

Si含量对3104铝合金铸态组织和力学性能的影响

杨东明^{1, 2}, 宋景昊², 刘欢², 蔡月华², 朱世安², 宋东福¹, 柯彬²

(1. 广东省科学院新材料研究所 广东省金属强韧化技术与应用重点实验室, 广东广州 510650;

2. 广东豪美新材股份有限公司, 广东清远 511500)

摘要: Si元素作为3104铝合金的主要杂质元素, 影响合金中杂质相的特征及合金的力学性能。采用扫描电子显微镜 (SEM)、万能拉伸试验机和JMat-Pro软件等研究3104铝合金的富Fe相形貌与分布及对力学性能的影响。研究表明: 随着Si含量的增加, 富Fe相类型由颗粒状Al₆(Mn, Fe)相转变为汉字状 α -Al(Mn, Fe)Si相; 富铁相的面积分数和平均面积显著增加。当Si含量为0.50%时, 富Fe相的平均面积较0.25%Si合金增加了46.2%, 而相应的圆整度则降低了32.9%。随着Si含量的增加, 合金强度逐渐增加, 而伸长率则逐渐降低。当Si含量为0.50%时, 合金抗拉强度相比于0.25Si合金仅提高了6 MPa, 伸长率降低了13.8%。Si含量的增加提高了 α -Al(Mn, Fe)Si相的形成温度和温度范围, 促使 α -Fe相的形成和粗化, 降低了合金塑性。

关键词: 3104铝合金; 富Fe相; 力学性能; Si含量

中图分类号: TG113; TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977(2026)02-0123-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0018

作者简介:

杨东明(2000-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为铝合金材料与成形。电话: 17641242965, E-mail: 1745292997@qq.com

通信作者:

柯彬, 男, 博士, 工程师。电话: 15084974053, E-mail: kebin07@163.com

基金项目:

国家重点研发计划项目(2024YEE0109100); 广东省科技计划项目(2023B121260043); 清远市科技计划项目(2024YFJH001)。

收稿日期:

2025-09-01 收到初稿, 2025-09-19 收到修订稿。

引用格式:

杨东明, 宋景昊, 刘欢, 等. Si含量对3104铝合金铸态组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2026, 75(2): 123-129.

YANG Dongming, SONG Jinghao, LIU Huan, et al. Effect of Si content on the microstructure and mechanical properties of 3104 aluminum alloy [J]. Foundry, 2026, 75(2): 123-129.

3104铝合金作为Al-Mn系合金, 具有优良的成形性、良好的力学性能和耐腐蚀性, 被广泛应用于易拉罐的罐体的制备^[1-3]。在易拉罐的回收过程中, Fe和Si常作为杂质元素影响再生铝合金的力学性能, Si元素与Fe元素共同存在时会优先形成 α -Al(Fe, Mn)Si相^[4-7]。胡展奎等研究发现, 当Al-Mn-Mg-Si合金中Si元素含量大于Fe元素含量时, 形成的 β -Al₃Fe₂Si相对合金力学性能产生了不利的影响^[7]。张青柱等研究发现, 6082铝合金的抗拉强度会随着Si元素的增加呈上升趋势, 伸长率呈现先升高后降低的趋势, 当Si含量在1.0%~1.1%(质量分数, 下同)时, 综合性能最佳^[8]。攀富起等研究发现, 随着Si含量的增加7xxx铝合金的强度呈现先升高后降低的趋势, 伸长率呈现降低趋势, 其抗拉强度在0.3%Si时达到最高的264.8 MPa, 此时伸长率为10.6%^[9]。适量Si元素的添加, 可以提高合金铸造性能, 然而, 过量的Si元素降低了合金的铸造性能^[8-11]。作为3XXX铝合金中的杂质元素, Fe和Si元素会随着回收次数的增加而递增, 因此, 开展Si含量对3104铝合金力学性能的影响很有必要。

此前, 我们已经探讨了Fe含量对3104铝合金富Fe相形貌以及力学性能的影响^[12], 而关于Si含量对3104铝合金影响的并没有深入研究。因此, 本课题设计四组不同Si含量的3104铝合金, 探究不同Si含量对富Fe相形貌和力学性能的影响。

每组试验样品总重量为2 kg, 由工业纯铝(99.5%)、纯Mg(99.7%)及Al-20Si、Al-20Fe、Al-10Mn、Al-50Cu和Al-5Ti-1B几种商业中间合金制成, Al-5Ti-1B的添加主要是为了细化晶粒。制备方法如下: 将除Mg、Al-Ti-B外的试验材料放入坩埚中, 使用电阻加热炉经由800 °C保温1 h; 待原料全部熔化, 铝液温度随炉降到730~740 °C后, 使用钛制工具将质量为熔体质量0.5%(约10 g)的精炼剂(主要由氟盐和少量氯化盐组成)放入熔体, 进行精炼; 精炼完成后分别加入经250 °C预热的Mg和Al-5Ti-1B; 保温30 min后, 清理熔体表面浮渣, 浇注到经250 °C预热的30 mm × 200 mm × 150 mm的钢制模具中, 空冷得到铸锭。

使用直读光谱仪 (SPECTRO-MAX) 对铸锭进行化学成分检测, 结果见表1。在铸锭中间部位使用线切割机取金相和拉伸样品, 金相样品分别经由砂纸打磨、金刚石抛光膏 (0.15~0.25 μm) 粗抛与MgO水溶液 (0.5%) 精抛后制得。使用自带能谱仪 (EDS, OXFORD-7412) 的扫描电子显微镜 (Gemini SEM 300) 进行微观结构分析。选择5~10张200倍扫描图像, 使用Image J软件得到富Fe相的2D形貌特征数据。采用万能拉伸试验机 (Zwick-roll Z250, 拉伸速度1 mm/min) 测试合金力学性能, 每组试验合金的拉伸试样数量不小于4, 拉伸试样尺寸在之前的研究中已经描述^[12]。使用JMat-Pro 软件分析物相的凝固顺序。

表1 试验合金的化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of the test materials

样品	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Al	$w_B/\%$
0.25Si	0.25	0.46	0.20	1.25	1.02	0.02	余量	
0.35Si	0.35	0.45	0.20	1.24	1.01	0.02	余量	
0.40Si	0.40	0.47	0.19	1.25	1.03	0.02	余量	
0.50Si	0.50	0.46	0.20	1.26	0.99	0.02	余量	

1 结果和分析

1.1 Si 含量对微观结构的影响

图1为不同Si含量的合金的显微组织图像。由图分析, 合金主要由三种形貌组成, 即: 灰黑色相、灰白色相和深黑色相。初步判断其中灰黑色为基体 α -Al,

灰白色为富Fe相, 深黑色的条状为Mg₂Si相^[13-15]。随着Si含量的增加, 富Fe相由颗粒状转变为汉字状, 并且其连通性提高。当Si含量为0.25%时, 以颗粒状富Fe相为主。随着Si含量进一步增加到0.4%~0.5%时, 富Fe相形貌以汉字状为主。

图2为图1放大后的背散射图像和不同Si含量合金的XRD图谱。图中标记的点A~F代表了具有典型形貌的富Fe相, 其化学组成见表2。由表2分析, 颗粒状富Fe相 (点A) 和长条状 (点B和点C) 主要由Al、Mn和Fe三种元素组成, 推测为Al₆(Mn, Fe)相^[12]。而汉字状富Fe相 (点D和点F) 除了含有Al、Mn和Fe外, 还包含一定量的Si元素, 推测为 α -Al(Fe, Mn)Si相 (以下简称 α -Fe相)^[12-14]。图2(d)中标记的黑色条状相 (点E) 主要由Al、Mg和Si元素组成, 推测为Mg₂Si相。不同Si含量合金的XRD图谱证明了合金中存在Al₆(Mn, Fe)相和 α -Fe相两种不同类型的富铁相 (图3)。综上所述, 随着Si含量的增加, 合金中富Fe

表2 典型形貌富Fe相的化学组成

Tab. 2 Chemical compositions of Fe-rich phases with typical morphologies

测试点	Mg	Al	Si	Mn	Fe	物相	$w_B/\%$
A	—	85.76	—	6.66	7.57	Al ₆ (Mn, Fe)	
B	—	89.50	—	5.13	5.37	Al ₆ (Mn, Fe)	
C	—	86.43	—	6.72	6.85	Al ₆ (Mn, Fe)	
D	—	75.70	7.44	8.31	8.54	α -Fe	
E	21.70	53.35	24.95	—	—	Mg ₂ Si	
F	—	79.75	6.23	6.93	7.09	α -Fe	

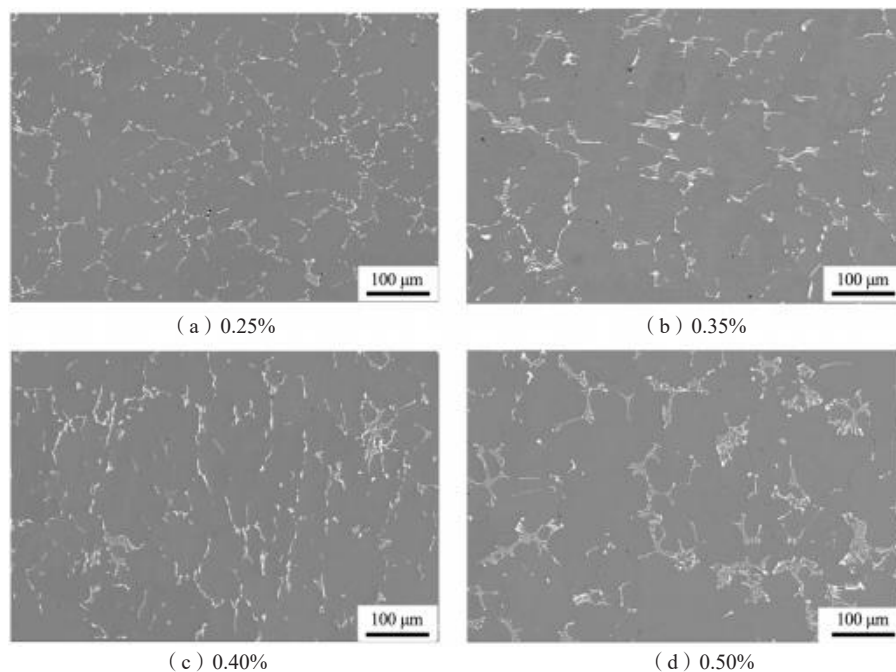


图1 不同Si含量合金扫描电镜图片

Fig. 1 SEM photographs of the alloys with different Si contents

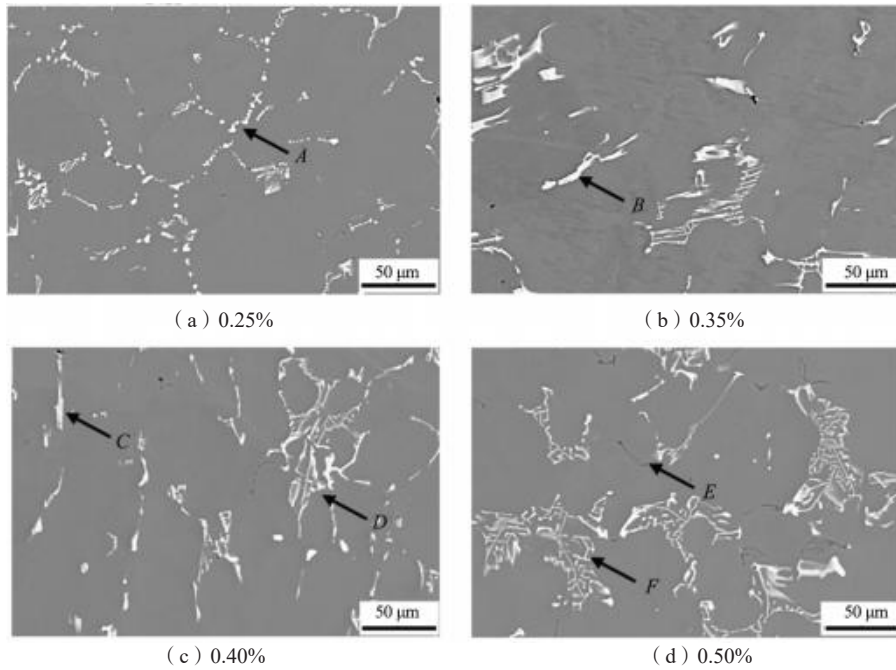


图2 不同Si含量合金的高倍扫描电镜图片

Fig. 2 High magnification SEM images of the alloys with different Si contents

相的由颗粒状和长条状的Al₆(Mn, Fe)相转变为汉字状的α-Fe相。

表3为不同Si含量合金中富Fe相的2D特征数据。由表分析,随着Si含量的增加,富Fe相的面积分数没有发生明显变化,但其平均面积呈现上升趋势。相较于0.25Si合金,0.50Si合金中富Fe相的平均面积增加了46.2%。同时,富Fe相的圆整度随着Si含量的增加呈现

下降趋势。当Si含量为0.50%时,富Fe相的圆整度降低了32.8%。这说明,相较于α-Fe相,Al₆(Mn, Fe)相更趋近于圆形。圆整度用于表征富铁相的形状系数^[13],当表征对象的圆整度为1时,说明该对象是圆,其计算公式如下:

$$C = \frac{4\pi \times A}{P^2} \quad (1)$$

式中: C表示圆整度, A表示富铁相的面积, P表示富铁相的周长。

图4为不同Si含量合金局部元素分布图。由图4分析,几乎所有的富Fe相都包含Mn和Fe元素,在0.25Si合金中,仅有少量的Si元素富集区;在0.50Si合金中, Si元素与Mn、Fe元素分布相吻合。在本文中,通过富Fe相中是否含有Si元素,来区分α-Fe相和Al₆(Mn, Fe)相。由此可以推断,0.25Si合金中,富Fe相主要以Al₆(Mn, Fe)相形式存在;而在Si含量为0.50%的合金中,由于Si元素与Mn、Fe的分布重合,推测富Fe相主要以α-Fe相为主,这些α-Fe相呈现汉字状。

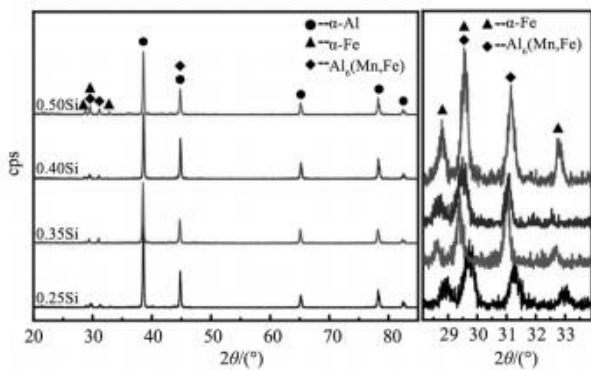


图3 不同成分合金的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of the alloys with different compositions

表3 不同Si含量的合金中富铁相形态特征统计
Tab. 3 The morphology characteristic statistics of Fe-rich phases in the alloys with different Si contents

Si含量/%	面积分数/%	平均面积/μm ²	圆整度
0.25	3.82 ± 0.07	14.90 ± 3.40	0.64 ± 0.03
0.35	3.91 ± 0.06	18.33 ± 4.20	0.56 ± 0.04
0.40	3.68 ± 0.16	20.11 ± 2.78	0.47 ± 0.05
0.50	3.83 ± 0.11	21.78 ± 3.96	0.43 ± 0.03

1.2 Si含量对力学性能的影响

图5为不同Si含量合金的拉伸性能曲线。由图分析,随着Si含量的增加,合金的抗拉强度呈现上升趋势,而伸长率则呈现下降趋势。当Si含量为0.50%时,合金的抗拉强度相比于0.25Si合金仅提高了6 MPa,伸长率降低了13.8%。当Si含量增加到0.35%及以上时,合金的伸长率变化并不明显。这说明,富铁相形貌的转变降低了合金塑性,然而对强度的提升没有显著作用,这证明相较于颗粒状富铁相,汉字状富铁相起到

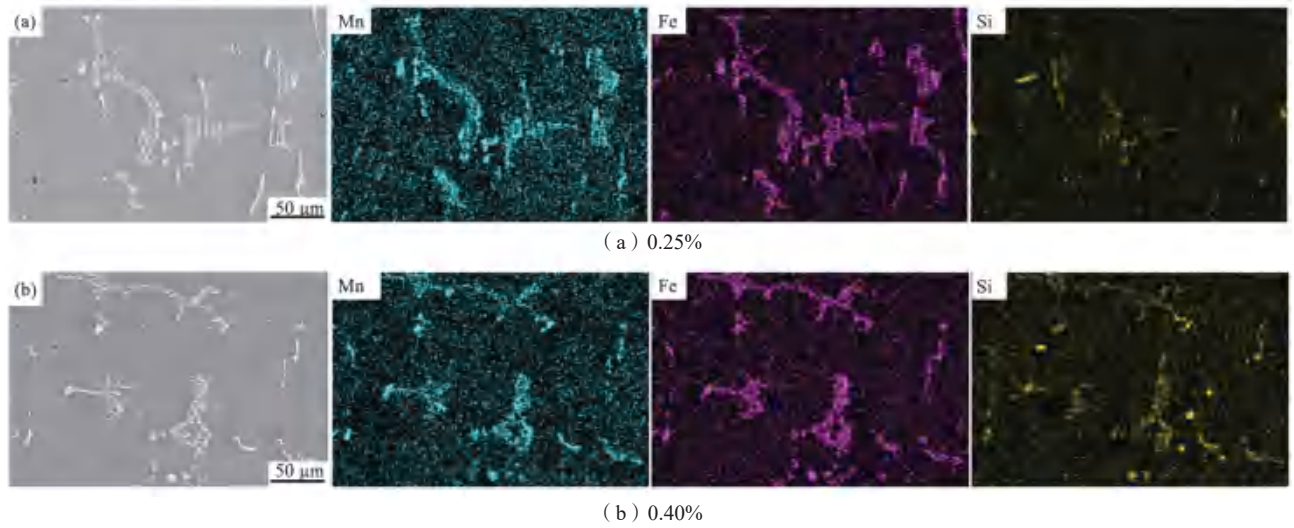


图4 不同Si含量的合金元素分布

Fig. 4 Elemental distributions of the alloys with different Si contents

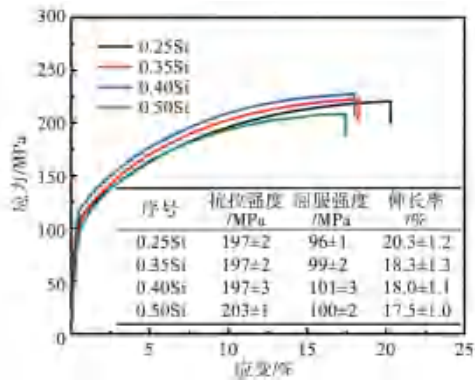


图5 不同Si含量合金的拉伸性能曲线

Fig. 5 Tensile property curves of the alloys with different Si contents

的第二相强化作用并不明显。

图6为拉伸断口的侧面形貌。由图6分析，断口处分布着大量破碎的富Fe相，这表明富Fe相是裂纹萌生的位点和扩展的介质。在图6(c)中，发现了大量横向裂纹，仅观察到少量的纵向裂纹。这代表裂纹更倾向于沿着垂直于拉伸方向扩展^[16-17]。进一步分析发现，在Si含量为0.25%的合金中，如图6(a)所示，断口处主要为颗粒状富Fe相，颗粒状的富Fe相通常具有较高的圆整度，在拉伸过程中，不易发生应力集中。随着Si含量增加到0.50%时，如图6(d)所示，断口处主要为汉字状富Fe相，汉字状富Fe相由于具有较低的圆整度和

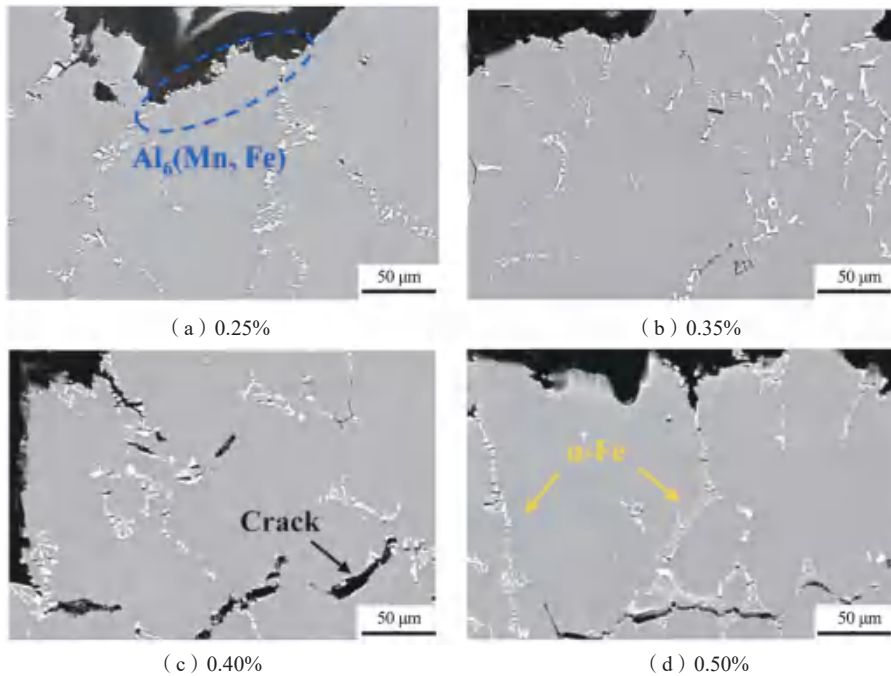


图6 不同Si含量合金侧面断口形貌

Fig. 6 The morphologies of lateral fractures of the alloys with different Si contents

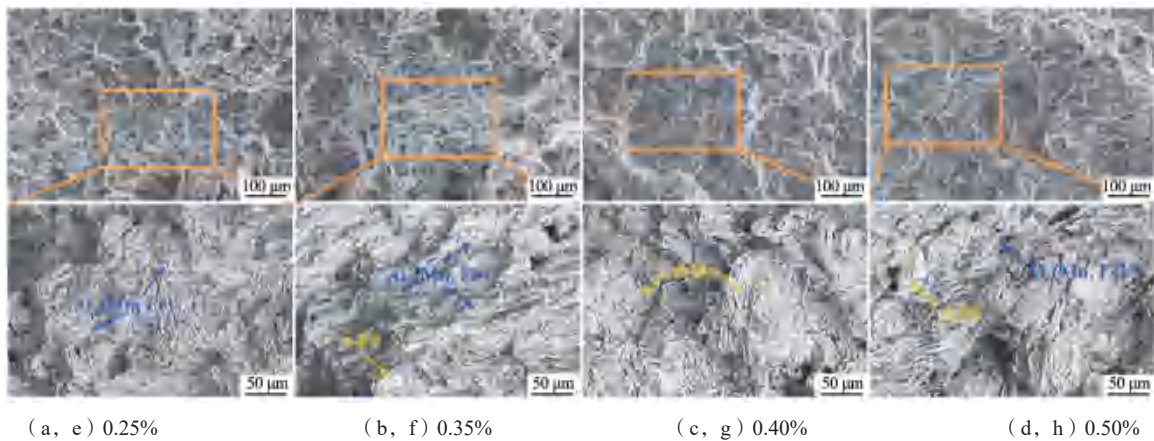
较复杂的网络互联结构,在拉伸过程中更容易成为裂纹的萌生位点和促进裂纹的横向扩展^[18-19]。在0.40Si和0.50Si合金中,断口处发现了更为明显的横向裂纹即裂纹数量,较0.25Si和0.35Si合金显著增多,长度增大,其在拉伸过程中产生更大的应力应变。

图7为不同Si含量合金的断口形貌。图7(a)-(d)为二次电子图像,由图分析,断口表面主要以韧窝和撕裂脊为主,这表明合金具有良好的塑性。同时,在断口表面发现了灰白色的富Fe相,如图7(e)-(h)所示,在这些富Fe相内部发现了许多次生裂纹。这说明,在裂纹萌生初期,在富Fe相的横向和厚度方

向均发生了应力集中和裂纹萌生,但裂纹更容易沿着横向扩展。在Si含量为0.25%时,如图7(e)所示,合金断口处的富Fe相主要以碎块状的 $Al_6(Mn, Fe)$ 相为主。随着Si含量的增加,当Si含量超过0.40%时,断口处的富Fe相逐渐以片状的 $\alpha-Fe$ 相为主。这些片状 $\alpha-Fe$ 相通常比颗粒状 $Al_6(Mn, Fe)$ 相更容易使裂纹扩展,在断裂后呈现较为光滑的平面状。

2 分析与讨论

图8为不同Si含量合金的物相析出顺序图。从



(a, e) 0.25%

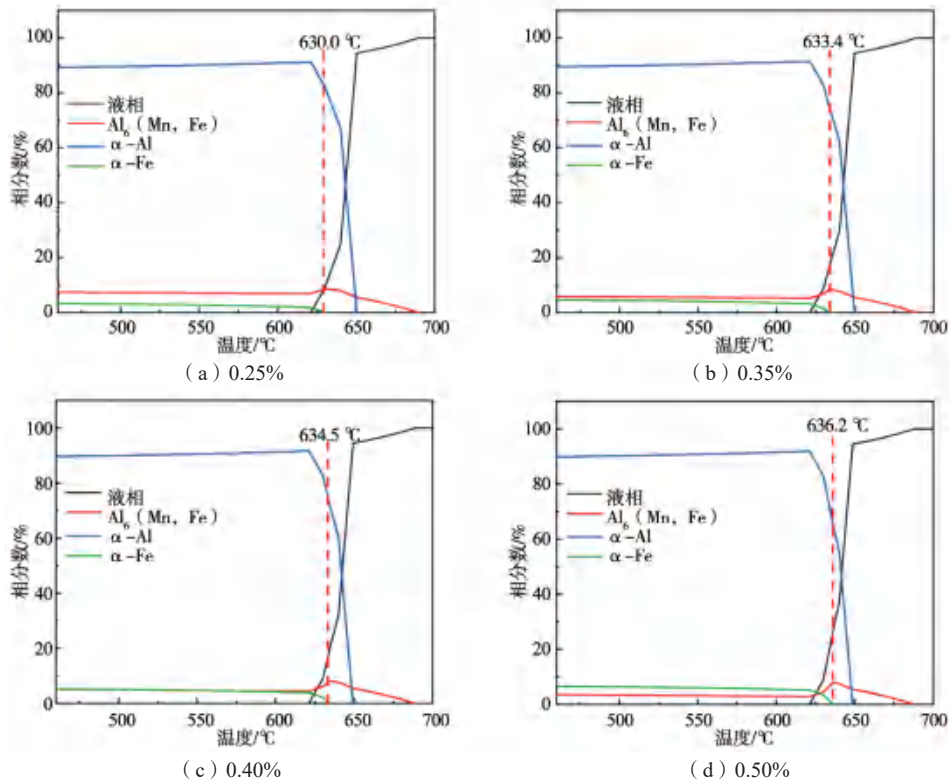
(b, f) 0.35%

(c, g) 0.40%

(d, h) 0.50%

图7 不同Si含量合金的断口形貌

Fig. 7 The fracture morphologies of the alloys with different Si contents



(a) 0.25%

(b) 0.35%

(c) 0.40%

(d) 0.50%

图8 不同Si含量合金物相的析出顺序图

Fig. 8 Phase precipitation sequences of the alloys with different Si contents

图8中可以发现,所有合金中都主要含有 α -Fe相和 Al_6 (Mn, Fe)相,这与图2和表2得到的结果相一致,证明了不同Si含量的合金中富Fe相的类型并没有发生变化。由图8分析, Al_6 (Mn, Fe)相在685℃时开始生成,其含量随着温度的降低而逐渐增加,在 α -Fe相生成时达到最高。之后,随着 α -Fe相的生成 Al_6 (Mn, Fe)相的相分数开始逐渐降低,到达一定程度后 Al_6 (Mn, Fe)相与 α -Fe相的相分数趋于稳定。这说明 Al_6 (Mn, Fe)相和 α -Fe相之间存在竞争关系^[20-21]。当Si含量为0.25%时, α -Fe相的初始形成温度为630.0℃。随着Si含量的增加,当Si含量为0.50%时, α -Fe相的初始形成温度提升为636.2℃(0.50Si),较0.25Si合金提高了6.2℃。这说明Si含量的增加提高了 α -Fe相的形成温度,从而提高了 α -Fe相的凝固温度范围,促进了 α -Fe相的长大。这是导致富Fe相的平均面积提高和圆整度降低的原因。Si含量改变了铝合金的热力学特性,使 α -Fe相的析出温度升高。同时,抑制了 Al_6 (Mn, Fe)相的形成,促进了 α -Fe相的形成温度,为 α -Fe相的生长提供了更多的时间和空间,使 α -Fe相的相分数增加。

参考文献:

- [1] LI Z, ZHANG Z, CHEN X. Microstructure, elevated-temperature mechanical properties and creep resistance of dispersoid-strengthened Al-Mn-Mg 3xxx alloys with varying Mg and Si contents [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 708: 383-394.
- [2] LI Y, ARNBERG L. Evolution of eutectic intermetallic particles in DC-cast AA3003 alloy during heating and homogenization [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 347 (1-2): 130-135.
- [3] CAPUZZI S, TIMELLI G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: a review [J]. *Metals*, 2018, 8 (4): 103390.
- [4] 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.
- [5] LU H, HOU Z, MA M, et al. Effect of Fe-content on the mechanical properties of recycled Al alloys during hot compression [J]. *Metals*, 2017, 7 (7): 262.
- [6] LI Z, LIMODIN N, TANDJAOU I, et al. Influence of Fe content on the damage mechanism in A319 aluminum alloy: tensile tests and digital image correlation [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 183: 94-108.
- [7] 胡展奎, 池国明. 合金成分及热处理工艺对Al-Mn-Mg-Si-Fe-Cu合金组织与性能的影响 [J]. *铝加工*, 2018 (2): 8-14.
- [8] 张青柱, 白帮伟, 谌铁强, 等. Si含量对6082铝合金型材弯曲性能的影响 [J]. *轻合金加工技术*, 2023, 51 (12): 36-39.
- [9] 樊富起, 徐敏道. Si含量对汽车用铝合金组织和性能的影响 [J]. *功能材料*, 2024, 55 (6): 6224-6229.
- [10] 孟秋燕, 梁玉霞, 贾瑞红, 等. Si含量对Al-Cu-Si复合材料组织及性能的影响 [J]. *功能材料*, 2021, 52 (10): 10116-10120.
- [11] 李思. Si、Mg、Fe含量对6063铝合金抗拉强度、导电性能的影响 [J]. *电工材料*, 2019 (2): 3-6.
- [12] YANG D, SONG D, YANG D, et al. 3D characteristics of Fe-rich phase and its effect on mechanical properties of AA3104 alloys [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 35: 3634-3644.
- [13] YANG D, YUEHUA C, SONG D, et al. A novel modifier Al-Sr-RE for improving the microstructure and mechanical properties of recycled AA3104 alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1022: 179744.
- [14] ZHEN L I, ZHANG Z. Effect of magnesium on dispersoid strengthening of Al-Mn-Mg-Si (3xxx) alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26 (11): 2793-2799.
- [15] ENGLER O, MILLER JUPP S. Control of second-phase particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083 [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 689: 998-1010.
- [16] SONG D, ZHAO Y, WANG Z, et al. 3D Fe-rich phases evolution and its effects on the fracture behavior of Al-7.0 Si-1.2 Fe alloys by Mn neutralization [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35 (1): 163-175.
- [17] SONG D, ZHAO Y, JIA Y, et al. Effect of B addition on the formation of Fe-rich phases in Al-Si-Fe alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 930: 167426.

3 结论

采用扫描电子显微镜 (SEM)、万能拉伸试验机和J Mate-Pro软件等工具研究了不同Si含量对3104铝合金显微组织和力学性能的影响,主要结论如下。

(1) 随着Si含量的增加,富Fe相由颗粒状 Al_6 (Mn, Fe)相转变为汉字状 α -Fe相。富Fe相的二维形貌统计显示,相较于0.25Si合金,0.55Si合金中富Fe相的平均面积增加了46.17%,富Fe相的圆整度降低了32.81%。

(2) 随着Si含量的增加,合金的抗拉强度呈现上升趋势,而伸长率则呈现下降趋势。当Si含量为0.50%时,合金的抗拉强度相比于0.25Si合金仅提高了6 MPa,伸长率降低了13.79%。

(3) 随着Si含量的增加, α -Fe相的初始凝固温度提高,当Si含量为0.25%时, α -Fe相的初始形成温度为630.0℃;当Si含量为0.50%时, α -Fe相的初始形成温度提升为636.2℃(0.50Si),提高了6.2℃。

- [18] SONG D, ZHAO Y, JIA Y, et al. Study of the evolution mechanisms of Fe-rich phases in Al-Si-Fe alloys with Mn modification using synchrotron X-ray imaging [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 915: 165378.
- [19] SONG D, ZHAO Y, JIA Y, et al. Synergistic effects of Mn and B on iron-rich intermetallic modification of recycled Al alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 527–541.
- [20] SONG D, ZHAO Y, WANG Z, et al. Effect of Mn/Fe ratio on Fe removal efficiency and tensile ductility of an Al-7.0Si-2.4Fe alloy [J]. *Journal of Materials Research*, 2021, 36: 1357–1366.
- [21] YANG D, SONG D, TANG C, et al. 3D morphological evolution of the Fe-rich phase and mechanical properties of the recyclable A356 alloy [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39: 110425.

Effect of Si Content on the As-Cast Microstructure and Mechanical Properties of 3104 Aluminum Alloy

YANG Dong-ming^{1,2}, SONG Jing-hao², LIU Huan², CAI Yue-hua², ZHU Shi-an², SONG Dong-fu¹, KE Bin²

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Metal Toughening Technology and Application, Institute of New Materials Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 2. Guangdong Haomei New Material Co., Ltd., Qingyuan 511500, Guangdong, China)

Abstract:

Si is the main impurity element in AA3104 alloy. It affects the characteristics of impurity phases in the alloy and the mechanical properties of the AA3104 alloy. The scanning electron microscopy (SEM), universal tensile testing machine, and JMat-Pro software were used to study the morphology and distribution of the Fe-rich phases in the AA3104 alloys, as well as their influence on mechanical properties. The results show that as Si content increases, the types of Fe-rich phases change from granular $Al_6(Mn, Fe)$ phase to Chinese-script $\alpha-Al(Mn, Fe)Si$ phase. The area fractions and average areas of the Fe-rich phases increase significantly. When the Si content is 0.50%, the average area of Fe-rich phases increase by 46.2% compared with that of the 0.25% Si alloy, while the circularity decrease by 32.9%. With increasing Si content, the strengths of the alloys increase, while the elongations decrease. When the Si content is 0.50%, the tensile strength of the alloy only increases by 6 MPa compared to the 0.25% Si alloy, and the elongation decreases by 13.8%. Increasing Si content raised the formation temperature and the formation temperature range of the $\alpha-Al(Mn, Fe)Si$ phase, promoted the formation and coarsening of the $\alpha-Fe$ phase, and reduced the plasticity of the alloy.

Key words:

AA3104 alloy; Fe-rich phase; mechanical property; Si content