

金属电子理论在铝基复合材料研究中的应用

任玉艳, 胡皓, 李英民

(沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870)

摘要: 随着物理及化学学科的进步以及先进测试手段的出现, 金属电子理论有了进一步的发展, 并已在铝基复合材料中得到应用。本文综述了利用微电子理论对铝基复合材料的微观机制进行分析的方法和特点, 并介绍了其发展概况及最新研究成果, 认为随着测试手段及计算技术的不断发展, 对微观物质结构的研究会不断深入, 金属电子理论也会进一步的完善, 在复合材料中的应用也会得到发展, 起到有效的指导作用。

关键词: 电子理论; Al 基复合材料; 析出相; 价电子; 力学性能

Applications of Metal Electron Theory in Aluminum Composite Material

REN Yu-yan, HU Hao, LI Ying-min

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning)

Abstract: Along with the progress of physics and chemistry as well as the advancing measuring techniques, metal electron theory has the further development, and has been applied in aluminum matrix composite material. This article summarized that we analyze the methods and feature for the microcosmic mechanism of the aluminum composite material by using the micro-electronics theory, and introduce which development condition and the newest research achievements, then we believe that with the development of test methods and computer technological, the research for microcosmic substance structure can continue going deep into, the metal electronic theory will be further improved, and the applied in composite material also make more progress, which play a guiding role effective.

Key words: electron theory; Al matrix composite material; mechanical property; phases; valence electron

1 电子理论概述

1.1 固体与分子经验电子理论

金属电子理论是研究电子运动状态及与此有关的电、热输运过程的理论。

余瑞璜^[1]在鲍林的金属电子理论基础, 发现了一个固体与分子经验电子理论。它是周期表第六周期和以上 78 个元素的、上千种晶体与分子结构; 结合其它现代实验如中子衍射、电子衍射、微波分析、穆斯鲍尔效应、回旋共振、正电子湮没、康·普顿谱线外形等实验; 经过考验的理论如能带理论、共价键理论、电子浓度理论等; 以及一般的金相平衡图、磁学、力学、热学、电学和其它物理性能等的分析、检查、再分析等反复多次的综合总结。利用三个假设和一个方法, 对固体与分子经验电子理论进行了描述, 并加以讨论其可行性。

1.2 电子理论的应用

1998 年刘志林^[2]等人, 探究了余氏理论(固体与分子经验电子理论)在合金研究中的应用, 利用余氏理论, 研究合金晶体或分子的价电子结构, 研究固溶体、相变、材料的物理性质等。

2004 年罗电宏^[3]等人, 对金属电子理论在合金材料中的应用进行了研究。合金材料的许多物理化学性质都是由电子结构所决定, 因此, 可以利用金属电子理论对材料性质提供理论基础, 以及预

测的依据,这样可以大大的加快发展,对材料的研究起到促进作用。今后随着电子理论的进一步发展,在合金材料中的应用也会更加广泛。

2012 年孙跃军^[4]等人,则对固体与分子经验电子理论在钢铁、铸铁、Ti-Al 金属间化合物以及 Ti 合金、铜合金、陶瓷、铝合金、镁合金等领域方面的应用,评述了价电子结构对合金的力学性能、磁性能、相变、熔点等的影响,并对电子理论进行了展望。

而同年褚冉和张国英^[5]则研究了电子理论在材料氧化腐蚀方面的应用,利用不同的计算方法,研究了电子理论在材料腐蚀氧化领域应用取得的成果和最新的进展等,为高性能抗腐蚀高抗的合金的设计起到有效的指导作用。

2 电子理论对 Al-Mg-Si 复合材料析出相的理论研究

2.1 Al-Mg-Si 复合材料的相简介

李云雯^[6]、王庆松^[7]和韦娜^[8]介绍合金中的相及电子结构。以李云雯^[6]的 Al-Mg-Si 合金的电子理论研究为例介绍合金中存在的相。

Al-Mg-Si 合金是以铝为基添加少量镁、硅以及其它微量元素的合金,合金在时效过程中出现了一些新相,当 Mg 与 Si 的比例为 1.73:1 时,合金中存在 $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 相;如果 Mg 与 Si 的比例大于 1.73:1,合金中还存在 $\delta\text{-Mg}$ 相;如果 Mg 与 Si 的比例小于 1.73:1,则合金中将存在 $\beta\text{-Si}$ 相^[9],下面将对这些相分别作概述。

2.1.1 $\alpha\text{-Al}$ 相

英国学者 H·戴维(H·Davy)在 1808 年指出了在黏土中存在一种金属,并将其命名为铝(在俄国十九世纪将它称为高岭土),同年他还发现了镁。Al-Mg-Si 系合金主要以铝基为主,故合金中主要的相为 $\alpha\text{-Al}$ 相,在合金中占相当大一部分,通常合金中的 $\alpha\text{-Al}$ 相呈枝茎状,对合金的性能起主要的作用,如柔韧性等方面。

2.1.2 GP 区与 β' 、 β 相

大量的实验证明在以 $\alpha\text{-Al}$ 基为主的合金中添加一定量的镁和硅,这些元素在一定的条件下,形成有益的相,使合金的内部结构、性能发生变化。Al-Mg-Si 合金中的主要相是 $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 相。

GP 区一般都在低温形成,与基体保持共格关系,该区是 Mg、Si 原子富集区^[10]。GP I 区呈六角形状,与 $\alpha\text{-Al}$ 基的取向^[11]:

$$(001)_{\text{GP}} \parallel (001)_{\text{Al}} \text{ 和 } [100]_{\text{GP}} \parallel [100]_{\text{Al}}$$

在 GP I 区生长的同时,GP II 区 (β'') 也逐渐长大,它与 $\alpha\text{-Al}$ 基体保持半共格,它的取向^[14]为:

$$(001)_{\text{Al}} \parallel (010)_{\beta''} \text{ 和 } [310]_{\text{Al}} \parallel [001]_{\beta''}$$

由于 β'' 不稳定,接着过渡到 β' 。GP II 区 (β'') 的形成由硅含量决定,而与镁含量无关,若合金中含过量的硅,则存在 GP II 区 (β'');若硅含量适当,则不存在 GP II 区 (β'')^[12-13]。而大量的 β'' 相的存在能使铝合金得到强化^[14]。

G.Thomas 等认为,中间相 β' 与 $\alpha\text{-Al}$ 基体保持半共格,形核不均匀,与基体不同,它的结构是立方晶格,或是密排六方结构。该相的形成是合金强化的主要原因^[15]。

由于上面的几种结构都与出现的体积变化不一致,因而最终形成 $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$, β 相是在 β' 母体界面上成核,并靠消耗 β' 而成长,在 $\{100\}_{\alpha}$ 析出,其取向关系^[16-17]是:

$$(100)_{\beta} \parallel (100)_{\text{Al}} \text{ 或 } [011]_{\beta} \parallel [001]_{\text{Al}}$$

2.1.3 $\beta\text{-Si}$ 相

初晶硅通常呈多角状,共晶硅呈针条状^[18],一般情况下在合金中为了使 Mg 与 Si 获得合理的比例^[9],总是加入过量的硅,一部分硅与镁结合生成 Mg_2Si ,剩余的硅则以团聚的形式存在。 $\beta\text{-Si}$ 呈球状,均匀分布在合金中,颗粒直径较小,且其密度较大。Si 晶胞为金刚石结构,它的存在使得合金的硬度大大增强。同时, Si 可增加合金的气密性^[19]。

2.2 电子理论对 Al-Mg-Si 复合材料析出相的理论研究及作用机理

对于铝基复合材料的研究一直都没有间断过，从添加不同元素的稀土，使用不同的条件来改善铝基复合材料的力学性能。为了更好的对铝基复合材料的了解和探究，研究工作又从微观角度进行了分析和总结。

1997 年 7 月，李培杰^[20]等人和俄罗斯哈巴罗夫斯克国立技术大学李豪森对 Al-Si 合金熔体的价电子结构进行了研究，利用的理论基础就是余氏理论（固体与分子经验电子理论），并根据分析铝硅二元合金价电子结构，来推断铝硅熔体中 Si-Si 原子之间的结合力最强，表明在熔体中存在硅原子的短程有序的分布，同时根据熔体的微观不均匀性理论，建立了铝硅二元合金的熔体结构的模型。二维示意图如图 1 所示。

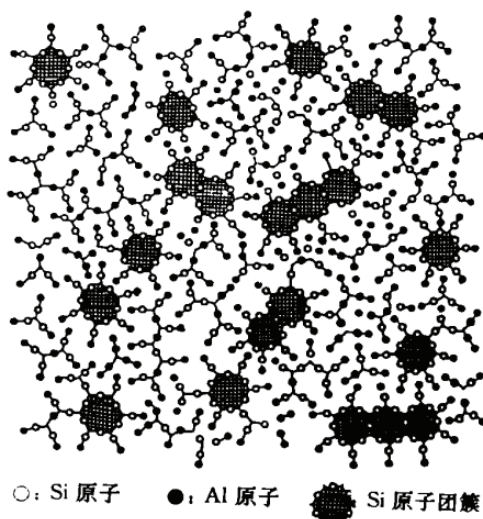


图 1 Al-Si 合金熔体结构模型（二维示意图）

1998 年，G.A.Edwards^[21]等人通过差示扫描量热法(DSC)以及各种微观扫描仪器分析了 Al-Mg-Si 合金的析出相顺序，分析结果如下：

独立的群集 Mg 和 Si 原子→含有 Mg 和 Si 原子的 Co 团簇→未知结构的细小析出物→针状析出物 β' →板条状个棒状析出物 β' 。

而 β'' 则作为一种新的析出相结构被提出，结果还发现在 Co 团簇和中间析出相中 Mg 和 Si 原子的比率接近 1: 1。

同年，K.Matsuda^[22]等人，研究了 Al-1.6Mg₂Si 合金中 GP 区的结构，通过改变不同的条件在高分辨率透射电子显微镜下观察 GP 区，通过观察发现，GP 区的化学组成 Mg/Si=1.0。

2001 年，C.D.Materialia^[23]等人，研究了 6082Al-Mg-Si 合金中的 GP 区模型。实验发现，将含有 0.6%Mg，0.9%Si，0.5%Mn 和 0.2%Fe 的 6082Al 合金进行热处理后，合金的硬度增加。分析了增加的原因主要是亚稳相的存在（尤其是 β'' ），并通过实验确定了 GP 区所含相 的模型。

2002 年，刘慧和高英俊^[24]运用固体与分子经验电子理论，对掺微量的 Sc 的 Al-Mg 合金的价电子结构进行了计算，根据计算结构分析，表明 Sc 的加入引起 Al-Sc 和 Mg-Sc 原子的较强相互作用，形成一种晶胞偏聚区 Al-Sc，从而提供了 Al₃Sc 所需要的成分条件，因此析出大量的 Al₃Sc，有效的细化晶粒。研究发现在浇注温度 720℃ 附近，含微量 Sc 的 Al-Mg 合金固溶体至少存在五种结构单元，分别是纯 Al 晶胞、Al-Mg 晶胞、Al-Mg-Sc 晶胞、Al-Sc 晶胞、Al-Sc 晶胞聚集区等。经过分析得出当 Sc 含量较高时，Al-Sc 键是最强的共价键，在基体中弥散析出 Al₃Sc 细小粒子，成为铝晶粒的非均匀形核，抑制基体中铝晶粒的长大，可以有效的细化铝晶粒，从而改善合金性能。

随后在 2003 年，高英俊和李云雯^[25]又对 Al-Mg-Si 合金的价电子结构进行分析，利用固体与经验电子理论对 Al-Mg-Si 合金的主要成分(α -Al, Mg, Si 和 β -Mg₂Si) 的价电子结构进行了计算，计算结果显示，各成分晶胞最强键上的共价电子对数与其密度、熔点、硬度和电负性有着对应的关系

(正比关系), Mg_2Si 原子上的次强键的共价电子分布有利于 β 相的形成。通过对相应的数据分析得出, Mg_2Si 的密度, 熔点介于镁与硅的密度和熔点之间; 其次电负性是表征元素的原子的分子内吸引电子的能力, 电负性越大, 吸引电子的能力越强, Al、Mg 和 Si 的电负性与最强键分布的电子对数成正比, 最强键分布的共价电子对数越多, 硬度越大。

在 2005 年高英俊^[26]等人对 Al-Mg-Si 合金进行了进一步研究, 主要是对 Al-Mg-Si 合金中的析出相 β (Mg_2Si) 及纯铝硅晶胞的键电子密度进行了计算, 结果表明硅晶胞中的最强键 Si-Si 键结合的最强, 使得硅在合金中易形成 Si 团, 主要以游离的硅晶体形式存在。由于 Si 存在与晶界和晶体中, 其具有较强的共价键络, 能够提升合金的共价键络的强度, 从而提高了合金的强度。而析出相 β (Mg_2Si) 晶胞中的最强键 Mg-Si 键较强, 键密度较大。使得 Mg 和 Si 有着较强的结合作用, 有利于 Mg_2Si 相的析出, Si 的存在一定程度上抑制了 Mg_2Si 的生长, 使 Mg_2Si 颗粒更加的细小, 从而起到了沉淀强化的作用。通过计算得出 Si-Si 键比 Mg-Si 键要强 2 倍, 这也解释了影响 Mg_2Si 颗粒生长和合金硬度等力学性能的原因。

2006 年, 高英俊^[27]等人再次利用固体与分子经验电子理论对 Al-Mg-Si 合金的 L_{10} 型 GP 区的价电子结构进行了分析, 分析结果表明: 合金基体析出的共格 GP 区具有比基体更强的共价键络, 起到提升合金整体共价键络的强度的作用, 并且对位错运动造成了更大的阻力, 从而使合金的强度得到明显提高。同年 10 月, 高英俊^[28]继续研究 GP 区的原子键络与强化作用, 除了以前研究的内容外, 还从晶胞滑移的方面进行解释, GP 区晶胞中相邻的 (111) 滑移面之间滑移由于存在强的共价键阻力, 使其硬度较基体增大, 当位错运动切过滑移带时, 需要切断强的共价键, 从而解释了 L_{10} 型 GP 区对合金时效强化作用的本质原因。2010 年, 高英俊^[29]等人再次对 Al-Mg-Si 合金展开研究, 应用分子与固体经验电子理论对时效过程中析出的 U1 和 U2 相的原子成键和结合能进行了计算。结果表明: 两相晶胞中最强键和次强键都是 Al-Si 键, 其键络比基体 Al 晶胞中的最强键络都强得多; 两析出相晶胞中都以较强的 Al-Si 键构成主要键络骨架结构, 起到增强基体键络强度、强化合金的作用。由于析出相 U1 比析出相 U2 具有更强的 Al-Si 键络结构, 且结合能较大, 因此, 相对 U2 相来说, U1 相更稳定。计算结果还表明: (001)Al/(110)U1 相界面处电荷保持连续且连续性较好, 界面应变能较低, 界面较稳定; 界面(001)Al/(010)U2 处的面电荷密度偏离连续条件, 因此在此界面处, 应力较大, 界面原子键匹配较差, 界面储能(应变能)较高, 容易成为新相形核、长大和裂纹萌生的地方。

2013 年高英俊^[30]等人又对 Al-Mg-Si 合金 Pre- β'' 与 β'' 析出相的界面原子键络与性能进行了分析。应用基于价键理论和能带理论建立的固体与分子经验电子理论(EET)和改进的界面 TFD 理论, 将合金宏观性能的研究追溯到原子成键的电子结构层次, 对 Al-Mg-Si 合金的 pre- β'' 和 β'' 析出相内部原子间的价电子成键及其与基体界面间形成的界面键络特征进行研究, 计算析出相的键络强度、界面结合因子、晶体结合能、析出相与基体的界面能。两相的计算结果表明: pre- β'' 相的界面能较小, 析出相需要的形核功较小, 因此, 该相易于析出; 而 β'' 相的界面能较大, 则该相形核长大较难; 这两个析出相与基体的相界面处的电荷密度连续性好, 同时界面的原子键结合较强, 使得相界面处内应力较小, 界面结合较坚固, 能够有效地提高合金的强度和韧性。这些结果与实验情况相符合。

最后在 2013 年, 高英俊^[31]等人对 Al-Mg-Si 合金的原子成键与性能的关系进行了叙述。应用基于价键理论和能带理论建立的固体与分子经验电子理论(EET)和改进的界面 TFD 理论, 将合金宏观性能的研究追溯到原子成键的电子结构层次, 并对 Al-Mg-Si 合金的序列析出相内部原子间的价电子成键及其与基体界面间形成的界面键络特征研究进行总结, 比较各析出相的键强、结合能以及析出相与基体的界面能。结果表明: β'' 相对合金的强化作用最显著, pre- β'' 相的次之; 结合能与最强键键能的变化也能反映熔点的变化, pre- β'' 相、 β'' 相与 U1 相的熔点比基体和其他 GP 区的熔点高; 各析出相的键强演变规律与实验强化曲线的变化规律相符。

2004 年 C.Ravi^[32]等人使用第一性原理对 Al-Mg-Si-(Cu)结晶的晶体结构和稳定性进行了研究, 研究发现了合金上的析出相(如 GP 区, β'' , U1, U2, β' , β)。利用第一性原理, 对合金进行热力学研究, 对相关参数进行了计算。通过对微观相的计算和分析, 讨论了稳定性。

同年 S.J.Andersen^[33]等人研究了 Al-Mg-Si 合金中的晶体 $U2-Al_4Mg_4Si_4$ 结构及 β' 和 β'' 之间的关系。使用 EDS 和高分辨率透射电子显微镜观察原子模型, 分析 β' 和 β'' 之间的关系, 并且计算分析强度的差异。

2006 年王庆松^[34]等人, 对 Al-Mg-Si 的 GP 区及 β 相界面的电子结构进行了分析。运用的理论基础就是固体与分子经验电子理论, 计算了 GP 区 (L_{10} 型) 和 β (Mg_2Si) 相与基体的界面电子结构, 分析了时效过程中之间的综合性质、界面原子状态变化及界面对合金力学性能的影响, 并分析原子状态变化的原因。通过分析得出 GP 区与基体界面的电子密度在一级近似下连续, 故 GP 区粒子易于长大, 而 β 相则不连续, 抑制了 β 相的再结晶晶粒的长大, 但是在高应力下连续, 从而提高了合金的变形能力。当界面最稳定时, GP 区与界面的结合强于 β 相; 当界面处于非稳定的临界状态时, GP 区与基体的结合能力下降, 而 β 相升高, 从而解释了合金相应状态下变形性能的差别。最稳定状态下的界面与体内各原子杂阶相比, GP 区界面各类原子杂化能级总体上升, 而 β 相界面各类原子状态没有变化, 这可能是共格与非共格界面的内在反映。当基体的电子密度由最小值过渡到最大值时, GP 区与 β 相中 Si 原子的杂阶均降低, 可能是力求增强高应力下界面稳定性的缘故。GP 区界面处基体 Al 原子的杂阶不变, 但 β 相界面处基体 Al 原子的杂阶上升, 这可能是基体位错与溶质不同的交互作用机理引起的。

同年, 王庆松^[35]等人继续对 Al-Mg-Si 合金滑移面及位错进行了研究, 运用固体与分子经验电子理论, 计算了 GP 区和 β 相滑移面之间总的共价键结合能力。实验结果是 GP 区和 β 相滑移面之间总的共价键结合能力分别是基体铝的 1.36 和 3.32 倍。时效初期析出的 GP 区, 滑移面比基体结合强, 当基体位错沿其滑移面切过时, 比基体受到的摩擦阻力大, 使得合金硬度明显提升, 稳定相 β 比基体滑移面结合能力强 3 倍之多, 起到强烈钉扎基体位错与晶界迁移的作用, 增强了合金的变形抗力。由 GP 区及 β 相的滑移面结合能力 H 值的比较可知, 前者硬度较基体不太硬, 这使得位错以切过机制运动, 而后者硬度过大, 使得位错以绕过机制运动。

2007 年, 黄创高^[36]等人对高英俊^[26]等人的研究进行了结论性补充, Al-Mg-Si 合金相界面上电荷密度不连续, 引起的内应力抑制了 β 相再结晶晶粒的长大, 使 β 相晶粒得到细化, 从而使合金在过时效状态下具有良好的韧性; 且由于 Mg_2Si 颗粒的 Mg-Si 共价键络较强, 能够阻碍位错运动, 使得位错难以切割 Mg_2Si 颗粒, 从而合金的硬度得到提。

2007 年 6 月, R.Vissers^[37]等人研究了 Al-Mg-Si 合金硬化过程中形成的一种亚稳相 β' 的晶体结构。通过扫描衍射的方法确定的。借助仪器进行计算分析, 可以获得 β' 的初始阶段的微观模型, 并对微观结构模型进行不分析。

2007 年 7 月高倩^[38]等人从电子结构上揭示了 Al-Mg-Si 合金时效强化初期的机理。通过固体与分子经验电子理论中的键距发计算了合金中的过饱和固溶体相, GP 区以及 β 相的电子结构, 解释了合金高温淬火后, 过饱和固溶体产生 GP 区而不直接产生 β 稳定相的过程。

2008 年胡益丰^[39]等人继续研究 Al-Mg-Si 合金中 GP 区的强化作用的价电子结构。通过结果分析得出 GP 区晶胞最强键和次强键上的共价电子数远比纯 Al 晶胞的最强键共价电子数多, 其主键络骨架对合金键络起到增强作用, 使得位错运动难以切割, 从而提高了合金的硬度。以 Mg 原子为中心的共价键络在 GP 区生长时起到主导作用, 生成较强的 Mg-Mg 键和 Mg-Si 键。由于细小共格的 GP 区大量均匀脱溶沉淀提升了基体的整体键络强度, 同样对合金产生强化作用。

王建中^[40]等人在 2008 年, 在电脉冲作用下, 对 Al-Si 合金的价电子理论进行研究。利用固体与分子经验电子理论, 计算了该合金熔体相价电子结构参数。研究了铝硅合金熔体基元键络对温度(能量)变化的敏感性及其对组织形态的影响。结果表明, 低过热铝硅合金熔体中 n_A 值较大的 Si-Si 团簇为过共晶铝硅合金初生硅形核提供了核心, 对其周围的 Al-Si 团簇产生强烈的“类拖曳”效应; 熔体温度的变化较明显地影响了该核心键络的稳定性, 从而影响了组织形态; 脉冲电场作用于合金熔体后, 不可恢复地改变了 Si-Si 团簇键络稳定性, 从而对合金凝固组织形态起到变质作用, 施加电脉冲的能量越高, Si-Si 团簇越不稳定, 电脉冲孕育效果越显著。

3 电子理论在铝基复合材料研究中的应用前景

电子理论在 Al-Mg-Si 复合材料的研究中起到重要的理论基础作用, 电子理论的加入, 更使得材料研究者从微观的角度, 探究铝基复合材料力学性能改变的根本原因。从价电子、相及键的角度, 以固体与分子经验电子理论为手段, 计算相应参数, 从内在关系来分析铝基复合材料。所以, 从微观角度对材料的分析, 成为一项研究热点。

近几年, 研究者们以 Al-Mg-Si 为基础, 研究电子理论对其微观机制的影响。随着电子理论的不完善, 这种研究方法也逐渐受到研究学者们的关注。随着固体与分子经验电子理论的完善, 未来在合金元素的强化机理、合金电子结构和力学性能的内在联系、新型合金的设计等领域必将有着越来越重要的作用。

4 结束语

电子理论应用于材料科学上的许多方面, 一定程度上推动了材料学的发展和应用。其应用范围大, 比如合金材料、合金设计、材料的腐蚀和氧化等。尽管电子理论有着有效的应用, 但是其也存在这局限性, 且电子理论属于新型学科, 只有通过研究工作者的继续研究, 坚持不懈的努力, 才能充分的掌握内在规律。今后, 随着科学技术的不断发展, 电子理论也将趋于完善。在未来, 电子理论将更有效的服务于材料的研究。

参考文献:

- [1] 余瑞璜. 固体与分子经验电子理论[J]. 科学通报, 1978, 23(4): 217-224.
- [2] 刘志林, 孙振国, 李志林. 余氏理论和程氏理论在合金研究中的应用[J]. 自然科学进展, 1998, 8(2): 150-160.
- [3] 罗电宏, 马荣骏. 金属电子理论在合金材料中的应用[J]. 有色金属, 2004, 56(4): 45-50.
- [4] 孙跃军, 李思南, 尚勇等. 固体与分子经验电子理论在材料研究中的应用[J]. 材料导报, 2012, 26(19): 166-168.
- [5] 褚冉, 张国英. 电子理论在材料腐蚀氧化方面研究的应用[J]. 沈阳师范大学(自然科学版), 2012, 30(3): 347-353.
- [6] 李云雯. Al-Mg-Si 合金的电子理论研究[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
- [7] 王庆松. Al-Mg-Si 合金强化机理的电子理论研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [8] 韦娜. Al-Mg-Si 三元合金析出相的电子结构与力学性能[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- [9] Gupta.A.K, Loyd.D.J, Court.S.A. Precipitation Hardening in Al-Mg-Si Alloys With and Without Excess Si[J]. Materials Science and Engineering, 2001, 316(1-2): 11-17.
- [10] 李普超, 汪明朴等. Al-Mg-Si 合金的时效研究[J]. 中南工业大学学报, 1998, 29(3): 262-265.
- [11] Verwerft.M. On the Precipitation of Magnesium Silicide in Irradiated Aluminium Magnesium alloys[J]. Acta Mater, 2000, 48: 1097-1104.
- [12] Andersen.S.J, Zandbergen.H.W, Jensen.J. The Crystal Structure of the β'' Phase in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta mater, 1998, 46(9): 3283-3298.
- [13] Mcrayama.M, Hoko.K. Pre-Precipitate Clusters and Precipitation Process in Al-Mg-Si Alloys[J]. Acta mater, 1999, 47(5): 1537-1548.
- [14] Zhang.D.L, Zhang.L.H, Stjohn.D.H. Effect of a short solution treatment time on microstructure and mechanical properties of modified Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg alloy[J]. J.Light metals, 2002, 2: 27-36.
- [15] 王艳晶, 王博, 曾等. Al-7%Si 合金综合处理及其力学性能的研究[J]. 沈阳航空工业学报, 2000, 117(3): 36-38.
- [16] Mondolfo.L.F. Aluminum Alloy: Structure and properties. Butterworth, London, 1976.
- [17] Zhang.J, Fan.Z, Wang.Y.Q et al. Microstructural development of Al-15wt%Mg₂Si in situ composite with mischmetal addition. Mater.sci&Eng., 2000, A281: 104-112.
- [18] 南京汽车制造厂等编著. 金属材料相谱[M]. 江苏科学技术出版社, 1979.
- [19] Wang.Y., Xiang.Y. Effects of beryllium in Al-Mg-Si-Ti cast alloy[J]. Mater.sci&Eng. 2000, A280: 124-127.

- [20] 李培杰, 陈岗, 余瑞璜等. Al-Si 合金熔体的价电子结构及其结构遗传[J]. 吉林大学自然科学学报, 1997, (3): 61-63.
- [21] Edwards.G.A, Stiller.K, Dunlop.D.L et al. The precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta.Materialia, 1998, 46(11): 3893-3904.
- [22] Matsuda.K, Ikeno.S, Gamada.H et al. High-resolution electron microscopy on the structure of the GP zones in an Al-1.6%Mg2Si alloys[J]. Metal Mater Trans A, 1998, 29(44): 1161-1167.
- [23] Marioara.C.D, Andersen.S.J, Jansen.J et al. Atomic model for GP-zones in 6082 Al-Mg-Si system[J]. Acta.Materialia, 2001, 49(2): 321-328.
- [24] 刘慧, 高英俊. Al-Mg-Sc 合金的价电子结构计算[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2002, 27(3): 256-259.
- [25] 高英俊, 李云雯. Al-Mg-Si 合金的价电子结构分析[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2003, 15(4): 10-11.
- [26] 高英俊, 李云雯, 王志成等. Al-Mg-Si 合金强化作用的键分析[J]. 轻金属, 2005, (2): 55-57.
- [27] 高英俊, 王玉玲, 温新竹等. Al-Mg-Si 合金 L10 型 GP 区的价电子结构分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2006, 27(3): 252-255.
- [28] 高英俊, 王庆松, 王娜. Al-Mg-Si 合金 GP 区的原子键络与强化作用[J]. 矿业工程, 2006, 26(5): 87-91.
- [29] 高英俊, 陈华宁, 韦娜等. Al-Mg-Si 合金中的 U1 和 U2 相的原子成键与性能[J]. 中国有色金属报, 2010, 20(7): 1267-1274.
- [30] 高英俊, 韦娜, 黄礼林. Al-Mg-Si 合金 pre- β' 与 β' 析出相的界面原子键络与性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 919-926.
- [31] 高英俊, 陈皓天, 朱甜霞等. Al-Mg-Si 合金的原子成键与性能的关系[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1226-1233.
- [32] Ravi.C, Wolverson.C. First-principles study of crystal structure and stability of Al-Mg-Si-(Cu) precipitates. Acta.Materialia, 2004, 52(14): 4213-4227.
- [33] Andersen.S.J, Marioara.C.D, Froseth.A et al. Crystal structure of the orthorhombic U2-Al4Mg4Si4 precipitation in the Al-Mg-Si alloy system and its relation to the β' and β'' phase[J]. Materials Science and Engineering:A, 2005, 390(1-2): 127-138.
- [34] 王庆松, 崔雪鸿, 王玉玲等. Al-Mg-Si 合金 GP 区及 β 相界面而电子结构分析[J]. 广西科学, 2006, 13(3): 207-211.
- [35] 王庆松, 秦庆海, 王娜等. Al-Mg-Si 合金滑移面结合及位错运动机制[J]. 重庆工学院学报, 2006, 20(2): 52-56.
- [36] 黄创高, 李云雯, 张丽娜等. Al-Mg-Si 合金相界面的键特征与强化作用[J]. 广西大学学报, 2007, 32(7): 50-54.
- [37] Vissers.R, Van Huis.M.A, Jansen.J et al. The crystal structure of the β' phase in Al-Mg-Si alloys[J]. 2007, 11(55): 3815-3823.
- [38] 高倩, 林成, 曹力生. Al-Mg-Si 合金时效强化初期的价电子理论研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(4): 27-30.
- [39] 胡益丰, 沈大华, 邓文. Al-Mg-Si 合金 GP 区强化作用的价电子结构分析[J]. 轻金属, 2008, 8:55-58.
- [40] 王建中, 何丽佳, 林成等. 电脉冲作用下 Al-22%Si 合金的价电子理论研究[J]. 中国科学, 2008, 38(11): 1936-1943.