

稀土 Y 对 AlSi7Cu2Mg 合金高温性能的影响

张文达, 杨 晶, 刘 云, 党惊知, 徐 宏

(中北大学 材料科学与工程学院, 太原 030051)

摘 要: 利用高温拉伸力学性能测试仪、扫描电镜(SEM)和 DTA 等测试分析手段, 研究不同含量 Y 对 AlSi7Cu2Mg 合金的高温力学性能的影响。结果表明: 随温度的升高, Y 含量为 0.15%(质量分数)的 AlSi7Cu2Mg 合金的强度及伸长率均呈下降趋势; 随着 Y 含量的增加, AlSi7Cu2Mg 合金在 250 °C 的高温强度(抗拉强度和屈服强度)和伸长率先增加后降低; Y 含量为 0.1% 的 AlSi7Cu2Mg 合金的高温力学性能最高, 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 275 MPa、240 MPa 和 12.4%; 微量 Y 对 AlSi7Cu2Mg 合金的强化作用主要是其对 Si 相的变质细化作用, 在 Y 含量为 0.1% 时, Si 相获得最佳的变质效果。

关键词: 稀土 Y; Al-Si-Cu-Mg 合金; 高温力学性能; 变质

中图分类号: TG 146.21

文献标志码: A

Effect of Y on high temperature mechanical properties of AlSi7Cu2Mg alloy

ZHANG Wen-da, YANG Jing, LIU Yun, DANG Jin-zhi, XU Hong

(School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The effect of Y contents on the high temperature mechanical properties of AlSi7Cu2Mg alloys was investigated by electronic universal material testing machine, scanning electron microscopy (SEM) and differential thermal analysis (DTA). The results indicate that the ultimate tensile strength and elongation of the AlSi7Cu2Mg alloy with 0.15% Y (mass fraction) decrease with increasing temperature. The ultimate tensile strength, yield strength and elongation of the AlSi7Cu2Mg alloys with 0.1% Y increase up to the maximum value and then decrease with increasing Y content at 250 °C. The alloy with 0.1% Y has the highest high temperature mechanical properties (ultimate tensile strength of 275 MPa, yield strength of 240 MPa and elongation of 12.4%). The strengthening effect of trace Y on the AlSi7Cu2Mg alloys is mainly relying on the modification of eutectic Si phase, the optimal modification of Si phase can be obtained with 0.1% Y.

Key words: rare earth Y; Al-Si-Cu-Mg alloy; high temperature mechanical properties; modification

稀土微合金化一直是提高合金性能、挖掘合金潜力的重要手段^[1], 稀土在铸造铝合金中起到细化组织^[2]、净化熔体、减少气体和夹杂物含量^[3]、降低线膨胀系数、减少铸造铝合金的裂纹源^[4]、提高合金常温和高温力学性能等方面的良好作用^[5-8]。李慧中等^[9]认为 Y 在 Al-Cu-Mg 合金中减少铜和镁元素在铝中的固溶度, 并形成 YCu₄Al₈ 化合物, 降低高温瞬时强度,

但可增加该合金的硬度, 提高合金在 250 °C 经 100 h 高温热暴露后的高温瞬时强度。且 Y 加入 2519 铝合金中主要形成 Al₆Cu₆Y 稀土化合物并沿晶界分布; 改变了合金铸态中第二相的形貌及大小, 加入适量的 Y (0.1%) 对 2519 铝合金铸态中的第二相具有球化和细化作用^[10]。侯文胜等^[11]研究了稀土 Y 对过共晶铝硅合金组织与磨损性能的影响, 结果表明, 稀土 Y 与铝生成

富铝稀土相 β 相(Al_3Y), 生成温度远高于铝的熔点, 且在高温下具有比铝高得多的强度, 它们的存在将阻止高温下晶粒长大和晶界滑移, 起到晶界强化作用, 能提高铝及其合金的高温强度。

Al-Si-Cu-Mg 系铸造铝合金因其密度低、有良好的铸造性能、力学性能和优异的耐腐蚀性而被公认为车辆发动机中最重要的合金材料之一^[12-15]。在车辆技术的发展中, 高功率密度发动机动力水平的发展是一项关键技术, 然而随着功率密度提高, 发动机缸体缸盖用材料耐高温性能逐渐不能满足要求。为改善铸造发动机缸体缸盖用传统材料 AlSi7Cu2Mg 合金的高温(200~300 °C)性能, 本文作者研究 Y 含量为 0.15% 的 AlSi7Cu2Mg 合金在不同温度下的高温力学性能和不同 Y 含量的 AlSi7Cu2Mg 合金在 250 °C 下的高温力学性能, 探讨了稀土 Y 对其高温性能影响。

1 实验

采用 AlSi12、AlMn10、AlCu50、AlZr4、AlTi5B1 中间合金、纯 Mg 和纯 Al 在 30 kg 电阻炉中熔制 AlSi7Cu2Mg 母合金, 成分见表 1。通过将 AlSi7Cu2Mg 母合金重熔后分别添加适量铝钎中间合金, 获取名义 Y 含量(质量分数)分别为 0.05%、0.1%、0.15%、0.2%、0.25%、0.5% 和 0.8% 的合金试样。试样采用金属型于 (700±5) °C 浇注, 热处理后加工成尺寸为 $d5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的拉伸试样。热处理工艺采用 T6 热处理工艺, 即固溶处理(490 °C, 8 h)+(515 °C, 6 h)+(538 °C, 4 h), 然后淬火(室温水淬), 时效处理(170 °C, 8 h, 空冷)。

表 1 实验材料的化学成分

Table 1 Composition analysis of experimental alloy (mass fraction, %)

Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Zr	Al
6.8	1.5	0.35	0.17	0.18	0.14	Bal.

在新三思 CMT-5105 电子万能材料试验机上进行高温拉伸性能测试, 升温速率为 10 °C/min, 分别在 200、250 和 300 °C 下保温 10 min 后以 2 mm/min 速度拉伸, 每组试样力学性能值取至少 3 根试样值的平均值。采用北京恒久 HCT 差热分析仪对各组合金试样进行差热分析(DTA)测试, 采用 Al_2O_3 坩埚作为样品坩埚和参比坩埚, 测量温度范围从室温至 700 °C, 加热速率为 5 °C/min。采用蔡司 EVO MA15 扫描电子显微镜观察和分析显微组织。组织观察试样取自各拉伸试

样夹持端, 组织腐蚀剂为盐酸(3 mL)、硝酸(5 mL)、氢氟酸(2 mL)和蒸馏水(250 mL)的混合液。

2 结果与分析

2.1 稀土 Y 对 AlSi7Cu2Mg 合金高温力学性能的影响

图 1 所示为 Y 含量为 0.15% 的 AlSi7Cu2Mg 合金和文献[13-15]中同类铝合金在不同温度(200、250 和 300 °C)下的力学性能。从图 1(a)可以看出, 在 200 °C 下添加 Y 的合金的抗拉强度比未添加 Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金的抗拉强度略低 8 MPa, 而在 250 和 300 °C 下则比未添加 Y 的同类发动机缸体缸盖用铝合金的抗拉强度高出 15~26 MPa。从图 1(b)可以看出, 添加 Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金伸长率随拉伸温度的升高而降低, 这同文献[13]中未添加 Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金的伸长率变化规律相同, 但添加 0.15% Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金的伸长率则比同类合金的^[13-15]高出

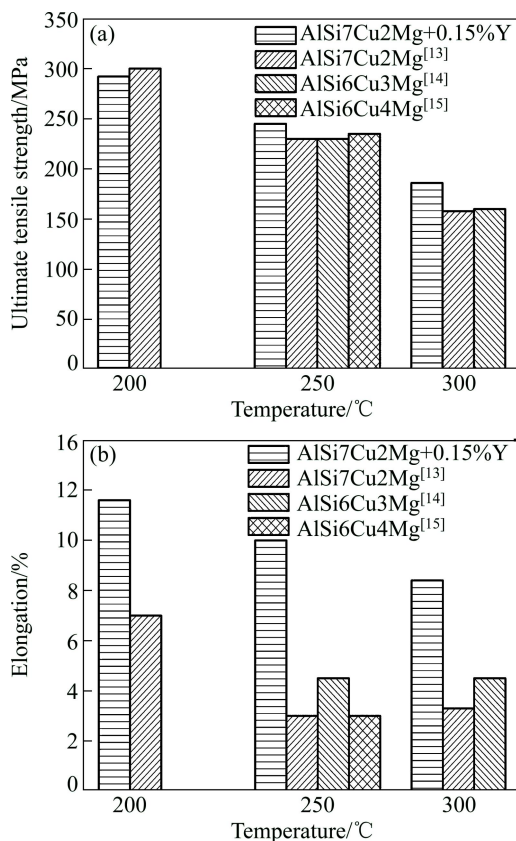


图 1 含 Y 0.15% 的 AlSi7Cu2Mg 合金在不同温度下的力学性能

Fig. 1 Tensile properties of AlSi7Cu2Mg alloy containing 0.15%Y at various temperatures: (a) Tensile strength; (b) Elongation

65%~100%。故添加 0.15%Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金的在高温下具有较好的强度和塑性。

通常发动机用铸造铝合金的耐热温度范围主要集中在 200 到 300 °C 之间, 因而选取 250 °C 来研究不同 Y 含量对合金力学性能影响。由图 2(a)可以看出, 随 Y 含量的增加, 合金在 250 °C 高温下保温 10 min 后的抗拉强度和屈服强度表现出相同的规律, 即随着 Y 含量的增加, 高温强度先增加后降低。在 Y 含量为 0.1% 时, 合金抗拉强度达到最大值, 约为 275 MPa, 屈服强度约为 240 MPa, 与未加 Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金相比, 两者分别高出 17% 和 11.6%。从图 2(b)可以看出, 随着 Y 含量的增加, 合金试样伸长率总体上呈下降趋势, 但在 Y 含量为 0.1% 时, 伸长率为 12.4%, 与未加 Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金相比, 提高了 10.3% 左右, 而随后伸长率迅速下降; 当 Y 含量为 0.8% 时, 伸长率约为 3%, 下降幅度超过 70%。故当 Y 的加入量达到 0.1% 左右时, AlSi7Cu2Mg 合金的高温力学性能最好。

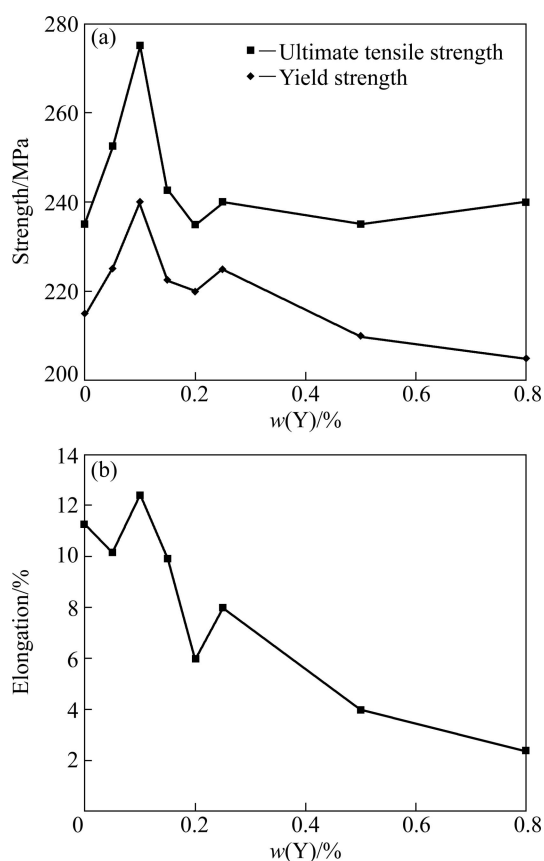


图 2 不同 Y 含量对 AlSi7Cu2Mg 合金高温(250 °C)力学性能的影响

Fig. 2 Effect of Y content on mechanical properties of AlSi7Cu2Mg alloys at elevated temperature (250 °C): (a) Strength; (b) Elongation

Y 在 Al 中的固溶度很小, 而同合金中其他元素形成金属间化合物能力较强, 这种化合物常常存在于晶界, 结晶时对晶粒长大有阻碍作用, 可细化晶粒。当加入少量 Y 时, 由于晶界上强化相数量的增加, 合金的抗变形能力提高即强度提高^[10, 16]。但是, 稀土 Y 加入过多时, 由于大量的金属间化合物富集于晶界, 可能引起晶粒内部弥散强化相大幅度减少, 使得基体强度降低, 最终导致材料整体力学性能的下降。

2.2 稀土 Y 对 AlSi7Cu2Mg 合金显微组织的影响

在合金中添加不同含量的稀土元素, 其发挥的作用不同^[9], 添加少量稀土元素时, 由于未形成稀土金属间化合物, 稀土元素在合金中主要起变质和细化作用, 从而使合金获得力学性能得到一定改善。当稀土元素添加量足以生成金属间化合物以及固溶强化相时, 可以显著提高合金的力学性能。由于 Y 含量总体偏少, 在扫描电镜下利用能谱技术没有发现富稀土 Y 相, 但是共晶硅相随着 Y 含量的不同而有所变化。

图 3 所示为不同 Y 含量的 AlSi7Cu2Mg 合金试样的 SEM 像。从图 3(a)可以看出, 在没有添加 Y 的情况下, 合金中的共晶硅相呈粗糙的片状结构并且带有锋利的边缘。当 Y 含量达到 0.05% 时, 合金中的共晶硅相的形貌由粗糙的片状结构逐渐转变为短棒状或颗粒状的结构, 如图 3(b)所示。当 Y 含量达到 0.1%, 合金中的共晶硅相的形貌大量呈颗粒状, 如图 3(c)所示。随着 Y 含量的继续增加, 合金中的共晶硅相又开始变得粗大, 这可能是导致合金性能的下降的重要原因, 如图 3(e)和(f)所示。

表 2 给出了不同含量 Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金中 Si 相颗粒大小及其形状因子。在没有添加稀土 Y 的情况下, AlSi7Cu2Mg 合金中共晶硅相的平均长度约为 6.5 μm, 标准差(SD)为 3.78 μm; 当添加 0.05% 的 Y 后,

表 2 不同 Y 含量的 AlSi7Cu2Mg 合金中硅相颗粒大小及其形状因子

Table 2 Particle size and aspect of Si phase in AlSi7Cu2Mg alloy with different Y contents

Y content	Size/μm		Aspect	
	Value	SD	Value	SD
0	6.5	3.78	2.70	1.67
0.05	5.2	2.54	2.26	1.09
0.10	4.3	2.08	1.72	0.98
0.15	6.66	3.55	2.59	1.42
0.20	5.14	2.50	2.17	1.33
0.25	6.04	3.98	2.45	1.48

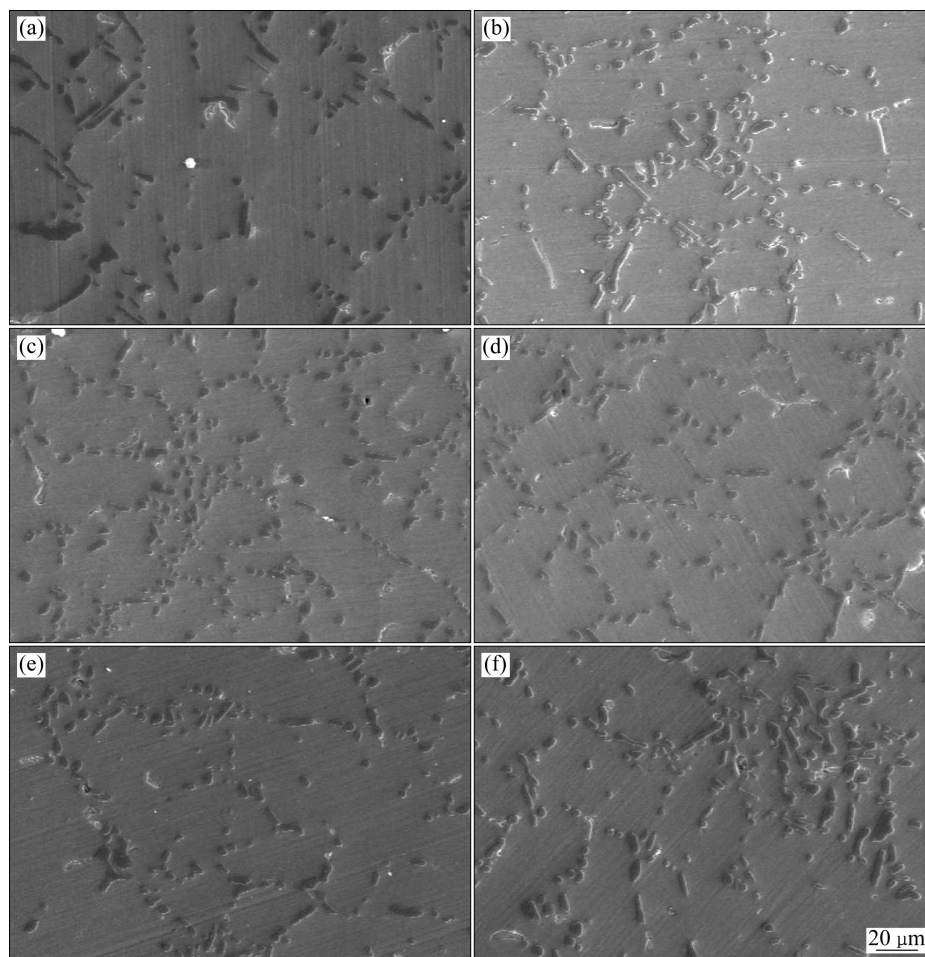


图 3 不同 Y 含量的 AlSi7Cu2Mg 合金的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of AlSi7Cu2Mg alloys with different contents of Y: (a) 0; (b) 0.05%; (c) 0.1%; (d) 0.15%; (e) 0.2%; (f) 0.25%

组织中共晶硅相的平均长度约为 $5.2\ \mu\text{m}$ ，标准差为 $2.54\ \mu\text{m}$ ；当 Y 含量达到 0.1% 时，共晶硅相的平均长度约为 $4.3\ \mu\text{m}$ ，标准差为 $2.08\ \mu\text{m}$ ；当继续增加 Y 含量时，共晶硅相平均长度又有长大趋势。

微量 Y 不仅改变了共晶硅相颗粒尺寸，也改变了其形貌和分布，由表 2 可以看出，在 Y 含量为 0.1% 左右时，合金中大部分共晶硅相的形状因子接近 1；随着 Y 含量的增加，合金中较多共晶硅相的形状因子又逐渐增大，共晶硅相颗粒的数量又逐渐减少，这说明在 Y 对亚共晶硅变质处理中，存在着过变质现象。

2.3 不同 Y 含量 AlSi7Cu2Mg 合金的 DTA 分析

图 4 所示为 8 组试样含 Y (0.0~0.25%) 的 AlSi7Cu2Mg 合金 DTA 曲线。由图 4 可见，样品在加热过程中出现了两个吸热峰值点，第一个峰值点为该合金的共晶组织熔化吸热峰值，第二个吸热峰值在 $621\ ^\circ\text{C}$ 附近，处于 $\alpha(\text{Al})$ 熔化温度范围内。由图 4 内置放大图 ($575\sim595\ ^\circ\text{C}$ 范围) 可以看出，未添加 Y 的

AlSi7Cu2Mg 合金的第一个峰值点为 $588\ ^\circ\text{C}$ ，随着 Y 含量的增加，第一个峰值点均向左发生偏移，偏移最大达 4° (Y 含量为 0.25%) 左右。这说明添加稀土 Y 降低了 AlSi7Cu2Mg 合金的共晶点。KNUUTINEN 等^[17]通过热分析证实了在合金中添加微量的 Y 后，抑制了共晶的生长，且有较大的共晶过冷度。DJURDJEVIC 等^[18]认为硅相的形貌变化依赖于共晶的形核和温度的变化，由于缺乏共晶过冷，共晶硅相以片状和树枝状生长，然而，较大的过冷度能够使硅相以非平面均匀生长，因而导致了共晶硅相形貌的改变。共晶硅的变质影响离不开共晶硅的形核和生长过程，形核率和长大速度均与过冷度有关，共晶硅的生长和形核需要足够的过冷度。

过冷度的增加促使了共晶的形核和长大，然而过冷度并不能单独被用来确定共晶硅相是纤维状的还是片状的。根据 Luand 和 Hellawell 理论，即由杂质诱发的孪晶引发了共晶硅形貌的改变^[19]，稀土 Y 原子吸附在硅的生长台阶或孪晶沟槽上，改变了硅原子的堆

积次序, 进而使共晶硅上固有的原子台阶或孪晶沟槽减弱或消失, 使共晶硅相的生长方向不断改变, 分枝也逐渐增多, 从而改变共晶硅相的形貌和大小。

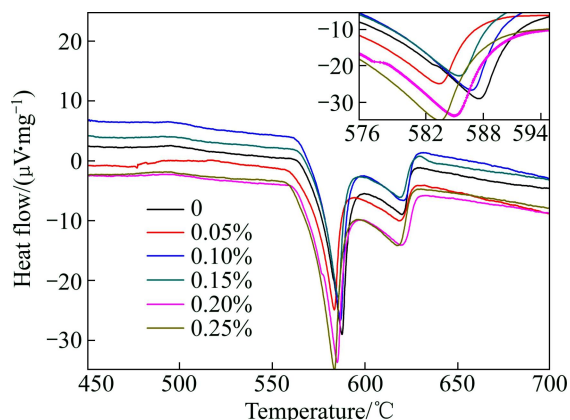


图 4 添加不同量稀土 Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金 DTA 曲线

Fig. 4 DTA curves of AlSi7Cu2Mg alloys with different contents of Y

2.4 断口形貌

图 5 所示为含 0.15%Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金在 200~300 °C 拉伸后的断口形貌。从图 5 可知, AlSi7Cu2Mg 合金的高温断口表现出韧性断裂为主, 韧性和脆性断裂共存特征。较大的塑孔均匀分布于细小的等轴韧窝群中, 形成了明显的凿峰型宏观断口: 200 °C 下的断口韧窝数量多, 但韧窝小而浅; 250 °C 时, 断口上韧窝较 200 °C 有长大趋势, 并开始出现少量的准解理撕裂棱; 300 °C 下, 拉伸断口的韧窝变得特别粗大且深, 断口上萌生了较多的解理面。含 0.15%Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金断口形貌随拉伸温度不同而产生差异的现象, 主要与高温下晶界的滑移及晶间空位的移动、聚集有关。温度升高, 位错密度及位错阻力减小, 位错运动速度加快, 显微空洞形成及扩展进程加速^[20]。当温度高到一定程度后, 大量形成的显微空洞使材料在来不及产生较大的变形时便开始产生裂纹并快速失稳, 从而导致材料拉伸强度和塑性降低。

3 结论

1) 随温度的升高, 0.15%Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金的强度及伸长率均呈下降趋势, 但添加 0.15%Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金的抗拉强度比未添加 Y 的同类铸造铝合金高约 15~26 MPa, 而伸长率则高 65%~100%。

2) 随着 Y 含量的增加, AlSi7Cu2Mg 合金在 250

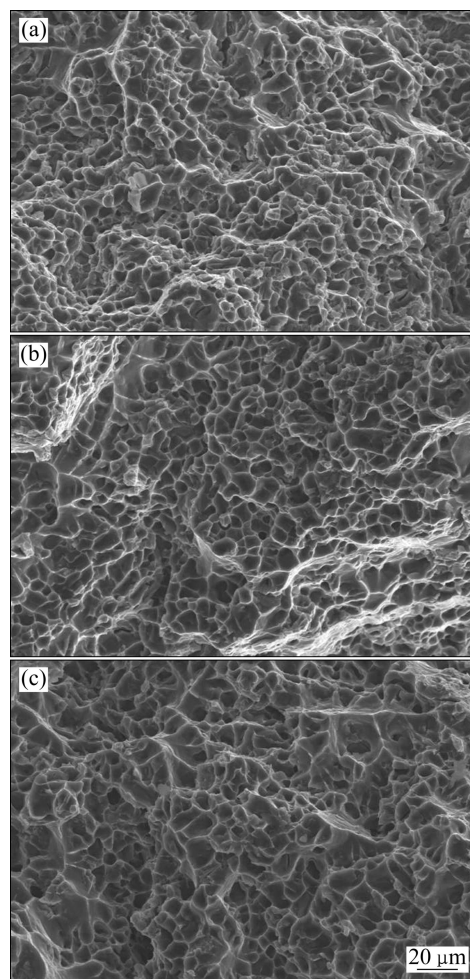


图 5 Y 含量为 0.15% 的 AlSi7Cu2Mg 合金在不同温度下拉伸断口的 SEM 像

Fig. 5 SEM images of tensile fracture of AlSi7Cu2Mg alloys with 0.15%Y tested at different temperatures for 10 min: (a) 200 °C; (b) 250 °C; (c) 300 °C

°C 下的高温强度(抗拉强度和屈服强度)先增加后降低, 而伸长率则随着 Y 含量的增加, 总体呈下降趋势, 其中含 0.1%Y 的 AlSi7Cu2Mg 合金高温性能最高, 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 275 MPa、240 MPa 和 12.4%。

3) 微量 Y 对 AlSi7Cu2Mg 合金高温性能的改善主要是因其对该合金共晶硅相变质细化作用。当 Y 含量为 0.1% 时, AlSi7Cu2Mg 合金在 250 °C 下的高温力学性能达到最大值时, 硅相颗粒尺寸最小且圆整度最高。

REFERENCES

- [1] 石为喜, 高波, 涂赣峰, 李世伟. Nd 变质过共晶 Al-17.5%Si 合金的微观组织和断口形貌[J]. 中国有色金属学报, 2011,

- 21(4): 719–725.
- SHI Wei-xi, GAO Bo, TU Gan-feng, LI Shi-wei. Microstructure and fracture morphology of hypereutectic Al-17.5%Si alloy modified with Nd[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(4): 719–725.
- [2] ZHANG Wen-da, LIU Yun, YANG Jing, DANG Jin-zhi, XU Hong, DU Zhen-min. Effects of Sc content on the microstructure of as-cast Al-7 wt.% Si alloys[J]. Materials Characterization, 2012, 66: 104–110.
- [3] 李桂荣, 王宏明, 赵玉涛, 陈刚, 陈登斌, 韩剑, 戴起勋. 稀土钇对 7055 铝合金熔炼和凝固过程的作用机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(1): 80–84.
- LI Gui-rong, WANG Hong-ming, ZHAO Yu-tao, CHEN Gang, CHEN Deng-bin, HAN Jian, DAI Qi-xun. Effect Mechanism of yttrium on melting and solidification of 7055 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(1): 80–84.
- [4] LI Min, WANG Hong-wei, WEI Zun-jie, ZHU Zhao-jun. The effect of Y on the hot-tearing resistance of Al-5 wt.% Cu based alloy[J]. Materials and Design, 2009, 31(5): 2483–2487.
- [5] WAN Di-qing. Si phase morphology and mechanical properties of ZL107 Al alloy improved by La modification and heat treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012(22): 1051–1054.
- [6] XING Peng-fei, GAO Bo, ZHUANG Yan-xin, LIU Kai-hua, TU Gan-feng. Effect of erbium on properties and microstructure of Al-Si eutectic alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2010, 28(6): 927–930.
- [7] 张新明, 王文韬, 刘波, 陈明安, 刘瑛, 高志国, 叶凌英, 贾寓真. Nd 对 2519 铝合金组织与耐热性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 15–20.
- ZHANG Xin-ming, WANG Wen-tao, LIU Bo, CHEN Ming-an, LIU Ying, GAO Zhi-guo, YE ling-ying, JIA Yu-zhen. Effect of Nd addition on microstructures and heat-resisting properties of 2519 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 15–20.
- [8] ZHANG Xing-guo, MEI Fei-qiang, ZHANG Huan-yue, WANG Shao-hua, FANG Can-feng, HAO Hai. Effects of Gd and Y additions on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 552: 230–235.
- [9] 李慧中, 张新明, 陈明安, 周卓平, 龚敏如. 稀土钇对 2519 合金组织及耐热性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(1): 38–41.
- LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, ZHOU Zhuo-ping, GONG Min-ru. Effect of Y addition on microstructure and elevated temperature properties of 2519 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(1): 38–41.
- [10] 李慧中, 张新明, 陈明安, 周卓平. 钇对 2519 铝合金铸态组织的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(4): 545–549.
- LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, ZHOU Zhuo-ping. Effect of yttrium on as-cast microstructure of 2519 aluminum alloy[J]. Journal of Central South University of Technology: Science and Technology, 2005, 36(4): 545–549.
- [11] 侯文胜, 陈刚, 谢俊, 赵玉涛, 徐勇华, 余莹. 变质与热处理对 Al-Si-Fe/Al-20Si 复合材料组织和磨损性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(22): 3126–3130.
- HOU Wen-sheng, CHEN Gang, XIE Jun, ZHAO Yu-tao, XU Yong-hua, YU Ying. Effect of modification and heat treatment on microstructure and wear properties of Al-Si-Fe/Al-20Si composite[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(22): 3126–3130.
- [12] RINCÓN E, LÓPEZ H F, CISNEROS M M, MANCHA H, CISNEROS M A. Effect of temperature on the tensile properties of an as-cast aluminum alloy A319[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 452/453: 682–687.
- [13] 陈继森, 王草原, 白绿水. 高强度铸造铝合金 ZL702A 缸盖材料的研究[J]. 材料工程, 1990(4): 21–23.
- CHEN Ji-sen, WANG Cao-yuan, BAI Lu-shui. Research on high strength aluminum alloy ZL702A for cylinder head[J]. Journal of Materials Engineering, 1990(4): 21–23.
- [14] 贾均, 陈玉勇, 桂满昌, 朱键. 高强耐热铸造铝硅合金的试验研究[J]. 航空学报, 1994, 15(2): 242–245.
- JIA Jun, CHENG Yu-yong, GUI Man-chang, ZHU Jian. Investigation of high strength and heat-resisting cast Al-Si alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(2): 242–245.
- [15] 陈大辉, 汤进军, 郇红岩, 贾祥磊, 侯立群, 张广明. 发动机缸盖用新型 Al-Si-Cu-Mg 铝合金材料[J]. 车用发动机, 2011(6): 85–89.
- CHEN Da-hui, TANG Jin-jun, TAI Hong-yan, JIA Xiang-lei, HOU Li-qun, ZHANG Guang-ming. New Al-Si-Cu-Mg aluminum alloy material for engine cylinder head[J]. Vehicle Engine, 2011(6): 85–89.
- [16] 赵忠, 樊自田, 成平, 蒋文明, 董选普. Al-Si-Mg-Y 合金消失模铸造振动压力凝固的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(8): 1520–1526.
- ZHAO Zhong, FAN Zi-tian, CHENG Ping, JIANG Wen-ming, TONG Xuan-pu. Microstructures and properties of Al-Si-Mg-Y alloy with vibration-pressure solidification in lost form casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(8): 1520–1526.
- [17] NOGITA K, KNUUTINEN A, MCDONALD S D, DAHLE A K. Mechanisms of eutectic solidification in Al-Si alloys modified with Ba, Ca, Y and Yb[J]. Light Metals, 2001, 1(4): 219–228.
- [18] DJURDJEVIC M, JIANG H, SOKOLOWSKI J. On-line prediction of aluminum-silicon eutectic modification level using thermal analysis[J]. Materials Characterization, 2001, 46(1): 31–38.
- [19] LU Shu-zu, HELLAWELL A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning[J]. Metallurgical Transactions A, 1987, 18(10): 1721–1733.
- [20] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- ZHONG Qun-peng, ZHAO Zi-hua. Fractography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

(编辑 何学锋)