

杂质 Fe 含量对工业纯铝组织和性能的影响

连运增¹ 李达人² 宋东福³ 李润苗¹ 章耀平¹ 万忠华² 陈胜迁⁴

[1. 广东欧亚包装有限公司, 中山 528437; 2. 广东理工职业学院机电工程学院(标准化学院), 广州 510091; 3. 广东省科学院新材料研究所, 广州 510650; 4. 张家界航空工业职业技术学院航空制造学院, 张家界 427000]

摘要 采用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和拉伸试验机研究了不同 Fe 含量对气雾罐用工业纯铝组织和力学性能的影响。结果表明, 随 Fe 含量增加, 富 Fe 相面积分数逐渐增加, 形貌由针状逐渐向汉字状和短棒状转变, 同时促进了 α -Al 的晶粒细化。当(质量分数,下同)Fe 含量为 0.49% 时, 富 Fe 相的面积分数和平均面积较 Fe 含量为 0.16% 的工业纯铝提高了 4.67 倍和 6.2%, 但圆整度提高了 7.8%。此外, 随 Fe 含量增加, 工业纯铝的抗拉强度和屈服强度逐渐提高, 在 Fe 含量为 0.49% 时分别达到 79 MPa 和 41 MPa, 较 Fe 含量为 0.16% 的工业纯铝分别提高了 12.9% 和 11.1%, 而塑性则呈现先增加后降低的趋势。另外, Fe 含量为 0.49% 时工业纯铝伸长率较 Fe 含量为 0.16% 时提高了 3.2%。低 Fe 含量导致缩松缺陷的形成, 降低了工业纯铝的塑性, 而高 Fe 含量引起的富 Fe 相形貌的有益转变提高了工业纯铝的伸长率。

关键词 工业纯铝; 富 Fe 相; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250103

Effects of Impurity Fe Content on Microstructure and Properties of Commercial-purity Aluminium

LIAN Yunzeng¹, LI Daren², SONG Dongfu³, LI Runmiao¹, ZHANG Yaoping¹, WAN Zhonghua², CHEN Shengqian⁴

[1. Guangdong Euro-Asia Packaging Co., Ltd., Zhongshan 528437; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering (School of Standardization), Guangdong Polytechnic Institute, Guangzhou 510091; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Metal Toughening Technology and Application, Institute of New Materials Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650; 4. Aviation Manufacturing College, Zhangjiajie Institute of Aeronautical Engineering, Zhangjiajie 427000]

Abstract: Effects of varied Fe contents on microstructure and mechanical properties of commercial-purity aluminum for aerosol cans were investigated by metallographic microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and tensile tester. The results indicate that the area fraction is increased gradually with the increase of Fe content, and the morphology of Fe-rich phase is transformed from needle-like to Chinese-script and short-rod. Meanwhile, the grain refinement of α -Al is promoted. The area fraction and average area of Fe-rich phase with 0.49% Fe content are 4.67 times and 6.2% higher than that of 0.16% Fe industrial pure aluminum, while the roundness is increased by 7.8%. In addition, the tensile strength and yield strength of commercial-purity aluminum are increased progressively as Fe content rises, reaching 79 MPa and 41 MPa with 0.49% Fe, which are increased by 12.9% and 11.1% compared with those of ones with 0.16% Fe, respectively. The plasticity of the alloy is increased firstly and then decreased, and the elongation with 0.49% Fe is 3.2% higher than that of ones with 0.16% Fe. Low Fe content leads to shrinkage defects and reduces the plasticity of commercial-purity aluminum, while the beneficial transformation of Fe-rich phase morphology contributes to the elongation of commercial-purity aluminum with high Fe content.

Key Words: Commercial-purity Aluminum, Fe-rich Phase, Mechanical Properties

收稿日期: 2025-03-05; 修订日期: 2025-05-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFE0109100); 湖南省教育厅科学研究资助项目(23C1036); 清远市科技计划资助项目(2025YFJH006)

第一作者: 连运增, 男, 1965 年出生, 教授级高级工程师, E-mail: lin@euroasia-p.com

通信作者: 陈胜迁, 男, 1985 年出生, 副教授, E-mail: dzsrchen@163.com

引用格式: 连运增, 李达人, 宋东福, 等. 杂质 Fe 含量对工业纯铝组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(7): 1 045-1 050.

LIAN Y Z, LI D R, SONG D F, et al. Effects of impurity Fe content on microstructure and properties of commercial-purity aluminium[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 1 045-1 050.

铝及其合金具有密度小、耐蚀性能好、良好的加工性能和可回收性,被广泛应用于包装领域,如铝箔纸、易拉罐和气雾罐等^[1-2],尤其是包装行业,其中气雾罐的含铝量高达 99.5%^[3]。尽管我国的气雾罐、易拉罐等废铝的回收率高达 98% 以上,但由于缺乏高效的回收利用技术与装备,导致废旧罐体通常作为普通的铝合金废料,降级使用^[4]。

在废旧铝合金回收过程中,会引入一些杂质元素,对铝合金的服役性能造成了不利的影响,尤其是 Fe^[5]。Fe 在铝合金中的溶解度仅为 0.05%,导致 Fe 基本以高脆性和高硬度的富 Fe 相形式存在,极易造成应力集中,对合金的性能不利^[6-12]。徐道芬等^[13]发现(质量分数,下同)0.1% 的 Fe 促进了大尺寸 Al₇Cu₂(FeMn)相的析出,合金伸长率降低了 18.4%。刘惠等^[14]发现 Fe 含量(质量分数,下同)低于 0.14% 时,析出的 α -Al₃Fe₂Si 极少,导致 Al-Mg-Si 合金的晶粒长大,而 Fe 含量高于 0.14% 时,易形成长条状的 β -Al₃FeSi,导致合金强度和伸长率降低。林波等^[15]发现当 Fe 含量为 0.5% 时,Al-5Cu 合金中出现针状富 Fe 相,且汉字状富 Fe 相发生明显粗化,导致合金的常温和高温性能急剧下降。何项项等^[16]发现 Fe 对 Al-7.1Zn-2.4Mg-2.1Cu 合金的塑性影响非常显著,当 Fe 含量为 0.55% 时,重力铸造和挤压铸造合金的伸长率较 Fe 含量为 0.1% 的合金降低了约 50%。周玉立等^[17]研究表明,当 Fe 含量从 0.1% 增加到 1.0% 时,Al-9Si-0.2Mg 合金中富 Fe 相由汉字状的 π 相转变为长针状的 β -Fe 相,富 Fe 相的平均长度增加近 20 倍,热导率、抗拉强度和伸长率分别降低了 6%、11.7% 和 66%。杨宁源等^[18]发现,随 Fe 含量的增加,Al-1.04Mg-0.64Si-0.23Cu 合金中富 Fe 相由针状 β -Al₃Fe₂Si₂ 逐渐向汉字状 α -Al₁₇Fe_{3.2}Mn_{0.8}Si₂ 和短棒状 Fe₂Al₃Si₃ 转变。当 Fe 含量超过 1.21% 时,平均晶粒尺寸增大,合金塑性和腐蚀性能降低。前期研究表明,在 Al-7Si-0.4Mg 合金中,合金的塑性在 Fe 含量为 0.4% 时出现了极大值,较 Fe 含量为 0.25% 和 0.55% 时高^[19]。而在 Al-0.7Mg-0.7Si 合金中,随 Fe 含量增加,富 Fe 相形貌由简单的汉字状、针片状逐渐向粗大的汉字状转变,其体积分数和最大单体体积分数增加,合金的塑性逐渐降低^[20]。目前,关于 Fe 的不利影响研究主要集中在 Al-Si、Al-Mg-Si、Al-Cu 和 Al-Zn 等合金上,而对工业纯铝组织和性能影响的研究报道较少。

本研究针对工业纯铝的保级利用难题,研究了 Fe 含量对工业纯铝微观组织和力学性能的影响,重点研究了 Fe 对晶粒尺寸和富 Fe 相形态特征的影响,旨在为提高气雾罐用工业纯铝中 Fe 的容许度提供参考。

1 试验材料与方法

试验原料主要包括 1050 工业纯铝、Al-20Fe 和 Al-5Ti-1B 中间合金。按照 Fe 质量分数为 0.15%、0.25%、0.35% 和 0.50% 配制 4 组工业纯铝,依次编号为 Fe15、Fe25、Fe35 和 Fe50,每组合金的总质量为 2 kg,随后将原料中的 80% 工业纯铝、Al-20Fe 原料放入石墨坩埚内,随炉升温至 800 ℃,待原料熔化后,加入剩余的 20% 工业纯铝,并将熔体降温至 730~750 ℃。采用钛制钟罩加入 10 g 市售混合氯盐精炼剂,并缓缓搅拌净化熔体,随后加入经 250 ℃预热的 Al-5Ti-1B 中间合金保温 30 min 后,清除熔体表面浮渣,将熔体倒入尺寸为 200 mm×30 mm×180 mm 的钢制模具中,模具使用前需在 250 ℃下预热 1 h 以上,空冷获得 4 组铸锭。

采用电火花线切割加工试样,采用 SPECTRO-MAX 直读光谱仪测试铸锭的化学成分,结果见表 1。由表 1 可知,Fe 含量与设计成分的差异较小,约为 ±0.03%,满足设计要求,其余元素均在要求范围内。在铸锭相同位置截取试样,制备成金相和拉伸试样。利用 ZIESS E10 型扫描电镜分析基体的晶粒尺寸、第二相的形态与分布,并采用扫描电镜自带的 OXFORD 7412 型能谱仪(EDS)测试第二相的化学组成。在测试晶粒尺寸之前,需要对试样进行振动抛光,以去除表面应力。采用 Vibro Met2 振动抛光,时间一般为 3~5 h。采用 UTM5205 型万能试验机测试工业纯铝的力学性能,拉伸试样呈平板状,平行长度为 32 mm,标距为 25 mm,厚度为 3 mm,宽度为 6 mm,拉伸速度为 1 mm/min,每种合金至少测试 3 根试样,取平均值。利用 SEM 观察断口的形貌特征,采用 Image Plus 软件定量分析富 Fe 相的形态特征。

表 1 不同 Fe 含量工业纯铝的化学组成

Tab.1 Chemical compositions of commercial-purity aluminum with different Fe contents %

合金 编号	w_B					
	Si	Fe	Ti	B	V	Al
Fe15	0.04	0.16	0.028	0.005	0.047	余量
Fe25	0.05	0.27	0.024	0.005	0.037	余量
Fe35	0.05	0.37	0.023	0.005	0.025	余量
Fe50	0.04	0.49	0.023	0.005	0.040	余量

2 试验结果与分析

2.1 Fe 对微观组织的影响

图 1 为不同 Fe 含量工业纯铝的 SEM 组织。可以看出,面积分数最大的灰黑色相为基体相,白色相为富

Fe 相,而黑色的颗粒状相待确认。当 Fe 含量较低时,富 Fe 相形貌以细条状为主,分布在晶界处,同时还出现少量的细小颗粒状和汉字状,分布在三角晶界处。在部分晶界和晶内出现了细小的黑色颗粒,以及少量黑色的缩松和氧化夹杂。随 Fe 含量增加,富 Fe 相面积分数逐渐增多,三角晶区的汉字状富 Fe 相尺寸增大,分布转变成连续状,黑色颗粒数量增多,但尺寸变化不明显,尤其是 Fe 含量达到 0.27%~0.37% 时,黑色颗粒均匀地分布在晶界内。

图 2 为不同 Fe 含量工业纯铝的高倍扫描电镜组织图。可以看出,当 Fe 含量较低(0.16%~0.27%)时,分布在非三角晶界处的富 Fe 相主要呈长条状,而当 Fe 含

量提高至 0.37% 及以上时,非三角晶界处的富 Fe 相逐渐转变成汉字状,尤其是 Fe 含量为 0.49% 时,汉字状成为晶界富 Fe 相的主要形态,其宽度也由 1 μm 增加至 5~7 μm 。对不同 Fe 含量工业纯铝中富 Fe 相进行成分分析,结果见表 2。可以看出,长条状和汉字状富 Fe 相的元素组成无明显区别,主要含有 Al 和 Fe,但汉字状中 Fe 含量略高于长条状,较大尺寸的颗粒状富 Fe 相中含有少量的 Si 元素,这说明少量的 Si 有利于富 Fe 相向颗粒状富 Fe 相转变。结合 Al-Fe 二元相图,可确定富 Fe 相的类型为 Al_3Fe 。黑色颗粒的成分主要含有 Al 和 Si,可判断为含 Si 物相,这可能是金相制备过程中嵌入的硬质 SiC 颗粒。

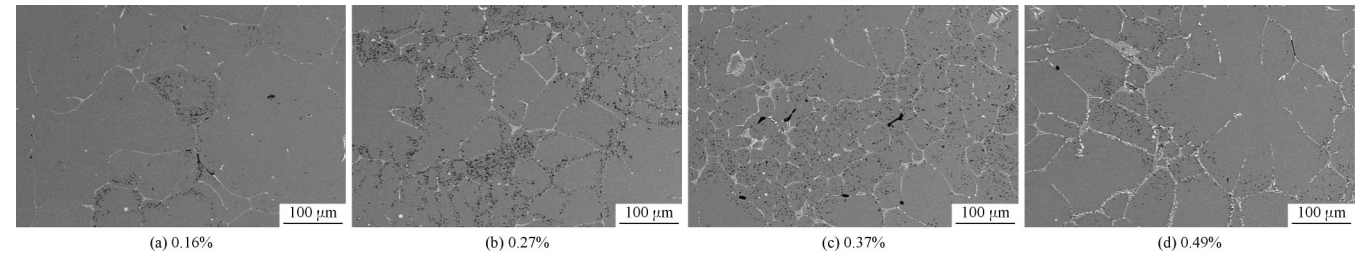


图 1 Fe 含量对工业纯铝组织的影响

Fig.1 Effect of Fe content on microstructure of commercial-purity aluminum

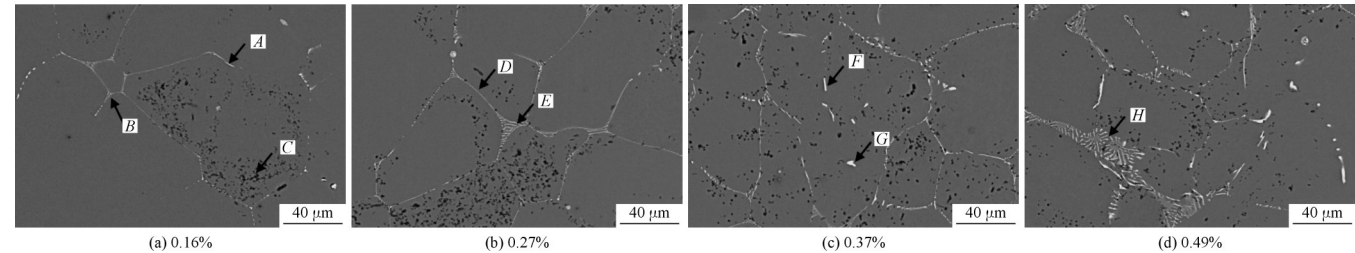


图 2 Fe 含量对工业纯铝第二相形貌的影响

Fig.2 Effect of Fe content on the secondary phase morphology of commercial-purity aluminum

表 2 图 2 中典型第二相的化学组成

Tab.2 Chemical compositions of secondary phases in Fig.2					
测试点	$w_B/\%$				可能物相
	Si	Fe	Ni	Al	
A	—	9.52	0.56	余量	Al_3Fe
B	—	12.05	—	余量	Al_3Fe
C	6.73	—	—	余量	Si
D	—	1.52	—	余量	Al_3Fe
E	—	5.77	—	余量	Al_3Fe
F	—	19.63	—	余量	Al_3Fe
G	2.54	8.50	—	余量	$\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$
H	—	24.61	—	余量	Al_3Fe

采用 Image Pro-Plus 软件对图 2 中富 Fe 相的形态特征进行统计,结果见表 3。可以看出,随 Fe 含量增加,富 Fe 相的面积分数逐渐增加,而平均面积随 Fe 含量的增加而略有增加。当 Fe 含量为 0.49% 时,富 Fe 相的面积分数和平均面积分别达到 3.12% 和 8.52 μm^2 ,较 Fe 合金时的工业纯铝提高了 4.67 倍和 6.2%。当 Fe 含量为 0.27% 时,富 Fe 相的平均面积最大,较 Fe15 工业

表 3 图 2 中典型富 Fe 相的形貌特征统计

Tab.3 Statistics of morphological characteristics of Fe-rich phases in Fig.2			
合金编号	面积分数/%	平均面积/ μm^2	圆整度
Fe15	0.55	8.02 ± 7.96	2.45 ± 1.95
Fe25	1.48	9.04 ± 8.96	2.68 ± 2.58
Fe35	2.24	8.61 ± 8.56	2.75 ± 2.65
Fe50	3.12	8.52 ± 7.54	2.26 ± 1.63

纯铝增加了 12.7%。圆整度用于表征富 Fe 相形状系数,标准圆形的圆整度为 1,偏离标准圆形的程度越大,其圆整度值也越大,紧密度也越低。可见随 Fe 含量的增加,富 Fe 相的圆整度值呈现先增加后降低的趋势,这说明富 Fe 相的紧密度呈现先降低后增加的趋势。当 Fe 含量为 0.49% 时,富 Fe 相的圆整度为 2.26,较 Fe15 提高了 7.8%。由图 2d 可知,Fe50 工业纯铝中的汉字状富 Fe 相由大量的短棒状组成,圆整度较小,而图 2a~图 2c 中粗大针状相和汉字状相圆整度较大,这与表 3 中的数据一致。此外,Fe50 中存在大量的短棒状富 Fe 相,

致使富 Fe 相的平均面积减小。

采用 Image Pro-Plus 软件对图 2 中最大尺寸富 Fe 相的形态特征进行统计,结果见表 4。可以看出,随 Fe 含量增加,最大富 Fe 相的面积和圆整度值都是先增大后减小,当 Fe 含量为 0.37% 时,最大富 Fe 相的面积约为 Fe15 工业纯铝的 2 倍,同时较 Fe50 工业纯铝提高了 80%,而圆整度较其余工业纯铝降低了 50% 以上。

图 3 为不同 Fe 含量工业纯铝的晶粒分布情况。可以看出,Fe 含量对晶粒的形状影响不明显,均存在较大

表 4 图 2 中最大尺寸富 Fe 相的形貌特征统计

Tab.4 Statistics of morphological characteristics of maximum-sized Fe-rich phase in Fig.2

合金编号	面积/ μm^2	圆整度
Fe15	77.7	20.01
Fe25	111.7	20.14
Fe35	160.4	45.42
Fe50	91.1	11.77

尺寸和细小的晶粒,其中 Fe 含量为 0.37% 时,组织均匀性较高,尺寸较小。

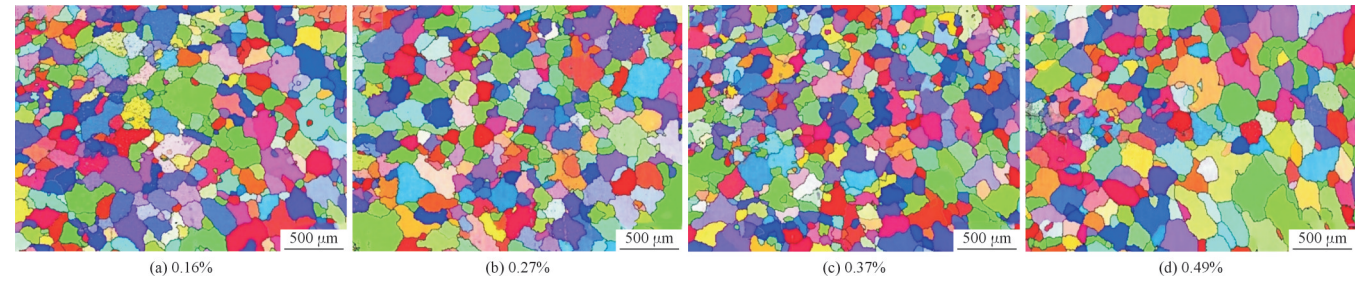


图 3 Fe 含量对工业纯铝晶粒分布的影响

Fig.3 Effect of Fe content on grain distribution in commercial-purity aluminum

对不同 Fe 含量工业纯铝的晶粒分布进行统计,结果见图 4。可以看出,随 Fe 含量增加,小尺寸晶粒的占比增加,晶粒的平均直径也逐渐减小。尤其当 Fe 含量为 0.37%~0.49% 时,平均晶粒直径减小至 110 μm ,较 Fe15 和 Fe25 工业纯铝降低了 18.4%,同时晶粒的分布集中度增加,偏差较小。

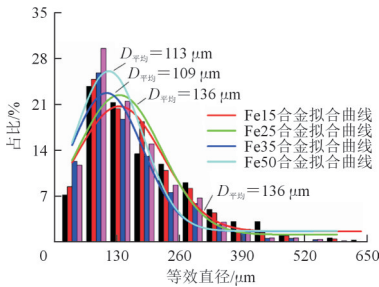


图 4 Fe 含量对工业纯铝晶粒尺寸的影响

Fig.4 Effect of Fe content on grain size of commercial-purity aluminum

2.2 Fe 对工业纯铝力学性能的影响

图 5 为不同 Fe 含量工业纯铝的应力-应变曲线,力学性能见表 5。由图 5 和表 5 可知,随 Fe 含量增加,工业纯铝的抗拉强度和屈服强度逐渐提高,但伸长率呈现先增加后降低的趋势。当 Fe 含量超过 0.37% 时,工业纯铝的强度变化不明显,此时的抗拉强度和屈服强度达到 79 MPa 和 41 MPa,较 Fe15 工业纯铝分别提高了 12.9% 和 11.1%。当 Fe 含量为 0.27% 时,工业纯铝的塑性最佳,其平均伸长率为 48.1%,较 Fe15 工业纯铝提高了 10.6%。当 Fe 含量超过 0.25% 后,工业纯铝的

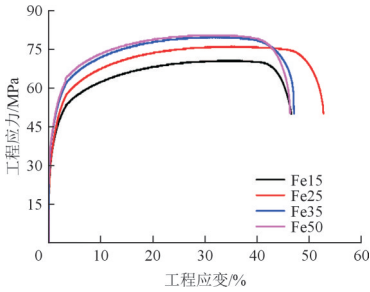


图 5 不同 Fe 含量工业纯铝的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of commercial-purity aluminum with varied Fe contents

表 5 不同 Fe 含量工业纯铝的力学性能

Tab.5 Mechanical properties of commercial-purity aluminum with different Fe contents

合金编号	平均抗拉强度/MPa	平均屈服强度/MPa	平均伸长率/%
Fe15	71 $\pm$ 0.5	36 $\pm$ 0.3	43.5 $\pm$ 2.2
Fe25	76 $\pm$ 0.6	39 $\pm$ 0.8	48.1 $\pm$ 3.3
Fe35	79 $\pm$ 0.7	40 $\pm$ 0.4	45.5 $\pm$ 2.7
Fe50	79 $\pm$ 0.7	41 $\pm$ 0.6	44.9 $\pm$ 1.6

塑性略有降低,但仍较 Fe15 工业纯铝好。此外,同一工业纯铝中不同试样的抗拉强度和屈服强度的误差值极小,这说明强度非常稳定。相比之下,伸长率的变化较大,最高达到了 3.3%,增幅达 6.9%。

图 6 为不同 Fe 含量工业纯铝的拉伸断口形貌。可以看出,断口表面主要由不同尺寸的韧窝和撕裂棱组成,未发现大尺寸的解理面,呈典型的韧性断裂模式,这与工业纯铝良好的伸长率相符。但在图 6a~图 6d 中发现了一些颜色较深的圆形区域,该区域可能是铸造

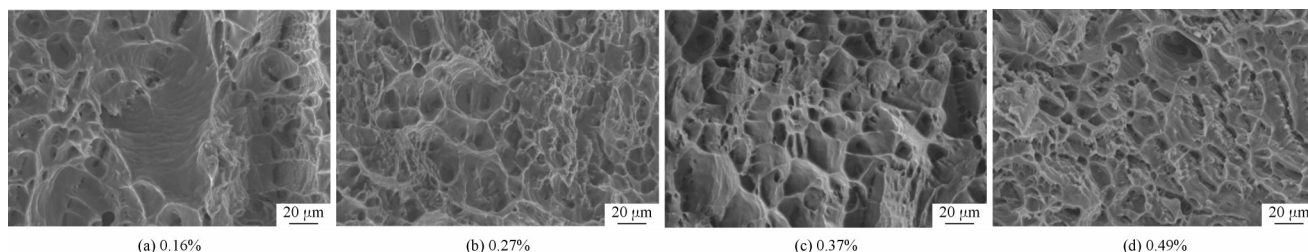


图6 Fe含量对工业纯铝断口形貌的影响

Fig.6 Effect of Fe content on fracture morphologies of commercial-purity aluminum

时留下的气孔,在圆孔周边的基体经过较大的塑性变形,形成了比常规韧窝更深的圆孔。

为了研究富Fe相在断口表面的分布,用背散射模式分析了断口形貌,结果见图7。可以看出,断口表面

主要由灰色的基体和白色的第二相组成,亮白色第二相主要呈细小的颗粒状和短棒状,长度不超过 $5\mu\text{m}$,主要分布在撕裂棱上和韧窝的底部。随Fe含量增加,断口表面的白色物相增多,形态无明显变化。

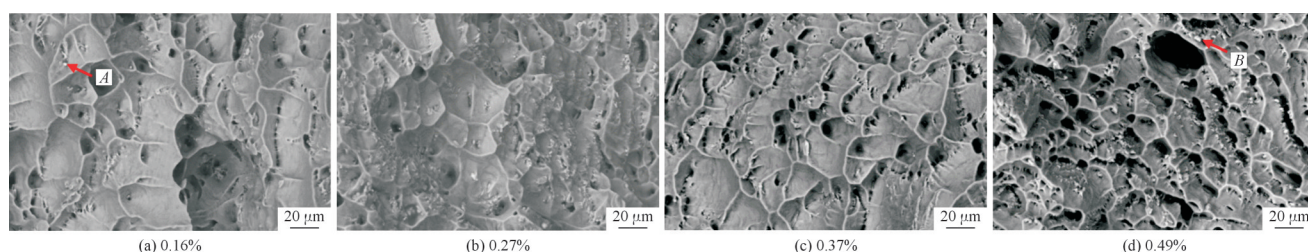


图7 不同Fe含量工业纯铝断口表面的背散射图

Fig.7 BSE images of fracture surfaces in commercial-purity aluminum with different Fe contents

采用EDS能谱仪分析了第二相的化学组成,结果见图8。可以看出,亮白色第二相主要由Al、Fe等元素组成,应为 Al_3Fe 相。随Fe含量增加,富Fe相的元素组成无明显变化,但Fe含量有所提高。特别是,在断口中未发现带有单质Si的质点,这可能是颗粒尺寸太小,未成为裂纹萌生的主要硬质相。

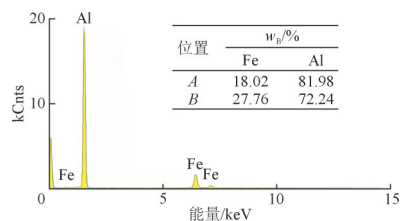


图8 图7中典型第二相能谱和化学组成

Fig.8 EDS and chemical composition of typical secondary phases in Fig.7

3 讨论

3.1 Fe含量对工业纯铝组织的影响机制分析

采用JMat Pro软件分析了不同Fe含量工业纯铝的析出相固相率与凝固温度之间的关系,结果见图9。可以看出,工业纯铝的物相主要由 Al_3M 、 $\alpha\text{-Al}$ 和 Al_3Fe 组成,其中 Al_3M 即为 Al_3Ti ,作为细化剂Al-5Ti-1B引入了0.02%~0.03%的Ti,在 693°C 发生了共晶转变,并在 660°C 时与Al发生了包晶反应,即在 TiB_2 表面形成

一层 Al_3Ti 薄层,并作为Al的形核质点,细化晶粒。随着凝固温度降低,在 654°C 左右发生了 Al_3Fe 的析出。随Fe含量增加, Al_3Fe 的析出温度略有增加,富Fe相的质量分数显著增加。当Fe含量为0.49%时, Al_3Fe 的形成温度和质量分数达到了 654.1°C 和1.26%,分别较Fe15工业纯铝高了 1°C 和0.84%,其中富Fe相质量分

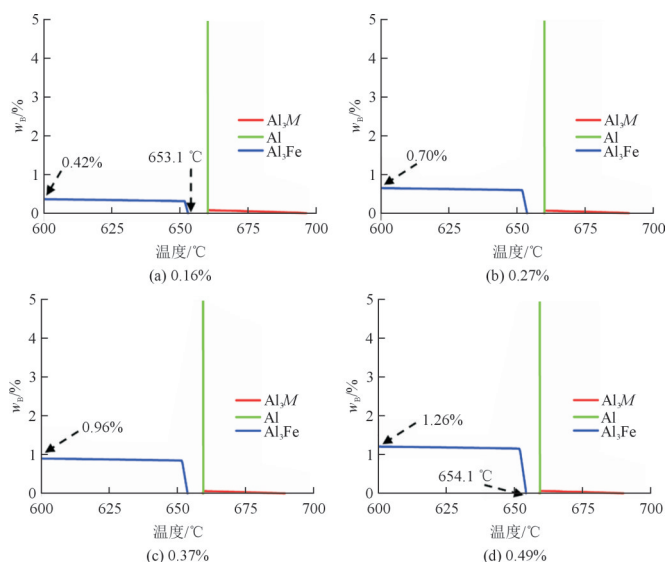


图9 不同Fe含量工业纯铝中析出相质量分数与凝固温度之间的关系

Fig.9 Relation between precipitated phase content with solidification temperature in commercial-purity aluminum with different Fe contents

数的增加趋势与其面积分数一致。高Fe工业纯铝中, Al_3Fe 的形成温度略有提高,形成的 Al_3Fe 压缩了 $\alpha\text{-Al}$ 的生长空间,有利于细化晶粒。此外,更多 Al_3Fe 相的形成限制了富Fe相的生长空间,促进富Fe相短棒状生长,减少了长条针状生长,这也减少了大尺寸气孔的形成,有利于提高工业纯铝的塑性。

3.2 Fe含量对工业纯铝力学性能的影响机制

工业纯铝含有的合金元素少,其产生的强化相也少。由于主要合金元素Fe在铝中的溶解度小,其形成的固溶强化可忽略不计。因此,工业纯铝的强化主要来自于细晶强化和第二相强化。其中细晶强化的效果根据霍尔-佩奇公式(Hall-Petch公式)来解释,即材料的屈服强度随着晶粒尺寸的减小而增加。第二相强化机制主要来自第二相对位错运动的阻碍,通常采用奥罗万机制(Orowan mechanism)来分析,第二相尺寸越细小,体积分数越高,其强化效果越好。基于此强化机制,随Fe含量增加,晶粒细化程度增加,富Fe相的体积分数增加,有利于高Fe含量工业纯铝屈服强度的增加。合金塑性主要取决于工业纯铝的铸造缺陷和第二相的形态与尺寸。当Fe含量较低(0.16%)时,形成的长条针状 Al_3Fe 相阻碍了熔体的流动,易形成缩松缺陷^[20]。当Fe含量增加时,富Fe相的体积分数和尺寸增加,裂纹萌生数量增加,不利于塑性改善。当Fe含量超过0.37%后,富Fe相的平均面积减小,同时形状系数增加,这有利于提高工业纯铝塑性。因此,Fe含量在一定范围内,可以获得塑性良好的工业纯铝,铸造缺陷的减少和富Fe相的细化是保持良好塑性的主要原因。

4 结 论

(1)随Fe含量增加,工业纯铝中的富Fe相面积分数逐渐增加,形貌由针状逐渐向汉字状和短棒状转变。

(2)随Fe含量增加, $\alpha\text{-Al}$ 相的晶粒尺寸略有降低, Al_3Fe 形成温度和质量分数的提高是晶粒尺寸减小的主要原因。

(3)随Fe含量增加,工业纯铝的屈服强度增加,塑性则呈现先增加后降低的趋势。低Fe工业纯铝易形成缩松缺陷,导致塑性降低。富Fe相形貌由狭长针状和粗大汉字状向短棒状转变是高Fe含量工业纯铝保持良好塑性的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 白文昌,王祝堂,毛书波,等.铝在包装中应用的几个问题[J].轻合金加工技术,2008(2):1-6,55.
- [2] 崔利群,李达人,章耀平,等.罐用铝材研究进展[J].材料研究与应用,2018,12(4):244-248.

- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会.喷雾罐用铝材,GB/T 0009-1996[S].
- [4] 刘林林,李志,钟俊辉,等.铝质易拉罐原级回收利用研究进展[J].食品工业,2022,43(9):268-273.
- [5] CAI Y H, SONG D F, ZHAO Y L, et al. Effects of Fe content on the 3D morphology of Fe-rich phases and mechanical properties of cast Al-Mg-Si alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 990: 174 501.
- [6] 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 and Technology, 2020, 51: 54-62.
- [7] YI J, GAO Y, LEE P, et al. Effect of Fe-content on fatigue crack initiation and propagation in a cast aluminum-silicon alloy (A356-T6)[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A386(1-2): 396-407.
- [8] BJURENSTEDT A, GHASSEMALI E, SDIFEDDINE 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, 2019, A756: 502-507.
- [9] CESCHINI L, Morri A, Morri A, et al. Correlation between ultimate tensile strength and solidification microstructure for the sand cast A357 aluminium alloy[J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4 525-4 531.
- [10] CACERES C H, TAYLOR J A. Enhanced ductility in Al-Si-Cu-Mg foundry alloys with high Si content[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2006, B37(6): 897-903.
- [11] TAYLOR J A, JOHN D H S, BARRESI J, et al. An empirical analysis of trends in mechanical properties of T6 heat treated Al-Si-Mg casting alloys[J]. Cast Metals, 2000, 12(6): 419-430.
- [12] 陈胜迁,陈立,陈涛,等.Fe含量对Al-Si合金热挤压组织和性能的影响[J].塑性工程学报,2020,27(1):96-102.
- [13] 徐道芬,陈康华,陈运强,等.Fe对2219铝合金锻件组织与性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(6):116-124.
- [14] 刘惠,付伟磊,陈宗强,等.Fe含量对Al-Mg-Si合金微观组织和力学性能的影响[J].航空材料学报,2023,43(3):32-41.
- [15] 林波,张卫文.Fe含量对挤压铸造Al-Cu合金组织演变及高温力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2017,27(5):885-893.
- [16] 何项项,林波,范滔,等.Fe含量对挤压铸造Al-Zn-Mg-Cu合金组织和力学性能的影响[J].材料热处理学报,2021,42(12):44-52.
- [17] 周玉立,张俊超,林师朋,等.Fe含量对铸造铝合金导热和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(4):416-419.
- [18] 杨宁源,周慧慧,张志豪.Fe含量对Al-1.04Mg-0.64Si-0.23Cu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.
- [19] YANG D Y, SONG D F, TANG C Y, et al. The 3D morphology morphological evolution of Fe-rich phase and mechanical properties in recyclable A356 alloy[J]. Materials Today Communications, 2024,41:110 425.
- [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 I. Initial experimental observations[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1999, A30:1 643-1 650.

(编辑:陈志辉)