



过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金 制备工艺改进



案例制作：林高用 教授

中南大学材料科学与工程学院

内容提纲

- 案例来源与背景
- 问题铸锭分析
- 单组元变质处理
- 复合变质处理
- 热处理
- 总结与思考



一、案例来源与背景

▶ 案例来源：福建某铝业公司

Al-18Si-4Cu-0.5Mg过共晶铝硅合金是该公司在A390基础上自主研发的一种新型铸造铝合金，具有密度低、比强度高、热膨胀系数小、热稳定性好、耐磨、耐蚀等优点，在发动机活塞、化油器、汽缸体、缸盖、机车减震器等领域具有广阔应用前景。



一、案例来源与背景

对于过共晶铝硅合金，随着Si含量的增加，在过共晶铝硅合金组织中出现板块状或粗大不规则块状**初晶硅**和针片状**共晶硅**，这些粗大的硅相严重割裂合金基体，并且在这些硅相的尖端和棱角处极易引起应力集中，甚至导致裂纹的产生，这会严重降低合金综合使用性能，严重限制了过共晶铝硅合金的使用范围，影响企业的经济效益和长远发展。



探求该公司生产的铝硅合金铸锭性能不佳的原因？



二、问题铸锭分析

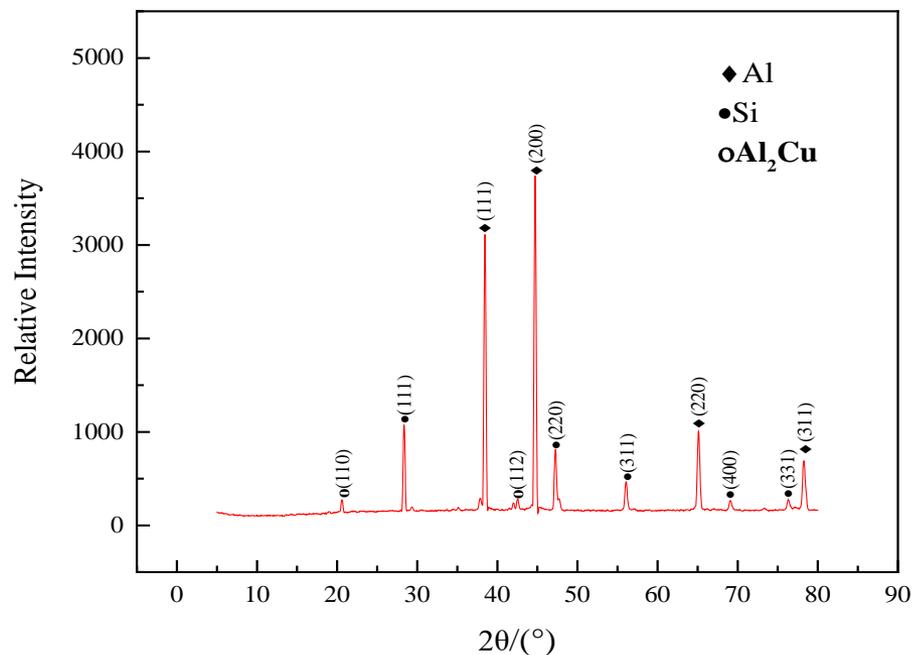
熔铸工艺

过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金以工业纯铝、工业纯镁、工业纯硅和Al-40Cu中间合金为原料制备。为加快熔炼过程，首先将工业纯硅敲碎然后预热至200°C左右与母料一起放入熔炼炉中，加热至820°C，保温至母料完全熔炼，充分搅拌，在浇注之前，加入C₂Cl₆进行精炼除气处理，充分搅拌，静置15~30min，最后待合金熔体冷却至750°C浇铸试样。



二、问题铸锭分析—组织分析

未变质过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金XRD图谱

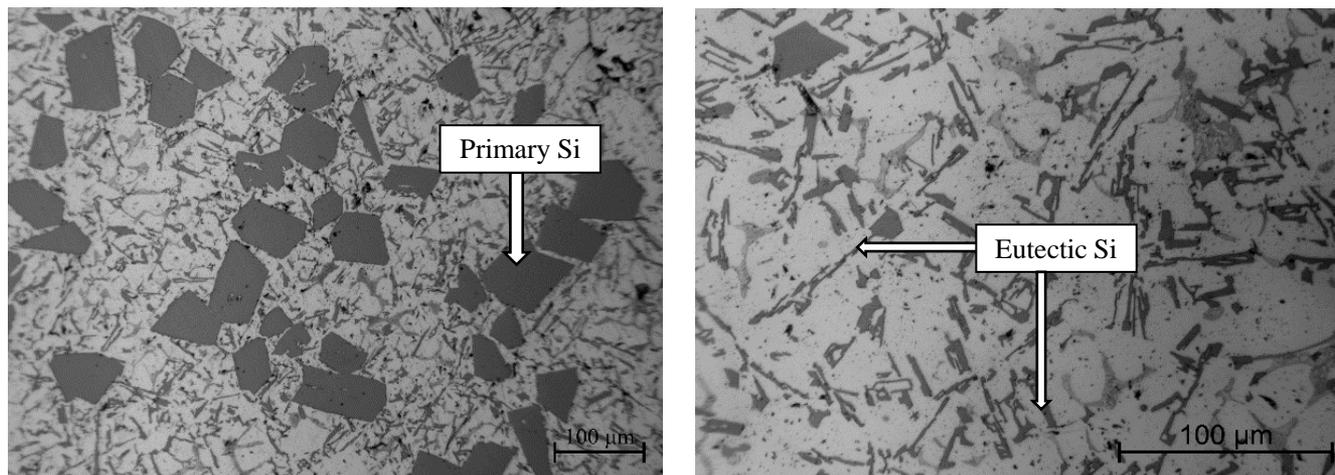


未变质合金主要含有Al相和Si相，以及少量的Al₂Cu相，由于其他相含量极小，因而未被检测出。



二、问题铸锭分析—组织分析

未变质过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金金相组织

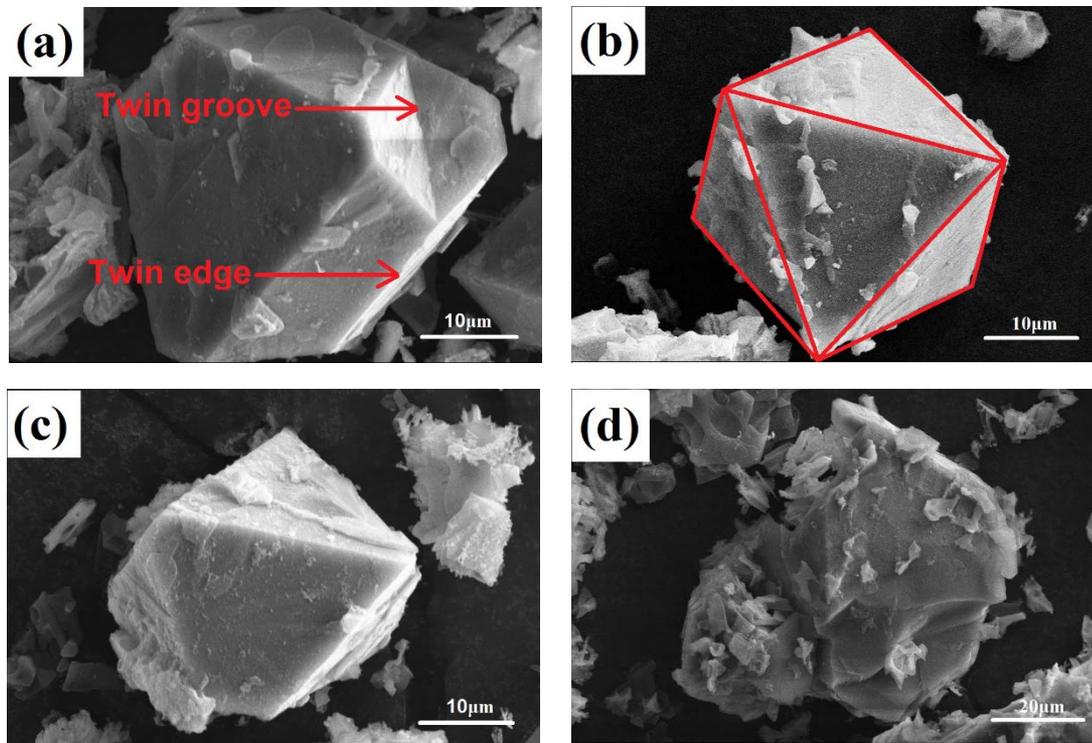


初晶硅平均尺寸 $61\mu\text{m}$ ，**共晶硅**长度 $50\sim 100\mu\text{m}$ 。

在硅相尖角处极易引起应力集中，降低合金的综合力学性能，不能满足客户要求。



二、问题铸锭分析—组织分析

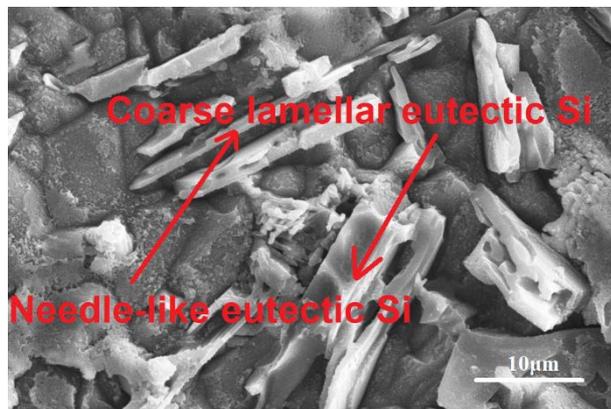


初晶硅三维形貌

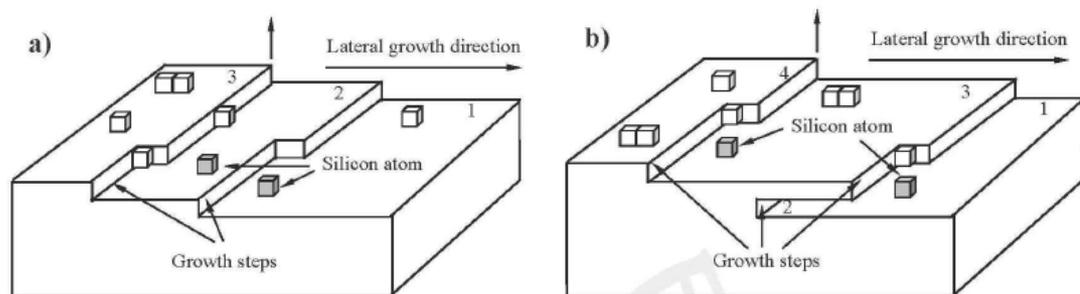
- a: 板片状; b: 无缺陷八面体状; c: 有缺陷八面体状;
d: 粗糙多面体状



二、问题铸锭分析—组织分析



共晶硅三维形貌



共晶硅界面台阶生长机制
a: 侧向生长; b缺陷形成

在共晶硅的固液生长界面上存在许多生长台阶，**Si**原子或**Si**原子团簇易在台阶的扭折处吸附沉积，共晶硅沿形成台阶的侧向扩展生长，同时在已有的固液界面上形成新的界面台阶。在固液界面生长前沿也会产生其它杂质元素或**Al**元素的富集，经过深腐蚀之后，就形成了如图所示的孔洞和缺陷。



二、问题铸锭分析

根据以上结果可推测，合金性能不佳主要有两个方面的原因：

(1) 合金组织中含有粗大的不规则形状**初晶硅**；

(2) 合金组织中含有细长针片状的**共晶硅**。

变质处理

措施

变质处理+热处理

在细化共晶硅的同时，还能够起到固溶强化的作用，大幅度提高合金强度。

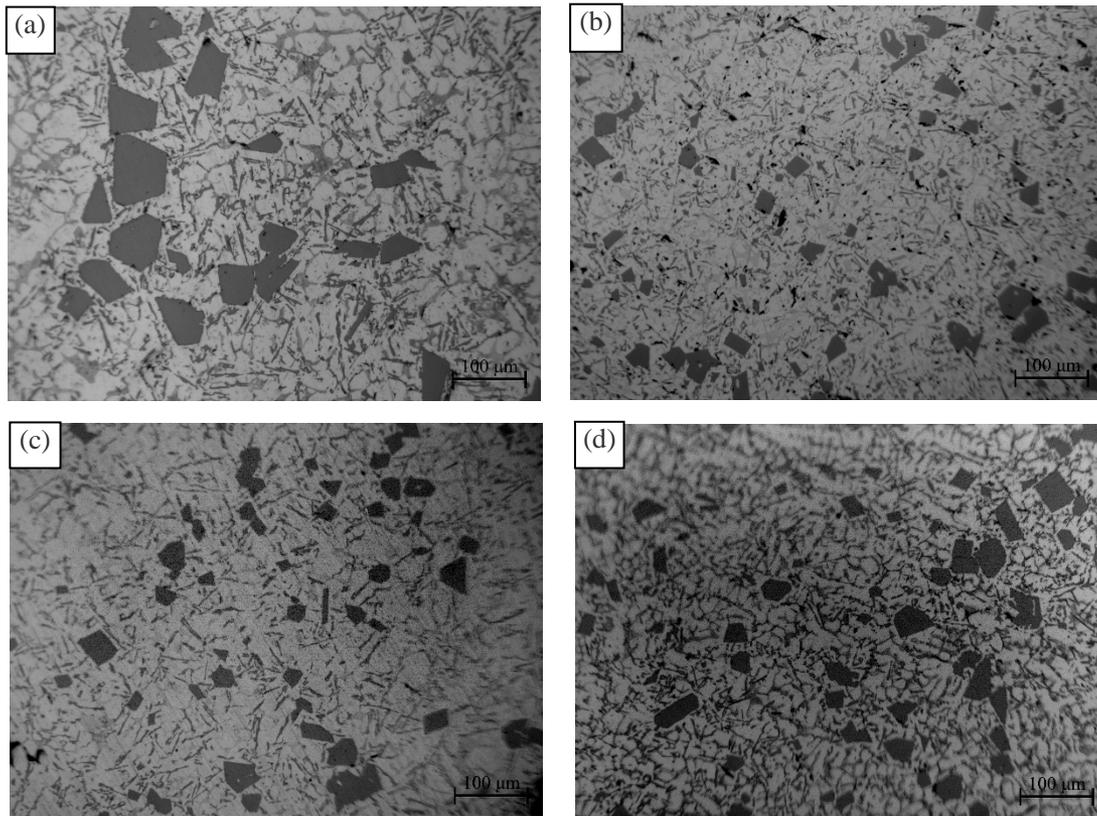
三、复合变质处理

复合变质处理工艺

变质剂	变质工艺	变质剂含量 (w/%)
P-RE	先添加P 820°C保温10min, 后添加RE 820°C保温10min	0.04 P+0.15 RE
P-Sr	先添加P 820°C保温10min, 后添加Sr 820°C保温10min	0.04 P+0.04 Sr
P-RE-Sr	先添加P 820°C保温10min, 再添加RE 820°C保温10min, 后添加Sr 820°C保温 10min	0.04 P+0.15 RE+ 0.04 Sr



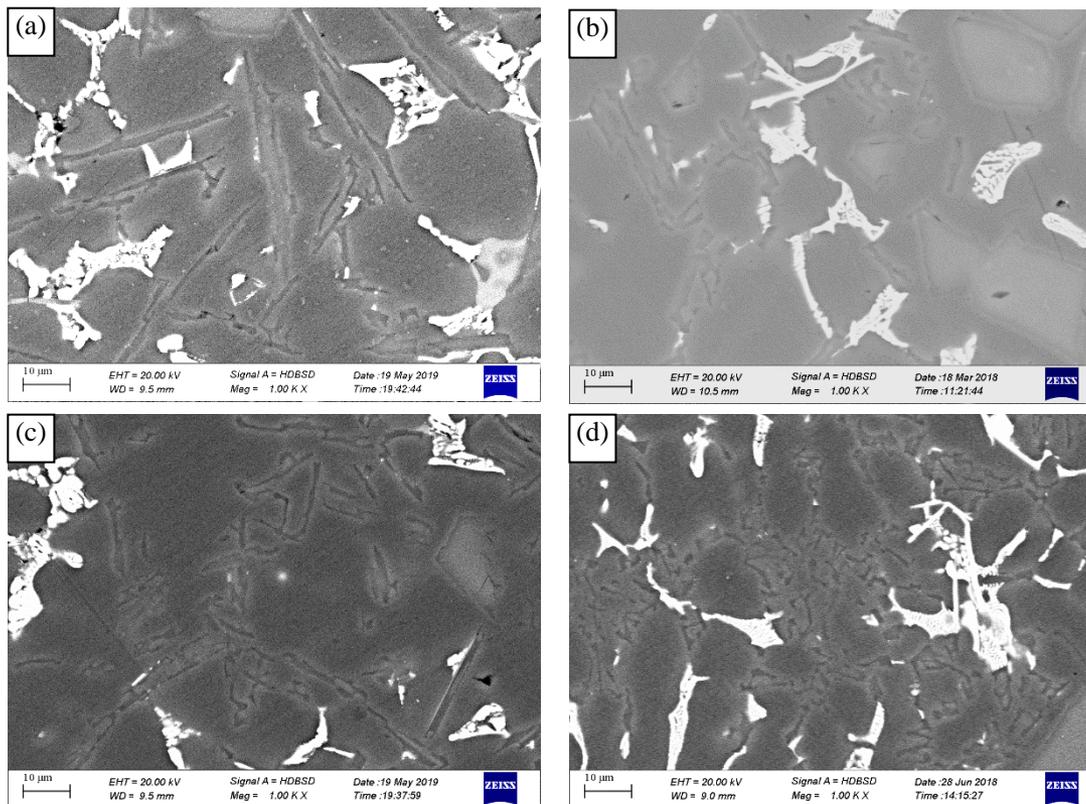
三、复合变质处理



不同复合变质处理后过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金金相组织
a: 未变质; b: P+RE; c: P+Sr; d: P+RE+Sr



三、复合变质处理



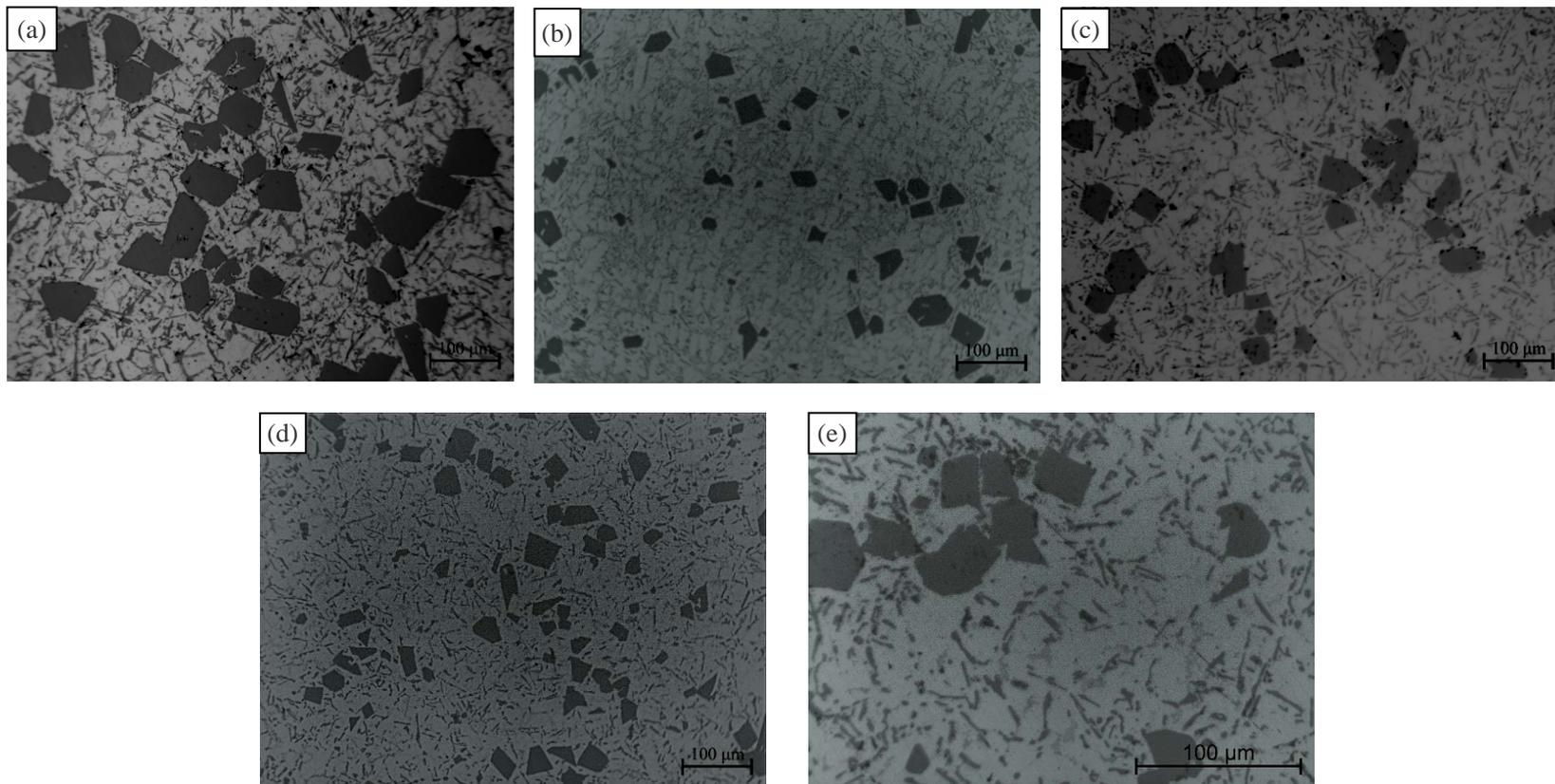
不同复合变质处理后过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金扫描照片

a: 未变质; b: P+RE; c: P+Sr; d: P+RE+Sr

P+RE+Sr综合变质效果最佳



四、热处理



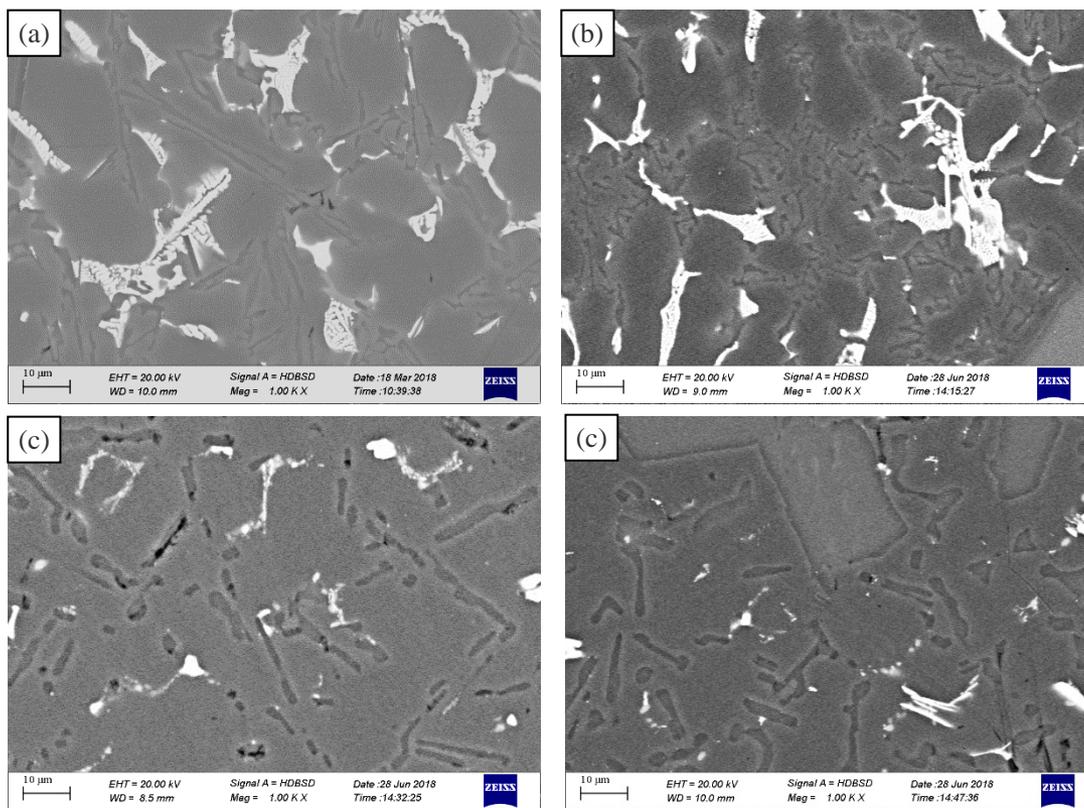
过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金金相组织

a: 未变质; b: 复合变质; c: 未变质+T6热处理; d: 复合变质+T6热处理; e: 钝化的初晶硅

热处理工艺: 520°C固溶8h, 室温水淬, 175°C时效9h, 空冷。



四、热处理



过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金扫描照片

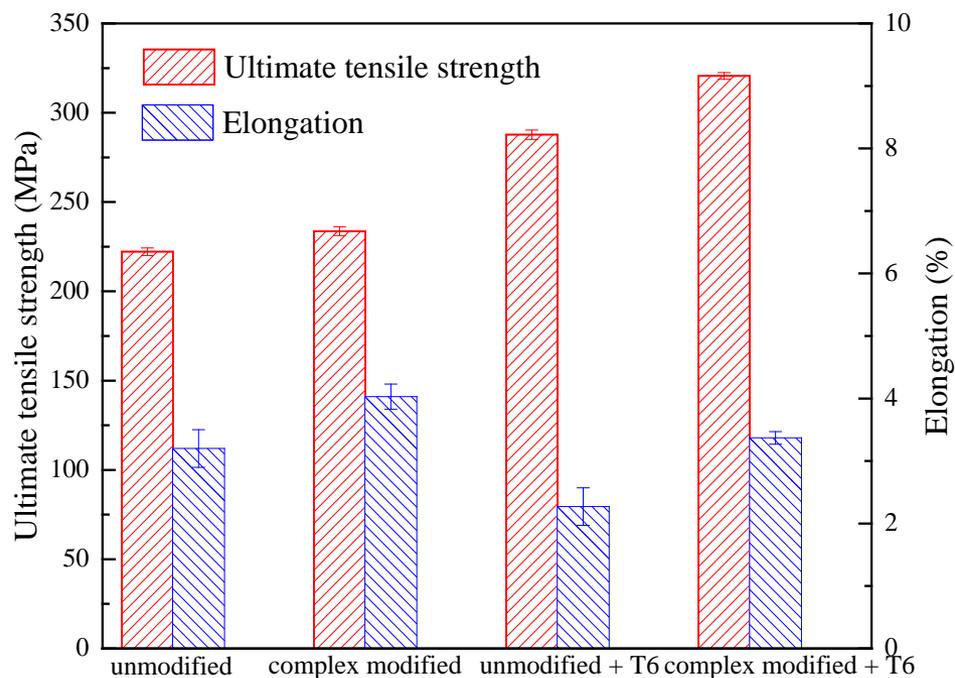
a: 未变质; b: 复合变质; c: 未变质+T6热处理; d: 复合变质+T6热处理

经热处理后，初晶硅边角钝化，共晶硅球化，分布弥散。



四、热处理

性能测试



P+RE+Sr复合变质过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金经固溶时效热处理后抗拉强度由233MPa提高至320MPa，提高了37%，断后伸长率由4.0%下降至3.4%。但均可满足用户要求。



五、总结与思考

(1) 未变质过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金中初晶硅尺寸粗大，平均尺寸在50 μm 以上，甚至部分粗大初晶硅尺寸达到100 μm ，共晶硅呈现细长的针状，长度大多分布在50~100 μm 。

(2) 过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金经P+RE、P+Sr和P+RE+Sr复合变质处理后初晶硅和共晶硅均得到了明显细化，其中经P+RE+Sr复合变质处理后，综合变质效果最佳，初晶硅平均尺寸由61 μm 细化至30 μm 以下，共晶硅由针片状变质为颗粒状、珊瑚状和短棒状，并且硅相的分布也得到改善，均匀弥散地分布在 α -Al基体中。

(3) 过共晶Al-18Si-4Cu-0.5Mg合金经固溶时效热处理后初晶硅边角发生钝化，共晶硅发生球化，抗拉强度得到大幅度提升，断后伸长率有所下降。P+RE+Sr复合变质合金经固溶时效热处理后，抗拉强度由233MPa提高至320MPa，断后伸长率由4.0%下降至3.4%。但均可满足用户要求。

思考题： (1) 常规的铝硅合金熔体变质处理技术有哪些？ (2) 除采用化学变质处理细化硅相外，还可采用哪些物理方法细化初晶硅和共晶硅？例如超声波？ (3) 稀土元素与Sr容易在高温下发生反应，因此，P+RE+Sr复合变质处理应如何实施？

五、总结与思考

引申思考:

(1) 本案例通过复合变质处理和热处理,有效改善过共晶铝硅合金的组织,使初晶硅和共晶硅均得到有效细化,由此提高其综合性能。目前,部分企业工程师因缺乏对理论知识的理解,对铝硅合金的变质与精炼处理,容易犯以下错误: 1) **易将初晶硅和共晶硅混为一谈**。对共晶铝合金和亚共晶铝硅合金,企业工程师容易忽视其中的初晶硅的变质处理,而对于过共晶铝硅合金,则容易忽视共晶硅的变质处理; 2) **易忽视变质剂中各组分的相互作用**。例如,稀土和Sr都是活性很高的元素,常用在铝硅合金的变质、精炼处理中,但高温下两类元素可发生复杂的化学反应,降低其变质和精炼效果。因此,这两类元素需要在不同的时间点分别加入铝熔体。

(2) 人才培养。案例涉及的合作企业拥有良好的试验条件,本案例的工艺试验均在企业的试验基地完成。然而,这家大型铝加工企业近几年招聘的研发人员中,没有一个在大学期间学习过铝加工技术!为此在合作过程中,学校团队对该企业的研发人员进行了一次较为系统的专业培训。本案例的这种现状,实际上反映了当下社会大学生群体“学一行厌一行”、“这山望着那山高”的普遍现象。这种社会现象实际上导致了我国专业人才和教育资源的巨大浪费!因此,高校更应加强**思政教育**和职业教育,鼓励引导更多专业对口的毕业大学生加入制造业人才队伍,而高校大学生也应树立正确的择业观,积极走进有色金属加工企业,**学以致用**,为我国实体经济发展注入更多的新鲜活力。



谢谢!

