

硅相形态及含量对 Al-Si 合金线膨胀系数的影响

武玉英¹, 刘相法¹, 戴勇², 姜炳刚³, 边秀房¹

(1. 山东大学 材料液态结构及其遗传性教育部重点实验室, 济南 250061;

2. 济钢集团山东冶金设备制造公司, 济南 250101;

3. 山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061)

摘要: 利用金相显微镜、DIL402C 高温膨胀仪等对 Al-Si 合金的线膨胀进行了研究。结果表明: 对于 Al-Si 合金, 硅含量越高, 其线膨胀系数越小, 随温度变化幅度减小; 随着温度升高, 磷变质比锶变质的线膨胀系数变化幅度小, 合金更加稳定; 此外, T6 热处理也显著降低 Al-Si 合金的线膨胀系数。通过对合金线膨胀系数和微观组织的对比观察发现: 硅相的形态和体积分数对 Al-Si 合金的线膨胀系数产生重要影响。初晶硅体积分数的增加和初晶硅的析出能够显著降低 Al-Si 合金的线膨胀系数, 共晶硅的形态对合金线膨胀系数也有一定的影响, 共晶硅为短棒状、颗粒状时(尤其经热处理后), 合金的线膨胀系数也显著降低。

关键词: Al-Si 合金; 线膨胀系数; 热处理; 变质处理

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Influence of morphology and content of silicon phase on CTE of Al-Si alloys

WU Yu-ying¹, LIU Xiang-fa¹, DAI Yong², JIANG Bing-gang³, BIAN Xiu-fang¹

(1. Key Laboratory of Materials Liquid Structure and Heredity, Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Jigang Group Shandong Metallurgy Equipment Manufacture Corporation, Ji'nan 250061, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: The linear coefficient of thermal expansion (CTE) of Al-Si alloys was studied by using Hi-scope video microscope and DIL 402C high temperature dilatometer. The results reveal that the CTE of Al-Si alloys decreases with increasing Si level. Compared with Sr modification, the Al-Si alloy modified with P has a lower CTE and is more stabilized. Moreover, T6 heat treatment can also decrease the CTE of Al-Si alloys, and improve the stability during heating-up. According to the contrasts above and combined with microstructure observation, it is found that Si phase has important influence on CTE of Al-Si alloys. The increase of volume fraction and precipitation of primary Si both can decrease the CTE. Also, eutectic Si exerts certain influence on the CTE of Al-Si alloys, i.e. the CTE decreases when eutectic Si exhibits morphology of short-bar shape and small particles, especially after heat treatment.

Key words: Al-Si alloys; stability; CTE; heat treatment; modification

目前活塞生产行业仍主要采用共晶和过共晶 Al-Si 合金, 但现有的研究都致力于改善传统的 Al-Si 合金的综合性能。这些措施主要如下^[1]: 1) 变质处理^[2-5]; 2) 合金化和热处理^[6-7]; 3) 减少合金中的有害杂质; 4) 改进铸造方法^[8-9]。其中前两种方法是铝合金生产行业研究的重点, 也是改善合金综合性能的有效方法。

然而, 发动机活塞的工作温度大约在 250~350 °C 之间, 因此其在这一温度段的力学性能和体积稳定性十分重要^[10-11]。固体的膨胀比气体和液体小得多, 直接测定固体的体积膨胀比较困难。但根据固体(非晶体或多晶体)在温度升高时形状不变可以推知, 固体在各方向上膨胀规律相同。因此可以用固体在一个方向上的线膨胀规律来表现它的体膨胀。通常定义固体在温度每升高 1 °C 时, 在某一方向上的长度增量 $\Delta L/\Delta t$ 与室温下(严格意义上是 0 °C 时)同方向上的长度 L_0 之比, 叫做固体的线胀系数 α ^[12], 即

$$\alpha = \frac{\Delta L / \Delta t}{L_0}$$

工业上可以采用很多不同工艺来降低 Al-Si 合金的线膨胀及各种性能, 但从理论角度来对其进行分析、讨论的文献较少。因此对 Al-Si 合金的线膨胀系数从理论方面去分析研究是十分必要的, 这不仅给生产, 也为进一步提高 Al-Si 合金的力学性能提供理论依据。本文作者采用德国进口的 DIL 402C 高温膨胀仪来对 Al-Si 合金的线膨胀系数进行测定和分析研究, 初步探讨其内在规律。

1 实验

在中频感应炉中制备 Al-Si 合金, 原料为工业纯铝和工业纯硅, 制备含硅量分别为 12.6%、20%和 24%(质量分数)的 Al-Si 合金。将配制好的 3 kg 左右的 Al-Si 合金装入中电阻炉石墨坩埚, 加热至 780 °C 进行熔炼变质。为保证合金成分的准确, 尽量控制沸腾和减少喷溅, 然后通入六氯乙烷进行精炼处理, 在保温一定时间后, 将合金液体直接浇入铸铁铸型中得到合金铸锭, 完成不同 Si 含量的 Al-Si 合金的变质处理。

在 5 kW 电阻炉内, 采用石墨粘土坩埚将共晶 Al-Si 合金在 780 °C 熔化, 分别加入 1% 的 Al-P 中间合金和 1% Al-Sr 中间合金, 保温 45 min 后浇入金属(铁)型试样。

对所得的铸锭进行 T6 处理, 在热处理炉中, 将

铸锭加热到 510 °C, 保温 6 h^[13]采用 510 °C 淬火(水淬), 200 °C 时效 14 h。

为了进行比较, 所有试样都取自铸锭的心部, 采用 KH-2200 型高倍视频显微镜(Hi-scope video microscope)进行微区成分分析及微观组织观察, 并利用 DIL 402C 高温膨胀仪对试样的线膨胀进行测量, 其中不同硅含量的 Al-Si 合金的测量速度为 5 °C/min, 其他测试速度则定为 10 °C/min。

2 结果与分析

2.1 不同硅含量 Al-Si 合金的线膨胀系数

图 1 所示为 Si 含量分别为 12.6%、20%和 24%的 Al-Si 合金微观组织。该组 Al-Si 合金均经过磷变质处理工艺。在图 1 中, 因为经过磷变质处理, 共晶 Al-Si 合金中出现一定量的初晶硅, 而过共晶 Al-Si 合金中粗大的初晶硅也被细化为细小圆整的初晶硅。经过磷变质处理后, 初晶硅尺寸相近, 形态相似。故本实验中随着硅含量的增加, 合金中初晶硅的体积分数明显增多, 初晶硅形态并没有改变。图 2 所示是对不同硅含量的 Al-Si 合金线膨胀系数的测定。由图 2 可见, 硅含量越高, 合金的线膨胀系数曲线越低, 峰值越小且趋于平缓。由图 1 和 2 可以得出硅含量对 Al-Si 合金线膨胀系数的影响规律: Al-Si 合金经变质处理后, 随着含硅量的增加及初晶硅体积分数的增多, Al-Si 合金的线膨胀系数逐渐减小, 合金的稳定性越好。

2.2 磷变质、锶变质对 Al-Si 合金线膨胀系数的影响

众所周知, 变质处理是 Al-Si 合金应用中必需的工艺^[14-15]。锶变质是对 Al-Si 合金中共晶硅而言, 如图 3(a), 经锶变质后, Al-Si 合金中的共晶硅变得均匀细小, 但是合金组织中并没有初晶硅的析出。磷变质主要是促进共晶 Al-Si 合金中初晶硅的析出, 同时也可以细化过共晶 Al-Si 合金中的初晶硅。图 3 所示为共晶 Al-Si 合金经锶变质和磷变质后, 然后经热处理得到的微观组织图。由图 3(b)可以看到, Al-Si 合金经磷变质后, 组织中出现了细小均匀分散的初晶硅, 共晶硅也变为长条状。两种不同的变质处理后所测得的线膨胀系数曲线如图 4 所示。由图 4 可见, 与锶变质后所测得的线膨胀系数相比, 磷变质处理后所测得线膨胀系数曲线比较平缓, 在加热过程中变化不大; 而锶变质的线膨胀系数曲线在 300~400 °C 之间有较大的变化, 且其线膨胀系数明显大于磷变质的。由此可知: 与锶变质相比, 磷变质使 Al-Si 合金在室温到

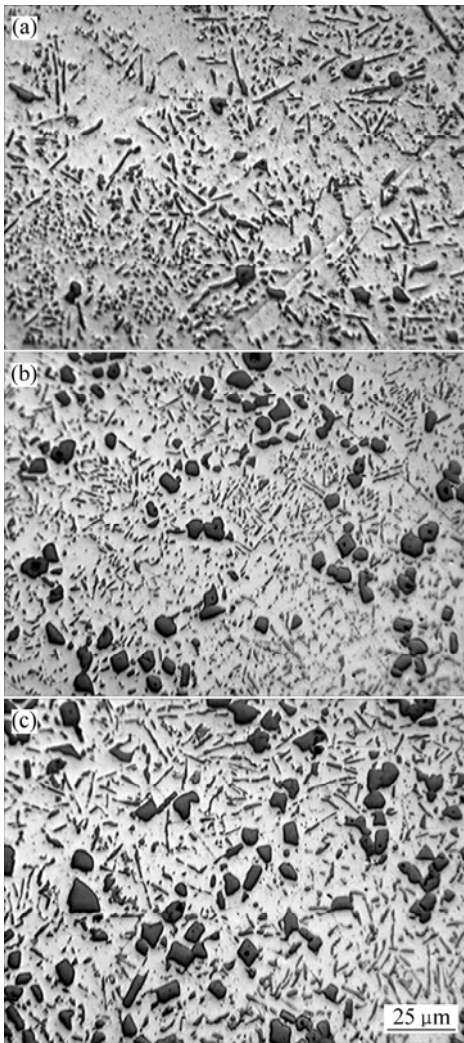


图1 变质处理和热处理条件下不同硅含量 Al-Si 合金的微观组织

Fig.1 Microstructures of Al-Si alloys after modification and heat treatment: (a) Al-12.6Si; (b) Al-20Si; (c) Al-24Si



图3 不同变质处理共晶 Al-Si 合金的微观组织

Fig.3 Microstructures of eutectic Al-Si alloys by different modification methods: (a) Sr modification; (b) P modification

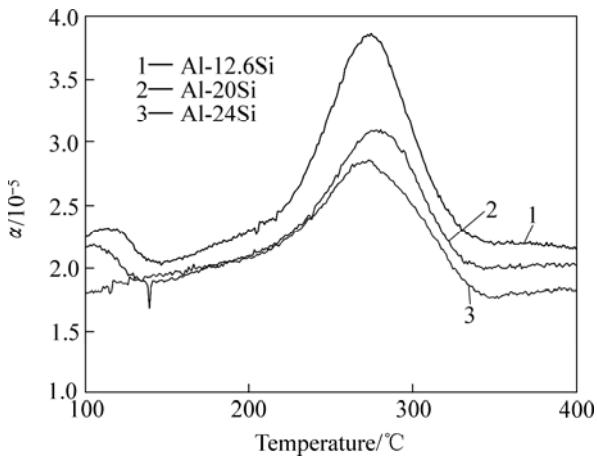


图2 不同硅含量 Al-Si 合金的线膨胀系数

Fig.2 Curves of CTE for Al-Si alloys with different Si contents

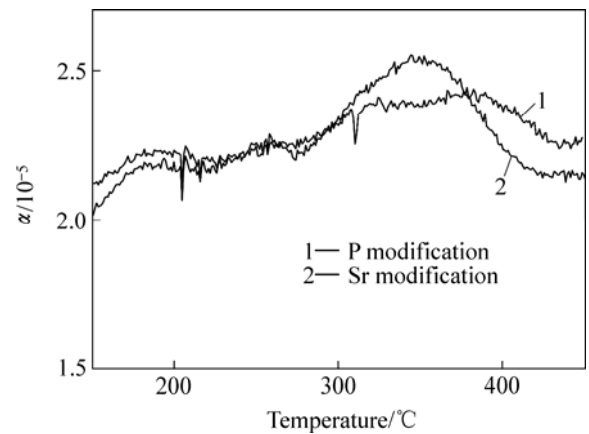


图4 不同变质处理后 Al-Si 合金的线膨胀曲线

Fig.4 Curves of CTE for Al-Si alloys by different modification treatments

450 $^{\circ}\text{C}$ 之间有更好的稳定性。结合其微观组织对比可知：初晶硅的析出对合金线膨胀系数的降低有促进作用。

2.3 热处理对 Al-Si 合金线膨胀系数的影响

热处理工艺对材料的性能有着重要的影响，热处理可以改善材料的力学、物理和化学性能，使材料具

备设计要求的性能。实验中对磷变质及锶变质共晶 Al-Si 合金在热处理前后及变质前后的组织及线膨胀系数进行测定。由图 5 可知, 热处理对磷变质 Al-Si 合金中初晶硅影响很小, 但使其共晶硅由长条片状变为短棒及球状, 尺寸明显变小, 形态趋向球化。而对于锶变质 Al-Si 合金, 热处理使其共晶硅明显球化。

图 6 所示为共晶 Al-Si 合金及经变质处理后的共晶 Al-Si 合金热处理前后线膨胀系数曲线。由图 6 可知, 热处理对共晶 Al-Si 合金线膨胀系数有很大的影

响, 显著提高 Al-Si 合金的体积稳定性。Al-Si 合金及磷变质、锶变质共晶 Al-Si 合金在热处理之前, 合金的线膨胀系数在 200~400 °C 之间变化很大, 先急剧增大然后再急剧下降。但合金经热处理之后, 其线膨胀系数在 200~400 °C 之间变化很小, 且比热处理前低。类似规律也出现在锶变质 Al-Si 合金热处理前后, 如图 6(b) 所示。由此可以得出: 热处理对 Al-Si 合金线膨胀系数有着显著的影响, 降低合金的线膨胀系数, 提高合金的稳定性。从图 5 中还可以看出, 热处理之

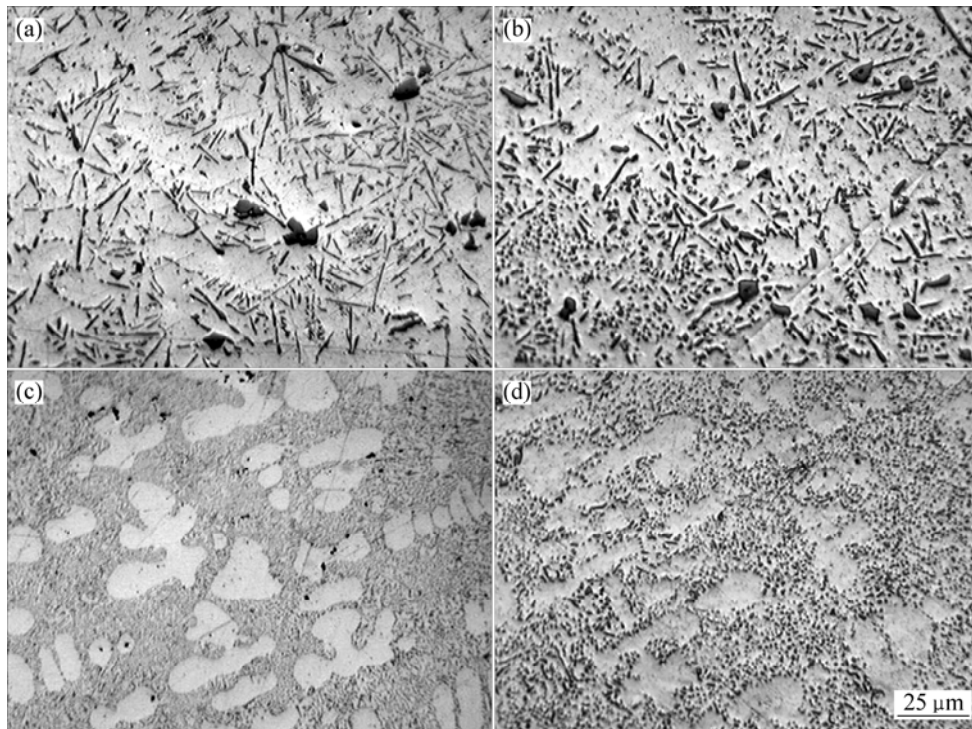


图 5 磷变质、锶变质共晶 Al-Si 合金热处理前后微观组织

Fig.5 Microstructures of Al-12.6Si alloys with P and Sr modification: (a) P modification before heat treatment; (b) P modification after heat treatment; (c) Sr modification before heat treatment; (d) Sr modification after heat treatment

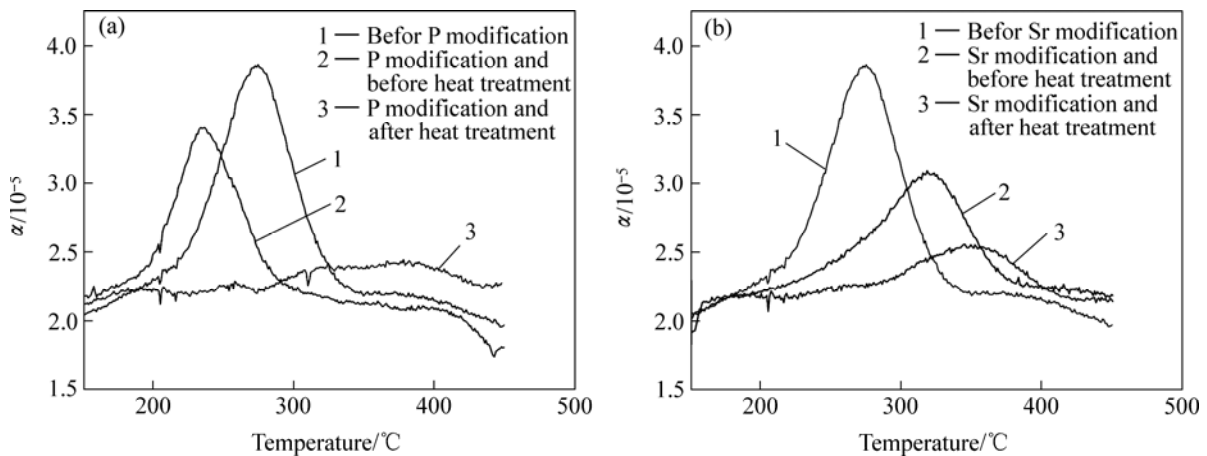


图 6 Al-Si 合金热处理前后的线膨胀系数曲线

Fig.6 Curves of CTE for Al-Si alloys: (a) Before and after P modification; (b) Before and after Sr modification

后的组织中共晶硅由原来的层片状变成细小的棒状或颗粒状,分布也比热处理之前更加紧密;热处理之后的共晶体对于基体的割裂已经大大减小,使得组织间的排列紧密,受热膨胀时不容易产生断裂等缺陷,可以降低材料的热膨胀系数。

3 结论

1) 随着硅含量的增加, Al-Si 合金线膨胀系数减小, 其升温过程中的稳定性越好。

2) 与锶变质 Al-Si 合金相比, 磷变质 Al-Si 合金的线膨胀系数更小, 升温过程中稳定性更好。

3) 热处理不仅显著提高 Al-Si 合金的稳定性, 而且显著提高磷和锶变质处理的稳定性。

4) 硅相的形态和体积分数对 Al-Si 合金的线膨胀系数有着重要影响。初晶硅体积分数的增加和初晶硅的析出能够显著降低 Al-Si 合金的线膨胀系数, 共晶硅的形态对合金线膨胀系数也有一定的影响, 共晶硅为短棒状、颗粒状时(尤其经热处理后), 合金的线膨胀系数也显著降低。

REFERENCES

- [1] 《铸造有色合金及熔炼》联合编写组. 铸造有色合金及熔炼[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
Casting Nonferrous Alloys and Its Melting Edit Group. Casting nonferrous alloys melting[M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1980.
- [2] 姚书芳, 毛卫民. 铸造铝硅合金细化变质处理的研究进展[J]. 铸造, 2000, 49(9): 512-515.
YAO Shu-fang, MAO Wei-min. The development of refining and modification in cast Al-Si alloy[J]. Foundry, 2000, 49(9): 512-515.
- [3] 廖恒成, 孙国雄. 铸造 Al-Si 合金 Sr 变质处理过程中共晶硅形态的渐变行为[J]. 铸造, 2005, 53(6): 435-538.
LIAO Heng-cheng, SUN Guo-xiong. Gradual behavior of the eutectic Si morphology from flake into fiber in Al-Si cast alloy with Sr modification[J]. Foundry, 2004, 53(6): 512-515.
- [4] Ho C R, Cantor B. Heterogeneous nucleation of solidification of Si in Al-Si and Al-Si-P alloys[J]. Acta Metal Mater, 1995, 43(8): 3231-3246.
- [5] Ben Heshmatpour. Modification of silicon in eutectic and hyper-eutectic Al-Si alloys[A]. Light Metals 1997[C]. Orlando: The Mineral, Metals & Society, 1997: 801-808.
- [6] 杨海龙, 王健农, 肖代红, 丁冬雁. 新型耐热铝合金 Al-Cu-Mg-Ag 棒材固溶处理温度的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(1): 16-18.
YANG Hai-long, WANG Jian-nong, XIAO Dai-hong, DING Dong-yan. Study on solution heat treatment temperature of new Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(1): 16-18.
- [7] Al'tman M B, Eskin G I, Gotsev I S, et al. A complex method of silumin modification legirovanie obrabotka legkikh splavov[J]. Alloying and Treatment of Light Alloys, 1981: 30-35.
- [8] 詹美燕, 陈振华, 夏伟军. 喷射沉积轧制工艺制备的 FVS0812 薄板的高温组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1348-1352.
ZHAN Mei-yan, CHEN Zhen-hua, XIA Wei-jun. Microstructure and properties of spray-deposited heat-resistant FVS0812 aluminum alloy at high temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(8): 1348-1352.
- [9] 杨俊, 李方, 李伟, 罗琴英. 快速凝固耐热粉末铝合金组织与性能分析[J]. 机械工程材料, 2002, 26(12): 39-41.
YANG Jun, LI Fang, LI Wei, LUO Qin-ying. Microstructure and properties of rapidly solidified heat-resistant aluminum alloys[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002, 26(12): 39-41.
- [10] 肖于德, 谢允安, 李松瑞. 耐热铝合金及其热强化相[J]. 铝加工, 1994, 17(4): 24-32.
XIAO Yu-de, XIE Yun-an, LI Song-rui. Heat-resistant aluminum alloy and its heat reinforcement phases[J]. Aluminum Processing, 1994, 17(4): 24-32.
- [11] Ho C R, Cantor B. Heterogeneous nucleation of solidification of Si in Al-Si and Al-Si-P alloys[J]. Acta Metal Mater, 1995, 43(8): 3231-3246.
- [12] 严琴, 李东风. 低膨胀固体材料线膨胀系数的干涉测量方法[J]. 激光技术, 2004, 28(2): 202-204.
YAN Qin, LI Dong-feng. Measurement of linear thermal expansion coefficient of low expansion materials using interferometry[J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 202-204.
- [13] 赵冬梅, 董企铭, 刘平, 康布熙, 黄金亮, 田保红, 金志浩. Cu-3.2Ni-0.75Si 合金时效早期相变规律及强化机理[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1167-1171.
ZHAO Dong-mei, DONG Qi-ming, LIU Ping, KANG Bu-xi, HUANG Jin-liang, TIAN Bao-hong, JIN Zhi-hao. Transformation and strengthening of early stage of aging in Cu-3.2Ni-0.75Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(6): 1167-1171.
- [14] Schneider W. A new method for the refinement of primary Si of hypereutectic Al-Si alloys in direct chill and ingot casting[A]. Light metals 1993[C]. Denver: CO Meeting Staff, The Minerals, Metals and Materials Society, 1993: 815-820.
- [15] Liu X F, Qiao J G, Zhang X H, Liu X J, Bian X F. Formation of $(Ca_{n-x}, Na_x)P_m$ compounds in eutectic Al-Si piston alloys and invalidation of phosphorus modification effect[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(4): 245-250.

(编辑 龙怀中)