

再生铝合金的净化处理与应用研究

臧永兴^{1, 2}, 苗赛男^{2, 5}, 李鑫赫³, 周亚伟^{2, 5},
鲁园园^{3, 6}, 李泉^{2, 4}, 马朝利^{3, 6}, 郑长清^{2, 5}

(1. 立中领航汽车零部件(北京)有限公司, 北京 102600; 2. 保定市立中车轮制造有限公司, 河北保定 071000; 3. 北京航空航天大学, 北京 100191; 4. 再生铝合金汽车零部件制造河北省工程研究中心, 河北保定 071100; 5. 河北省高强韧轻量化车轮技术创新中心, 河北保定 071000; 6. 天目山实验室, 浙江杭州 311100)

摘要: 以再生料添加量分别为75%和100%的6061铝合金为研究对象, 通过改进净化工艺减少再生铝液中的夹杂物, 提升铝液品质。根据铝棒的微观组织分析以及车轮锻件的力学性能检测结果, 经净化处理后的再生6061铝合金展现出优良的综合性能, 能够满足车轮产品要求。此外, 通过少量添加Zr、Sr和RE等元素可以进一步改善再生铝合金中第二相的微观组织形貌, 提高力学性能。

关键词: 再生铝; 净化处理; 微观组织; 力学性能; 车轮

中图分类号: TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0293-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0041

Research on Purification Treatment and Application of Recycled Aluminum Alloy

ZANG Yong-xing^{1,2}, MIAO Sai-nan^{2,5}, LI Xin-he³, ZHOU Ya-wei^{2,5}, LU Yuan-yuan^{3,6}, LI Quan^{2,4},
MA Chao-li^{3,6}, ZHENG Chang-qing^{2,5}

(1. Lizhong Pilot Auto Parts (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102600, China; 2. Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., Baoding 071000, Hebei, China; 3. Beihang University, Beijing 100191; 4. Hebei Provincial Engineering Research Center for Recycled Aluminum Alloy Automotive Parts Manufacturing, Baoding 071100, Hebei, China; 5. High Strength and Lightweight Wheel Technology Innovation Center of Hebei Province, Baoding 071000, Hebei, China; 6. Tianmushan Laboratory, Hangzhou 311100, Zhejiang, China)

Abstract: Taking the 6061 aluminum alloys with 75% and 100% recycled scrap contents as investigation object, the methods of improving the purification process and reducing the inclusions in the recycled aluminum melt have been applied to enhance the quality of the aluminum melt. According to the microstructure analysis of the aluminum rods and the mechanical property test results of the forged wheels, the recycled 6061 aluminum alloys subjected to purification treatment exhibited excellent comprehensive performance and met the requirements of wheel products. In addition, small additions of Zr, Sr and RE could modify the morphologies of secondary phases in the recycled aluminum alloys and enhance the mechanical properties.

Key words: recycled aluminum; purification treatment; microstructure; mechanical properties; wheel

铝合金具有比强度高和耐腐蚀性好等优点, 是实现结构轻量化的关键材料, 也是能够高效循环再利用的金属材料^[1-2]。据测算, 生产再生铝的能耗仅为生产电解铝的4.86%^[3], 因此发展再生铝产业对于节能减排, 加快实现“双碳”目标具有重要意义^[4]。

再生铝的生产以废铝为原料。废铝的种类繁多且

成分不易控制, 熔炼过程中会引入大量杂质元素, 如锌(Zn)、铁(Fe)、铜(Cu)、锰(Mn)等^[5]。这导致很多再生铝只能降级使用, 如再生铝目前多用于生产铸造铝合金, 而在合金成分要求相对严格的变形铝合金中则较少使用^[6]。对于回收的废杂变形铝合金, 经重熔后, 存在的主要杂质是Fe和Cu。它们会在合金

基金项目: 河北省创新联合体专项(24431003D); 中央引导地方科技发展资金项目(254Z1009G)。

收稿日期: 2025-08-14 收到初稿, 2025-09-10 收到修订稿。

作者简介: 臧永兴(1984-), 男, 中级工程师, 硕士, 主要从事汽车铝合金车轮的研发和制造。电话: 15630817290, E-mail: yongxing.zang@lzwheel.com

通信作者: 周亚伟, 男, 高级工程师, 学士。电话: 19031321681, E-mail: zhouyawei@lzwheel.com

引用格式: 臧永兴, 苗赛男, 李鑫赫, 等. 再生铝合金的净化处理与应用研究[J]. 铸造, 2026, 75(3): 293-299.

ZANG Yongxing, MIAO Sainan, LI Xinhe, et al. Research on purification treatment and application of recycled aluminum alloy [J]. Foundry, 2026, 75(3): 293-299.

中形成过剩的第二相,造成合金脆断。此外,再生铝合金浇铸热裂倾向性大,影响成品率^[7]。

在众多变形铝合金牌号中,6XXX系铝合金(Al-Mg-Si)占有的市场份额最大,主要应用于建筑型材以及工业型材领域。因此,对6XXX系铝合金进行回收并高品质化保级利用能够极大地推进再生铝应用进程。本研究以6061锻造铝合金车轮为研究对象,利用多种夹杂物分析方法开发出一整套超净化处理技术,并考察其对于再生铝液的品质优化作用,同时探究微合金化对再生铝合金力学性能的影响,比较再生铝添加量

对车轮各项性能的影响。

1 试验条件及方法

1.1 试验材料

试验原料分别为标准6061铝合金(100%新铝锭)、75%再生铝+25%新铝锭和100%再生铝。再生铝原料为生产过程中在机加工环节切削下来的6061铝屑,铝屑在添加前经过磁选和烘干。6061铝合金的化学成分,如表1所示。

表1 6061铝合金的化学成分
Tab. 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy

Cu	Fe	Mg	Si	Mn	Cr	Zn	Ti	杂质总量	Al
0.15~0.4	0~0.7	0.8~1.2	0.4~0.8	0~0.15	0.04~0.35	0~0.25	0~0.15	<0.15	余量

用于微合金化研究的对照组是100%再生铝试样,验证组是在100%再生铝铝棒生产时添加微量合金化元素后的试样。合金化元素为0.3%Zr、0.02%Sr、0.02%Ce和0.01%La,均以中间合金方式加入。

1.2 车轮生产流程

图1是6061再生铝车轮生产流程示意图,主要包括铸棒制备、车轮锻造、热处理、机加工、涂装和检测等步骤。在铸棒制备过程中,对铝液进行炉内多次精炼和多级过滤等超净化处理,随后再进行浇铸。熔炼温度始终控制在740~750℃,精炼熔剂为自主研发的LZRJ5-B专用精炼熔剂(含氯化物、氟化物及辅助成分等^[8])。经精炼、过滤并检测合格的铝液转至保温炉,采用热顶式气滑结晶器进行生产,连铸工艺保持不变,最终得到直径为228 mm、长度为5 000 mm的铸棒,经均匀化热处理并检验合格后进行车轮生产。

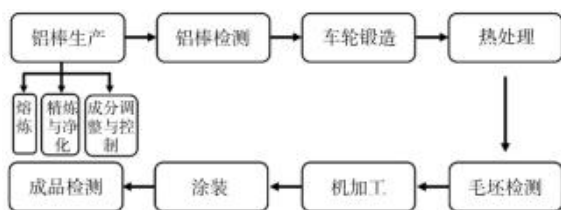


图1 再生铝锻造车轮生产流程

Fig. 1 Manufacturing procedure of recycled Al forged wheels

车轮样件选用20寸轮毂,按相同锻造工艺,使用三种合金棒料各生产20只良品毛坯。锻造过程分为制坯锻造、初锻和终锻三个阶段,分别在60 MN、80 MN和100 MN压力机上进行。锻造前坯料在热辐射炉内加热到约550℃,在初锻和终锻之间对毛坯进行约30 min

的中间加热。成形过程采用旋压工艺,旋压完成后对轮毂毛坯进行T6热处理,即首先在535℃下保温190 min,再在75℃水中淬火处理,最后在180℃保温8 h。通过机加工将轮毂加工至成品尺寸,随后进行涂装,形成车轮样件。

1.3 夹杂物、成分与组织分析

1.3.1 铝液夹杂物含量检测

采用PREFIL-Footer对含有不同再生铝添加量的铝液进行夹杂物检测。PREFIL-Footer是一种直显式金属液品质检测仪器,根据单位时间内铝液滤过重量曲线测定过滤速度。当铝液品质较高时,过滤速度快,过滤曲线斜率大^[9-11]。

1.3.2 合金成分与微观组织分析

采用ARL-3460直读光谱仪对铝液进行成分分析。通过Zeiss EVO18扫描电子显微镜对铝合金铸棒和微合金化样件进行微观组织表征。

1.4 铝棒内部缺陷测试

依据GB/T 36589—2018标准,采用德国YXLON高分辨率扫描仪(工业CT)对铝棒开展内部孔隙和夹杂分布分析。

1.5 力学性能试验

力学性能测试包括铝合金铸棒硬度检测、车轮各部位拉伸试验、硬度试验和车轮整体台架试验。使用HBS-3000TV布氏硬度计对各铝合金铸棒进行硬度测试,将每根铸棒的横截面从中心至边缘划分成等距离区域,每圈间相距45 mm,如图2(a)所示,并依据各圈上的数据计算硬度均值。自车轮样件不同部位取拉

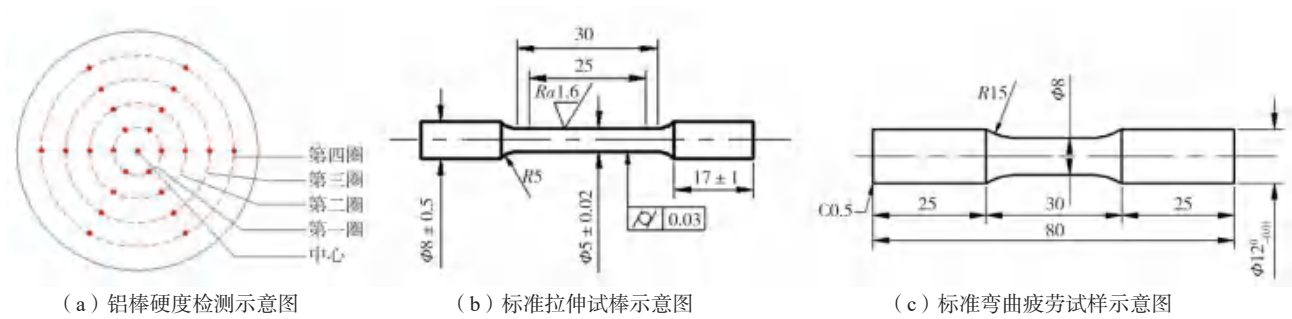


图2 硬度检测位置及力学性能试样尺寸

Fig. 2 The detection positions of hardnesses and the sizes of mechanical property samples

伸试样，每个部位各取5个试样，并从应力-应变曲线中获取强度、伸长率等力学性能值。拉伸试验依照国家标准GB/T 228.1—2021进行如图2(b)所示，测试设备为WDW-50万能试验机，测试过程中使用的应变速率为 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。依照GB/T 4337—2015制备弯曲疲劳试样，如图2(c)所示，使用SYZX-WQSYJ-01弯曲疲劳试验机检测车轮抗弯曲疲劳性，试验评测标准为TR-8891900600。

2 试验结果与分析

2.1 工艺条件对铝液的影响

针对铸棒生产各工艺环节进行铝液取样分析，依据夹杂物与铝液品质检测结果反复改进工艺参数，主要是过滤装置和精炼熔剂。

2.1.1 过滤装置

为了提升铝液质量，在熔炼炉向保温炉转液的过程中增设泡沫陶瓷过滤板，可过滤和吸附一定尺寸的夹杂物。过滤板的目数越大，越有利于过滤铝液中的夹杂物，但会导致过滤速度慢，降低生产效率。表2为添加100%再生铝的6061铝液样品在使用不同目数过滤板时的铝液滤过量和转液速度。对比分析后，最终优选出40目的过滤板。

表2 过滤板目数对100%再生铝铝液品质和转液速度的影响
Tab. 2 Effect of filter plate mesh size on the recycled Al melt quality and transfer speed

过滤板目数	150 s内铝液滤过量/g	转液速度/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)
20	1 325	38
35	1 380	35
40	1 433	31
45	1 492	22

2.1.2 精炼熔剂添加量

再生铝液中常含有较多的 Al_2O_3 和 MgAl_2O_4 等夹杂物^[1, 7]。这些夹杂物若不被充分去除，会严重影响铸件

质量。图3是100%再生铝液在使用不同含量精炼熔剂后的PREFIL-Footerprinter测试结果。可以看出，添加3%精炼剂时铝液过滤速度最快，夹杂物的去除效果最好。当精炼剂加入过量时(5%)，铝液中盐类夹杂物含量增加，使铝液质量恶化。

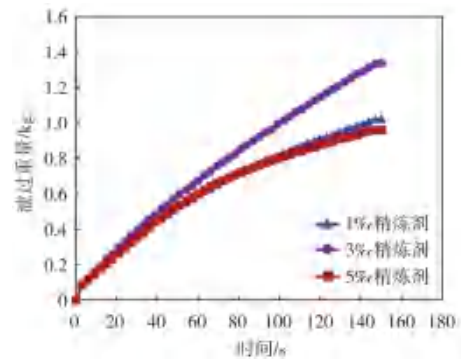


图3 不同精炼熔剂添加量条件下100%再生铝液过滤曲线

Fig. 3 The filtration curves of the 100% recycled Al melts under the conditions of different refining agent addition amounts

2.2 再生铝添加量对合金质量的影响

为验证生产工艺改进对再生铝液的净化效果，系统地比较了保温炉中铝液的品质与成分，以及铝棒的微观组织、缺陷情况和硬度。

2.2.1 铝液纯净度

PREFIL-Footerprinter分析结果表明，再生铝液与标准6061铝液的过滤速度相差不大(图4)。净化处理对再生铝液品质有着良好的控制。

2.2.2 铝液成分

表3为各试样的化学成分检测结果。随着再生铝添加量的增加，铝液中Fe和Mn元素含量上升，特别是Mn元素。这可能是由于Mn元素熔点较高，在重熔过程中烧损较少。从表3数据可以看出，100%再生铝试样中Mn元素含量为0.146 3%，未超出6061成分标准。

2.2.3 铝棒微观组织

图5为再生铝棒内部及表层的典型微观组织照片。两种再生铝棒均未出现过烧现象。然而，铸棒表层形

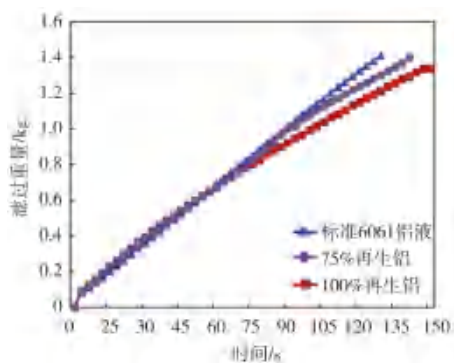


图4 各组合金试样的铝液过滤曲线

Fig. 4 The Al Melt filtration curves of each group of alloy samples

成了偏析层。这主要是由于铸造过程中，铸棒芯部未凝固金属的静压力会挤压富含溶质的液相，迫使其沿枝晶间隙或收缩孔隙向表层渗出。如图5所示，75%再生铝和100%再生铝铝棒的偏析层平均厚度分别为0.18 mm和0.17 mm，均低于0.28 mm的可加工极限，满足来料检验标准。

依据表4中的能谱分析结果，如图5(e)所示，偏析层中的析出相多为Si相。这主要是由于凝固时枝晶间低熔点的液相在压力作用下流向表层，导致Si过度聚集并析出。此外，还可以观察到少量的富Fe相(点3和点4)。在后续的车轮生产阶段，该表面偏析层在机加工

表3 各合金试样的化学成分

Tab. 3 The chemical composition of each alloy sample

w_B /%

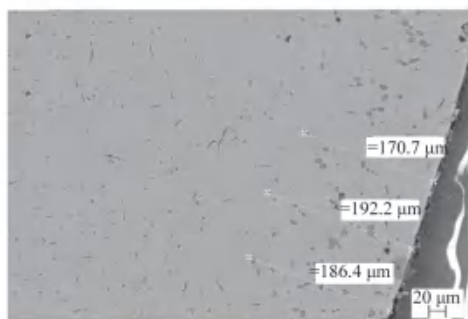
样品	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	Al
标准6061	0.65~0.75	0~0.15	0.2~0.3	0.08~0.15	1.0~1.2	0.2~0.3	0~0.05	0~0.05	余量
75%再生铝	0.718 4	0.140 3	0.237 5	0.146 3	1.060 4	0.251 1	0.035 6	0.009 1	余量
100%再生铝	0.716 5	0.144 2	0.236 1	0.146 9	1.080 1	0.244 4	0.039 3	0.008 7	余量



(a) 75%再生铝合金内部低倍金相组织



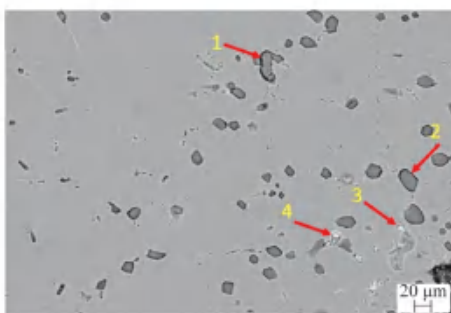
(b) 100%再生铝合金内部低倍金相组织



(c) 75%再生铝合金偏析层低倍金相组织



(d) 100%再生铝合金偏析层低倍金相组织



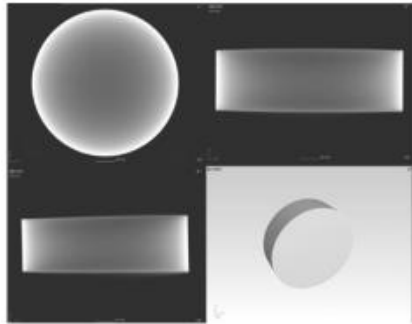
(e) 100%再生铝合金偏析层高倍金相组织

图5 再生铝棒试样的微观组织图片

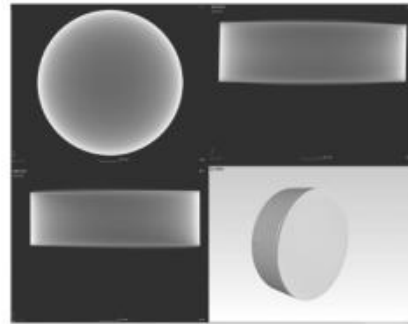
Fig. 5 Microstructure photos of the recycled Al alloy rod samples

表4 偏析层EDS点分析结果
Tab. 4 EDS point analysis results of the segregation layer at.%

位置	Al	Fe	Si	Mn	Cr	Cu
点1	10.90	-	89.10	-	-	-
点2	24.23	-	75.77	-	-	-
点3	79.11	6.93	7.47	3.11	1.93	1.45
点4	71.17	11.53	10.24	4.40	1.06	1.60



(a) 75%再生铝



(b) 100%再生铝

图6 再生铝锭的CT检测图

Fig. 6 CT detection results of the recycled ingots

表5 铝棒硬度检测结果 (HB)
Tab. 5 The hardness test results of the Al alloy rods (HB)

位置	标准6061铸棒	75%再生铝	100%再生铝
中心	36.9 ± 0.1	40.2 ± 0.1	40.0 ± 0.1
第1圈	38.1 ± 0.8	40.5 ± 0.3	41.0 ± 1.1
第2圈	38.5 ± 0.8	40.8 ± 0.4	40.6 ± 0.5
第3圈	37.8 ± 0.9	40.2 ± 0.6	40.1 ± 0.2
第4圈	37.1 ± 0.4	40.1 ± 0.8	39.7 ± 0.3

棒。这主要是由于再生料的加入促使合金中的第二相增多，起到一定的强化作用。

2.3 微合金化对再生铝合金组织和性能的影响

微量添加合金元素可以改善铝合金的微观组织和

工序中被车削去除。

2.2.4 铝棒CT检测

图6为75%再生铝和100%再生铝铝棒的CT检测图。结果表明，铝棒中无任何明显缩孔、缩松，且未发现明显夹杂物。

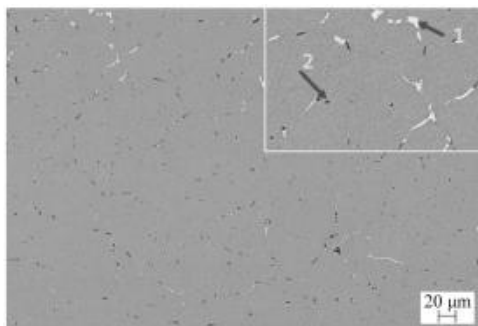
2.2.5 铝棒硬度检测结果

硬度测试结果表明，均匀化热处理后的75%再生铝铸棒和100%再生铝铸棒硬度均略高于标准6061铸

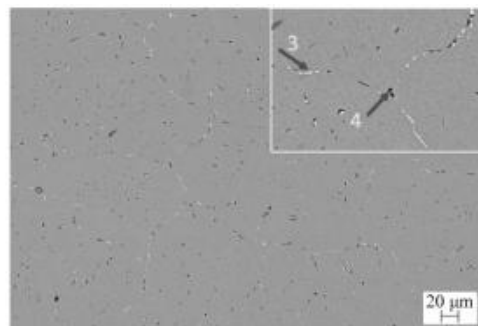
力学性能，是提升铸件品质的重要手段。再生铝合金中杂质元素（如Fe和Mn等）含量较高，往往导致枝晶间的第二相增多。为了优化 α -Al基体和第二相的组织形貌，本试验在100%再生铝试样中复合添加RE、Zr和Sr等合金元素，并对微合金化前后的合金组织与性能进行对比。

2.3.1 微观组织

图7为100%再生铝试样在微合金化前后的组织对比图，其中右上角为局部放大图。结合表6的能谱分析结果，合金中的第二相主要是呈浅灰色的富Fe相和呈黑色的 Mg_2Si 相。从图7(a)中可以看出，未经微合金化处理的100%再生铝合金中富Fe相尺寸较大，可能是由于合金中的Fe、Mn元素含量上升，Mn元素易与Fe元



(a) 未微合金化



(b) 微合金化后

图7 100%再生铝试样的微观组织SEM图片

Fig. 7 SEM images of microstructures of 100% recycled aluminum samples

表6 100%再生铝合金试样的EDS点分析结果
Tab. 6 EDS point analysis results of the 100% recycled aluminum alloy samples at.%

位置	Al	Fe	Si	Mg	Mn	Cr
点1	81.81	5.85	6.70	-	3.43	2.20
点2	56.27	-	20.09	23.64	-	-
点3	65.13	6.27	11.23	10.81	3.89	2.67
点4	47.87	-	21.94	30.18	-	-

素结合, 导致富Fe相尺寸增大。在加入RE、Zr和Sr等元素后, 富Fe相的尺寸明显变小, 如图7(b)所示。这可能是由于Sr存在于枝晶间, 与富Fe相/ α -Al基体界面相互排斥, 促使 β -Fe相发生弯曲、断裂和分解^[12-13]。此外, RE、Zr元素能够细化 α -Al基体^[14-15], 使枝晶间Fe和Mn等元素得以分散, 进一步细化富Fe相。

2.3.2 力学性能

表7为相同工艺条件下, 100%再生铝铸棒微合金化前后的力学性能数据。微合金化处理实现了100%再生铝合金的强度和伸长率同步提升, 抗拉强度和伸长率增幅分别为4.05%和18.26%。

表7 微合金化前后100%再生铝样品的力学性能对比
Tab. 7 Comparison of mechanical properties of the 100% recycled aluminum specimens before and after microalloying

样品	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
100%再生铝	313 ± 5	370 ± 1	11.5 ± 1.1
100%再生铝 微合金化后	320 ± 3	385 ± 2	13.6 ± 1.8

2.4 再生铝添加量对铝合金车轮性能的影响

为全面考察再生铝添加量与超净化处理技术对再生铝合金车轮的影响, 对车轮样件的力学性能进行了全面评估。

2.4.1 拉伸力学性能

表8是在车轮样件不同部位分别取样进行拉伸试验的结果, 表中数据为5根拉伸试样的强度和伸长率平均值, 典型的应力-应变曲线如图8所示。如表8所示, 与标准6061铝棒生产的车轮相比, 75%再生铝车轮和100%再生铝车轮在屈服强度和抗拉强度方面保持持平或略高。75%再生铝车轮和100%再生铝车轮的伸长率有一定程度下降, 但仍可满足 $\geq 10\%$ 的使用要求。

2.4.2 抗弯曲疲劳性能

车轮弯曲疲劳试验表明, 弯曲疲劳强度随再生铝添加量的增加而下降(见表9)。与标准6061铝合金车轮样品相比, 75%再生铝车轮及100%再生铝车轮的极限转数均有下降。然而, 依据TR-8891900600标准, 所有再生铝车轮的弯曲疲劳性能均达到合格标准。

通过使用自主开发的精炼熔剂并配合过滤设备优化等超净化处理手段, 再生6061铝棒及车轮产品均可以获得较好的力学性能。随着再生铝应用比例和产品范围的不断增加, 由市场上其他牌号再生铝废料制备的6061铝合金有待进一步的组织和性能验证。这将有利于实现再生铝回收范围的扩大, 推进节能减排, 缓解资源紧缺, 并成为再生铝加工制造领域的示范。

表8 各车轮样件力学性能对比
Tab. 8 The comparison of mechanical properties for the wheels

位置	样品分类	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HB
外轮缘	标准6061	347 ± 3	389 ± 3	15.8 ± 0.8	109 ± 1.3
	75%再生铝	353 ± 3	385 ± 2	14.3 ± 1.2	111 ± 1.3
	100%再生铝	354 ± 1	395 ± 2	12.6 ± 1.3	112 ± 1.4
内轮缘	标准6061	321 ± 6	361 ± 1	15.0 ± 0.6	106 ± 1.2
	75%再生铝	363 ± 4	402 ± 2	13.1 ± 1.9	112 ± 1.4
	100%再生铝	329 ± 3	372 ± 4	12.9 ± 1.2	110 ± 1.3
轮辐	标准6061	328 ± 2	369 ± 3	14.9 ± 1.0	109 ± 0.7
	75%再生铝	345 ± 5	378 ± 1	15.9 ± 0.7	113 ± 1.4
	100%再生铝	310 ± 3	349 ± 1	13.1 ± 1.4	111 ± 1.3
轮芯	标准6061	316 ± 2	359 ± 4	12.3 ± 1.5	108 ± 1.2
	75%再生铝	324 ± 1	354 ± 3	15.3 ± 1.3	108 ± 1.0
	100%再生铝	317 ± 4	359 ± 4	11.2 ± 0.6	103 ± 1.1
轮辋	标准6061	314 ± 3	362 ± 2	16.2 ± 2.1	103 ± 0.8
	75%再生铝	317 ± 1	356 ± 1	15.9 ± 1.3	109 ± 1.3
	100%再生铝	318 ± 5	366 ± 2	11.7 ± 1.7	109 ± 1.3

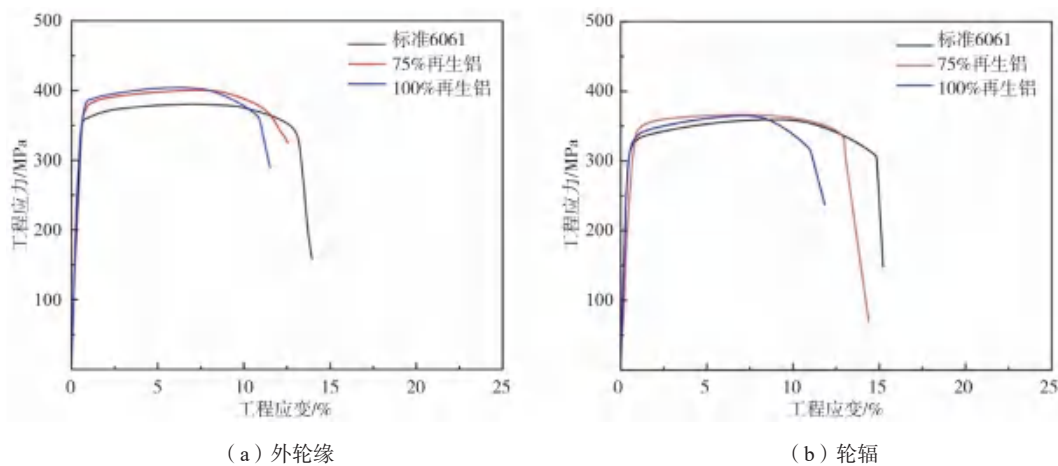


图8 车轮不同部位拉伸试棒的应力-应变图

Fig. 8 The stress-strain diagrams of tensile test bars in different parts of the wheels

表9 车轮试样弯曲试验结果
Tab. 9 Bending test results of the wheel samples

样品	停机转数/万转
标准6061铝液	> 300
75%再生铝	259.2
100%再生铝	214.6

3 结论

(1) 通过使用超净化处理技术, 75%再生铝和100%再生铝铝液及铝棒品质可以得到显著提升, 趋近

于标准6061铝合金。

(2) 少量添加RE、Sr和Zr等元素而形成的微合金化工艺能够改善100%再生铝合金第二相形貌, 使合金强度和伸长率同步提升。

(3) 与标准6061车轮相比, 75%再生铝车轮和100%再生铝车轮的强度持平或略高, 伸长率小幅下降, 但均可达到车轮性能标准。

(4) 与标准6061车轮相比, 75%再生铝车轮和100%再生铝车轮的弯曲疲劳性能有所下降, 但均可达到车轮性能标准。

参考文献:

- [1] 黄正阳. 6061再生铝合金的组织控制与性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [2] BLOMBERG J, SÖDERHOLM P. The economics of secondary aluminum supply: an econometric analysis based on european data [J]. Resources Conservation & Recycling, 2009, 53 (8): 455-463.
- [3] 敖晓辉. 废杂铝熔炼再生过程工艺能效与质量预报研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [4] 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.
- [5] PARK W, NOGUCHI T. Influence of metal impurity on recycled aggregate concrete and inspection method for aluminum impurity [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 1174-1183.
- [6] 黄莫一杰. 浅谈再生铝回收及利用技术 [J]. 铝加工, 2015 (6): 52-57.
- [7] 史明波. 6061再生铝合金的热裂倾向和性能改进研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [8] 张莘, 马涛, 马明明, 等. 一种铝及铝合金用精炼剂及其制备方法: CN201811562506 [P]. 2020-06-09.
- [9] PRILLHOFER B, ANTREKOWITSCH H, BTTCHER H, et al. Nonmetallic inclusions in the secondary aluminum industry for the production of aerospace alloys [J]. TMS Light Metals, 2008: 603-608.
- [10] 乔东, 程书建, 邱立宝. 铝合金熔体含渣量检测技术综述 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (1): 246-248.
- [11] 罗筱雄, 崔建忠, 长海博文, 等. 铝合金熔体中夹杂物及其在线检测技术研究进展 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 138-144.
- [12] 吴亮, 金青林, 蒋业华, 等. Mn, Sr对铝硅合金中铁相的影响 [J]. 铸造, 2011, 60 (12): 1185-1189.
- [13] 刘建方, 范晓明, 胡寿玉, 等. Sr变质对Al-Si合金组织中铁相形貌影响的研究 [J]. 铸造, 2008, 57 (9): 956-959.
- [14] 姚丽娟, 坚增运, 朱满, 等. 富铈混合稀土对A356铝合金凝固组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (2): 166-171.
- [15] 叶珍, 郑长清, 葛素静, 等. 再生铝超净化处理与微合金化技术在低压铸造铝车轮中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (1): 77-82.