

# 一体压铸用免热处理铝合金自主研发及应用

张鑫 高洪雷 李伟 国志鹏 徐成林

(一汽解放汽车有限公司, 长春 130011)

**摘要:**为获得性能优异的一体压铸用免热处理铝合金,通过调整合金中各元素的质量分数,设计出3种不同成分比例的Al-Si系免热处理铝合金,采用差示扫描量热仪(DSC)、金相显微镜、扫描电镜、拉伸试验机和电磁共振式疲劳试验机对3种合金的熔化温度区间、组织相构成、断口形貌、拉伸与疲劳性能进行分析,结果表明,2#合金的熔化温度区间为55℃,抗拉强度、屈服强度、断后伸长率分别为303 MPa、153 MPa、11.3%,在 $1 \times 10^7$ 循环周次下的轴向压缩疲劳强度均值为125 MPa,因此,2#合金具有良好的铸造流动性、金相组织、强韧综合性能与铸造工艺性,且疲劳性能优于汽车行业普遍应用的AlSi9Cu3(Fe)压铸合金。

**关键词:**免热处理铝合金 高真空压铸 力学性能 组织形貌

中图分类号:U465.2 文献标志码:B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240370

## Development and Application of Heat-Treatment Free Aluminum Alloy for Integrated Die-Casting

Zhang Xin, Gao Honglei, Li Wei, Guo Zhipeng, Xu Chenglin

(FAW Jiefang Automobile Co., Ltd., Changchun 130011)

**Abstract:** To obtain high-performance heat-treated free aluminum alloys, 3 kinds of Al-Si based heat-treated free aluminum alloys with different composition ratios are designed by adjusting the mass fractions of each element in the alloy. The melting temperature range, structure phase composition, fracture morphology, tensile and fatigue performance of 3 kind of alloys are analyzed by using Differential Scanning Calorimeter (DSC), metallographic microscope, scanning electron microscope, tensile testing machine and electromagnetic resonance fatigue testing machine. The results show that 2# alloy has good casting fluidity, metallographic structure, comprehensive strength and toughness properties and casting manufacturability, with a melting temperature range of 55 °C, the tensile strength, yield strength and elongation rate at break are 303 MPa, 153 MPa and 11.3%, respectively. The average axial tensile compressive fatigue strength at  $1 \times 10^7$  cycles is 125 MPa, which is superior to the fatigue performance of AlSi9Cu3 (Fe) die-casting alloy commonly applied in the automotive industry.

**Key words:** Heat-treatment free aluminum alloy, High vacuum die-casting, Mechanical properties, Microstructure

## 1 前言

免热处理铝合金按合金体系主要分为Al-Si系和Al-Mg系。其中,Al-Si系具有良好的铸造工艺性,行业应用广泛,例如美铝C611、德国莱茵Castasil-37和麦格纳公司的Aural 2、Aural 3、Aural 5

等。Al-Si系免热处理铝合金已应用于奥迪A8、保时捷Cayenne等高端车型的减震塔、扭转盒、车顶横梁等零件中<sup>[1]</sup>。但免热处理铝合金仅在部分高端乘用车企业和压铸行业有所应用,在汽车行业应用范围有限。2019年,特斯拉发布一体化车身压铸成型技术,并于2020年应用于Model Y车型的

作者简介:张鑫(1985—),男,高级工程师,硕士学位,研究方向为汽车新材料开发。

参考文献引用格式:

张鑫,高洪雷,李伟,等.一体压铸用免热处理铝合金自主研发及应用[J].汽车工艺与材料,2025(1):23-29.

ZHANG X, GAO H L, LI W, et al. Development and Application of Heat-Treatment Free Aluminum Alloy for Integrated Die-Casting[J]. Automobile Technology & Material, 2025(1): 23-29.

后底板总成,引起汽车行业对一体化压铸技术的持续关注。

传统压铸技术将铝合金零件铸造成型后需进行热处理以提高零件的强韧性。而使用免热处理铝合金制备的压铸件无需热处理即可获得较高强度和超高塑性,免热处理铝合金具有以下优势:减少铝合金压铸件的工序,缩短压铸铝件制造周期,节约生产成本;规避热处理导致大型薄壁压铸铝件变形、废品率提升的问题;铸态下具有超高塑性,能够满足压铸铝件铆接等连接需求。本文通过调整铝合金中元素质量分数,以期获得性能优异的免热处理铝合金。

## 2 试验材料与试验方法

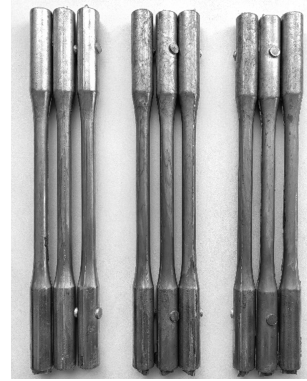
### 2.1 试样制备

综合考虑铝合金材料的成分、组织、工艺和性能,设计出3种不同成分比例的Al-Si系免热处理铝合金,其元素构成与质量分数如表1所示。

表1 3款免热处理铝合金质量分数			
元素	1#合金	2#合金	3#合金
Si	A		
Mg	B	B+0.1%	B+0.2%
Cu	C	C	C+(0.2%~0.4%)
Fe	≤0.3%		
Mn	0.3%~0.8%		
Cr	≤0.4%		
Sr	≤0.3%		
其他元素	≤0.2%	≤0.4%	≤0.4%

注:A、B、C分别代表Si、Mg、Cu的某一特定质量分数范围。

将表1中的3种铝合金材料依次放入电炉中,在温度为680~730℃的区间内熔炼,当合金完全熔化均匀后加入精炼剂,并在保持温度不变的条件下,使用氩气对合金液进行精炼除气,时间为5~15 min,随后采用高真空压力铸造方法将除气后的Al-Si合金液制备压铸试棒和板状试样,用于金相组织与力学性能分析。其中,压铸试棒规格执行GB/T 13822—2017《压铸有色合金试样》中的A型拉力试样<sup>[2]</sup>,其形貌如图1所示。板状试样规格为80 mm×200 mm,厚度为4 mm,形貌如图2所示。



1#合金 2#合金 3#合金

图1 压铸试棒形貌



图2 板状试样形貌

### 2.2 试验方法

试验采用NETZSCH DSC 204F1 Phoenix 差示扫描量热仪(Differential Scanning Calorimeter, DSC)对3种的压铸试棒进行热分析。为防止合金氧化,试验全程使用流速为50 mL/min的氮气作为保护气。使用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>坩埚,以10℃/min的平均升温速度由室温升温至670℃并保温5 min,再以10℃/min的平均降温速度降至室温,试验结束。

采用OLYMPUS金相显微镜、ZEISS场发射扫描电镜对压铸试棒进行金相组织、显微组织和断口形貌分析。采用MTS拉伸试验机对压铸试棒进行力学性能分析,拉伸速度为2 mm/min。

在2#合金的板状试样上制取漏斗型疲劳试样,试样规格按GB/T 3075—2008《金属材料疲劳试验 轴向力控制方法》中的图4b执行<sup>[3]</sup>。采用RMMUL Testronic 100 kN电磁共振式疲劳试验机,设置疲劳应力比R=-1、载荷波形为正弦波,测试2#合金在循环周次1×10<sup>7</sup>下的疲劳极限和应力-寿命(S-N)曲线。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 DSC分析

图3为3种压铸试棒的DSC曲线,3种试棒的DSC曲线均出现2个吸热峰:低温吸热峰的峰值温度约为593~594 °C,峰形高且尖锐,峰形下方面积较大,表明熔化吸收热量较多;高温吸热峰的峰值温度为612~618 °C,峰形相对较矮且平缓,峰形下方面积较小,表明熔化吸热相对较少。结合Al-Si相图<sup>[4]</sup>、低温及高温吸热峰温度范围、峰形下方面积分析可知:

- a. 低温吸热峰由Al-Si合金样品内低熔点共晶物熔化吸热形成。
- b. 高温吸热峰由样品内的 $\alpha$ -Al固溶体熔化吸热形成。
- c. 3种样品的共晶物熔化所吸收的热量比 $\alpha$ -Al固溶体熔化更多。

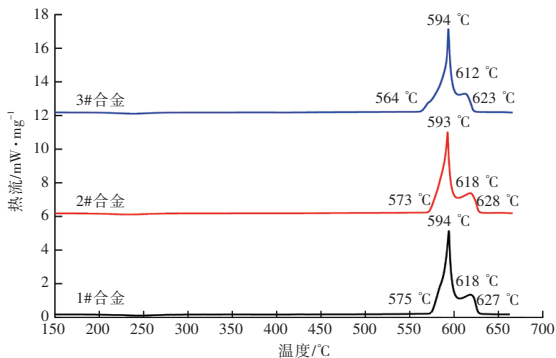


图3 3种铝合金试棒DSC曲线

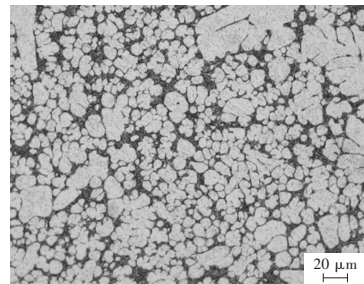
3种铝合金熔化温度区间为52~59 °C(见表2),与汽车行业普遍应用的YL112压铸铝合金熔化温度区间(55 °C)<sup>[5]</sup>基本相同,表明新设计的3种铝合金具有较好的铸造流动性。

类别	熔化起始温度	共晶熔化峰值	初生 $\alpha$ -Al熔化峰值	熔化终止温度	熔化区间
1#	575	594	618	627	52
2#	573	593	618	628	55
3#	564	594	612	623	59
YL112 <sup>[5]</sup>	538			593	55

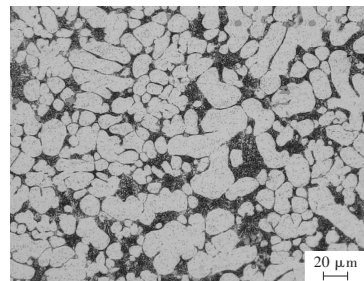
#### 3.2 金相组织与微观相形貌分析

图4为3种铝合金铸态下的金相组织,3种铝

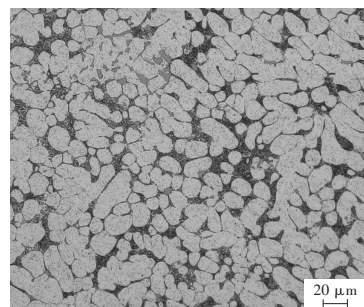
合金金相组织主要为 $\alpha$ -Al固溶体、分布在 $\alpha$ -Al固溶体间的共晶硅以及少量Al(Mn,Cr,Fe)Si等第二相。 $\alpha$ -Al固溶体有2种形态:一是粗大的条块状枝晶,该形态是由于铝液倒入压铸机料柄并接触料柄壁降温形核产生的,铝液在料柄内短暂停留,晶粒轻微长大;二是细小圆状,铝液在压铸充型时快速充填,在接触模具的瞬间快速形核凝固,晶粒难以长大,在模具型腔内形成细小圆状晶粒。



(a)1#合金



(b)2#合金



(c)3#合金

图4 金相组织

3种铝合金内的共晶硅均变质良好。二维下观察,共晶硅呈细小粒状、短杆状,粒径 $\leq 1 \mu\text{m}$ ,未见大块及条状共晶硅形态(图4、图5a)。将部分 $\alpha$ -Al固溶体腐蚀掉,可观察到共晶硅三维形态呈相互连接的细小羽毛状(图5b),每条“羽毛”分枝直径约为 $0.3 \mu\text{m}$ 。由于共晶硅的硬度和脆性均高于 $\alpha$ -Al固溶体,当铝合金中存在大块条状共晶硅时,会割裂基体导致材料塑性降低。因此,细化、粒化共晶硅有利于提升材料塑性。

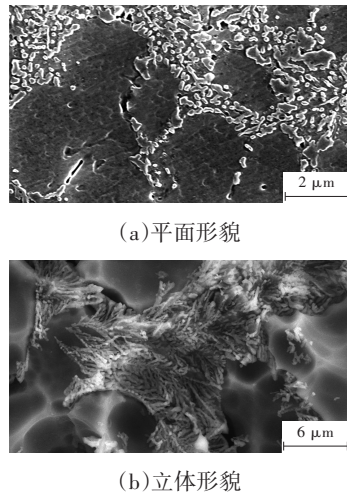


图5 自主开发合金共晶硅形貌

一般铸造铝合金中的针状或长条状β-Fe相会大幅降低铝合金塑性。在自主设计的铝合金原料中添加少量Mn、Cr元素,可将可能出现的针状β-Fe相调整为分布在α-Al固溶体上的少量呈汉字状、多边形形状的Al(Mn,Cr,Fe)Si相,从而提高铝合金塑性,如图6所示。图6中A点、B点成份如表3所示。

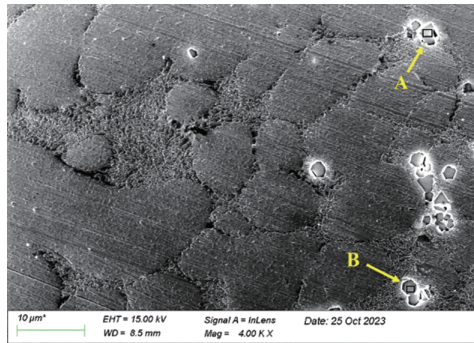


图6 自主开发合金Al(Mn,Cr,Fe)Si相成分与形貌特征

表3 各点成份

元素	Al	Si	Cr	Mn	Fe	总量	
A点	质量分数	78.77	8.15	1.46	9.58	2.03	100.00
	原子分数	84.65	8.42	0.81	5.06	1.06	100.00
B点	质量分数	70.31	9.38	2.26	14.91	3.14	100.00
	原子分数	78.70	10.09	1.31	8.20	1.70	100.00

### 3.3 力学性能与断口形貌分析

3种新设计的铝合金压铸试棒拉伸试验结果与2种传统铝合金的对比如表4所示。为确保试验结论的可靠性,新开发的铝合金压铸试棒每种选择5个样品进行试验,并取各项均值。

表4 压铸试棒力学性能对比

类别	试样	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率/%
1#合金	1	289.7	131.6	13.8
	2	288.1	131.7	12.7
	3	291.7	135.0	13.5
	4	292.1	132.5	13.1
	5	295.1	136.8	12.4
	均值	291	134	13.1
2#合金	1	304.8	155.7	11.3
	2	306.0	155.2	11.2
	3	299.0	151.0	11.7
	4	306.5	152.2	11.8
	5	300.0	152.0	10.7
	均值	303	153	11.3
3#合金	1	312.3	158.7	6.3
	2	317.8	156.8	8.4
	3	311.0	163.0	6.1
	4	315.0	162.0	9.2
	5	315.0	163.0	8.6
	均值	314	161	7.7
A380 <sup>[7]</sup>		320.4		2.8
YL112 <sup>[7]</sup>		328.3		2.5

由表4可知,新开发的3款铝合金抗拉强度虽略低于传统铝合金A380和YL112,但其断后伸长率比A380和YL112提升200%以上,具有更好的塑性。图7为新开发的3款铝合金与传统铝合金压铸试棒的抗弯曲形貌对比,传统铝合金YL112和A380的压铸试棒分别在弯曲30°、38°时发生断裂,自主开发的铝合金1#、铝合金2#、铝合金3#压铸试棒分别弯曲至150°、125°和90°时仍未断裂,表现出更好的抗弯曲性能和塑性变形能力。

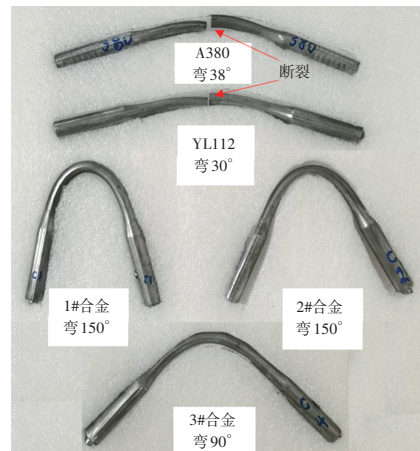


图7 压铸铝合金的抗弯曲性能对比

为满足压铸铝件自冲铆连接的工艺需求,一般要求一体压铸用免热处理铝合金断后伸长率 $\geq 10\%$ <sup>[6]</sup>。

由表4可知,1#合金的断后伸长率最高,均值为13.1%,但其抗拉和屈服强度相对较低,均值分别为291 MPa、134 MPa。2#合金与1#合金各元素质量分数相比,仅Mg元素和其他微量元素的质量分数有所提高,2#合金的抗拉强度和屈服强度分别比1#合金提升了约4.1%和14%,且2#合金5个样品的断后伸长率均高于10%,均值为11.3%,表现出优异的综合力学性能。相比于2#铝合金,3#铝合金进一步提升了Mg、Cu的质量分数,3#铝合金的抗拉强度、屈服强度的均值提升至314 MPa、161 MPa,但其断后伸长率降至7.7%。3#铝合金虽具有最高的强度,但断后伸长率 $< 10\%$ ,难以满足后续压铸铝件的连接需求。图8为新开发的3种铝合金压铸试棒应力与应变关系曲线,图中1#-1曲线表示表4中1#合金1试样的应力应变曲线,其余以此类推。

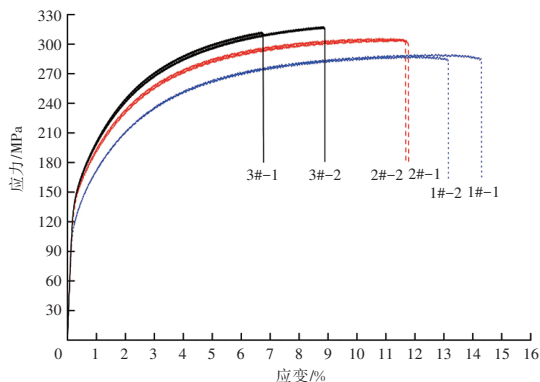
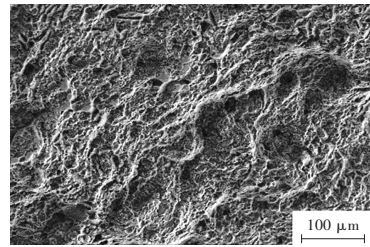
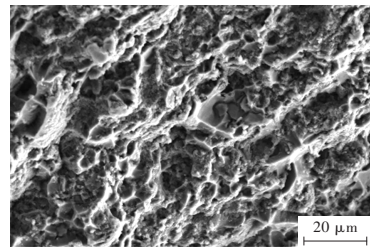


图8 3种铝合金压铸试棒应力-应变曲线

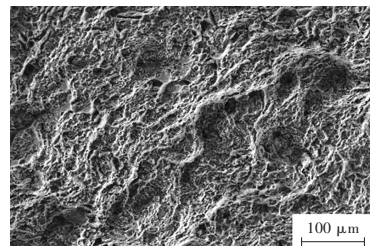
分析3种铝合金压铸试棒的拉伸断口形貌可知,1#合金断口布满韧窝,呈典型韧性断裂(图9a、图9b),此外,1#合金断口上可见多处因 $\alpha$ -Al基体塑性变形产生的“山脊”状形貌,表明 $\alpha$ -Al基体塑性变形能力会影响铝合金的断后伸长率。2#合金断口存在韧窝与 $\alpha$ -Al基体塑性变形产生的“山脊”状形貌,局部区域可见准解理形态(图9c、图9d),表明2#合金的塑性变形能力较1#合金有所下降。3#合金断口的准解理形貌占比进一步升高,并出现2次裂纹形态,表明3#合金的塑性变形能力持续降低(图9e、图9f)。3种合金的断口形貌特征与表4中材料的断后伸长率变化趋势一致。



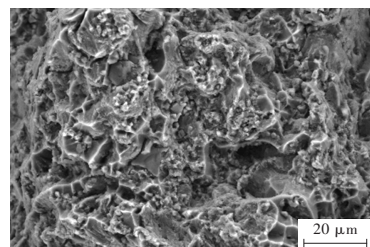
(a)1#合金(500 $\times$ )



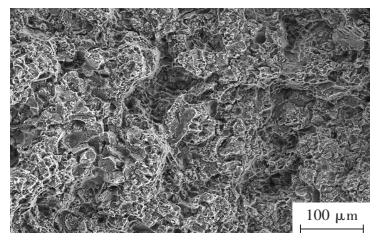
(b)1#合金(2000 $\times$ )



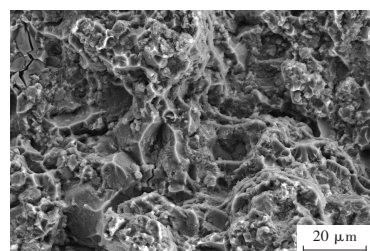
(c)2#合金(500 $\times$ )



(d)2#合金(2000 $\times$ )



(e)3#合金(500 $\times$ )



(f)3#合金(2000 $\times$ )

图9 3种铝合金压铸试棒断口形貌

### 3.4 疲劳性能分析

综上所述,3种铝合金中,2#铝合金具有最优的强韧综合性能,因此,选取2#铝合金开展疲劳性能分析与后续产品应用验证。

经疲劳测试与数据分析,2#铝合金在循环周次为 $1 \times 10^7$ 次时的疲劳强度平均值 $\hat{\mu}_y=125$  MPa,标准偏差 $\hat{\sigma}_y=2.65$  MPa。轴向拉压S-N曲线如图10所示。

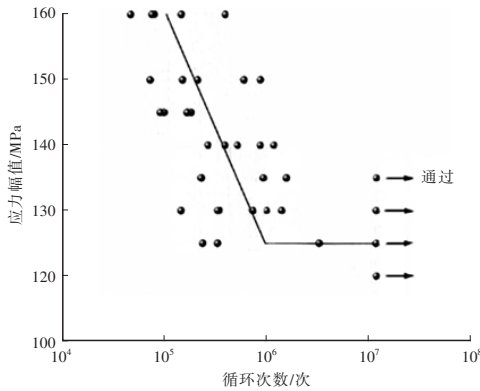


图 10 2#合金轴向拉压S-N曲线

按GB/T 24176—2009《金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法》,采用公式(1)<sup>[8]</sup>估算2#合金在不同置信度(1- $\alpha$ )、存活概率 $p$ 下的疲劳强度 $\hat{y}_{(p,1-\alpha)}$ ,计算结果如表5所示。

$$\hat{y}_{(p,1-\alpha)} = \hat{\mu}_y - k_{(p,1-\alpha,v)} \hat{\sigma}_y \quad (1)$$

式中:系数 $k_{(p,1-\alpha,v)}$ 为正态分布单边误差限; $v$ 为自由度,可通过查不同概率下的正态分布单边误差限系数表获得。

表 5 2#铝合金不同置信度、存活率的疲劳强度估算值

条件	疲劳强度/MPa
置信度 0.5, 存活率 0.5	125
置信度 0.9, 存活率 0.9	118
置信度 0.95, 存活率 0.95	115

汽车行业常用的压铸铝合金有YL112、YL113、A380和AlSi9Cu3(Fe)等。Péter Szalva等研究了AlSi9Cu3(Fe)在轴向拉压载荷下、应力比 $R=-1$ 时的S-N曲线,如图11所示<sup>[9]</sup>,当循环周次为 $1 \times 10^6$ 时,AlSi9Cu3(Fe)的疲劳强度平均值 $\hat{\mu}_y$ 为120~130 MPa。2#铝合金在更高循环周次( $1 \times 10^7$ )下的疲劳强度平均值 $\hat{\mu}_y=125$  MPa,故2#合金具有更好的疲劳性能。

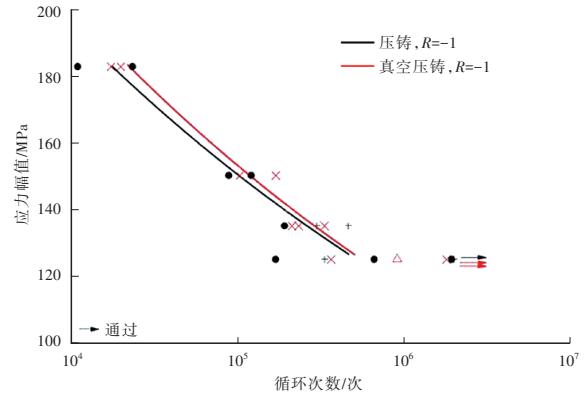


图 11 AlSi9Cu3(Fe)轴向拉压S-N曲线<sup>[9]</sup>

### 4 应用验证

在高真空压铸工艺下使用2#铝合金制备电池包壳体,验证评估2#铝合金的铸造工艺性与零件本体力学性能。

经试制,2#铝合金在合金熔炼与电池包壳体压铸生产过程中的铸造工艺性表现良好。如图12所示,压铸的电池包壳体零件外观、尺寸满足设计要求,未见冷隔、裂纹、缩孔和浇不足等缺陷。对零件进行X射线探伤以及剖切观察,零件内部组织较为致密,但局部加强筋处存在缩孔、缩松。

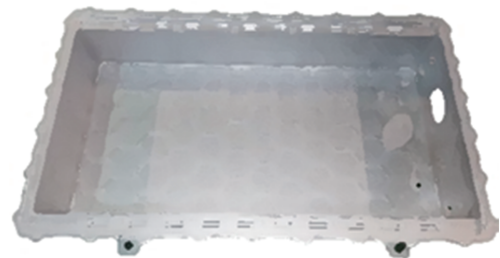


图 12 2#铝合金压铸电池包壳体

在电池包壳侧框处取样,进行零件本体的力学性能分析,检测结果如表6、图13所示。与前述2#铝合金压铸试棒力学性能(表4)对比可知,电池包壳体本体取样的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别约为压铸试棒性能的90%、96%和72%。零件本体样品的抗拉强度降低约10%,屈服强度较压铸试棒降低约4%,但断后伸长率大幅度降低约30%。经分析,原因为电池包壳体尺寸较大(长度约1 m)以及压铸工艺参数设置(压射速度、压射比、模温控制等),电池包壳体压铸时,铝液充型过程卷气与冷却凝固条件均较压铸试棒恶化,造成电池包壳体本体组织的致密性与一

致性均低于压铸试棒,降低了力学性能。由于铝合金的断后伸长率对组织致密性、一致性与铸造缺陷最为敏感,故降幅最大。后续压铸铝件开发时需重点关注压铸铝件本体与压铸试棒间力学性能的差异,尤其是断后伸长率的变化对压铸铝件使用性能的影响。提前进行零件结构及压铸工艺优化,实现铸件顺序凝固可获得良好强韧性能。

表 6 电池包壳体力学性能

试样编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率/%
1	274.5	149.6	8.5
2	278.9	155.0	6.7
3	267.2	139.8	8.9
4	270.6	142.5	8.4
均值	272.8	146.7	8.1

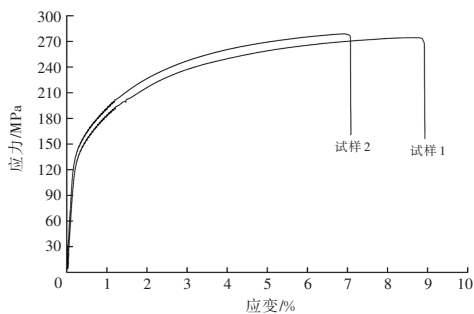


图 13 2#合金电池包壳体拉伸应力-应变曲线

## 5 结论

a. 1#铝合金具有高塑性(断后伸长率为13.1%),但抗拉强度、屈服强度略低,不利于产品可靠性与轻量化设计;3#铝合金抗拉强度、屈服强度较高,但塑性不足(断后伸长率为7.7%),难以满足压铸铝件自冲铆连接需求;2#铝合金具有优秀的强韧综合性能,其抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为303 MPa、153 MPa和11.3%。此外,与A380、YL112等铝合金相比,2#铝合金抗拉强度降低7.7%,但断后伸长率提升400%。

b. 2#铝合金熔化温度区间为55℃,与YL112压铸铝合金熔化温度区间持平,具有较好的铸造流动性。

c. 2#铝合金的金相组织主要为α-Al固溶体+

分布在α-Al固溶体间的共晶硅+少量Al(Mn,Cr,Fe)Si等第二相。其中,共晶硅平面形貌为细小粒状、短杆状,粒径≤1 μm;立体形貌呈相互连接的“细小羽毛状”。组织中无影响材料塑性的大块及条状共晶硅。2#铝合金还存在少量汉字状、多边形分布的Al(Mn,Cr,Fe)Si相,未见针状及长条状β-Fe相。

d. 2#合金在循环周次为1×10<sup>7</sup>的轴向拉压测试条件下,疲劳强度均值 $\hat{\mu}_y=125$  MPa,疲劳性能优于AlSi9Cu3(Fe)合金。

e. 采用2#合金试制的电池包壳体拉伸性能分析表明,零件本体抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别约为压铸试棒性能的90%、96%和72%。未来汽车行业的免热处理铝合金将向更高强韧性能、更低成本与回炉料循环利用等趋势发展。

### 参考文献:

- [1] Primary Aluminium Casting Alloys. Rheinfelden Alloys [EB/OL].[2024-03-26]. [https://rheinfelden-alloys.eu/wp-content/uploads/2017/01/Handbook-Primary-Aluminium-Casting-Alloys\\_RHEINFELDEN-ALLOYS\\_2016\\_EN.pdf](https://rheinfelden-alloys.eu/wp-content/uploads/2017/01/Handbook-Primary-Aluminium-Casting-Alloys_RHEINFELDEN-ALLOYS_2016_EN.pdf).
- [2] 全国铸造标准化技术委员会. 压铸有色合金试样: GB/T 13822—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [3] 中国钢铁工业协会. 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法: GB/T 3075—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 李念奎, 凌泉, 聂波, 等. 铝合金材料及其热处理技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019: 65.
- [5] 田荣璋. 铸造铝合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006: 81.
- [6] 段宏强, 韩志勇, 王斌. 汽车结构件用非热处理压铸铝合金研究进展[J]. 汽车工艺与材料, 2022(5): 1-6.
- [7] 张鑫, 李伟, 乔小兵, 等. 3种典型Al-Si-Cu系压铸铝合金耐腐蚀性能研究[J]. 汽车工艺与材料, 2022(5): 7-12.
- [8] 中国钢铁工业协会. 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法: GB/T 24176—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] SZALVA P, ORBULOV I N. Fatigue Testing and Non-Destructive Characterization of AlSi9Cu3(Fe) Die Cast Specimens by Computer Tomography[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 43(9): 1949-1958.