

低硅铸造铝合金服役热稳定性研究

程腾飞, 曾瑞祥, 赵天天, 杨弋涛

(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 对3种低硅铸造铝合金和A356在300 °C进行0~200 h的热暴露试验, 测试了合金室温拉伸性能随热暴露时间的变化规律。采用金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)观察金相组织及断口形貌; 借助扫描电镜的能谱分析(EDS)测定不同相的元素分布, 并观察热暴露前后组织中元素分布情况, 探究热暴露时间和Cu元素含量对合金高温稳定性的影响。结果表明, 3种低硅铸造铝合金和A356铝合金在热暴露25 h后抗拉强度分别下降了56%、55%、55%和58%, 而且随着热暴露时间的增加, 抗拉强度持续下降。对0.3%Cu实验铝合金研究发现, 300 °C热暴露会造成合金组织中Si、Mg、Cu主要元素偏析, 造成基体中强化相分布不均匀。

关键词: Al-Si合金; 热暴露; 高温稳定性; 拉伸性能; 显微组织

汽车轻量化发展使得越来越多的Al-Si合金铸件应用于汽车的底盘发动机、转向节、气缸等部件^[1]。汽车用铝合金铸件不仅仅要具备高的强度、良好的耐蚀性, 也需要具备良好的高温稳定性。因此, 提高铸造Al-Si合金高温条件下的综合力学性能是亟待解决的问题。国内外对于耐热铝合金的研究, 主要是通过基础合金中添加合金元素的方法^[2]来提高铝合金在室温和高温下的服役性能, 尤其以添加Ni、Ce、Zr、Er、Sc、Y、Ti、Ag等元素为主^[3-6], 如果可以准确清楚地了解Al-Si系铸造合金中Mg、Si、Cu等元素成分变化对合金高温稳定性的影响规律, 则会在很大程度上提升铝合金的应用性能。铸造Al-Si-Mg系铝合金的高温稳定性一般不好, 其正常工作使用温度一般不超过185 °C, 因为在过高温下起强化作用的Mg₂Si相会发生粗化, 严重损害该合金的力学性能。马建辉等^[7]研究表明, Cu元素对铝合金的室温性能影响不大, 对高温性能影响较大。

由于Cu含量超过1%的铝合金易受腐蚀, 本试验设计的低硅铸造铝合金含铜量(质量分数)依次为0.1%、0.3%、0.5%。对低硅铸造铝合金热暴露后的拉伸性能进行研究以了解其服役时的热稳定性能, 同时, 进行A356铝合金的相同对比试验。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及制备

本试验所用低硅铸造铝合金Al-3.5Si-0.65Mg-xCu ($x=0.1, 0.3, 0.5$)由实验室小型熔炼炉熔炼而成, 作为比较对象的A356试样取自某企业常规生产的汽车转向节铸件。利用PMI-MASTER PRO移动式直读光谱直读仪分析得到四组试样的化学成分如表1所示。试样的热处理工艺为: ①固溶处理: 540 °C保温2 h, 水淬; ②时效处理: 170 °C保温8 h, 空冷。

1.2 试验方案设计

汽车转向节服役温度局部可达300 °C, 故将试验热暴露温度选择为300 °C, 加快合金性能变化速率, 以便较迅速地评估出相对恶劣的工作环境下不同材料高温使

作者简介:

程腾飞(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为铸造铝合金组织与性能。E-mail:

TFchengshu@163.com

通讯作者:

杨弋涛, 男, 教授。电话:

021-66136550, E-mail:

yangyitao@shu.edu.cn

中图分类号: TG27

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

11-1249-06

收稿日期:

2019-04-29 收到初稿,

2019-07-19 收到修订稿。

用性能的差异。热暴露时间为0~200 h,每隔25 h放置一批试样。从三种成分低硅铸造铝合金中各切取7块 $\Phi 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的小试样,置于300 °C的烘箱中进行不同时间的热暴露试验,随后通过磨制、抛光后制成金相试样;各切取14个拉伸样,同样置于300 °C的烘箱中热暴露后,随后进行空冷,用于拉伸试验。从A356铝合金铸件中切取同样的试样进行对比测试。

通过尼康LV150正立式金相显微镜(OM)、HITACHI SU-1500钨灯丝扫描电子显微镜(SEM)观察组织形貌;借助扫描电镜的能谱分析(EDS)测定不同相的元素及其含量。拉伸试验在MTS C45.305电子万能试验机上进行,试验前把试样放在丙酮溶液中超声波清洗后烘干,拉伸试样采用非标准试样,试样尺寸如图1所示。

2 试验结果与分析

2.1 热暴露时间对铝合金力学性能的影响

对热暴露不同时间的四组拉伸试样进行拉伸试验,图2和图3是各组铝合金试样抗拉强度和伸长率变化曲线。

由图2、图3可看出,随着热暴露时间的增加,四种不同材料的抗拉强度急剧下降,伸长率急剧上升,最后都逐渐稳定。强度下降分为两个阶段,暴露0~25 h属于性能急剧下降阶段,25~200 h属于性能稳定阶段;伸长率提高也分为两个阶段,暴露0~25 h属于急剧增加阶段,25~200 h属于稳定阶段。同时,在相同的热暴露时间下,Cu含量的增加,其热暴露后的抗拉强度有所增加。表2是四种材料热暴露前后性能对比,可以看出,4组合金试样在经过300 °C热暴露25 h后,抗拉强度都急剧下降,下降率均超50%,而且可以看出,低硅铸造铝合金的热稳定性与A356铝合金处于相同水平。

由于热暴露试验相当于试样处于过时效状态,随着热暴露时间的延长,析出相逐渐长大,对位错的阻碍作用逐渐减弱,因此,试样抗拉强度在热暴露后会有急剧下降的趋势。郭永春等^[8]提出,随着热暴露时间的延长,富铜高温强化相的长大需要消耗溶质原子,当晶界附近固溶于基体中的溶质原子耗尽之后,只有通过晶界附近富铜相的重新溶解来补充溶质原子。因此,随着Cu含量的增加,晶界处 Al_2Cu 强化相溶解后的残余量会比较多,进而减缓合金性能下降的趋势。另外,随着热暴露时间的增加,合金组织中沉淀相的分布会产生变化,沉淀相会变得粗大,且数量逐渐减少,导致晶界变得脆弱,更容易断裂,使得铝合金抗拉强度急剧下降^[9]。

为了更好地探究试样抗拉强度明显下降的原因,对各组拉伸试样的断口进行了扫描电镜观察,图4是未经热暴露的断口和热暴露25 h的断口的形貌。

表1 试验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of four Al alloys $w_B/\%$

试样编号	Si	Mg	Cu	Ti
1	3.50	0.64	0.10	0.06
2	3.40	0.70	0.30	0.06
3	3.30	0.65	0.50	0.06
4	6.87	0.43	0	0.12

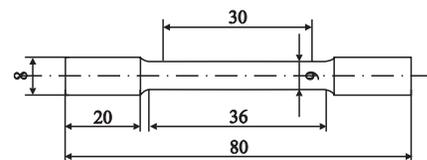


图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of tensile specimen

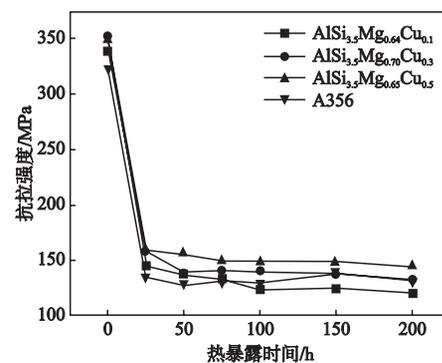


图2 不同成分试样热暴露后的抗拉强度和时间的关系

Fig. 2 Relationship between tensile strength and thermal exposure time of specimens

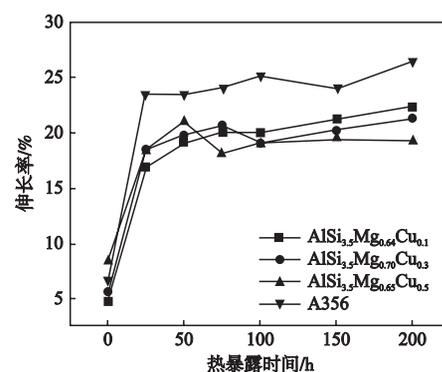


图3 不同成分试样热暴露后的伸长率和时间的关系

Fig. 3 Relationship between elongation and thermal exposure time of specimens

未经热暴露的试样的断口和热暴露25 h的试样的断口有明显的差别。从图4中可以看出，热暴露25 h后，断口上出现很多孔洞，这可能是造成热暴露后试样的抗拉强度急剧下降的原因之一。另外，试样经热暴露后，韧窝从小而多变成了大而少，并且韧窝变得不均匀。未经热暴露的试样，不同Cu含量的试样的断口也有差别，从SEM照片也可以看出，随着Cu含量的不断增加，韧窝逐渐变得小而多。经过25 h的热暴露后，从SEM照片可以看出，随着Cu含量的增加，韧窝的不均匀性有所改善，并且孔洞有所减少。

为了研究热暴露时间对低硅铸造铝合金的影响规律，对0.5%Cu含量试样不同热暴露时间的拉伸断口进行了SEM观察，如图5所示。

从图5可以看出，在100 h以内时，随着热暴露时间的增加，可以明显看出断口的韧窝数量是增加的，表明韧性随着热暴露时间的增加有所增加，断口表面表现为以韧性断裂为主的准解理断裂。但当热暴露时间超过100 h以后，随着热暴露时间的增加，韧窝数量大

大减少，且出现了一些解理平台，表现为以脆性断裂为主的准解理断裂，强度随之下降。

2.2 组织分析

铝合金中的Si相对合金高温稳定性能影响较大，共晶Si的形态、大小和分布对合金综合性能特别是高温性能影响很大，Si颗粒析出和Si相的破碎与断裂都会影响到铸造铝合金的使用性能^[10]。图6是四种铝合金热暴露前后的金相组织照片。

表2 四种材料热暴露25 h后抗拉强度下降对比
Table 2 Comparison of performance degradation of four Al alloys after 25 h thermal exposure

试样编号	强度/MPa		下降率/%
	未经热暴露	热暴露25 h	
1	338.1	145.8	56
2	351.5	156.6	55
3	350.2	158.5	55
4	322.9	133.7	58

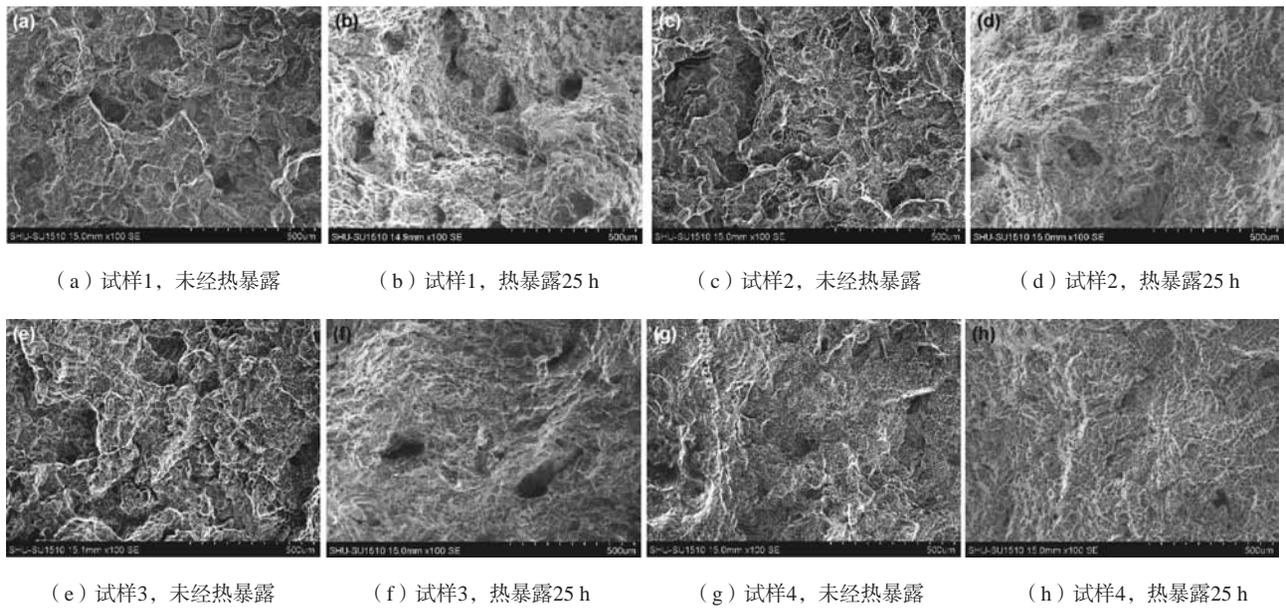


图4 未经热暴露和热暴露25 h后4组拉伸试样的断口形貌
Fig. 4 Fracture morphologies of four groups of tensile specimens

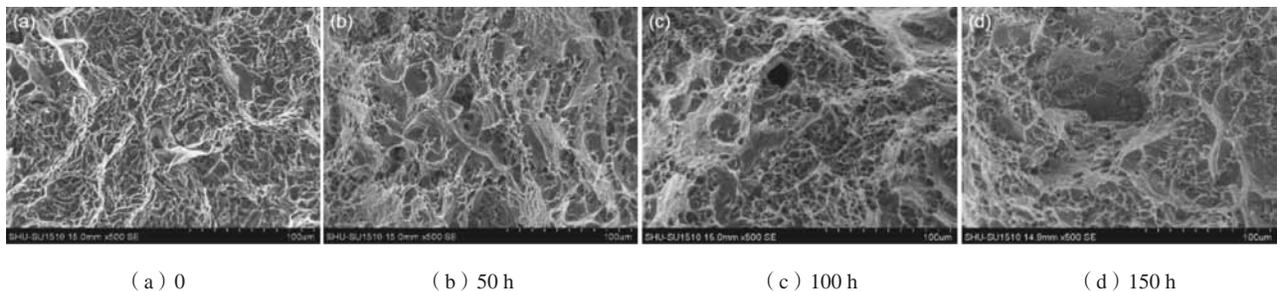


图5 Al-3.5Si-0.65Mg-0.5Cu试样不同热暴露时间的断口形貌

Fig. 5 Fracture morphologies of Al-3.5Si-0.65Mg-0.5Cu specimens with different thermal exposure times

通过比较图6a和图6b发现, Al-3.5Si-0.65Mg-0.1Cu在经过300 °C热暴露50 h后, Si相变得粗大了, 而且出现了聚集现象。0.3%Cu、0.5%Cu和A356试样金相组织变化不是特别明显, 不过也可以看出, 原本应该呈现弥散分布的颗粒状的Si相开始出现聚集与粗大的趋势。总体来说, 热暴露前后的金相组织变化不是特别大, 但铝合金的强度出现了明显下降, 可以推测为铝合金的相结构发生了变化^[7]。Si颗粒的球化以及Mg₂Si析出相的粗化或溶解都有可能造成合金的高温软化现象。Al₂Cu相主要以网络状和共晶状形式存在, 部分Al₂Cu相会依附生长在先形成的Si相上^[10], 因此, Si相在300 °C热暴露的过程中其形态、大小以及分布的变化会在一定程度上引起高温强化相Al₂Cu的变化; 同时, Si相的变化也会引起Mg₂Si强化相的变化, 进而引起性能的变化。铝合金的断裂形式受到组织中Si颗粒形态与分布的影响^[11], 结合金相照片进行分析, 这可能是合金在热暴露后力学性能急剧下降的一个主要原因。为了更

好地探究图4中的拉伸断口形貌上孔洞的形成原因, 对0.3%Cu的拉伸试样断口进行了SEM和EDS分析, 图7、图8分别是拉伸断口孔洞附近面扫描和线扫描的元素分布情况。

对孔洞附近进行面扫描发现, Si元素的分布在孔洞边缘和远离孔洞的位置有明显差异。如图7所示, 靠近孔洞的位置Si元素和Mg元素含量较低, 远离孔洞的位置Si元素和Mg元素含量比较高。对孔洞左右两边和远离孔洞的下部分进行线扫描也发现, Si元素和Mg元素在孔洞附近存在偏析现象, 如图8a、b所示。这从侧面说明在未进行拉伸前, 这批300 °C热暴露后的拉伸试样横截面上存在着许多贫Si和贫Mg区, 同时Cu元素含量过低, 不足以形成足够多的Mg₂Si和Al₂Cu强化相, 导致这些区域极易成为拉伸过程中断裂的源头, 进而形成大范围、数量多的孔洞。

在0.3%Cu试样的金相组织某处打一显微硬度点做标记(图9), 对其进行不同时间的热暴露试验, 分别

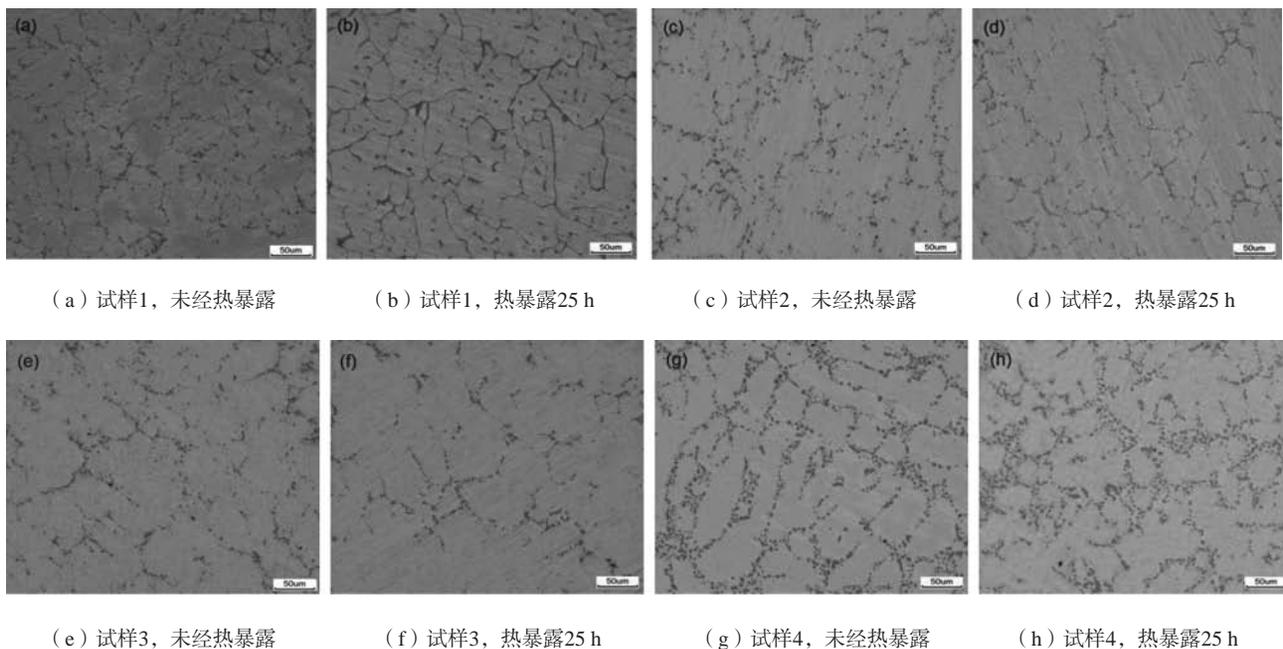
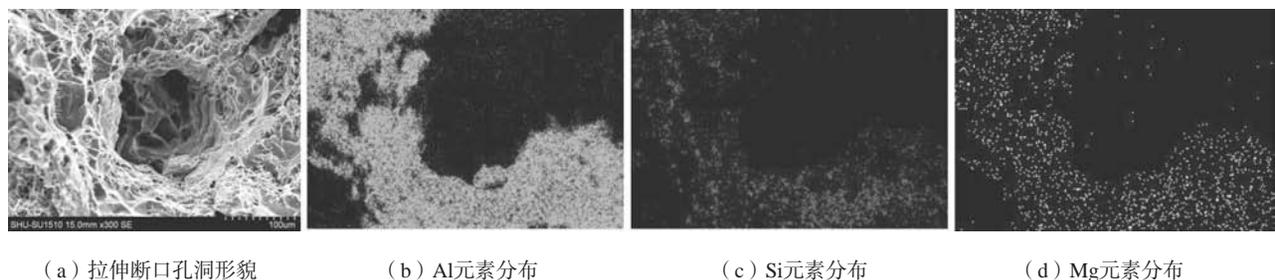


图6 未热暴露和热暴露50 h试样金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of specimens



(a) 拉伸断口孔洞形貌

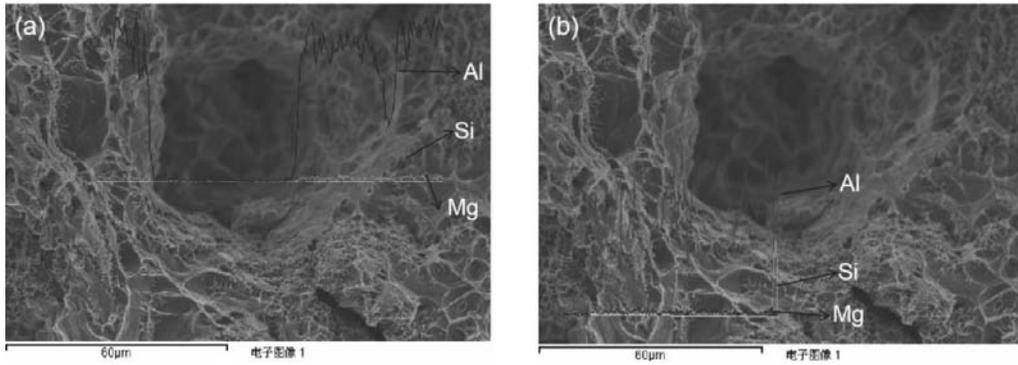
(b) Al元素分布

(c) Si元素分布

(d) Mg元素分布

图7 拉伸断口孔洞附近面扫描

Fig. 7 Scanning of the surface near the hole in the tensile fracture



(a) 靠近孔洞线扫描

(b) 远离孔洞线扫描

图8 拉伸断口孔洞附近线扫描

Fig. 8 Line scanning near the hole in the tensile fracture

观察热暴露0 h、10 h、20 h的显微组织，进行能谱分析，如图10所示。

从图10 a、b、c可以看出，热暴露对组织中的Si相的分布有影响。随着热暴露时间的不断延长，Si元素在局部区域发生了聚集的现象。从图10 d、e、f可以看出，Cu元素在热暴露试验过程中分布变化较大，从原本的弥散分布状态变成局部聚集状态。这是因为随着热暴露时间的增加，各强化相中的元素会发生再分配的现象，出现不同区域之间元素的转移，造成局部区域的元素偏析产生，影响到合金高温强化相的分布状态，对铝合金的力学性能造成不利影响。

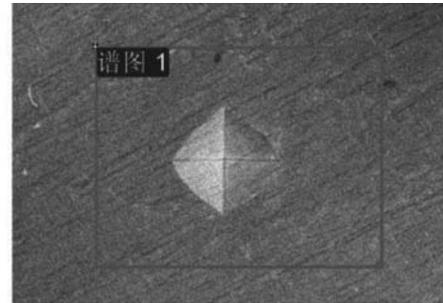
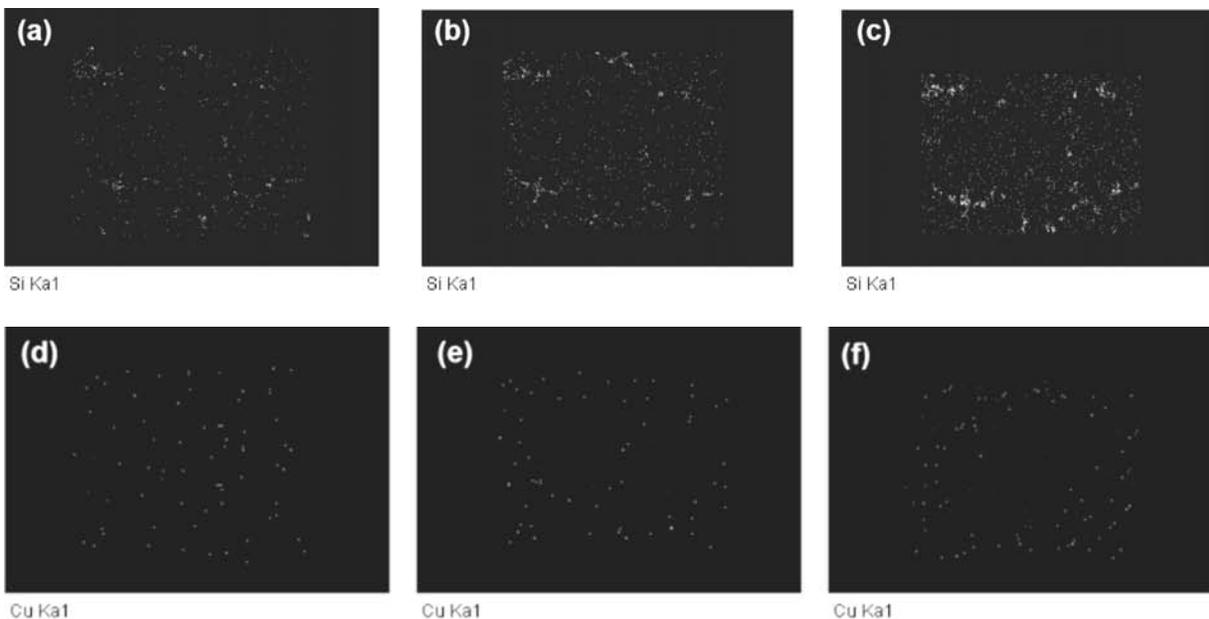


图9 显微硬度标记点

Fig. 9 Microhardness marking point



(a) (d) 未热暴露；(b) (e) 热暴露10 h；(c) (f) 热暴露20 h

图10 标记点附近热暴露前后元素分布变化

Fig. 10 Element distribution changes before and after thermal exposure near labeled points

3 结论

(1) 4组合金试样在经过300 °C热暴露25 h后, 抗拉强度急剧下降, 且随着热暴露时间的增加, 抗拉强度持续下降; 低硅铸造铝合金的热稳定性与A356铝合金处于相同水平。

(2) 随着Cu元素含量的增加, 拉伸断口韧窝的不均匀性有所改善, 并且孔洞有所减少, 所以合金的抗

拉强度和热稳定性均有一定提高。

(3) 通过对Al-3.5Si-0.65Mg-0.1Cu铝合金的研究发现, 300 °C热暴露较长时间会造成低硅铸造铝合金中主要合金元素Si、Mg、Cu分布发生变化, 使得合金中强化相的分布变得较不均匀, 进而对热暴露后的铝合金力学性能造成不利影响。

参考文献:

- [1] 隋育栋, 王渠东. 铸造耐热铝合金在发动机上的应用研究与发展 [J]. 材料导报, 2015, 29 (3): 14-19.
- [2] 孙德勤, 陈慧君, 文青草, 等. 耐热铝合金的发展与应用 [J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9 (3): 65-69.
- [3] 郝雅娇. Al-5.5Cu-0.9Mg-0.2Sc-0.15Zr (-xTi) 铝合金的高温力学性能 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [4] 夏峰, 梁民宪, 郭永春, 等. 微量锆对铸态A356铝合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (11): 1155-1158.
- [5] 尹斌, 曹富荣, 王顺成, 等. 稀土元素对连续铸挤Al-Mg-Si合金组织性能的影响 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (6): 130-136.
- [6] 徐佐, 吴大勇, 李振宇, 等. Mg与稀土Ce混合添加对A356.2铝合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (9): 855-859.
- [7] 马建辉, 郭鹏. Cu含量对铝合金活塞材料组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2014 (14): 90-92.
- [8] 郭永春, 卢致宇, 杨通, 等. Cu含量对铝硅合金热暴露后显微组织和拉伸性能的影响 [J]. 西安工业大学学报, 2011, 31 (3): 245-250.
- [9] SONG Y F, PAN Q L, WANG Y. Elevated-temperature mechanical properties and thermal stability of Al-Cu-Mg-Ag heat-resistant alloy [J]. Journal of Central South University, 2014, 21 (9): 3434-3441.
- [10] 刘取. 新型发动机缸体用耐热铝合金的合金化和微合金化 [D]. 东南大学, 2017.
- [11] RAJARAM G, KUMARAN S, RAO T S. Effect of graphite and transition elements (Cu, Ni) on high temperature tensile behaviour of Al-Si alloys [J]. Materials Chemistry & Physics, 2011, 128 (1-2): 62-69.

Study on Thermal Stability of Low Silicon Cast Aluminum Alloy in Service

CHENG Teng-fei, ZENG Rui-xiang, ZHAO Tian-tian, YANG Yi-tao
(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract:

Three low silicon cast aluminium alloys and A356 were exposed to a baking oven of 300 °C for 0-200 h, and the variation of the room temperature tensile properties of these alloys with the thermal exposure time was tested. The metallographic structure and fracture morphology were observed by OM and SEM; the element distribution in different phases was determined by EDS, and the element distribution in the microstructure before and after thermal exposure was observed; the effect of thermal exposure time and Cu content on the high temperature stability of the alloy was explored. The results show that the tensile strengths of three low silicon cast aluminium alloys and A356 aluminium alloy decrease sharply by 56%, 55%, 55% and 58%, respectively, after 25 h of thermal exposure, and the tensile strength decreases continuously with an increase in thermal exposure time. The study on 0.3% Cu-containing aluminium alloy shows that thermal exposure at 300 °C will cause segregation of Si, Mg and Cu elements in the alloy structure, resulting in uneven distribution of strengthening phases in the matrix.

Key words:

Al-Si alloy; thermal exposure; high temperature stability; tensile properties; microstructure