Al-Fe-V-Si 系铝合金中的添加元素

张林林[1]， 肖于德[1]， 周娟[1]， 黎文献
1 湖南长沙中南大学材料科学与工程学院，(410083)
E-mail(zhanghang80@163.com)

摘 要：总结了 Al-Fe-V-Si 系铝合金中常用的添加元素，以及各元素在合金中的作用及影响，并提出了一些看法。

关键词：Al-Fe-V-Si 系铝合金；添加元素

0.前 言

近年来，由于 Al-Fe-V-Si 系铝合金具有良好的室温和高温强度、塑性、热稳定性、抗蚀性和抗疲劳性，而得到国内外普遍重视[1-5]。Al-Fe-V-Si 合金最早是由美国 Allied Signal 公司利用平流铸造（PFC）方法研究开发的。该合金可以通过快速凝固技术大大提高过渡族金属在 Al 基体中的固溶度，并得到细小均匀分布、热力学稳定的硅化物 $Al_{12}(Fe、V)_3Si$ 弥散强化相，根据文献[6]可知该相结构为体心立方（a＝1.260nm）。当冷却速度达到一定值时 $Al_{12}(Fe、V)_3Si$ 相的体积分数可达到 24～37%。然而在实际生产过程中由于条件所限很难保证高的冷却速度，从而出现粗大针状铝铁相 $Al_{13}Fe_4$，该相结构为复杂底心单斜(a＝1.549nm，b＝0.808nm，c＝1.248nm，β＝107.43°)，它的存在导致材料强度，韧性和耐热性的严重下降。因而如何消除和改变粗大 $Al_{13}Fe_4$ 相是急需解决的问题，而添加其他合金元素是有效途径之一[7-8]。

为了进一步提高 Al-Fe-V-Si 系铝合金的综合性能，各国研究人员对在 Al-Fe-V-Si 系铝合金中添加元素作了大量研究。研究者常常定量加入不同合金元素，或以不同方法限制一些元素在合金中的含量。大量研究表明，许多微量元素（质量分数小于 1%）对合金的组织和性能有十分显著的影响。在铝合金中这些微量元素按用途分为五类，即：变质剂、抗再结晶元素、改变时效行为添加剂、溶体净化剂和赋予合金特殊性能元素，其中一种元素可有多种用途，使合金获得多种性能。为了使合金获得某种性能，也可单独使用一种或联合加入几种微量元素。在 Al-Fe-V-Si 系铝合金中，微量元素的主要作用也与传统铸锭冶金铝合金中的作用相似。

1.稀土元素在 Al-Fe-V-Si 系铝合金中的应用

稀土元素加入铝合金中，有许多良好的作用，如在熔炼，铸造时增加成分过冷，细化晶粒，减小二次枝晶间距，减少气体和夹杂，球化夹杂相，降低熔体表面张力，增加流动性等，对工艺性能有着明显的影响。稀土元素在传统铸造生产的铝合金中已得到十分广泛的应用，研究也较为成熟。但稀土元素在 Al-Fe-V-Si 系铝合金的研究起步较晚，还有待发展[9-10]。

(1) Er 元素[9]

往 Al-Fe-V-Si 铝合金中添加 0.89%Er 元素，采用快速凝固制粉设备制取合金粉末，粉末经过一系列处理后，在 470°C热挤压，随后对试样进行力学性能测试。从测试结果可知：加入 Er 后，明显改善了 Al-Fe-V-Si 合金的塑性，高温强度几乎不变，但室温强度有所降低；在室温拉伸断口中有一定的粗大韧窝、粗大的质点和较多的撕裂棱。这是由于加入 Er 后，

基金项目：“973”子课题(TG1999064912)

稀土 Er 使 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$ 中间相失稳，导致基体固溶体固溶量增加，使体系的自由能升高；为了降低体系能量，合金元素与稀土元素形成粗大块状相δ(AlFeVSiEr)，该相热力学稳定性更高。其中一些粗大块状的δ相会使块状相周围的 Fe，V 浓度降低，减少了细小 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$ 质点数量，以至于热挤压过程中粗大块状相周围发生明显的局部再结晶。这使得合金强度得不到改善；但与此同时块状相周围发生的局部再结晶可以松弛应力集中，提高合金的塑性。

(2) Y 元素[10]

加 Y 与加 Er 有许多类似的情况。Y 的加入使 Al-Fe-V-Si 合金的室温强度明显提高，但合金塑性，高温强度都明显降低；合金室温拉伸断口中也能观察到一定的粗大韧窝和粗大质点。这是因为，加入的 Y 也使 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$ 失稳，类似地产生类球状相 $Al_{20}(V,Fe)_2Y$ 。$Al_{20}(V,Fe)_2Y$ 的产生同样也引起合金基体的局部再结晶温度降低，周围也会发生局部再结晶，但 $Al_{20}(V,Fe)_2Y$ 相对的均匀分布使基体变形也相对均匀，因此局部再结晶没有加 Er 的合金那么明显。

(3) Ce 元素[8-11]

Ce 的加入明显改善了材料的室温强度，高温强度及塑性。在合金的室温拉伸断口中，韧窝细小且均匀分布。这是因为，加入 Ce 提高 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$ 相的稳定性。虽然 Ce 的加入并未产生新相，但部分 Ce 固溶于 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$ 中，取代部分 Fe，成为第二相粗化速率的控制元素，从而大大降低了 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$ 质点的粗化率。这些使得第二相球形质点更细小，分布更均匀弥散，从而从整体上改善了合金的综合力学性能。

(4) Nd 元素[12-17]

用单辊平流铸造法可制备出 AlFeVSiNd 纳米晶薄带，经研究发现该合金主要由两相组成：α-Al 固溶体和 Al_8Fe_4Nd 相。纳米晶微结构随热处理温度而变化：在相同作用时间(1h)下，先发生以 Fe、Nd 原子团为中心的溶质元素偏聚；最大热处理温度下，在α-Al 周围网状分布的 Al_8Fe_4Nd 开始溶解，析出近似球形、分布较均匀的新相α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$，即经过高温处理后发生亚稳稀土相 Al_8Fe_4Nd 向α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$ 高温稳定相的转变，从而提高了材料的高温热稳定性和力学性能。测量热处理后试样的力学性能发现，纳米晶合金经过热处理后出现类似于传统铝合金的时效硬化现象[14]：随退火温度升高，显微硬度和拉伸强度升高，在 370℃随α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$ 相大量析出，出现一个硬化峰。

(5) Mm（混合稀土）[8-14]

在快凝 AlFeVSi 中添加混合稀土（55wt%Ce，29 wt%La，11 wt%Nd，5 wt%pr），该合金因具有超细晶粒和纳米级大小的弥散颗粒而表现出较高的屈服、疲劳强度，较好的热稳定性。

通过对合金条带铸态的 X 射线衍射测试结果的分析发现，随稀土含量的增加，合金结构变化有两个显著特征：

1）当稀土含量由 1at %增至 6at %时， AlFeVSi 合金中弥散相α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$ 的析出被抑制，基体合金向非晶态转变。这是由于在快凝 AlFeVSi 合金中α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$ 粒子往往呈团聚状沿晶界析出，添加以 La,Ce 为主的混合稀土元素易于择优作用于晶界，由于 Al、La(Ce)间存在显著的原子尺寸差异，并能形成混合热焓较大的金属间化合物，导致 Al-La(Ce)间相互作用明显强于 Al-M(M=Fe,V,Si)，这样在晶界处会抑制α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$ 粒子析出。

2）稀土含量达到 6at %时，过冷溶体粘度增加，Al-La(Ce)和 Al-Fe 二元合金熔点显著降低，此时形成 AlFeVSiMm 非晶态的金属玻璃。其 XRD 谱中出现 3 个明显的峰包，推测该非晶态无序原子排列有一定的取向性或存在着不同的短程近邻原子排列。

综合以上两点，有人分别讨论 Al93.3-xFe4.3V0.7Si1.7Mmx （ x=0,0.5,1,3 ）材料的组织性能变化情况。当 x＝0 时材料内弥散的α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$ 相（近似球形，直径大小为 50～100nm）分布于晶界、亚晶界以及晶粒内部；当 x≠0 时，发现随 Mm 加入量的增加，晶

粒和弥散相的尺寸都在减小，这意味着 Mm 的加入使材料内部出现了直径小于 50nm 的纳米晶粒；当 x=0.5 时材料内共存有两种弥散颗粒 α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$ 相和 Al_8Fe_4Mm 相；当 x=1 时只有 Al_8Fe_4Mm 相，当 x=3 时只有 $Al_{20}Fe_5Mm$（准晶）。

另外，加 Mm 后材料硬度明显提高。x=0.5、x=1 的合金具有较高的硬度和较好的热稳定性，揭示了 Al_8Fe_4Mm 向 α-$Al_{13}(Fe,V)_3Si$ 的相转变；x=3 的合金的硬度值有一个最高值，而后迅速递减，说明此合金的热稳定性差。

2．Mg 元素在 Al-Fe-V-Si 系铝合金中的应用

Mg 能提高合金的强度。Al-Fe-Mn 三元系中加入 0.1%~0.2%Mg，可强化基体和细化 Fe-Mn 化合物。在传统 AlFeVSi 铸件中由于 Fe、V 在 Al 中的低扩散性，粗大相 $Al_{13}Fe_4$ 和金属间硅化物(Fe-V 硅化物)的形成，降低了材料的性能，同时铝合金中较高的 Fe 含量会导致含铁的主要相和铸造中片状有害相 β（AlFeSi）的形成，其中 β 相非常硬且脆，与基体的结合强度相对较低，此外含铁主要相会影响浇注过程，在合金中产生一些显微缩孔，电子显微观察发现铸件中有许多星形的沉淀相颗粒。最新研究表明 Mg 可以有抑制铁相的有害作用的效果。

K.L.Sahoo [18-19]对 Al-Fe-V-Si 系铝合金中添加微量元素 Mg 的影响做了研究。经过处理后的合金中微孔数量减少，并且改善了主要铝合金相的形状、大小与分布，合金中主要的铝铁合金相以及共晶铝铁硅颗粒尺寸和形状也得到了的改善，从而起到了弥散强化作用。合金中的沉淀相的形状大多为块状或类球形，分布较均匀。原来由星形颗粒和片状颗粒引起的缺口效应也消失了。对合金的断口组织观察发现，未经处理的合金完全是脆性断裂，而经过 Mg 处理的合金是一种混合（塑—脆）断裂。

作者在铸态 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si(FVS0812)合金中添加元素 Mg,发现 Mg 的加入使得粗大针状铝铁相有所细化，分布均匀，同时基体晶粒也得到细化，提高了合金的硬度与强度，但塑性下降。

3．Be 元素在 Al-Fe-V-Si 系铝合金中的应用

Be 在变形铝合金中可改善氧化膜的结构，减少熔炼和铸造市的烧损和夹杂。一项专利宣称：在 Al-6～10Si 合金中加 0.05～0.5 的 Be 会使铁杂质相形态从长针转变为危害较小的圆球形或近似球体状，因而提高合金的塑性。在 AlFeVSi 合金中添加 Be 可使 AlFeSi 相转变为球状。

作者在铸态 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si(FVS0812)合金中添加元素 Be,发现 Be 能改善铝铁相的形貌与分布，且细化基体晶粒。当 Be 含量为 1.28%(质量分数)时,针状铝铁相已经得到很好的抑制,合金力学性能比未添加的合金有很大提高，其中抗拉强度和伸长率分别达到 152 Mpa 和 15.6%。随着 Be 含量的增加，合金断裂方式由典型的脆性断裂转变为微孔聚集型韧性断裂。

4．Ti 和 Zr 元素在 Al-Fe-V-Si 系铝合金中的应用

Ti 是铝合金中常用的添加元素，主要作用是细化铸造组织和焊缝组织，减小开裂倾向，提高材料的力学性能。如果和 B 一起加入，效果更为显著，所以常以 Al-Ti 或 Al-Ti-B 中间合金形式加入。Ti 的加入形成 Al_3Ti 与熔体产生包晶反应而形成非自发核心，起细化作用。在 AlFeVSi 合金中添加 Ti 可使针状 AlFeSi 相尺寸增大[17]。

Schumacher P 等人研究了在 Al70Fe13Si17(at%)中加入 Al-Ti-B 晶粒细化剂,结果发现对相的形貌影响不大。比较了在 Al-Y-Ni-Co 和 Al-Fe-Si 合金中 α-Al 的形核机制，两者大体相似：形核发生在硼化物的表面，并在硼化物周围存在富钛层，但在 Al-Fe-Si 合金中更为复杂，在硼化物周围还存在无特征沉淀相区。

在 FSV0812 合金中通过原位反应所生成的 TiC 粒子,改变了基体和化合物相的凝固特性，避免了较粗大的第二相的形成。原位反应生成的 TiC 粒子增大了基体中弥散强化相的体积分

数，在高温挤压过程中增强了对基体的钉扎作用，降低了粗化速率，从而有效的提高了材料的力学性能。

Zr 亦能细化铸造组织，但比 Ti 效果小，有 Zr 存在时会降低 Ti 和 B 的细化晶粒的效果。加入 Ti 和 Zr 的快速凝固 AlFeVSi 合金粉末，经观察表明，小于 40μm粉末中的析出相主要是 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$ 相，50～61μm粉末的组织基本上由铝和 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$，$Al_3(Zr,Ti,V)$两种析出相组成[6,20]。

5．其他元素在 Al-Fe-V-Si 系铝合金中的应用

(1) Cu+Ni+Ce+Zr 元素[21]

采用气体雾化制备的 Al-Fe-Cu-V-Si-Ni-Ce-Zr 铝合金粉末中，在粉末粒度较小的试样中，基体没有明显的组织特征；在粒度为 20～30μm的粉末中有 $Al_{12}(Fe,V)_3Si$ 和 $Al_{17}Cu_5CeNiFe$ 球状相析出，且粉末硬度较低；在粒度为 38.5～40μm的粉末中，基体为显微胞状组织，其间分布着球状析出相，此时在固溶强化、弥散强化和亚晶界强化的共同作用下，粉末的硬度达到最大值；随着粉末粒度的增大，雾化时冷却速度降低，析出相的大小和分布也发生变化，在粉末粒度为 50～61μm的粉末中，有片状组织形成，片状组织中的亚晶强化作用加强，但固溶强化作用受到很大削弱，因此硬度较低；粉末粒度增大到 61～74μm时，形成大量片状共晶组织；在更大粒度的粉末中，形成大量针状相（Al_7Cu_2Fe 和 Al_9FeNi）和点状平衡析出相（$Al_3(Zr,V)$），此时粉末的变形能力大大下降，表现出一定的硬脆性，使粉末的硬度再次升高。

(2) SiC、Co、Mn、Mo 元素

在 FSV0812 合金中加入碳化硅等颗粒或纤维增强相，材料的弹性模量、高低温强度、抗应用腐蚀能力以及抗蠕变性能都得到了明显的提高。含 SiCp5-15%的 AA8009 合金膨胀系数约为 22.7～20.8×10^{-6}1/K，弹性模量约为 94～107Gpa，比刚度均已超过 Ti-6Al-4V 钛合金和 17-4PH 不锈钢，服役温度可以提高 370℃。

Co 和 Mn 的作用相似，都使得含铁铝合金的富铁相富集，形成对拉伸性能没有有害作用的球状、树枝状的铁相。 Mn 很容易偏析而形成粗大的复杂晶体，而 Co 不会出现这种现象，但 Co 的加入量稍多。Mo 也可用于中和铁相，并比 Mn 的效果好。在 AlFeVSi 合金中添加 Co 可使含 Fe 相化合物分散为球状和枝状，添加 Mn 会使 Fe 相化合物转变为汉字状，花朵状。

另外，通过调整合金的主合金元素含量或比例也很可能出现新的组合，形成一些在常规铝合金中不能形成的多元强化相，从而发展出一些新合金原型。

6．结 束 语

充分发挥微量元素的潜力，对改善 Al-Fe-V-Si 系铝合金的各种性能及开发新合金具有指导作用。但是目前已经掌握的资料还远远不够，所以继续开展此方面的研究，不断积累有关资料和数据，并从理论上加以总结和深化具有重大意义。

今后，随着研究工作的继续进行，对现有 Al-Fe-V-Si 系铝合金中弥散相的研究会进一步深入，相信会有新的弥散相被发现。微量元素加入量很少对铝合金性能的影响却十分显著，应该花大力气开发利用。然而在我国微量元素在铝合金中的应用研究的还很不充分，在 Al-Fe-V-Si 系铝合金中的应用更少。特别是像 Zr、Sc 和 Ag 等高效微量元素，由于资源昂贵或添加工艺复杂等原因研究甚少。这些都需要我国从事该项研究者进行长期不懈努力，争取在短时间内使微量元素在 Al-Fe-V-Si 系铝合金甚至在铝合金中的应用研究赶上世界先进水平。

参 考 文 献

[1]王建华，易丹青．耐热铝合金研究进展．宇航材料工艺，2000，6：10-13

[2]董寅生，沈军，杨英俊等．快速凝固耐热铝合金的发展及展望．粉末冶金技术，2000，18(1)：35-41

[3]黄晖，张迎元，王月．快速凝固耐热铝合金及其进展．材料开发与应用，1996，11(4)：38-42

[4]高文宁,张永昌.快速凝固耐热铝合金的现状与发展.材料导报,No.3,1994:17-21
[5]齐世长,安江和夫.快速凝固粉末铝合金制备和应用.材料科学与工程,Vol.12,No.2,1994:34-38
[6]肖于德,黎文献,李松瑞等.稀土元素对快凝 AlFeVSi 合金性能和组织的影响.中南工业大学学报,1998,29(5):471-475
[7]苏北华,沈韵琪.铝合金的微量元素.轻合金加工技术,1997,Vol.25,No.6:30-35
[8]谭敦强.提高喷射沉积 AlFeVSi 耐热铝合金性能的若干理论问题和新工艺研究.博士学位论文.中南大学,2004:1-124
[9]Skinner D J.The physical metallurgy of dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloys.In:Dispersion Strengthened Aluminum Alloys,Edited by KIM YW and GRIFFITH WM,THE MINERAL METAL AND MATERIALS SOCIETY,WARRENDALE,PA,1988:181-197
[10] 张秀梅.Ce 的加入对变形铝合金组织与疲劳性能的影响.包头钢铁学院学报,2000,19(3):241-246
[11]肖于德,黎文献,李松瑞等.稀土 Er 对 FVS0812 合金组织性能的影响.中南工业大学学报,1997,28(5):461-464
[12]高泽生.锶用于 Al-Si 合金的变质处理.轻合金加工技术,1994,22(8):10-16
[13]庞华,邓江宁,张宝金等.快凝 Al-Fe-V-Si-Nd 合金中第二相选择.中国有色金属学报,2000,3;370-373
[14]庞华,邓江宁,林锦新等.用瞬态形核理论研究钕对快凝 Al-Fe-V-Si 合金非晶形成倾向的影响.中国稀土学报,200,2:131-134
[15]庞华,邓江宁,张宝金等.快速凝固 Al-Fe-V-Si-Nd 合金中纳米相转变动力学.中国有色金属学报,2000,4:487-489
[16]贾威,熊良铖,曾梅光等.快凝 Al-Fe-V-Si-Mm 合金中稀土作用的正电子湮没研究.金属学报,1998,34(2):221-224
[17] Xiao Yude,Li Songrui,Li Wenxian,Wang Richu.MicrostructuresandMechanicalProperties of Rapidly Solidified AlFeCrZrVSi Alloy and TheirThermalStability.Trans.Nonfer.Met.Soc.China, Vol.8,No.3,1998(9)
[18]K.L.Sahoo,S.K.Das.Eeffect of magnesium on sliding wear performance of cast Al-8.3Fe-0.8V-0.9Si alloys.Materials Science and Technology,2003,19:959-965
[19]K.L.Sahoo,C.S.Sivaramakrishnan.The effect of Mg treatment on the properties of Al-8.3Fe-0.8V-0.9Si alloy.Journal of Materials Processing Technology,2001,112:6-11
[20]董寅生,沈军,杨英俊等.气体雾化 Al-Fe-Cu-V-Si-Ni-Ce-Zr 铝合金粉末的组织和硬度及其关系.铸造,1999,12:8-11

Effect of Adding Elements in Al-Fe-V-Si series Aluminum Alloys

Zhang Linlin, Xiao Yude , Zhou Juan , Li Wenxian
College of Materials Science and Engineering Central South University,Hunan Changsha (410083)

Abstract: Adding elements widely used in Al-Fe-V-Si series aluminum alloys were summarized in this paper. The main performance of adding elements in the alloys and several proposals were also mentioned.

Key words: Al-Fe-V-Si series aluminum alloys; adding elements