2017年12月 December 2017

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2017.12.06

混合稀土对过共晶 Al-20Si 合金 显微组织与力学性能的影响



李庆林^{1,2},李斌强¹,李进宝¹,兰晔峰^{1,2},夏天东^{1,2}

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院,兰州 730050;2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室,兰州 730050)

摘 要:采用光学显微镜、扫描电子显微镜、电子探针及力学性能测试,研究了不同比例的混合稀土 Pr 和 Y 对 过共晶 Al-20Si 合金显微组织与力学性能的影响。结果表明: Al-20Si 合金中添加稀土 Pr 和 Y 能使合金中粗大的 块状及五瓣星状初生 Si 变质为细小的块状和部分粒化;当 Pr 和 Y 按质量比 1:1 的比例混合(0.5%Pr、0.5%Y,质 量分数)时,细化效果最为显著,初生 Si 尺寸由 96 μm 减小到 41 μm,减小 57.3%,共晶 Si 由粗大的针片状变质 为类蠕点状;此时,合金的抗拉强度由 93 MPa 提高到 143 MPa,伸长率从 1.12%提高到 2.79%,分别提高 53.8% 和 149%。

关键词: Al-20Si 合金; 混合稀土; 显微组织; 力学性能 文章编号: 1004-0609(2017)-12-2443-08 中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

过共晶铝硅合金因良好的导热性、低密度、低热 膨胀系数及良好的流动性,被作为传统铸铁的理想替 代材料,用来生产汽车发动机活塞、缸体缸盖等零部 件,以减轻自身质量,降低耗油量,实现节能环保的 目的^[1-2]。但传统铸造的过共晶铝硅合金组织中存在粗 大的块状、不规则的五瓣星状初生 Si 和粗大针片状共 晶 Si,它们分布在合金基体上,严重割裂了基体的连 续性,且尖端存在应力集中,降低了合金的力学性 能^[3-5]。因此,变质过共晶铝硅合金中的 Si 相,细化 合金组织,对提高合金的力学性能及扩大合金材料的 使用范围至关重要。

铝硅合金的细化方法主要有熔体处理、动力学细化、快速凝固和化学变质,其中化学变质法因工艺简单、细化技术成熟、生产成本低、细化效果良好等优点被广泛的应用于工业生产^[6]。已有研究表明^[7–8],P能够细化初生 Si,是因为 P 与合金熔液中的 Al 反应生成了较高熔点(约 1060 °C)的 AlP 化合物,且该化合物与初生 Si 有着相同的晶体结构(FCC)和相近的晶格常数(a_{AP} =0.546 nm, a_{Si} =0.54 nm),二者的错配度很小,可以作为其非均质形核的核心,提高初生 Si 的形核率,细化初生 Si。然而,P 的燃点较低(约 240 °C),不宜储存和运输,且当 P 加入到高温合金熔体中时会形成有毒的腐蚀性烟气 P₂O₅,对环境造成很大的污

染,而素有"工业维生素"之称的稀土金属因其独特的 电子层结构和物理化学性质,具有很强的自旋耦合性, 少量的稀土添加量就能够对初生 Si 和共晶 Si 起到很 好的变质作用^[9-10]。

目前,很多学者都致力于单一稀土和混合稀土对 铝硅合金的变质研究。如 LI 等^[5]通过向过共晶 Al-20%Si 合金中添加稀土 Ce,发现随着 Ce 含量的增 加,初生Si 由粗大的块状及五瓣星状向边缘钝化的块 状转变, 且当 Ce 含量为 1.0%(质量分数)时, 细化为 均匀分布的小块状;而共晶 Si 由粗大的针片状逐渐地 转变为多分枝的纤维状,同时合金的抗拉强度和伸长 率分别提高了 63.2%和 58.1%。LI 等^[11]向 Al-10Si-3Cu 合金中添加不同含量的混合稀土(La+Yb),发现稀土对 合金组织中的初生 α (Al)、共晶 Si 和 β -Al₅FeSi 相都有 很好的细化效果,与未变质时的组织相比,当稀土含 量为 0.6%(质量分数)时,各相的细化效果均达到最佳, 其中 α(Al)的二次枝晶臂间距减小 50.83%, 共晶 Si 由 粗大的板片状变为细小的颗粒状,尺寸减小 81.78%, 而 β -Al₅FeSi 相由长针状变成了短杆状,平均尺寸为 16.4 µm; 同时, 合金的抗拉强度、伸长率和硬度分别提 高 92.4%、132.1%和 29.8%。熊俊杰等^[12]通过向 ADC12 合金中添加不同含量的 Pr/Ce 混合稀土,发现当稀土 含量为 0.6%时, 粗大的初生 α(Al)相变得细小甚至局

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51561021);甘肃省自然科学基金资助项目(1606RJZA024);甘肃省高校科研基金资助项目(2015B-035) 收稿日期:2016-09-02;修订日期:2017-02-28 部圆整;共晶 Si 变质为细小弥散的颗粒状,且合金的 抗拉强度和伸长率分别提高了 34.91%和 51.24%。HU 等^[13]研究了稀土 Nd 对近共晶 Al-12Si 合金显微组织及 力学性能的影响,结果表明,当 Nd 为 0.3%时,生成 的纳米相 Al₂Nd 起到异质形核的作用,使得初生 Si 细 化为均匀的颗粒状,共晶 Si 变质为纤维状,合金的抗 拉强度和伸长率分别达到 252 MPa 和 13%。ZUO 等^[14] 将 Al-Y-P 中间合金加入到 Al-18Si 合金中,发现当变 质剂含量为 1.5%(质量分数),并在 780 ℃保温 30~60 min 时, Si 原子能够最大程度地促使 YP 颗粒的结构 向 AlP 颗粒演变,而 AlP 颗粒作为异质形核剂有效地 变质了合金组织,使其抗拉强度提高了 16.8%。然而, 混合稀土对过共晶 Al-Si 合金变质的研究鲜见报道。

本文作者通过向过共晶 Al-20Si 合金熔体中添加 不同比例的稀土 Pr 和 Y, 与单一稀土 Pr 和 Y 的添加 效果进行对比分析,研究了混合稀土 Pr 和 Y 对 Al-20Si 合金显微组织及力学性能的影响,同时探讨了混合稀 土对过共晶铝硅合金中 Si 相的变质机理。

1 实验

实验材料用由工业纯铝和工业结晶硅熔配而成的 过共晶 Al-20Si 合金,合金的化学成分如表 1 所示。 单一稀土 Pr 和 Y 的添加量均为 0.5%(质量分数);混合 稀土 Pr 和 Y 的总添加量为 1.0%(质量分数),具体的添 加量(质量分数)分别为(0,0)、(0.3%,0.7%)、(0.4%, 0.6%)、(0.5%,0.5%)、(0.6%,0.4%)、(0.7%,0.3%)。

表1 过共晶 Al-20Si 合金化学成分

Table 1Chemical composition of hypereutectic Al-20Si alloy(mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Al
19.8	0.16	0.04	0.15	0.03	Bal

将适量的过共晶 Al-20Si 合金加入到石墨坩埚中, 于 780 ℃下在 Si-C 棒加热炉中重熔,随后将稀土 Pr 和 Y 用铝箔包覆压入到合金熔体中,每隔 5 min 搅拌 一次,直至其全部熔化后保温 30 min; 然后,按合金 总质量的 0.5%称取粉末六氯乙烷,用铝箔包覆压入到 合金熔体中进行精炼除杂,保温 5 min 待熔渣上浮后 扒渣;在熔体温度降至 710~720 ℃时浇入到预热了 200 ℃的金属模具中。待其冷却成形后,在合金试棒 底部相同高度处取样,制备得到金相试样。

将试样在腐蚀液(95 mL H₂O、1.5 mL HCl、2.5 mL

HNO₃、1 mL HF)中浸蚀,用 MeF3 型光学显微镜和 FEG-450 型热场发射扫描电子显微镜观察初生 Si 及 共晶 Si 的形貌与分布,并借助 Image Pro Plus 软件测 量初生 Si 的平均晶粒尺寸,利用 EPMA1600 型电子 探针进行各元素的分布分析;将试棒按国家标准加工 成标距为 40 mm 的拉伸试样,在 AG-10TA 型万能材 料试验机上进行拉伸试验,并用扫描电子显微镜进行 断口分析。

2 实验结果

2.1 稀土 Pr 和 Y 变质对初生 Si 的影响

图 1 所示为稀土 Pr 和 Y 添加量对 Al-20Si 合金中 初生 Si 形貌的影响。图 1(a)所示为未变质时的初生 Si 显微组织,可以看出,存在着粗大的块状及不规则的 五瓣星状初生 Si, 边缘尖锐, 平均尺寸为 96 µm; 当 分别添加 0.5%Pr 和 0.5%Y 时,初生 Si 仍呈不规则的 粗大块状,平均尺寸分别为 87 μm 和 75 μm(见图 1(b) 和(c)); 当 Pr 和 Y 的添加量分别为 0.3%和 0.7%时, 比较图 1(a)中未变质的初生 Si 形貌可以发现, 五瓣星 状初生 Si 消失, 粗大的块状初生 Si 变质为边缘钝化 的块状,平均尺寸减小为 72 µm(见图 1(d))。图 1(e) 中稀土 Pr 和 Y 的添加量分别为 0.4%和 0.6%, 初生 Si 变质为更加均匀的小块状,尺寸减小到 55 µm; 当 稀土 Pr 和 Y 按质量比 1:1 混合(0.5%Pr, 0.5%Y)时, 初生 Si 变质为细小的颗粒状, 细化效果达到最佳, 平 均尺寸减小到 41 µm, 减小了 57.3%(见图 1(f))。然而, 随着 Pr 含量的增加, Y 含量的减少, 初生 Si 变质为 边缘钝化的块状,但初生 Si 的尺寸没有进一步地细 化,反而出现了粗化现象(见图 1(g)和图 1(h))。也就是 说,Al-20Si 合金中初生 Si 的平均尺寸随着稀土 Pr 和 Y 混合比例的改变呈现先减小后增大的变化趋势,其 变化如图2所示。

2.2 稀土 Pr 和 Y 变质对共晶 Si 的影响

图 3 所示为稀土 Pr 和 Y 添加量对共晶 Si 形貌的 影响。从图 3(a)可以看出,未变质的共晶 Si 为粗大的 针片状,棱角尖锐。当分别添加 0.5%Pr 和 0.5%Y 时, 共晶 Si 形貌仍为粗大的针片状,端部稍有钝化(见图 3(b)和(c));在图 3(d)中,当稀土 Pr 和 Y 的添加量分 别为 0.3%和 0.7%时,粗大的针片状共晶 Si 尺寸减小; 当稀土 Pr 和 Y 的添加量为 0.4%和 0.6%时,共晶 Si 变质为短杆状,边缘钝化(见图 3(e));当添加 0.5%Pr 和 0.5%Y 时,共晶 Si 变质为密集分布的类蠕点状,





图 2 不同比例稀土 Pr 和 Y 混合合金对初生 Si 平均尺寸的 影响

Fig. 2 Effect of different ratios of Pr to Y on average size of primary Si

其形貌如图 3(f)所示;而在图 3(g)和(h)中,随着稀土 添加比例的改变,共晶 Si 变质为棱角钝化的短杆状。

2.3 合金的力学性能

图 4 所示为不同比例稀土 Pr 和 Y 混合对 Al-20Si 合金力学性能的影响。从图 4 可看出,随着 Pr 和 Y 混合比例的改变,其抗拉强度和伸长率呈现先上升后 下降的变化趋势。当Pr和Y的质量分数为0.3%和0.7% 时,抗拉强度从 93 MPa 提高到 114 MPa,伸长率从 1.12%提高到 1.26%; 随着 Pr 和 Y 混合比例的改变, 当 0.4%Pr 和 0.6%Y 添加到 Al-20Si 熔体中时, 合金抗 拉强度和伸长率分别提高到 138 MPa 和 1.63%; Pr 和 Y 按 1:1 的比例(0.5%Pr, 0.5%Y)混合时, Al-20Si 合金 抗拉强度达到最大值 143MPa, 与未变质时相比, 增 加了 53.8%, 伸长率提高到 2.79%, 提高了 149%; 随 着稀土 Pr 和 Y 添加比例的进一步改变, 当 Pr 与 Y 质 量比为 6:4 和 7:3 时,合金的抗拉强度和伸长率均呈 现下降的趋势。这是因为随着 Pr 含量的增加, Y 含量 的减少,混合稀土 Pr 和 Y 对合金的变质效果减弱, 从而引起抗拉强度与伸长率的下降。





图 4 不同比例 称 土 Pr 和 Y 混合时 对 Al-2081 合金 刀字 性能 的影响

Fig. 4 Effect of different ratios of Pr to Y on mechanical properties of Al-20Si alloy

2.4 合金的断口形貌

图 5 所示为混合稀土 Pr 和 Y 对过共晶 Al-20Si 合

金拉伸断口形貌的影响。从图 5(a)中可以看出,未变 质时的合金拉伸断口有明显的解理台阶,这是因为未 变质时,粗大的五瓣星状初生 Si 及针片状共晶 Si 尖 端容易形成应力集中,在外加载荷的条件下产生裂纹, 并使得裂纹沿特定方向扩展,导致穿晶断裂;随着稀 土 Pr 和 Y 的添加,拉伸断口中不规则的脆性平坦区 及粗大的撕裂棱明显减少,如图 5(b)所示。在图 5(c) 和(d)中,有局部的韧窝出现,表现出以脆性断裂为主 的韧脆混合断裂特征;当稀土 Pr 和 Y 的混合比例进 一步改变时,拉伸断口中韧窝数量急剧减少,存在较 多的脆性平坦区和解理台阶,表现出典型的脆性断裂 特征,如图 5(e)和(f)。

3 分析与讨论

3.1 稀土对 Si 相的变质机理

过共晶 Al-20Si 合金凝固过程中,先析出的初生



图 5 不同比例稀土 Pr 和 Y 混合时合金的断口形貌

Fig. 5 Tensile fracture morphologies of alloys with different ratio of Pr and Y: (a) Unmodified; (b) (0.3%Pr, 0.7%Y); (c) (0.4%Pr, 0.6%Y); (d) (0.5%Pr, 0.5%Y); (e) (0.6%Pr, 0.4%Y); (f) (0.7%Pr, 0.3%Y)

Si 具有小平面生长的特性,其表面高指数的非密排面 因较快的生长速度而逐渐消失,使得初生 Si 沿垂直于 低指数密排面 {111} 的方向上缓慢生长,表现出如图 1(a)所示的粗大块状和不规则五瓣星状。研究表 明^[15-17],共晶团(α(Al)+Si)在凝固过程中,由于 Al 和 Si 具有不同的收缩率及原子错配,使得 Si 相产生机械 孪晶,形成了孪晶凹槽,从而改变了 Si 晶体的生长方 向并不断分枝,长成了如图 3(a)所示的粗大针片状。

LU 等^[18]的研究表明,当稀土变质剂的原子半径 与 Si 原子半径的比值等于或接近 1.646 时,其具有很 好的变质能力。Pr 的原子半径为 0.183 nm,Y 的原子 半径为 0.18 nm,Si 的原子半径为 0.117 nm,其比值 分别为 1.564 和 1.538。另有研究表明^[19-21],当稀土原 子嵌入 Si 的晶格点阵中时,因为其较大的原子体积使 得 Si 晶体产生晶格畸变,势能增加,诱发出高密度的 原子台阶和孪晶凹槽,促进溶质原子向台阶及凹槽处 的富集,改变了 Si 相的生长方式,由各向异性转变为 各向同性生长,从而有效变质了 Al-Si 合金中的 Si 相, 改善了合金显微组织。

图 6(a)所示为 Al-20Si-0.5Pr-0.5Y 合金背散射电子 图,可以看到在初生 Si 的边缘和 Si/Al 界面处存在着 细小的亮白色颗粒,图 6(b)所示为亮白点的成分分析 图,结果表明亮白色颗粒中主要有 Al、Si、Pr 和 Y 这 4 种元素(横坐标的 4 种颜色分别代表这 4 种元素)。这

是因为比较 Al 和 Si,稀土 Pr 和 Y 具有更大的电负性, 在合金凝固过程中易与其他元素结合,形成金属间化 合物。为了进一步讨论稀土 Pr 和 Y 的存在形式与分 布状态, 对图 6(a)中 Al-20Si-0.5Pr-0.5Y 合金的背散射 形貌图进行元素面分布扫描分析,结果如图 6(c)~(f) 所示。由图 6(c)~(f)可以看出,在 Si 相边缘和 Si/Al 界面处分布着稀土 Pr 和 Y。一方面,由于稀土原子在 凝固过程中放出的热量较高,延缓了结晶进程,这样 在相同条件下 Si 相将会优先结晶,导致稀土富集在相 界前沿,阻碍了溶质原子向界面的扩散,抑制了 Si 相生长,从而细化了晶粒。同时,稀土在 Si/Al 界面 处的富集使得枝晶前沿的热量不能立即扩散,就会导 致枝晶熔断游离,利于晶粒的细化。另一方面,由于 Pr 和 Y 在 Al、Si 中的固溶度极其有限,因此在合金 凝固过程中,稀土原子被推到 Si 相的生长界面前沿, 促使 Si 晶体产生高密度的孪晶凹槽, 从而有效变质了 初生 Si 及共晶 Si。另外,稀土原子在 Si 相界面前沿 富集,会导致过冷度增大,促进 Si 晶体的形核,并抑 制 Si 相长大,有效地细化了初生 Si 和共晶 Si。因此, 混合稀土 Pr 和 Y 对过共晶 Al-Si 合金中 Si 相的变质 机理可归纳为抑制生长机制和杂质诱发孪晶机制。

3.2 Si 相与合金的力学性能

随着稀土 Pr 和 Y 对初生 Si 及共晶 Si 的变质, 过

共晶 Al-20Si 合金的抗拉强度和伸长率表现出与显微 组织相同的变化趋势。根据式(1)可知^[6,22]:

$$\sigma_{\rm f} = \left(\frac{2E\gamma}{\pi C}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中: γ表示断裂能; E 是弹性模量; C 是晶粒内部

的缺陷长度。一方面,由于 Al-Si 合金的力学性能对 Si 相形貌有着极强的敏感性^[23],因此随着粗大的块 状、不规则的五瓣星状初生 Si 转变为均匀细小的块 状,粗大的针片状共晶 Si 变质为类蠕点状,使得晶粒 内部缺陷及其长度 C 明显减少, Si 相所能承受的最大 应力 $\sigma_{\rm f}$ 提高,从而使 Al-20Si 合金的抗拉强度提高。



图 6 Al-20Si-0.5Pr-0.5Y 合金的背散射电子像、成分分析及元素的面扫描图 Fig. 6 Backscattered image(a), component analysis(b) and elements surface scanning results of Al(c), Si(d), Pr(e), Y(f) of Al-20Si-0.5Pr-0.5Y

另一方面,由于 Al-Si 合金的断裂行为与 Si 相的裂纹 扩展密切相关^[24],拉伸过程中产生的位错会在 Si 相边 缘塞积,而当过共晶 Al-20Si 合金中 Si 相变质为均匀 分布的细小颗粒和类蠕点状时,晶界数目增多,阻碍 了位错在 Si 相边缘的塞积,减小了局部的应力集中, 从而提高了合金的抗拉强度。

4 结论

1) 当稀土 Pr 和 Y 按质量比 1:1 混合(0.5%Pr, 0.5%Y)时, 粗大的块状及不规则的五瓣星状初生 Si 变质为边缘钝化且均匀分布的小块状初生 Si, 平均尺 寸由未变质时的 96 μm 减小到 41 μm, 减小了 57.3%。

2) 随着稀土混合比例的改变, 共晶 Si 由未变质时的粗大针片状转变为短杆状, 当稀土 Pr 和 Y 的添加量均为 0.5%时, 具有最佳的变质效果, 共晶 Si 变质为类蠕点状。

3) 当稀土 Pr 和 Y 按质量比 1:1 的比例(0.5%Pr, 0.5%Y)混合时, 合金具有良好的综合力学性能, 其抗 拉强度和伸长率分别从未变质时的 93 MPa 和 1.12% 提高到 143 MPa 和 2.79%, 分别提高 53.8%和 149%。

REFERENCES

- HIRSCH J. Recent development in aluminum for automotive applications[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 1995–2002.
- [2] 范子杰,桂良进,苏瑞意.汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1): 1-16.
 FAN Zi-jie, GUI Liang-jin, SU Rui-yi. Research and development of automotive lightweight technology[J]. Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1): 1-16.
- [3] SHI W X, GAO B. Effect of Nd on microstructure and wear resitance of hypereutectic Al-20%Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 508: 480–485.
- [4] 刘 芳, 于福晓, 张祎玲, 赵大志, 许 茜, 左 良. 过共晶 铝硅合金的高温力学性能及显微组织演变[J]. 中国有色金属 学报, 2015, 25(9): 2358-2365.
 LIU Fang, YU Fu-xiao, ZHANG Yi-ling, ZHAO Da-zhi, XU Qian, ZUO Liang. High-temperature mechanical properties and microstructure evolution of hypereutectic Al-Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2358-2365.
- [5] LI Qing-lin, XIA Tian-dong, LAN Ye-feng, ZHAO Wen-jun, FAN Lu, LI Peng-fei. Effect of rare earth cerium addition on the microstructure and tensile properties of hypereutectic Al-20%Si alloy[J]. Journal of Alloys Compounds, 2013, 562: 25–32.

[6] 李庆林. 过共晶 Al-20%Si 合金 Si 相形态的演变及性能研究

[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014: 8-13.

LI Qing-lin. On the morphological evolution of Si phase and properties of hypereutectic Al-20%Si alloy[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014: 8–13.

- [7] LIANG Song-mao, RAINER S F. Thermodynamic assessment of the Al-P system based on original experimental data[J]. Calphad, 2013, 42: 76–85.
- [8] QIN Jing-yu, ZUO Min, GU Ting-kun, LIU Xiang-fa. The featured local structure units in liquid Al₈₀Si₁₅P₅ alloy and their relationship with Si modification[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 492: 525–528.
- [9] 邱智华,李云龙,陈 欢,陈建春,张国栋,潘春旭. Al-10RE 中间合金对 Al-20Si 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及 有色合金, 2015, 35(6): 632-635. QIU Zhi-hua, LI Yun-long, CHEN Huan, CHEN Jian-chun, ZHANG Guo-dong, PAN Chun-xu. Effect of Al-10RE master alloy on microstructure and mechanical properties of the as-cast Al-20Si alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2015, 35(6): 632-635.
- [10] 王会阳,安云岐,李承宇,晁 兵. 稀土在铝和铝合金中应用的研究及进展[J]. 稀土, 2012, 33(1): 75-80.
 WANG Hui-yang, AN Yun-qi, LI Cheng-yu, CHAO Bing. The research progress of rare earth application in aluminum and aluminum alloys[J]. Chinese Rare Earths, 2012, 33(1): 75-80.
- [11] LI Zheng-hua, YAN Hong. Modification of primary α-Al, eutectic Si and β-Al₃FeSi phases in as-cast AlSi10Cu3 alloy with (La+Yb) addition[J]. Journal of Rare Earths, 2015, 33(9): 995–1003.
- [12] 熊俊杰,闫 洪,揭小平. 混合稀土变质对 ADC12 铝合金组 织及性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(1): 18-24. XIONG Jun-jie, YAN Hong, JIE Xiao-ping. Effect of mischmetal modification on microstructure and properties of ADC12 aluminum alloy[J]. Materials Science and Technology, 2016, 24(1): 18-24.
- [13] HU Zhi, RUAN Xian-ming, YAN Hong. Effect of neodymium addition on microstructure and mechanical properties of near-eutectic Al-12Si alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(12): 3877–3885.
- [14] ZUO Min, ZHAO De-gang, WANG Zhen-qing, GENG Hao-ran. Complex modification of hypereutectic Al-Si alloy by a new Al-Y-P master alloy[J]. Metals and Materials International, 2015, 21(4): 646–651.
- [15] LI J H, WANG X D, LUDWIG T H, TSUNEKAWA Y, ARNBERG L, JIANG J Z, SCHUMACHER P. Modification of eutectic Si in Al-Si alloys with Eu addition[J]. Acta Materialia, 2015, 84: 153–163.
- [16] 李华基, 胡慧芳, 陈俊桃. Sr 变质后 Al-28%Si 合金中 Si 相的 生长行为[J]. 热加工工艺, 2010, 39(11): 67-69.
 LI Hua-ji, HU Hui-fang, CHEN Jun-tao. Growth behavior of silicon phase of Al-28%Si alloy modified with Sr[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(11): 67-69.
- [17] 张 苏,杨 钢,吴云峰,闫 洪,赵 伟.稀土La变质处理

17(3): 86-90.

对 A356 铝合金显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(17): 69-72.

ZHANG Su, YANG Gang, WU Yun-feng, YAN Hong, ZHAO Wei. Effect of rare earth La modification on microstructure of A356 aluminum alloy[J]. Hot Workong Technology, 2013, 42(17): 69–72.

- [18] LU S Z, HELLAWELL A. Growth mechanism of silicon in Al-Si alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 1985, 73: 316–328.
- [19] 张 瑜, 王宇鑫, 廖文俊, 王华钰, 杨 颖, 严 彪. 稀土元 素对过共晶铝硅合金的变质机理[J]. 金属功能材料, 2010, 17(3): 86-90.
 ZHANG Yu, WANG Yu-xin, LIAO Wen-jun, WANG Hua-yu, YANG Ying, YAN Biao. Modification mechanism of RE on hypereutectic Al-Si alloy[J]. Metallic Functional Materials, 2010,
- [20] MOUSAVI G S, EMAMY M, RASSIZADEHGHANI J. The effect of mischmetal and heat treatment on the microstructure and tensile properties of A357 Al-Si casting alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 556: 573–581.
- [21] MAO Feng, YAN Guang-yuan, XUAN Zhen-jing, CAO

Zhi-qiang, WANG Tong-min. Effect of Eu addition on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 896–906.

- [22] YILMAZ F, ELLIOTT R. Halo formation in Al-Si alloys[J]. Metal Science, 1984, 18(7): 362–365.
- [23] 蒋 伟,胡恺琪,朱向镇,武玉英,刘相法. Al-Si 合金力学行 为对 Si 相形貌敏感性的差异[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(1): 15-23.
 JIANG Wei, HU Kai-qi, ZHU Xiang-zhen, WU Yu-ying, LIU Xiang-fa. Difference in sensitivity of mechanical behaviors for Al-Si alloys to Si phase morphologies[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 15-23.
- [24] 马广辉,李润霞,白彦华,李荣德. Si相对铸造Al-Si合金低温 拉伸断裂行为的影响[J]. 中有色金属学报, 2016, 26(8): 1615-1623.

MA Guang-hui, LI Run-xia, BAI Yan-hua, LI Rong-de. Effect of silicon phase on tensile fracture of Al-Si alloys at low temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1615–1623.

Effect of mischmetal on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy

LI Qing-lin^{1, 2}, LI Bin-qiang¹, LI Jin-bao¹, LAN Ye-feng^{1, 2}, XIA Tian-dong^{1, 2}

School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: By optical microscopy, scanning electron microscopy, electron probe analysis and mechanical property test, the effects of mischmetal Pr and Y on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy were investigated. The results show that the addition of mischmetal Pr and Y can effectively modify the primary Si from coarse polygonal and star-like shape to fine blocky shape with smooth edges and corners. When the mass ratio of mischmetal Pr and Y is 1:1 (0.5%Pr, 0.5%Y (mass fraction)), the consequence of modification is the best on primary silicon and eutectic silicon, the size of primary silicon reduces by 57.3% from 96 µm to 41 µm. In addition, the morphology of eutectic silicon changes from coarse platelet-like/needle-like structure to fine fibrous structure and worm-like. The ultimate tensile strength increases by 53.8% from 93 MPa to 143 MPa, and the elongation increases by 149% from 1.12% to 2.79%, respectively.

Key words: Al-20Si alloy; mischmetal; microstructure; mechanical property

Foundation item: Project(51561021) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (1606RJZA024) supported by the Gansu Province Natural Science Foundation, China; Project (2015B-035) supported by the Institution Science Research Project of Gansu Province, China

Received date: 2016-09-02; Accepted date: 2017-02-28

Corresponding author: LI Qing-lin; Tel: +86-931-2976688; E-mail: libq94@163.com