

高强韧铝硅合金变速箱中间板压铸件 热处理工艺研究

李文巧¹, 袁海波², 马 溶¹, 陈 涛³, 钱运亮¹, 杨召岭¹, 李 楠²

(1. 东风(十堰)有色铸件有限公司, 湖北十堰 442062; 2. 东风商用车有限公司技术中心工艺研究所, 湖北武汉 430056; 3. 东风格特拉克汽车变速箱有限公司, 湖北武汉 430056)

摘要: 为了提高铝硅合金变速箱中间板压铸件力学性能, 采用正交实验方法研究了高强韧压铸铝合金Silafont36的热处理工艺。结果表明: 影响抗拉强度和屈服强度的因素依次为固溶温度、时效时间、时效温度和固溶时间; 影响伸长率的因素依次为时效温度、固溶温度、固溶时间和时效时间。经实验和生产验证, 变速箱中间板采用的最佳热处理工艺参数为 $495\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h} + 180\text{ }^{\circ}\text{C} \times 3.5\text{ h}$; 同时发现, 压铸工艺参数中的真空度对铸件伸长率有显著影响。

关键词: 高强韧; 铝硅合金; 压铸件; 热处理工艺

作为应用于汽车的金属材料, 铝合金以其密度小、强度高、铸造成形性和机械加工性能优良等优点, 被广泛应用到汽车动力总成以及底盘系统零部件, 成为汽车轻量化重要解决方案之一。然而在汽车轻量化中不能牺牲其可靠耐久等关键特性, 因此仅具有中等力学性能的铸态铝合金零件面临着严峻挑战, 零件优化设计与材料工艺强化技术是目前广泛采取的应对策略^[1-5]。其中, 为进一步提高占汽车应用铝量约70%以上的压铸铝合金件力学性能, 开发出新的高强韧压铸合金、各种致密化新工艺(如超低速压铸、充氧压铸和高真空压铸、半固态压铸等)。致密化新工艺有助于解决因内部气孔等缺陷造成无法热处理的弊端, 实现压铸铝合金件的热处理强化, 从而获得良好的综合力学性能^[6-10]。

Silafont36铝合金是德国Rheinfelden公司开发的Al-Si系压铸合金。为获得良好的强韧性, 该合金严格控制Fe含量在0.15%以下, 并添加0.01%~0.02%的Sr对共晶硅变质处理。此外, 采用该合金在高真空压铸工艺下成形的铸件可进一步通过热处理获得更加优良的力学性能^[11]。本文采用该合金进行高真空压铸成形某型变速箱中间板铸件, 研究了最佳热处理工艺, 使铸件获得良好的综合性能, 满足了该铸件技术要求。

1 合金成分及性能要求

某型变速箱中间板铸件外形尺寸约为 $350\text{ mm} \times 240\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 平均壁厚约6.5 mm, 最小壁厚仅2 mm, 如图1所示。该铸件为重要承载件, 主轴孔处承受轴向和周向动载荷, 外侧承受部分弯矩, 长期处于交变载荷作用, 铸件要求具有良好的疲劳性能。其本体力学性能要求极限抗拉强度 $\geq 290\text{ MPa}$, 屈服强度 $\geq 230\text{ MPa}$, 伸长率 $\geq 5\%$ 。综合分析铸件壁厚特征和工况条件、性能要求等, 该铸件选用高强韧压铸合金Silafont36,

其主要化学成分要求及铸件本体实测成分如表1所示。采取高真空压铸工艺并结合T6热处理达到铸件本体力学性能要求。由于铸件形状复杂, 壁厚不均, 无法从铸件本体取拉伸试样, 因此设计了附铸试样用于对照铸件本体力学性能, 附铸试样外形及其位置如图1箭头所示。

作者简介:

李文巧(1971-), 女, 高级工程师, 学士, 主要从事有色金属铸造工艺及工装设计。E-mail: 402520439@qq.com

中图分类号: TG166.3

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2019)

12-1382-05

收稿日期:

2019-09-03 收到初稿,

2019-10-17 收到修订稿。

2 铸件热处理工艺制定

与普通真空压铸工艺相比,高真空压铸工艺型腔内绝对压力低于5 kPa,每100 g铸件内气体含量仅为1~3 mL,可实现压铸件的热处理和焊接。此外,压铸合金在高速充型和快速冷却条件下获得细小的铸态组织,不仅有效提高铸件本体抗拉强度和伸长率,而且更能发挥热处理强韧化潜能,进一步提高铸件强度和韧性。Silafont36合金高真空压铸铸态试棒力学性能的测试结果为:抗拉强度 R_m 平均为279 MPa,屈服强度 $R_{p0.2}$ 平均为155 MPa,伸长率 A 平均为3.1%。其铸态试样金相组织为细小的近球形 α 相+极细颗粒状共晶硅+少量合金相,如图2所示。尽管其铸态试样的力学性能指标未达到高强韧要求,但其铸态组织表明该材料极具通过后续热处理强化进一步提高其综合力学性能的可能。

通常,铸造铝合金热处理强化主要包括固溶和时

效处理,其中T6处理(固溶+完全人工时效)是最常用的改善铸件综合力学性能的有效热处理工艺。在该工艺过程中,主要有固溶温度、固溶时间、时效温度和时效时间四个重要影响工艺参数。通过对工艺参数的优化组合可获得所希望的铸件综合性能。

一般地,固溶温度越高,固溶冷却速度越快,中间转移时间越短,所获得的固溶体过饱和程度越大,时效强化效果越大,铸件力学性能得到大幅度提高。固溶保温时间是保证粗大合金相充分溶入到基体从而获得足够的过饱和固溶体组织的重要参数。时效温度和时效时间决定了第二相从过饱和固溶体中均匀析出与沉淀,这种扩散型的固态相变实现基体组织的强化,从而获得不同的综合力学性能^[12]。

由于压铸铝合金Silafont36是以 Mg_2Si 为主要强化相的Al-Si系合金,且压铸组织细小,因此其固溶温度比金属型和砂型铸造工艺下的类似合金低,固溶时间也

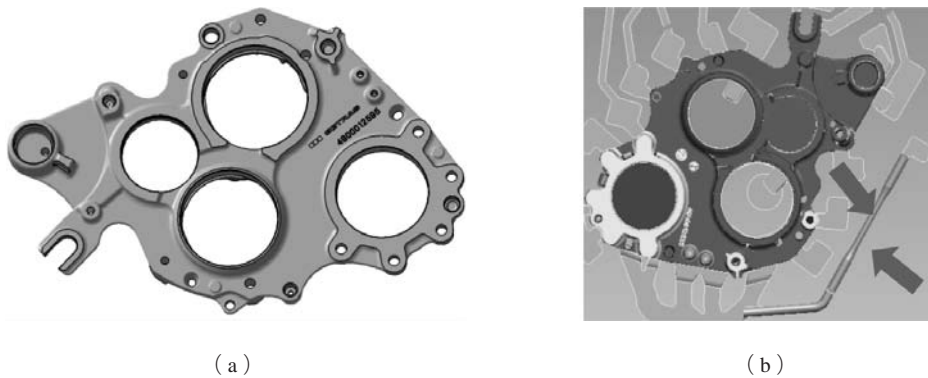
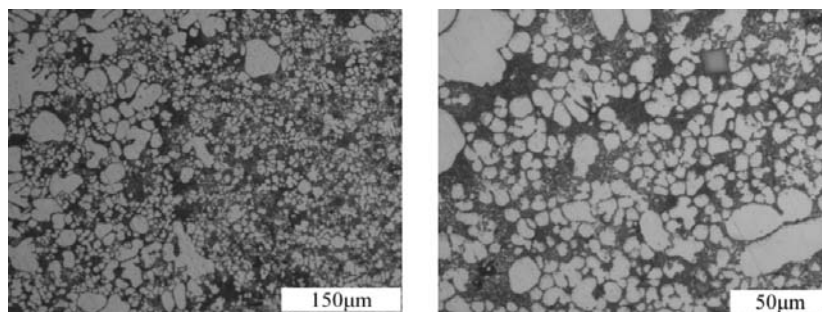


图1 变速箱中间板铸件轮廓及其附铸试样外形

Fig. 1 The contour of gearbox intermediate plate and the shape of cast-on sample

表1 Silafont36 (AlSi9MgMn) 压铸中间板铸件化学成分
Table 1 Chemical composition of die-cast Silafont36 alloy intermediate plate castings

项目	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Ti	Sr	Al	$w_B/\%$
要求值	9.5~11.5	0.1~0.5	0.5~0.8	≤0.15	0.03	0.04~0.15	0.01~0.02	余量	
实测值	10.2	0.38	0.59	0.11	≤0.01	0.07	0.013	-	



(a) 低倍 (b) 高倍

图2 压铸合金Silafont36铸态金相组织

Fig. 2 Metallographic structure of as-cast Silafont36 alloy

相对较短。然而，其最佳热处理工艺参数的确定采用正交试验法是最为经济和有效的方法。本研究中通过对正交试验确定出该铸件的最佳热处理工艺。

2.1 热处理正交试验

通过对Silafont36合金热处理主要影响因素固溶温度、固溶时间、时效温度、时效时间的分析，结合该合金热处理前期研究成果，采用正交 $L_9(3^4)$ 进行试验。其正交试验因素水平如表2所示，正交试验结果见表3。

根据表3，针对抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{p0.2}$ 和伸长率 A 的极差分析结果可见：影响 R_m 、 $R_{p0.2}$ 的因素排序：固溶温度>时效时间>时效温度>固溶时间；影响伸长率 A 的因素排序：时效温度>固溶温度>固溶时间>时效时间。因此，获得最佳抗拉强度和屈服强度的优化工艺参数为 $A3 \times B2 + C3 \times D3$ ；而获取最佳伸长率的优化工艺参数为 $A1 \times B1 + C1 \times D2$ 。结合该中间板铸件承受交变载荷等工况和图纸技术要求分析，确定该铸件热处理策略是在获得高屈服强度前提下尽可能提高伸长率。从表3影响屈服强度最弱因素固溶时间来看，其极

差变化最小，为提高生产效率可选择B1参数；从影响伸长率的因素极差分析发现表2所选择的因素和水平变化对其影响均不太显著，因此优化后的工艺参数为 $A3 \times B1 + C3 \times D2$ ，即 $495\text{ }^\circ\text{C} \times 2\text{ h} + 180\text{ }^\circ\text{C} \times 3.5\text{ h}$ 。

2.2 生产验证及分析

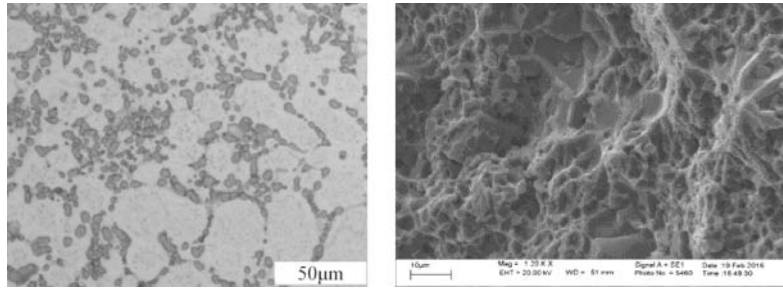
从连续生产的同批次铸件中随机选出一定数量的试样，按上述确定的优化工艺参数进行热处理，热处理后的试棒金相组织及拉伸断口SEM形貌如图3所示。金相组织明显可见，经变质和热处理后的细小、尖角钝化蓝灰色共晶硅颗粒均匀分布在白色椭圆形 α 固溶

表2 热处理正交试验 $L_9(3^4)$ 因素与水平
Table 2 Factors and levels of orthogonal test $L_9(3^4)$ for heat treatment

因素	固溶温度/ $^\circ\text{C}$	固溶时间/h	时效温度/ $^\circ\text{C}$	时效时间/h
水平	A	B	C	D
1	475	2	160	2.5
2	485	3	170	3.5
3	495	4	180	4.5

表3 Silafont36合金正交热处理试验结果
Table 3 Experimental results of orthogonal heat treatment for Silafont36 alloy

序号	因素水平				R_m /MPa (均值)	$R_{p0.2}$ /MPa (均值)	A /% (均值)
	固溶温度/ $^\circ\text{C}$	固溶时间/h	时效温度/ $^\circ\text{C}$	时效时间/h			
1	1	1	1	1	257.4	133.3	11.47
2	1	2	2	2	278.3	198.7	7.82
3	1	3	3	3	304.0	248.3	6.33
4	2	1	2	3	294.6	228.4	5.71
5	2	2	3	1	286.0	228.9	5.71
6	2	3	1	2	289.6	208.4	8.01
7	3	1	3	2	338.3	273.6	7.22
8	3	2	1	3	327.4	261.6	6.36
9	3	3	2	1	294.4	226.3	5.08
R_m	I	279.9	296.8	291.5	279.3		
	II	290.0	297.2	289.1	302.0		
	III	320.0	296.0	309.4	308.7		
	极差R1	40.1	1.2	20.3	29.4		
$R_{p0.2}$	I	193.4	211.8	201.1	196.1		
	II	221.9	229.7	217.8	226.9		
	III	253.8	227.7	250.2	246.1		
	极差R2	60.4	17.9	49.1	50.0		
A	I	8.54	8.13	8.62	7.42		
	II	6.48	6.63	6.20	7.68		
	III	6.22	6.47	6.42	6.13		
	极差R3	2.32	1.66	2.42	1.55		



(a) 金相组织

(b) SEM照片

图3 热处理后的试样金相组织及断口形貌

Fig. 3 Microstructure and fracture morphology of heat-treated sample

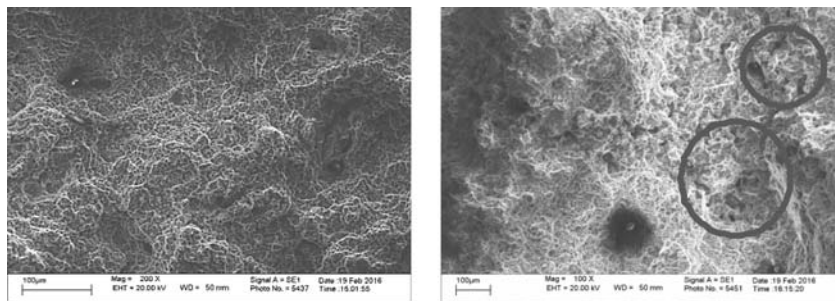
体周围,且固溶体内部可见微小的析出强化相,从而实现该材料强度和伸长率的提高。此外,SEM断口照片可见大量分布的细小韧窝,进一步佐证了材料经热处理后具备的良好韧性。热处理后随机取8件附铸试样的力学性能测试结果如表4所示,其抗拉强度 R_m 平均达到316.8 MPa,屈服强度 $R_{p0.2}$ 平均达到262.8 MPa,伸长率 A 平均为6.68%,全部指标均达成中间板铸件技术标准要求。

在对比附铸试样力学性能测试值发现,尽管同批试棒的屈服强度相近,但其伸长率却有8%~11%的差异。经对试样断口进行SEM分析发现,伸长率较高的试样断口几乎无任何缺陷(图4a),而伸长率较低的试样断口存在少量微小气缩孔缺陷(图4b)。通过对压铸参数追溯发现伸长率较低的试样型内真空度数值略高于伸长率较高试样的值,其真空度差异约为

0.31~0.38 kPa。由此可见,压铸参数中型内真空度的微小变化,对铸件的伸长率影响显著。

表4 批量生产的中间板铸件附铸试样热处理后力学性能
Table 4 Mechanical properties of test lugs after heat treatment

试样编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	型内真空/kPa
1	314	251	6.2	2.03
2	324	270	6.8	1.96
3	318	273	7.4	1.72
4	320	268	5.5	2.10
5	321	264	7.8	1.72
6	316	259	7.0	1.80
7	316	265	5.6	2.06
8	306	252	7.2	1.76



(a) 断口无缺陷

(b) 断口微小气缩孔缺陷

图4 附铸试样断口形貌

Fig. 4 Fracture morphologies of test lugs without and with tiny gas holes

3 结论

(1) 正交试验结果表明,影响高强韧压铸合金Silafont36抗拉强度和屈服强度的因素依次为固溶温度、时效时间、时效温度和固溶时间;影响伸长率的因素依次为时效温度、固溶温度、固溶时间和时效时间。

(2) 批量生产实践证明,中间板铸件最佳热处理工艺为 $495\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h} + 180\text{ }^{\circ}\text{C} \times 3.5\text{ h}$ 。在该热处理工艺条

件下,随机抽取的8件附铸试样的 R_m 平均为316.8 MPa, $R_{p0.2}$ 平均为262.8 MPa,伸长率 A 平均为6.68%,满足铸件技术要求。

(3) 附铸试样断口对比分析发现,真空度数值较高的试棒伸长率较低,其断口存在少量微小气缩孔缺陷。因此,该力学性能指标受真空度影响显著。这对于要求具有高伸长率的压铸结构件来说,尤其需要关注真空度对铸件性能的影响。

参考文献:

- [1] 叶爱凤, 徐彪. 东风商用车轻量化开发 [J]. 汽车工艺与材料, 2010 (2): 7-11.
- [2] 褚东宁. 东风公司商用车轻量化材料的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2007 (7): 1-3.
- [3] SUJIT DAS. Light-weighting opportunities in the global automotive industry [C] // 2011 International Automotive Lightweight Materials Development Forum.
- [4] 袁海波, 褚东宁, 康明, 等. 轻金属材料铝和镁在东风汽车上的应用 [J]. 汽车科技, 2011 (4): 1-5.
- [5] 冯美斌. 我国商用车轻量化技术现状及发展动向 [J]. 汽车工艺与材料, 2009 (2): 6-9.
- [6] 万里, 赵芸芸, 潘欢, 等. 铝合金高真空压铸技术的开发及应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008 (11): 858-861.
- [7] 王永新, 陆如辉. 提高铝合金AlSi9Cu3 (Fe) 屈服强度的工艺措施 [J]. 铸造技术, 2008 (10): 1429-1430.
- [8] 刘艳华, 冯赞. 液态与半固态A380铝合金压铸件热处理前后组织性能的研究 [J]. 材料研究与应用, 2008 (3): 219-222.
- [9] 纪莲清, 郭长江, 熊守美. 超低速压铸慢压射速度下ADC12 铝合金的显微组织和性能 [J]. 中南大学学报, 2010 (3): 977-981.
- [10] 郭洪民, 杨湘杰. 流变压铸YL112铝合金的微观组织特征 [J]. 中国有色金属学报, 2008 (3): 400-408.
- [11] 万里, 潘欢, 罗吉荣. 高真空压铸技术及高强韧压铸铝合金开发和应用的现状及前景 [J]. 特种铸造及有色合金, 2007 (12): 939-941.
- [12] 张士林, 任松赞. 简明铝合金手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 336-350.

Heat Treatment Process of Die Cast Silafont36 Alloy Gearbox Intermediate Plates

LI Wen-qiao¹, YUAN Hai-bo², MA Rong¹, CHEN Tao³, QIAN Yun-liang¹, YANG Zhao-ling¹, LI Nan²
(1. Dongfeng (Shiyang) Nonferrous Casting Co., Ltd., Shiyang 442062, Hubei, China; 2. Material Technology Institute of Dongfeng Commercial Vehicle Technical Center, Wuhan 430056, Hubei, China; 3. Dongfeng Getrag Transmission Co., Ltd., Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract:

In order to improve the mechanical properties of die-cast Silafont36 alloy gearbox intermediate plates, the heat treatment process of high strength and toughness Al-Si alloy Silafont36 was studied by orthogonal experiment. The results show that the factors affecting the tensile strength and yield strength of die-cast Al-Si alloy Silafont36 are solution temperature, aging time, aging temperature and solution time, and the factors affecting elongation are aging temperature, solution temperature, solution time and aging time. Experiments and production verify that the optimum heat treatment process for gearbox intermediate plates are 495 °C ×2h+180 °C ×3.5h. Meanwhile, the vacuum degree in the die casting process was found to have a significant effect on the elongation..

Key words:

high strength and toughness; Al-Si alloy; die casting; heat treatment process