

Y对再生A356铝合金凝固组织及力学性能的影响

李 振, 韩维娜, 王晓民, 赫丽杰, 郭丽莉, 张全庆, 薛 亮, 张 淼, 卢 伟

(营口理工学院材料科学与工程学院, 辽宁营口 115100)

摘要: 采用JMatPro软件、直读光谱仪、金相显微镜、X射线衍射仪、电子万能拉伸试验机和扫描电镜研究了Y对再生A356铝合金凝固组织及力学性能的影响。结果表明, 再生A356合金的凝固组织以初生 α -Al和颗粒状共晶硅为主。随着Y加入量由0增加至0.5%, 合金的 α -Al晶粒尺寸逐渐减小, 抗拉强度和伸长率逐渐增大; 合金中生成的 Al_3Y 相为 α -Al的优良异质形核质点, 同时其还对共晶Si起到显著的变质细化作用。

关键词: 再生A356合金; Y加入量; Al_3Y 相; 凝固组织; 力学性能

作者简介:

李振(1988-), 男, 博士, 研究方向为合成镁钙质耐材制品性能和损毁机理研究。E-mail: 451794353@qq.com

通讯作者:

韩维娜, 女, 讲师, 硕士。E-mail: 823437656@qq.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)03-0275-07

基金项目:

辽宁省教育厅项目(编号LJKMZ20221860), 项目名称: 采用ANSYS有限元分析CaO含量对制备电熔高纯镁砂性能影响的基础研究。

收稿日期:

2022-11-07 收到初稿,

2022-12-09 收到修订稿。

A356铝合金具有流动性好、线收缩率小、气密性优良、无热裂倾向等良好的铸造性能, 而且通过热处理可以获得较高的强度、良好的塑性和较高的冲击韧性, 因此是汽车铸造轮毂的首选材质。与原铝相比, 再生铝在能耗和环境保护方面有明显优势, 再生铝的总能耗仅为原铝生产能耗的4.86%, CO_2 排放量是原铝生产排放量的4.6%, GWP只有原生铝的1/24。因此, 大力发展再生铝产业是铝工业节能减排最直接有效的措施之一^[1]。然而, 再生A356铝中杂质Fe元素含量较高, 凝固组织和力学性能较差, 严重制约了其使用范围。因此, 如何实现再生A356铝合金的再循环利用, 改善其凝固组织及力学性能已成为当今科研工作者研究的热点。

众多周知, 材料的组织对力学性能有着重要的影响。晶粒越细, 材料的强度越高^[2-3]。陈志强等人在研究Y和Sr对Al-Mg-Si合金显微组织和力学性能的影响时发现, 合金经Y和Sr协同变质处理后, α -Al晶粒尺寸由62.1 μm 减小至48.48 μm ; 共晶硅颗粒平均尺寸由8.5 μm 减小至4 μm 左右, 铸态抗拉强度最高达到213.3 MPa^[4]。何冰和章爱生等人认为A356合金熔体中加入Y和Sc形成的 Al_3Y 和 Al_3Sc 相是导致 α -Al相细化的重要原因^[5-6]。叶珍等人研究表明A356.2合金经复合稀土变质处理后, 合金中含Fe相将由针状转变为细小的颗粒状, 铸态抗拉强度和伸长率最高可达280.7 MPa和6.26%^[7]。另外, 周文华等人通过Y稀土变质细化A356铝合金也得到了类似的结论^[8]。另外, 蔡厚道采用Nb变质ZL101铝合金时发现, 当Nd加入量为0.5%时, 合金的综合力学性能达到最佳, 其极限抗拉强度和伸长率最高分别为178 MPa和5.6%^[9]。于小健等人研究了Y对A356合金除气效果和耐蚀性能的影响。结果表明, 当Y添加量为0.3%时, A356铝熔体中氢含量比未添加Y的熔体降低56%, 合金布氏硬度提高约40%, 合金腐蚀深度降低52%^[10]。此外, 刘政等人在研究电磁场协同Y变质对半固态A356合金凝固组织的影响时发现, A356-Y合金经30 Hz下搅拌15 s并在590 $^{\circ}C$ 保温5 min后, 初生 α 相的形貌和尺寸达到最佳, 中心区域晶粒尺寸降至64.95 μm , 平均形状因子达到0.80^[11]。

以上研究表明, 稀土Y变质对A356合金的凝固组织和力学性能有着显著的效果。然而目前该类研究多集中于非再生A356铝合金, 关于采用稀土Y变质处理再生A356铝合金的研究报道较少。因此, 本文在前人的基础上研究了稀土Y对再生A356合金凝固组织及力学性能的影响, 并进一步探讨了Y对再生A356合金的变质细化机

制,这对实现废旧A356合金的回收及保级利用有着重要的指导意义。

1 试验材料及方法

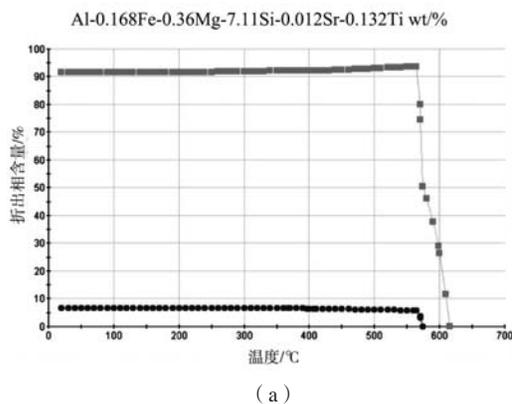
试验原料:再生A356铝合金锭、Al-10Y中间合金、精炼剂。试验设备:电子天平、热电偶、DD-25高频感应加热设备、石墨坩埚。检测设备:Metaser v250手自动磨抛机、Imager A2m金相显微镜、X射线衍射仪、ZEISS EVO18扫描电镜、ARL3460直读光谱仪、WDW 3100电子万能拉伸试验机。

准确称取500 g再生A356铝合金,将其置于石墨坩埚中,设定高频感应加热设备电磁频率为380 Hz,将其由室温加热至750 ℃左右,待合金完全熔化后将铝液温度降至720 ℃,加入Al-10Y中间合金;分别调整合金中Y元素含量为0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和0.5%左右,按0.15%比例加入NaCl+KCl+K₆AlF₃型精炼剂并充分搅拌5 min后扒渣;最后将铝液温度降至700 ℃,并将其浇入事先预热150 ℃左右的铁质Φ10 mm拉伸试样模具中并冷却至室温。每组试验各浇注3个样品,试样尺寸如图1所示。

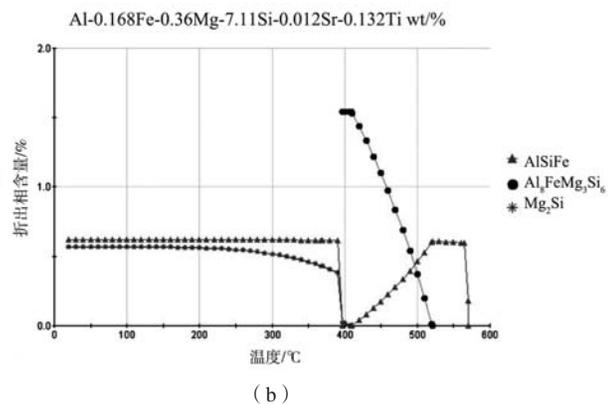
在自拉伸试样夹持端相同位置取金相样,采用100目、200目、600目、1 200目和2 500目SiC砂纸进行磨抛,磨抛结束后采用3 μm、1 μm和0.02 μm抛光液对试样进行抛光;在ZEISS Imager A2m金相显微镜下

表1 试验再生A356合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of experimental recycled A356 alloy

序号	Si	Mg	Fe	Ti	Sr	Y	Al
1	7.01	0.32	0.155	0.136	0.012	0.108	余量
2	6.94	0.34	0.165	0.136	0.014	0.213	余量
3	7.09	0.32	0.131	0.133	0.013	0.309	余量
4	7.11	0.36	0.168	0.132	0.012	0.417	余量
5	6.93	0.35	0.168	0.132	0.013	0.498	余量



(a)



(b)

图2 A356合金中析出相情况
Fig. 2 Precipitated phase of A356 alloy

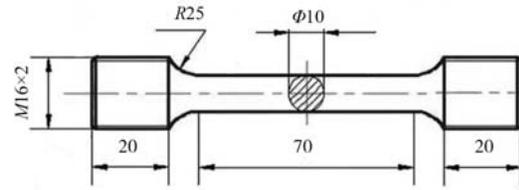


图1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tensile specimen

观察合金的凝固组织。每个试样选取15个视场,采用NanoMeasurer 1.2软件统计A356合金的 α -Al晶粒尺寸并对统计结果取平均值。通过ARL3460直读光谱仪检测合金样品成分。采用WDW3100微机电子万能试验机对每组各浇注的3个样品进行拉伸试验,根据GB/T 228.1—2021的要求,设定试验拉伸速率为1.05 mm/min;采用TD3500 X射线衍射仪对合金进行物相分析;最后,通过JMatPro13.2软件模拟计算合金中析出相情况并在ZEISS EVO18扫描电镜下进行观察。

2 试验结果

2.1 再生 A356 铝合金中的析出相

图2为通过JMatPro13.2软件模拟得到的A356试验合金凝固过程中析出相变化情况。可以看出,A356合金的平衡组织主要由 α (Al)+Si+Mg₂Si+ β -Al₉Fe₂Si₂+Al₈FeMgSi₆相组成。当合金由浇注温度分别降至616.12 ℃、573.63 ℃、570.84 ℃、520.64 ℃、406.77 ℃时,开始伴随初生 α -Al、共晶Si、 β -Al₉Fe₂Si₂、Al₈FeMgSi₆和Mg₂Si相的析出,在合金温度分别降至564.76 ℃、564.76 ℃、390 ℃、409.19 ℃和390 ℃时,以上各相的析出量无明显变化,分别为93.71%、5.67%、0.62%、1.53%和0.39%。

图3为A356试验合金XRD分析结果。结果表明,A356合金中的物相主要包括 α -Al、共晶Si相、AlSiFe相和Al₃Y相,这与JMatPro13.2软件预测结果基本一致。另外,Mg₂Si相由于含量较少,同时由于受设备检

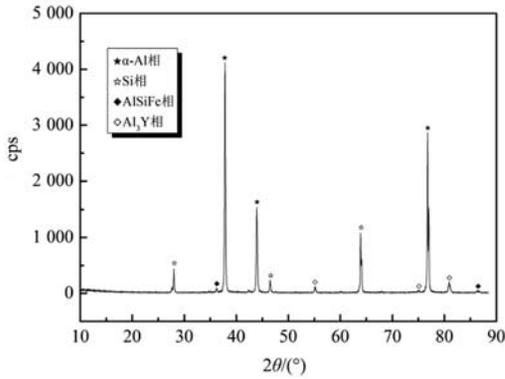


图3 A356合金XRD分析结果
Fig. 3 XRD analysis results of A356 alloy

测精度的限制，因此在本次XRD分析结果中未发现该相的存在。

图4至图6分别为A356合金中析出相EDS分析结果。结果表明，在A356合金中存在的针状灰白色析出相主要由Al、Fe、Si元素组成，其化学成分为94.72Al、3.98Si、1.30Fe (at.%)。相关研究表明，当合金中Si含量大于Fe含量时，铝合金中容易形成粗大针状富Si化合物β (Al₉Fe₂Si₂)相，该析出相既硬又脆，使铝合金的塑性急剧下降^[12]。结合JMatPro13.2软件预测结果、XRD及EDS分析结果，合金中的针状灰白色析出相为β (Al₉Fe₂Si₂)相。另外，在合金中α-Al晶界处存在明显的白亮色块状析出相，EDS结果显示

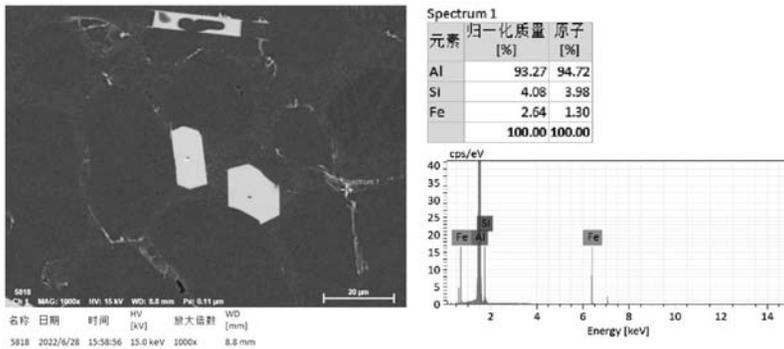


图4 A356合金中β-Al₉Fe₂Si₂相
Fig. 4 β-Al₉Fe₂Si₂ phase of A356 alloy

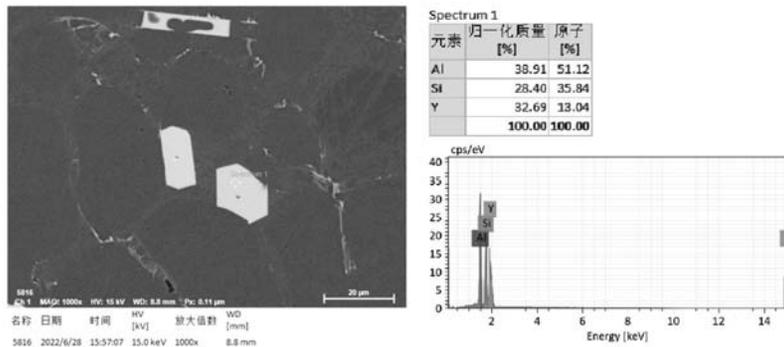


图5 A356合金中Al₃Y相
Fig. 5 Al₃Y phase of A356 alloy

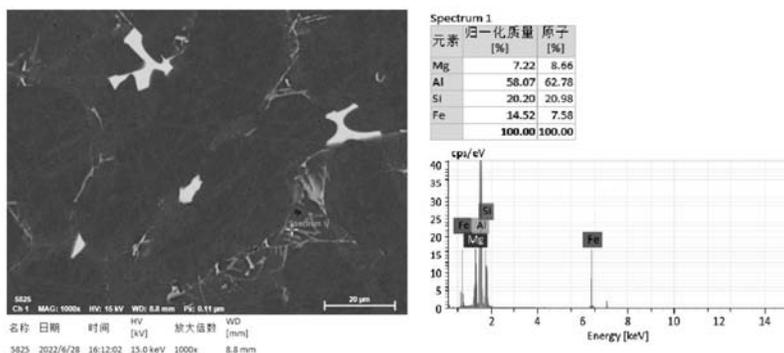


图6 A356合金中Al₈FeMgSi₆相
Fig. 6 Al₈FeMgSi₆ phase of A356 alloy

其主要由Al、Si和Y元素组成，化学成分为51.12Al，35.84Si，13.04Y (at.%)。由于A356合金中的主要合金元素为Al和Si，因此在对样品进行能谱分析时很容易检测到Si元素的存在，结合EDS和XRD分析结果及前人的研究成果，该析出相可能为 Al_3Y 相^[11, 13]。此外，在合金中还存在大量深灰色针状析出相，该析出相主要由Al、Fe、Si、Mg元素组成，其化学成分为62.78Al，20.98Si，7.58Fe，8.66Mg (at.%)，结合JMatPro13.2软件预测结果及XRD分析结果，该析出相可能为 $Al_8FeMgSi_6$ 相。

2.2 再生 A356 铝合金不同 Y 加入量下的凝固组织

图6为不同Y加入量下再生A356铝合金的凝固组织。可以看出，合金的凝固组织以初生 α -Al和点状共晶硅为主。未添加Y元素时，合金中 α -Al主要表现为粗大的树枝晶组织（图7a）；当Y加入量为0.1%时，合金中 α -Al枝晶组织向短棒状和蔷薇状组织发生转变（图7b）；当Y加入量增加至0.4%时，合金中的枝晶 α -Al组织几乎全部转变为短棒状（图7e）；进一步增加Y加入量至0.5%，合金 α -Al组织无明显变化（图7f）。

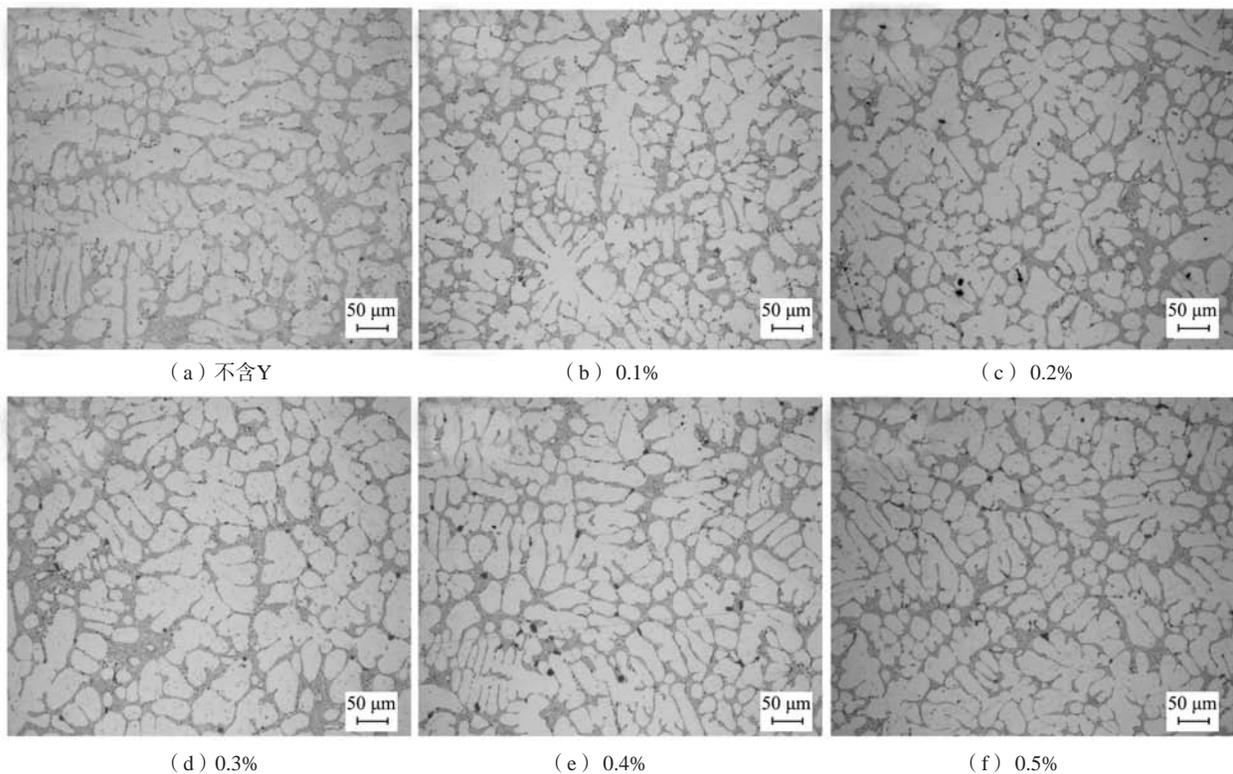


图7 不同Y加入量下再生A356合金的凝固组织

Fig. 7 Solidification structure of regenerated A356 alloy under different Y addition

图8为不同Y加入量下A356合金中 α -Al晶粒尺寸分布情况。统计结果明，未加Y时，A356合金中尺寸小于25 μm 、25~35 μm 、35~45 μm 及45 μm 以上的 α -Al晶粒占比分别为0、8.3%、29.2%和62.5%；随Y加入量的增加，合金中25 μm 以下的 α -Al晶粒数量逐渐增多，45 μm 以上的 α -Al晶粒数量占比逐渐减少。当Y加入量为0.4%时，A356合金中尺寸小于25 μm 、25~35 μm 、35~45 μm 及45 μm 以上的 α -Al晶粒占比分别达到10.1%、52.1%、34.5和3.4%；随Y加入量的进一步增加，A356合金的凝固组织无明显变化。

图9为A356铝合金 α -Al平均晶粒尺寸随Y加入量的变化规律。可以看出，随Y加入量的增多， α -Al晶粒尺寸逐渐减小。未添加Y元素时， α -Al平均晶粒尺寸

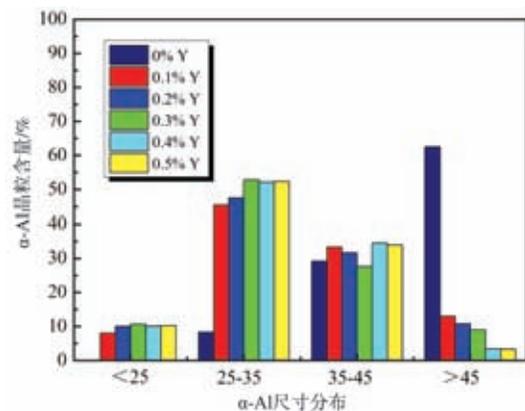


图8 不同Y加入量下A356铝合金中晶粒尺寸分布情况

Fig. 8 Grain size distribution of A356 aluminum alloy under different Y additions

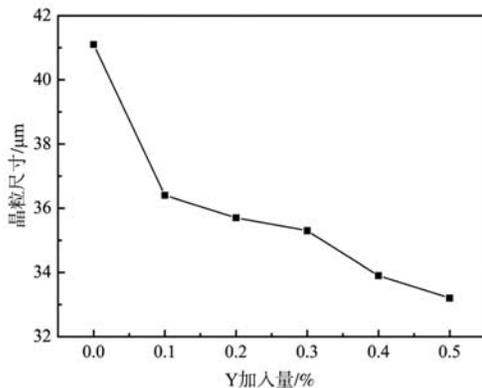


图9 再生A356合金不同Y加入量下的晶粒尺寸

Fig. 9 Grain size of regenerated A356 alloy under different Y addition

最大为41.1 μm；当Y加入量为0.1%时，α-Al平均晶粒尺寸减小至36.4 μm；当Y加入量增加至0.4%时，α-Al平均晶粒尺寸将明显细化至33.9 μm；进一步增加Y加入量，α-Al平均晶粒尺寸无明显变化。当Y加入量为0.5%时，α-Al平均晶粒尺寸仅略减小至33.2 μm。这主要是由于随Y加入量的增加，合金中45 μm以上α-Al粗大晶粒数量急剧减少，同时25 μm以下α-Al晶粒数量逐渐增多所致。

本次试验中除Y加入量外，其它条件均相同。因此，Y加入量是导致α-Al晶粒组织细化的主要原因。相关研究表明，异质形核点必须满足其优先于基底相析出且在合金熔体中稳定存在，同时其与基底相的晶格错配度要小于12%方可起到晶粒细化作用，尤其是当两者的晶格错配度小于6%时，其细化效果更佳^[14]。前文SEM和EDS结果表明，A356合金中添加Y后会导致Al₃Y相的生成。因此，为探讨Y对A356合金凝固组织的细化机理，需研究Al₃Y相在A356合金熔体中的析出情况并对其与α-Al的晶格错配度进行计算。图10为Al-Y的二元合金相图。可以看出，Al₃Y相的熔点为

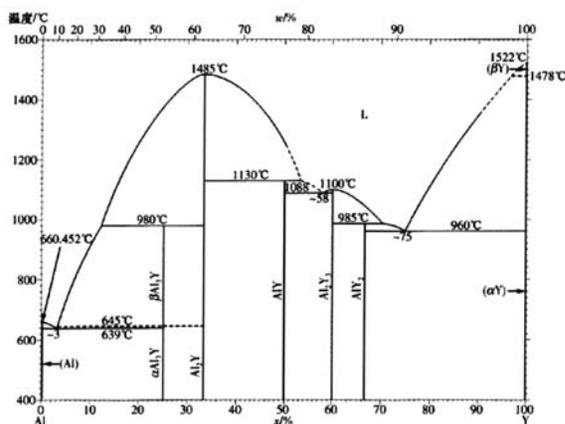


图10 Al-Y二元合金相图

Fig. 10 Phase diagram of Al-Y binary alloy

980 °C，其熔点明显高于A356铝合金^[15]。因此，Al₃Y相满足优先α-Al相析出且在A356合金熔体中稳定存在的前提条件。为验证Al₃Y相的异质形核作用，需进一步对二者之间的晶格错配度进行计算。

众所周知，Al为面心立方晶体，其晶格常数 $a=4.0496 \text{ \AA}$ ，Al₃Y为面心正方晶系中L12型结构，其晶格常数 $a=4.234 \text{ \AA}$ ，其与Al的晶格错配度可根据公式(1)进行计算^[16]。计算结果表明，Al₃Y相与α-Al的晶格错配度仅为4.55%。因此，Al₃Y相可以作为A356铝合金凝固过程中优良的异质形核质点，从而对α-Al起到细化作用，这与前人的研究结果一致^[17, 18]。

$$\delta = 100 \left| 1 - \frac{a}{a_0} \right| \quad (1)$$

式中： δ 为晶格错配度； a_0 为Al的晶格常数； a 为Al₃Y相的晶格常数。

另外，相关研究表明，稀土元素对共晶硅也有着显著的变质作用。根据杂质诱发孪晶变质理论，变质剂原子半径与Si原子半径之比是衡量变质能力的首要条件，最合适的变质剂原子半径与Si原子半径之比 $R_i/R_{Si}=1.65$ ，而 $R_Y/R_{Si}=1.63$ ，接近1.65，因此Y被认为是共晶Si较佳的变质剂^[19-20]。Y元素由于在铝熔体中的固溶度较低，大部分Y元素迅速在凝固固液界面前沿及晶界处富集，从而在已析出的共晶Si相前沿形成较大的成分过冷，促使共晶Si的复合孪晶产生。孪晶表面上存在一些原子级台阶或犁沟，Y元素的富集使得其原子大量地吸附在共晶Si相孪晶沟槽中，从而封闭了Si相及其孪晶表面的原子级台阶或犁沟，有效地抑制Si的孪晶凹角沟槽生长机制及改善共晶Si晶体固-液界面能，同时引起晶格畸变。另一方面，随着结晶过程的进行，吸附在Si孪晶沟槽中Y原子并不全部随固液界面推进而推移，而是有相当一部分嵌入Si相晶格中形成异类原子缺陷，引起晶格畸变。这种畸变使Si在更多方向产生孪晶，是共晶硅由粗大的针片状转变为纤维状或颗粒状。

2.3 再生 A356 合金不同 Y 加入量下的力学性能

图11和图12为A356合金不同Y加入量下的力学性能。可以看出，随Y加入量的增加，A356合金的抗拉强度和延伸率均逐渐增大。未添加Y时，A356合金的抗拉强度和延伸率仅分别为244 MPa和4.2%；当Y加入量为0.1%时，A356合金的抗拉强度和伸长率分别显著增加至252 MPa和5.1%；当Y加入量增加至0.4%时，A356合金的抗拉强度和延伸率继续增加至268 MPa和6.8%；进一步增加Y加入量至0.5%，A356合金的抗拉强度和延伸率无明显变化。

造成上述现象的原因可能是由于当未添加Y时，合金中α-Al平均晶粒尺寸最大为41.1 μm，因此抗拉强度和伸长率相对较低；而当Y加入量为0.1%时，合金中

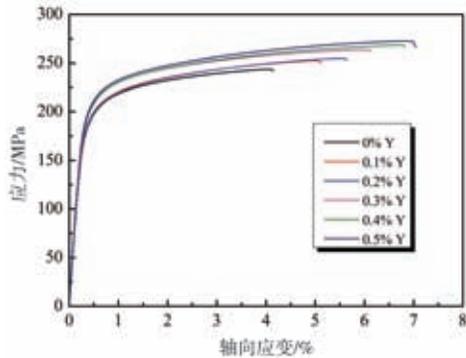


图11 拉伸试样不同Y加入量下的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve of tensile specimen under different Y addition

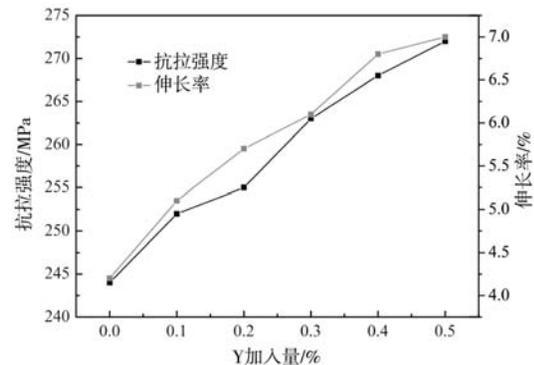


图12 A356合金不同Y加入量下的力学性能

Fig. 12 Mechanical properties of A356 alloy under different Y addition

的 α -Al平均晶粒尺寸显著细化至 $36.4\ \mu\text{m}$ ，因此抗拉强度和延伸率明显提高；当Y加入量为0.4%时，合金中的 α -Al平均晶粒尺寸进一步细化至 $33.9\ \mu\text{m}$ ，因此抗拉强度和伸长率得到进一步的改善；Y加入量进一步增加至0.5%，合金中 α -Al平均晶粒尺寸仅略微减小至 $33.2\ \mu\text{m}$ ，因此抗拉强度和延伸率无明显变化。

3 结论

(1) Y元素的加入对 α -Al组织形貌有着较大影响。当Y加入量为0.1%时，合金中 α -Al枝晶组织向等轴晶和蔷薇状组织发生转变；当Y加入量增加至0.4%时，合金中 α -Al几乎全部转变为等轴晶和类等

轴晶。

(2) 随Y加入量的增多， α -Al晶粒尺寸逐渐减小。未添加Y元素时， α -Al平均晶粒尺寸最大为 $41.1\ \mu\text{m}$ 。当Y加入量增加至0.4%时， α -Al平均晶粒尺寸将细化至 $33.9\ \mu\text{m}$ ；进一步增加Y加入量， α -Al平均晶粒尺寸无明显变化。

(3) 随Y加入量的增加，A356合金的抗拉强度和伸长率均逐渐增大。当未添加Y时，A356合金的抗拉强度和延伸率仅分别为 $244\ \text{MPa}$ 和 4.2% ；当Y加入量增加至0.4%时，A356合金的抗拉强度和伸长率将增加至 $268\ \text{MPa}$ 和 6.8% ；进一步增加Y加入量至0.5%，A356合金的抗拉强度和伸长率无明显变化。

参考文献:

- [1] 丁宁, 高峰, 王志宏, 等. 原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比 [J]. 中国有色金属学报, 2012, 22 (10): 2909-2915.
- [2] HALL E O. The deformation and ageing of mild steel: III. discussion of results [J]. Phys. Soc. B, 1951, 64 (9): 747-753.
- [3] PETCH N J. The cleavage strength of polycrystals [J]. J. Iron Steel Inst, 1953, 174 (1): 25-28.
- [4] 陈志强, 贾锦玉, 胡文鑫, 等. Y与Sr协同作用对Al-Mg-Si合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 367-373.
- [5] 何兵, 覃铭, 黄蓓, 等. Sc和Y复合作用对A356合金组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 38 (4): 1385-1389.
- [6] 章爱生, 龚远兴. Y和Sc对A356合金组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (10): 1032-1034.
- [7] 叶珍, 苗赛男, 郑长清, 等. 稀土复合微合金化对A356.2铝合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 356-360.
- [8] 周文华, 周细应, 彭以辉, 等. 稀土钇对A356铝合金凝固组织和力学性能的影响 [J]. 热处理, 2022, 37 (3): 27-31.
- [9] 蔡厚道. 稀土元素Nd变质对ZL101铝合金的显微组织与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (6): 499-503.
- [10] 于小健, 沈坚, 周文军, 等. Y对A356合金除气效果和耐腐蚀性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (12): 1389-1392.
- [11] 刘政, 谌庆春, 罗浩林, 等. 电磁搅拌对半固态A356-Y铝合金凝固组织的影响 [J]. 中国稀土学报, 2014, 32 (1): 61-68.
- [12] 王群骄. 有色金属热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [13] 赵忠, 樊自田, 成平. 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.
- [14] BRAMFITT B L. The effect of carbide and nitride additions on the heterogeneous nucleation behavior of liquid iron [J]. Metallurgical Transactions, 1970 (1): 1987-1995.
- [15] 戴永年. 二元合金相图集 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] KEITH E Knippling, DAVID C Dunand, DAVID N Seidman. Criteria for developing castable, creep-resistant aluminum-based alloys—a

review [J]. International Journal of Materials Research, 2006, 97 (3) : 246-265.

- [17] 刘政, 谌庆春, 郭颂, 等. A356-RE合金中稀土铝化合物/初生 α 相界面二维错配度的计算及验证 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44 (4) : 859-865.
- [18] 刘政, 谌庆春, 郭颂. 铝钇共晶反应及其产物对亚共晶铝硅合金初生相的细化研究 [J]. 稀有金属, 2013, 37 (5) : 708-714.
- [19] 姜峰, 张慧, 李云峰, 等. 混合稀土变质对 A356 合金组织及力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (3) : 68-71.
- [20] 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.

Effect of Y on Solidification Structure and Mechanical Properties of Regenerated A356 Alloy

LI Zhen, HAN Wei-na, WANG Xiao-min, HE Li-jie, GUO Li-li, ZHANG Quan-qing, XUE Liang, ZHANG Miao, LU Wei

(Yingkou Institute of Technology, College of Materials Science and Engineering, Yingkou 115100, Liaoning, China)

Abstract:

The effect of Y on solidification structure and mechanical properties of regenerated A356 aluminum alloy was studied by JMatPro software, direct reading spectrometer, metallographic microscope, X-ray diffractometer, electronic universal tensile testing machine and scanning electron microscope. The results showed that the solidification structure of regenerated A356 alloy was primary α -Al and granular eutectic silicon. With the addition of Y increased from 0% to 0.5%, the grain size of α -Al decreased gradually, and the tensile strength and elongation increased gradually. The Al_3Y phase formed in the alloy was the excellent heteromorphic nucleus of α -Al phase, and it also played a significant role in modifying and refining eutectic Si.

Key words:

recycled A356 aluminum alloy; Y addition; Al_3Y phase; solidification structure; mechanical properties
