combinations of austenitic stainless steel (the Cr, Fe/Ni, and interstitial atoms are indicated in brown, purple, and green, respectively)[52]

多种低浓度杂质体系的相图、热力学及动力学基础数据,多种杂质共存时对性能的影响,铝合金作为工程合金能容纳的杂质上限等需要得到补充与深入研究,为开发可容纳更高杂质含量的合金提供指导。

2.3 材料素化

在材料设计中,常见的方式是通过添加各类合金元素,以材料合金化来提升相应的性能,这无疑会增加后续回收的难度及材料成本。2017 年卢柯院士提出“材料素化”的概念,其本质是以缺陷调控来代替成分调控,减少合金的成分复杂度,通过缺陷的引入,调控其组织结构以提升材料性能。

卢院士团队在低温下通过塑性变形制备的纳米

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

金属晶粒，低于临界尺寸时触发晶界自主弛豫，热稳定性有所增强，有效避免了纳米晶的粗化问题[53]。在此基础上，提出晶界调控实现材料素化的方法，对于低合金化材料，可以通过减小晶粒尺寸，抑制位错形核以实现强化[54]。Rong 等[55]将热处理与固相铝热反应结合，在 Al-CuO 复合体系中构建包括晶界和增强体——基体在内的素化界面，晶内分布的纳米级第二相以及低应变能的 Al-Al_2O_3 界面均有利于材料腐蚀性的提高。Zhang 等[56]利用脉冲电流处理，对晶界析出相以及位错的调控，实现了 Al-Mg 合金强度与耐蚀性的匹配，在不依靠 Sc/Er 等元素合金化的情况下提升综合性能。

构建跨尺度微观结构，可扩展材料的性能范围。Yang 等[57]采用表面超生滚压技术，铝合金从表面到中心依次形成等轴纳米晶、层状结构、变形粗晶粒和中心粗晶粒构成的梯度结构，如图 7 所示，表面的细晶强化以及位错增殖和应变硬化可以补偿第二相回溶导致的强度降低，提高强度，同时抗腐蚀性也得到提升。通过设计梯度纳米结构，将高塑性的粗晶钢与高强度的纳米钢状态耦合，可大大扩展钢的强塑性范围[58]。

虽然上述研究成功通过缺陷的引入，实现了性能的提升，但在提高缺陷稳定性方面需要对缺陷的产生、移动、湮灭等演化过程有清晰的理解，以及通过新工艺的开发，精准引入缺陷，设计微观结构。

3　铝合金服役过程

延长铝合金的使用寿命也是促进可持续发展的途径之一。铝合金材料的耐久性提高，相同服役周期内回收再生处理次数减少，也有利于节约资源、减少能耗。金属材料延长寿命可分为两种途径：①优化铝合金成分及生产工艺，设计性能更加综合的铝合金，以面对更加复杂多变的环境，这部分内容体现在本文铝合金设计章节；②研究铝合金服役过程，分析铝合金产品在服役过程中的失效演变，预测其寿命，以为铝合金损伤容限设计等提供参考，有效预防铝合金失效，保证安全服役。

铝合金应用领域广泛，服役环境也越来越复杂，包括气候、机械、辐射、生物及电环境等。而在实际服役过程中，铝合金失效多是因为疲劳开裂及腐蚀问题，腐蚀与疲劳共同作用也是铝合金作为结构材料的主要服役特点，而腐蚀与疲劳两者协同作用比两者单一作用影响更大[59]，因此越来越多的研究集中于铝合金的腐蚀疲劳过程。

铝合金腐蚀疲劳过程研究一方面集中于其失效机制。腐蚀环境下，铝合金疲劳失效的过程包括裂纹

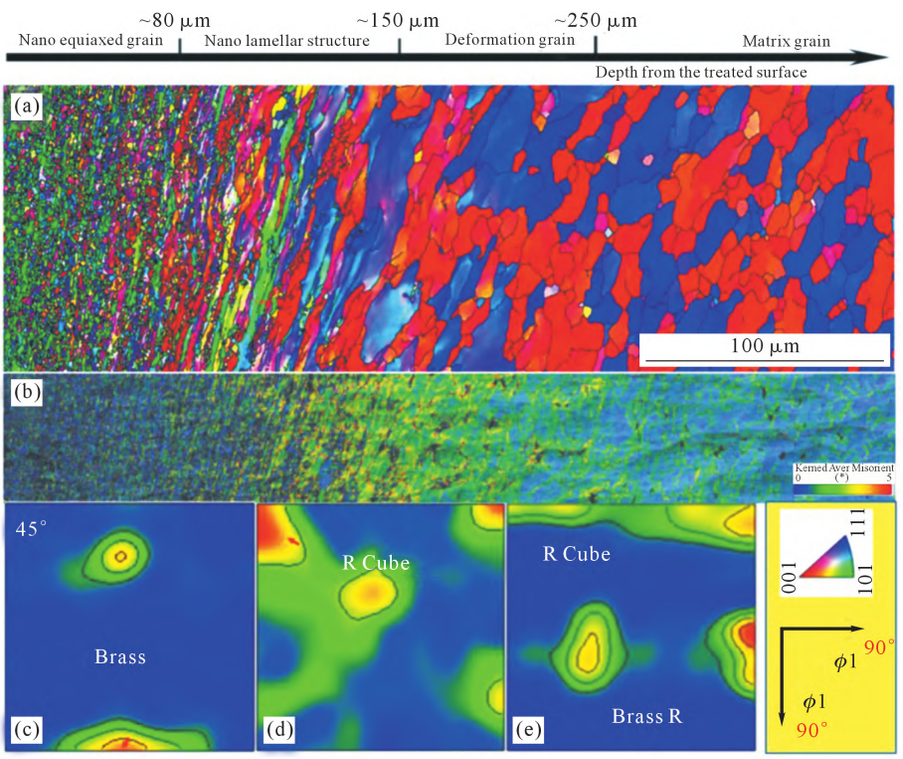


图 7　7075-T6 铝合金梯度纳米结构 EBSD 图：(a) 反极图，(b) 等轴纳米晶层 KAM 图，(c) 等轴纳米晶层 ODF 图，(d) 层状结构 ODF 图，(e) 变形粗晶层 ODF 图[57]

Fig.7　EBSD image of the gradient structure of the 7075-T6 aluminum alloy: (a) inverse pole figure (IPF), (b) KAM the equiaxed nanograin layer, (c) ODF of the equiaxed nanograin layer, (d) ODF of the lamellar structure layer, (e) ODF of the deformed coarse grain layer[57]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的萌生与扩展，需要进行大量实验或模拟，以探索裂纹萌生、扩展及过程演化机理。现有研究中，疲劳裂纹萌生理论主要包括：①局部腐蚀理论，即材料在腐蚀环境中形成腐蚀坑，造成应力集中，进而形成裂纹[60]；②保护膜破坏理论，即氧化物保护膜破裂，基体作为阳极被溶解，又被修复形成保护膜，该过程不断进行至形成裂纹[61]；③吸附理论，在腐蚀介质下，铝合金表面吸附活性物质，降低表面能及力学性能，裂纹更易产生[62]；④滑移带优先溶解理论，即在外加载荷作用下，产生滑移带，由于电化学不均匀性，滑移带优先溶解，产生裂纹[63]。在腐蚀介质的存在下，裂纹的扩展过程变得更加复杂。裂纹的扩展理论有①阳极溶解理论，氧化膜被破坏后，铝基体作为阳极被溶解，载荷作用下形成裂纹，裂纹尖端阳极快速溶解以及滑移带的存在，加速裂纹沿晶粒边界及穿晶发展，最终解理断裂[64]；②氢脆理论，裂纹尖端氢原子富集超出极限后，发生氢脆使得裂纹向前扩展并断裂[65]。

在深入研究裂纹萌生扩展理论的基础上，根据理论规律预测寿命也是重点之一。裂纹萌生寿命仅占 10%，扩展占 90%，寿命主要受限于裂纹扩展环节，因此模型预测集中于裂纹扩展环节。毋玲等[66]应用腐蚀疲劳损伤累积的概念，考虑到疲劳损伤发展的应力阈值，构建了腐蚀疲劳寿命方程。Engelhardt 等[67]建立了高频外力作用下的裂纹尖端阳极溶解的质量传输模型及裂纹扩展速率。而在实际应用中仍依照经典的 Paris 方程，即认为裂纹扩展速率仅与应力强度因子有关，当应力强度因子变化幅度超出断裂韧性时将发生断裂[68]。Wang 等[69]梳理了主要的预测模型，发现这些模型都是补充了外部载荷、环境等因素后对 Paris 方程的轻微修正。腐蚀疲劳的演化过程与实际环境条件相关，想要定量统一地描述损伤、预测寿命十分困难，仍需要根据特定实际环境进行大量实验总结推算。

铝合金腐蚀疲劳过程研究另一方面还需要对铝合金的失效程度予以判断，以更好地评价其耐久性。现有研究对于腐蚀与疲劳两者均有独立的判断标准。对于腐蚀而言，定量评价指标包括质量损失，腐蚀深度、面积等，检测方法包括 X 射线检测、超声检测、涡流联测、图像处理、电镜表征等[70]。疲劳方面，以应力幅、应变幅及损伤吸收能量变化为损伤参量[71-72]，通过疲劳试验得到损伤参量；同时也可从空位、位错、滑移带等微观结构以及气孔尺寸、分布、孔隙等宏观缺陷入手，通过电阻法、超声波法检测[73]。

由于铝合金的牌号众多、服役环境复杂，其失效过程和寿命预测与众多因素相关，未来需要在不同的特定环境下进行腐蚀疲劳的模拟实验及虚拟仿真研究，完善腐蚀疲劳的数据库。寻找合适的可定量表示损伤的变量，建立腐蚀与疲劳协同的评价体系，量化失效程度对寿命的影响。

4 总结与展望

面对全球资源与环境问题，铝合金作为第二大金属材料，其可持续发展问题至关重要。限制铝合金可持续应用的最大问题是降级使用，本文总结了未来铝合金的设计方向及以腐蚀疲劳为代表的服役过程，以为铝合金设计—服役—回收再生全循环过程提供参考。目前关于铝合金可持续发展的研究还处于起步阶段，内容尚不够系统和完整，未来需要在以下方面开展研究。

(1)回收方面，提高现有检测方式的速度及准确度，寻求精细化分选途径，以实现不同成分、牌号废铝合金的分类，提高变形铝合金的有效回收率，达到保级利用。

(2)再生方面，开发有效的去除杂质、气体的精炼方式，同时实现富铁相的变质，以减小 Fe 对铝合金性能的危害，经再生后能重新投入使用中。

(3)设计方面，以循环利用这一需求为导向，可从交叉合金、提高合金对杂质的耐受度、材料素化等方向设计铝合金。补充多种杂质元素共存时对铝合金组织结构、性能等的影响及相图、热力学、动力学基础数据，借助机器学习、高通量实验、材料基因组计划等方法加速对于成分–工艺–结构–性能关系的构建与研究。

(4)服役方面，完善铝合金在各环境下的服役失效机制、寿命预测模型数据库，建立系统的铝合金环境适应性评价体系及指标，以判断铝合金失效程度及性能，为铝合金设计提供理论指导。

参考文献：

[1] 新华网. 新中国峥嵘岁月丨可持续发展战略[EB/OL]. (2019-10-29)[2024-02-06]. http://www.xinhuanet.com/politics/2019-10/29/c_1125165645.htm.
Xinhuanet. The momentous years of new China 丨 sustainable development strategy [EB/OL]. (2019-10-29) [2024-02-06]. http://www.xinhuanet.com/politics/2019-10/29/c_1125165645.htm.

[2] 李永峰. 可持续发展导论[M]. 北京：机械工业出版社，2021.
LI Y F. Introduction to sustainable development[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2021.

[3] 河北省自然资源厅(海洋局). 我国矿产品供给形势分析——基于2021 年基本态势[EB/OL]. (2022-09-07)[2024-02-06]. https://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gongk/gkml/kjxx/kjfz/10764939532127072

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

256.html.
Department of Natural Resources of Hebei Province (Ocean Adminstration). Analysis of the supply situation of mineral products in China-based on the basic situation in 2021[EB/OL]. (2022-09-07) [2024-02-06]. https://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gongk/gkml/kjxx/kjfz/1076493953212707256.html.

[4] 郭学益，田庆华，刘咏，等. 有色金属资源循环研究应用进展[J]. 中国有色金属学报，2019, 29(9): 1859-1901.
GUO X Y, TIAN Q H, LIU Y, et al. Progress in research and application of non-ferrous metal resources recycling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1859-1901.

[5] 黄建辉. 废旧金属资源综合利用[M]. 北京：化学工业出版社，2018.
HUANG J H. Comprehensive utilization of waste metal resources [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.

[6] 李福刚，齐丽媛，卢秉天. 建立电子垃圾产业化体系是加速循环经济的必要措施[A]. 中国环境科学学会 2006 年学术年会优秀论文集(上卷) [C]. 北京：中国环境科学学会，2006. 133-135.
LI F G, QI L Y, LU B T. The establishment of electronic waste industrialization system is a necessary measure to accelerate the circular economy[A]. Chinese Society of Environmental Sciences 2006 Annual Symposium Excellent Papers(Volume I)[C]. Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2006. 133-135.

[7] Brunel University London and The Future Liquid Metal Engineering Hub. Aluminium for future generations[EB/OL]. [2024-02-06]. https://recycling.world-aluminium.org/home.

[8] LU J T, HUANG H, WU H, et al. Mechanical properties and corrosion behavior of anew RRA-treated Al-Zn-Mg-Cu-Er-Zr alloy[J]. Rare Metals, 2023, 42: 672-679.

[9] HIRSCH J, AL-SAMMAN T. Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications[J]. Acta Materialia, 2013,61(3): 818-843.

[10] SUN W W, ZHU Y M, MARCEAU R, et al. Precipitation strengthening of aluminumalloys by room-temperature cyclic plasticity[J]. Science, 2019, 363(6430): 972-975.

[11] XIE P, CHEN S Y, CHEN K H, et al. Enhancing the stress corrosion cracking resistance of a low-Cu containing Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy by step-quench and aging heat treatment[J]. Corrosion Science, 2019, 161: 108184.

[12] SCHLESINGER M E. Aluminum recycling[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.

[13] 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.

[14] 丁宁，高峰，王志宏，等. 原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比[J]. 中国有色金属学报，2012, 22(10): 2908-2915.
DING N, GAO F, WANG Z H, et al. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2908-2915.

[15] LU X, ZHANG Z, HIRAKI T, et al. A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap[J]. Nature, 2022, 606: 511-515.

[16] 刘洋. 再生铝保级利用，前途光明龙头可期——铝行业深度报告③[R]. 上海：东方证券研究所，2021.
LIU Y. The use of recycled aluminum, the future bright leader can be expected—Aluminum industry research report③[R]. Shanghai: Orient Securities, 2021.

[17] HIROKI H, ICHIRO D, YASUNARI M, et al. Evolution of aluminum recycling initiated by the introduction of next-generation vehicles and scrap sorting technology[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 66: 8-14.

[18] MODARESI R, LOVIK A N, MULLER D B. Component- and alloy-specific modeling for evaluating aluminum recycling strategies for vehicles[J]. JOM, 2014, 66: 2262-2271.

[19] NUNES H, EMADINIA O, SOARES R, et al. Adding value to secondary aluminum casting alloys: A review on trends and achievements[J]. Materials, 2023, 16(3): 895.

[20] 袁蔚景，涂杰松，李银华，等. 回收工艺对再生铝合金性能影响述评[J]. 有色金属科学与工程，2021, 12(5): 18-29.
YUAN W J, TU J S, LI Y H, et al. Effects of recycling process on properties of recycled aluminum alloy: A review[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(5): 18-29.

[21] WERHEIT P, FRICKE-BEGEMANN C, GESING M, et al. Fast single piece identification with a 3D scanning LIBS for aluminium cast and wrought alloys recycling[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(11): 2166-2174.

[22] SHIGEKI K, KENICHIRO K, YOSHITAKE Y, et al. Elemental analysis of lightweight metal scraps recovered by an automatic sorting technique combining a weight meter and a laser 3D shape-detection system[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 75: 63-69.

[23] CAPUZZI S, TIMELLI G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: A review[J]. Metals, 2018, 8(4): 249.

[24] KOYANAKA S, KOBAYASHI K. Automatic sorting of lightweight metal scrap by sensing apparent density and three-dimensional shape[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(9): 571-578.

[25] WAITE P. A technical perspective on molten aluminum processing [M]//GRANDFIELD J F, ESKIN D G. Essential readings in light metals, volume 3, cast shop for aluminum production. Cham: Springer Cham, 2016: 51-58.

[26] AMMAR H R, SAMUEL A M, SAMUEL F H, et al. Effect of casting imperfections on the fatigue life of 319-F and A356-T6 Al-Si casting alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 473 (1-2): 65-75.

[27] BJURENSTEDT A, GHASSEMAIL E, SEIFEDDINE S, et al. The effect of Fe-rich intermetallics on crack initiation in cast aluminium: An in-situ tensile study[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 756: 502-507.

[28] WU J X, DJAVANROODI F, GODE C, et al. Melt refining and purification processesin Al alloys: A comprehensive study[J]. Materials Research Express, 2022, 9(3): 032001.

[29] LIU X Q, LIU T B, LIU Z L, et al. Effects of B-containing composite flux on the microstructures and mechanical properties of ADC12 alloys[J]. Materials Research Express, 2019, 6(9): 096576.

[30] 倪红军，孙宝德，蒋海燕，等. 稀土熔剂对 A356 铝合金的作用[J]. 中国有色金属学报，2001, 11(4): 547-552.
NI H J, SUN B D, JIANG H Y, et al. Effect of new flux including

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

rare earth on A356 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 547-552.

[31] GRANDFIELD, J. Developments in inclusion removal technology [M]//RATVIK A P. Light metals 2017. Cham: Springer Cham, 2017: 1429-1434.

[32] DAMOAH L N W, ZHANG L F. AlF_3 reactive Al_2O_3 foam filter for the removal of dissolved impurities from molten aluminum: Preliminary results[J]. Acta Materialia, 2011, 59(3): 896-913.

[33] SIGWORTH G K, ENGH T A. Chemical and kinetic factors related to hydrogen removal from aluminum[J]. Metallurgical Transactions B, 1982, 13: 447-460.

[34] 左玉波,康轶瑶,蔺玥,等. 强剪切作用下氩气泡破碎行为及其对7075铝合金除气效果的影响[J]. 中国有色金属学报,2016, 26(3): 486-493.
ZUO Y B, KANG Y Y, LIN Y, et al. Dispersion behaviour of Ar bubbles under intensiveshearing and its effect on degassing effect of 7075 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3): 486-493.

[35] KHALIFA W, SAMUEL A M, SAMUEL F H, et al. Metallographic observations of β-AlFeSi phase and its role in porosity formation in A 1-7%Si alloys [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2006, 19(3): 156-166.

[36] WANG'OMBE D N, MAUBE S E, MARANGA S M, et al. Effect of Iron-intermetallics on the Fluidity of Recycled Aluminum Silicon Cast Alloys[A]. Proceedings of the 2012 Sustainable Research & Innovation (SRI) Conference[C]. Kenya: Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, 2012. 224-227.

[37] 宋东福. 高Fe含量Al-Si合金的力学性能与富铁相调控机制研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
SONG D F. Study on the mechanical property and regulating mechanism of Fe-rich phases in Al-Si Alloys with high Fe content [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.

[38] CESCHINI L, BOROMEI I, MORRI A, et al. Microstructure, tensile and fatigue properties of the Al-10%Si-2%Cu alloy with different Fe and Mn content cast under controlled conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15-16): 5669-5679.

[39] SANTOS J, JARFORS A E W, DAHLE A K. Formation of iron-rich intermetallic phases in Al-7Si-Mg: Influence of cooling rate and strontium modification[J]. Metallurgical Matererials Transactions A, 2019, 50: 4148-4165.

[40] DING W W, ZHAO X Y, CHEN T L, et al. Effect of rare earth Y and Al-Ti-B master alloy on the microstructure and mechanical of properties of 6063 and minum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 830: 154685.

[41] LIU Y L, LUO L, HAN C F, et al. Effect of Fe, Si and cooling rate on the formation of Fe- and Mn-rich intermetallics in Al-5Mg-0.8Mn alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 305-312.

[42] SHEN X, LIU S Q, WANG X, et al. Effect of cooling rate on the microstructure evolution and mechanical properties of iron-rich Al-Si alloy[J]. Materials, 2022, 15(2): 411.

[43] CINKILIC E, RIDGEWAY C D, YAN X, et al. A formation map of iron-containing intermetallic phases in recycled cast aluminum alloys[J]. Metallurgical Matererials Transactions A, 2019, 50: 5945-5956.

[44] SHANKAR S, RIDDLE Y W, MAKHLOUF M M. Nucleation mechanism of the eutectic phases in aluminum-silicon hypoeutectic alloys[J]. Acta Materialia, 2004, 52(15): 4447-4460.

[45] ENGLER O, MARIOARA C D, HENTSCHEL T, et al. Influence of copper additionson materials properties and corrosion behaviour of Al-Mg alloy sheet[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 710: 650-662.

[46] TUNES M A, STEMPER L, GREAVES G, et al. Prototypic lightweight alloy design for stellar-radiation environments [J]. Advanced Science, 2020, 7(22): 2002397.

[47] SAMBERGER S, WEIßENSTEINER I, STEMPER L, et al. Fine-grained aluminium crossover alloy for high-temperature sheet forming[J]. Acta Materialia, 2023, 253: 118952.

[48] HAGA T, IMAMURA S, FUSE H, et al. Roll casting and die casting of Si-added Al-Mg alloy[J]. Materials Science Forum, 2020, 1007: 12-17.

[49] LU H Z, ZHANG J P, TIAN N, et al. Recycle-friendly aluminum alloy sheets for automotive applications based on hemming[J]. Automotive Innovation, 2018, 1: 70-75.

[50] FREITAS B J M, KOGA G Y, MENDES M A B, et al. Ductile and corrosion-resistant aluminum alloy from recycled secondary aluminum scraps containing iron impurities[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54: 2188-2205.

[51] XU P, PYCZAK F, LIMBERG W, et al. Superior fatigue endurance exempt from high processing cleanliness of Metal-Injection-Molded β Ti-Nb-Zr for bio-tolerant applications[J]. Materials & Design, 2021, 211: 110141.

[52] CHEN Y, ZHU H M, ZHANG P B, et al. An exceptionally strong, duc tile and impurity-tolerant austenitic stainless steel prepared by laser additive manufacturing[J]. Acta Materialia, 2023, 250: 118868.

[53] ZHOU X, LI X Y, LU K. Enhanced thermal stability of nanograined metals below a critical grain size[J]. Science, 2018, 360(6388): 526-530.

[54] LI X Y, LU K. Improving sustainability with simpler alloys[J]. Science, 2019, 364(6442): 733-734.

[55] RONG X D, LI Y, CHEN X F, et al. Plain interface strategy toward the high corrosion performance of Al matrix composites[J]. Science China Materials, 2023, 66: 4295-4305.

[56] ZHANG Z, ZHANG D, GONG H, et al. Realizing recrystallization-stabilization temperature range inversion in high Mg content Al alloys via pulsed electric current[J]. Materials Research Letters, 2023, 11(3):179-186.

[57] YANG M, LEI L, JIANG Y, et al. Simultaneously improving tensile properties and stress corrosion cracking resistance of 7075-T6 aluminum alloy by USRP treatment[J]. Corrosion Science, 2023, 218: 111211.

[58] LI X Y, LU K. Playing with defects in metals[J]. Nature Materials, 2017, 16: 700-701.

[59] DUQUESNAY D L, UNDERHILL P R, BRITT H J. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminium alloy under aircraft loading[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(5): 371-377.

[60] SADANANDA K, VASUDEVAN A K. Analysis of pit to crack transition under corrosion fatigue & the safe-life approach using the modified Kitagawa-Takahashi diagram[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134: 105471.

[61] CO N E C，BUMS J T. Effects of macro-scale corrosion damage feature on fatigue crack initiation and fatigue behavior[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 234-247.

[62] WAN L, GENG W T, ISHII A. Hydrogen embrittlement controlled by reaction of dislocation with grain boundary in alpha-iron[J]. International Journal of Plasticity, 2019,112: 206-219.

[63] ZHANG Z Y, TAN J B, WU X Q, et al. Effects of temperature on corrosion fatigue behavior of 316LN stainless steel in high-temperature pressurized water[J]. Corrosion Science, 2019, 146: 80-89.

[64] MA H, CHEN X Q, LI R H, et al. First-principles modeling of anisotropic anodic dissolution of metals and alloys in corrosive environments[J]. Acta Materialia, 2017, 130: 137-146.

[65] TAKAKUWA O, OGAWA Y, OKAZAKI S, et al. A mechanism behind hydrogen-assisted fatigue crack growth in ferrite-pearlite steel focusing on its behavior in gaseous environment at elevated temperature[J]. Corrosion Science, 2020, 168: 108558.

[66] 毋玲，陈召涛，孙秦. 应力腐蚀损伤裂纹起始寿命计算模型[J]. 机械强度, 2004, 26(S): 58-59.
WU L, CHEN Z T, SUN Q. Damage mechanics model for the initiation life of stress corrosion cracking[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(S): 58-59.

[67] ENGELHARDT G R, MACDONALD D D. Modelling the crack propagation rate for corrosion fatigue at high frequency of applied stress[J]. Corrosion Science, 2010, 52(4): 1115-1122.

[68] XIONG J J, SHENOI R A. Fatigue and fracture reliability engineering[M]. London: Springer london, 2011.

[69] WANG C Q, XIONG J J, SHENOI R A, et al. A modified model to depict corrosionfatigue crack growth behavior for evaluating residual lives of aluminum alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 83: 280-287.

[70] 郭小农，宗绍晗，成张佳宁，等. 铝合金结构耐腐蚀性能研究现状简述[J]. 建筑钢结构进展，2021, 23(6): 1-12, 60.
GUO X N, ZONG S H, CHENG Z J N, et al. State-of-the-art of the research on corrosion resistance of aluminum alloy structures[J]. Progress in Steel Buliding Structures, 2021, 23(06): 1-12, 60.

[71] 李旭东，刘治国，穆志韬. 基于能量耗散的铝合金疲劳损伤评价[J]. 理化检验(物理分册)，2013, 49(10): 647-649.
LI X D, LIU Z G, MU Z T. Fatigue damage evaluation of aluminum alloy based on energy degradation[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2013, 49(10): 647-649.

[72] 张哲峰，刘睿，张振军，等. 金属材料疲劳性能预测统一模型探索[J]. 金属学报，2018, 54(11): 1693-1704.
ZHANG Z F, LIU R, ZHANG Z J, et al. Exploration on the unified model for fatigue properties prediction of metallic materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(11): 1693-1704.

[73] WANG C S, ZHANG P J, DUAN L, et al. Fatigue performance evaluation of existing concrete girder bridges[J]. Structural Engineering International, 2018, 28(3): 280-287.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net