

# 稀土在航空工业中的应用现状与发展趋势

## Application and Development Trend of Rare Earth in Aviation Industry

李凤梅 钱鑫源 李金桂 王乐安 赵进 (北京航空材料研究院)

Li Fengmei Qian Xinyuan Li jingui Wang Lean Zhao jin

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

[摘要] 综述了稀土在航空领域中的应用状况, 展望了未来的发展趋势。着重介绍了引入稀土后航空材料性能改善的机理。

关键词 稀土 航空材料 性能 应用

[Abstract] The application situation of rare earth in aviation industry is introduced, and the development trend of rare earth in aviation industry is forecast. The mechanism of improving properties is discussed after introducing rare earth to aeronautical materials.

**Keywords** rare earth aeronautical materials properties application

### 1 前言

早在 50 年代我国仿制的飞机和导弹的蒙皮、框架及发动机机匣已采用稀土镁合金, 70 年代后, 随着我国稀土工业的迅速发展, 航空稀土开发应用跨入了自行研制的新阶段。新型稀土镁合金、铝合金、钛合金、高温合金、非金属材料、功能材料及稀土电机产品也在歼击机、强击机、直升机、无人驾驶机、民航机以及导弹、卫星等产品上逐步得到推广和应用。

### 2 稀土材料及其在航空工业中的应用

#### 2.1 稀土镁合金

中国航空工业总公司(简称中航总)研制的稀土镁合金包括铸造镁合金及变形镁合金约有 10 多个牌号, 很多牌号已用于生产, 质量稳定。例如: 以稀土金属钕为主要添加元素的 ZM6 铸造镁合金已扩大用于直升机后减速机匣、歼击机翼肋及 30kW 发电机的转子引线压板等重要零件。稀土高强镁合金 MB25 已代替部分中强铝合金, 在强击机上获得应用。为了扩大稀土镁合金的推广应用, 还开展了稀土镁合金在医学工程上的应用。目前该材料正在做医学生物实验, 稀土镁合金有望作为人工骨接材料代替现用金属夹具, 减少病人第二次取出夹具的手术。

稀土铸造镁合金主要在 200~300℃ 以下长期使

用, 具有好的高温强度和长期抗蠕变性能。各种稀土元素在镁中的溶解度不同, 增加的顺序为镧、混合稀土、铈、镨、钕。它对常温、高温力学性能的良好影响也随之增加。以钕为主要添加元素的 ZM6 合金在热处理后不但具有高的室温力学性能, 而且还有良好的高温瞬时力学性能和抗蠕变性能, 可在室温下使用, 也可在 250℃ 长期使用。随着含钕抗蚀新型铸造镁合金的出现, 近年来铸造镁合金重新受到国外航空工业的青睐。

在镁合金中添加适量的稀土金属, 可以增加合金的流动性, 降低微孔率, 提高气密性, 显著改善热裂和疏松现象, 使合金在 200~300℃ 高温下仍具有高的强度和抗蠕变性能。

#### 2.2 稀土钛合金

70 年代初, 北京航空材料研究院(简称航材院)在 Ti-Al-Mo 系钛合金中用稀土金属铈取代部分铝、硅, 限制了脆性相的析出, 使合金在提高耐热强度的同时, 也改善热稳定性能。此后, 在此基础上, 又研制出了性能良好的含铈的铸造高温钛合金 ZT3。它与国际同类合金相比, 在耐热强度及工艺性能方面均具有一定的优势。用它制造的压气机机匣用于某发动机, 每架飞机减重达 39kg, 提高推重比 1.5%, 此外减少加工工序约 30%, 取得明显效益, 填补了我国航空发动机在 500℃ 条件下使用铸钛机匣的空白。研究表明, 含铈的 ZT3 合金组织中存在着细小的氧化铈质点。铈

化合了合金中的一部分氧，形成了难熔的、高硬度的稀土氧化物质点  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ 。这些质点在合金形变过程中阻碍了位错运动，提高了合金高温性能。铈夺取了一部分气体杂质（尤其是在晶界上的），就有可能在使合金强化的同时，保持良好的热稳定性能。这是在铸造钛合金中应用难熔质点强化理论的首次尝试。

在钛合金熔模精密铸造工艺中，航材院经多年研究，采用了特殊的矿化处理技术，研制出了稳定廉价的氧化钇砂料与粉料，其比重、硬度和对钛液的稳定性上，都达到了较好的水平，而在调节控制壳料浆性能上，表现出更大的优越性。用氧化钇型壳制造钛铸件的突出优点是：在铸件质量和工艺水平与钨面层工艺相当的条件下，能制造比钨面层工艺更薄的钛合金铸件。

### 2.3 稀土铝合金

中航总研制的含稀土耐热铸造铝合金 HZL206，与国外含镍的合金比较，具有优越的高温 and 室温力学性能，并已达到国外同类合金的先进水平。现已用于直升机和歼击机工作温度达  $300^\circ\text{C}$  的耐压阀门，取代了钢和钛合金。

稀土铝硅过共晶 ZL117 合金在  $200\sim 300^\circ\text{C}$  下的拉伸强度超过西德活塞合金 KS280 和 KS282，耐磨性能比常用活塞合金 ZL108 提高 4~5 倍，线膨胀系数小，尺寸稳定性好，已用于航空附件 KY-5、KY-7 空压机和航模发动机活塞。

稀土元素加入铝合金中，明显改善显微组织和机械性能。稀土元素在铝合金中的作用机制为：形成分散分布细小的铝化合物起着显著的第二相强化作用；稀土元素的加入起到了除气净化作用，从而减少合金中气孔的数量，提高合金的性能；稀土铝化合物作为异质晶核细化晶粒和共晶相，也是一种变质剂；稀土元素促进了富铁相的形成和细化，减少了富铁相的有害作用， $\alpha\text{-Al}$  中 Fe 的固溶量随稀土加入量的增加而减少。也对提高强度和塑性有利。

### 2.4 稀土非金属材料

稀土有机灌注料 XZ-1 已用于高性能发动机控油系统的燃油电磁开关，液压电磁开关等八种电磁铁产品，由于成本低，施工简便，可以大量取代环氧灌注料，具有很好的经济效益。

系列防老化橡胶涂料 KF-1 的研制成功，解决了长期以来飞机油箱使用寿命短的难题，KF-1 的投入使用，使得飞机油箱使用寿命由原来的 3~5 年延长到 15~20 年，并提高了使用性能。

含  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的  $\text{MgCrAlY}$  涂层是发动机热端部件用的可

设计成分的第三代涂层。航材院采用磁控溅射沉积工艺和多弧离子镀技术已研制成功这种涂层系列，其抗热腐蚀及综合性能已达到国外同类涂层的先进水平。该涂层系列已被高温合金、定向凝固合金、单晶合金和  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基合金涡轮叶片、导向叶片选用，作为高温抗氧化涂层已在先进发动机和地面燃气涡轮机上使用。 $\text{Y}_2\text{O}_3$  在该系列涂层中起着涂层与基体合金的“钉扎”作用，显著提高了涂层与基体的结合力。

稀土添加剂对化学热处理有重要作用，由于稀土元素具有特定的电子结构和很高的化学活性，在化学热处理中有显著的活化作用，对改善渗层组织和性能及提高渗层速度有明显效果。某航空工厂将常规渗碳、氮和碳氮共渗加入稀土添加剂工艺进行比较，渗剂中加入稀土元素，初步试验研究表明渗速可提高 30%。加入稀土的高速钢氮碳共渗硬度 HV 从 933~946 可提高到 1350~1478。稀土元素用于化学热处理的方法简便易行，对设备无特殊要求，产品质量提高，并节省能源，有很好的推广应用价值。

### 2.5 稀土永磁材料

稀土永磁材料已在许多领域里广泛应用，成为当代新技术的重要物资基础。自 80 年代以来利用钕钴合金做稀土永磁电机，包括伺服电动机、驱动电动机、汽车启动机、地面军用电机、航空电机等，钕钴永磁合金的主要特点是：（1）退磁曲线基本上是一条直线，其斜率接近于逆磁导率，即回复直线近似与去磁曲线重合；（2）具有极大的矫顽力，有很强的抗去磁能力；（3）具有很高的最大磁能积；（4）可逆温度系数很小，磁性的温度稳定性较好。因此，稀土钕钴永磁合金特别适合在开路状态、压力场合、退磁场情况或动态情况下运用，并适合制造体积小的元件。

中航总 125 厂生产的 160LY-1.2 永磁直流力矩电机使用钕铁硼（NTP200/64）磁钢。用钕铁硼永磁代替钕钴永磁成本降低，性能提高。该厂生产的 QZD1401-H 稀土永磁汽车启动机，使用了钕铁硼磁钢。该产品为稀土减速型启动机。使用稀土磁钢，使启动机体积小、效率高、输出力矩大、启动速度快。国内 SmCo 系永磁材料的温度系数待改进，NdFeB 系永磁材料的高温稳定性和耐腐蚀性需要进一步提高，粘结 NdFeB 系永磁材料还处于研制开发阶段。

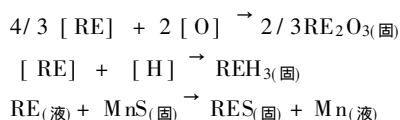
永磁材料的发展先后经历了铁氧体阶段（磁能积 4.6 MGOe），AlNiCo 合金阶段（磁能积 11.5 MGOe），SmCo 阶段（磁能积 31.0 MGOe），NdFeB 阶段（磁能积 43 MGOe）。钕铁硼稀土永磁材料的研制成功，使耳机、扬声器、步进电机、无芯电机等实现了超小型化。

美国通用汽车公司在 1000CC 汽车发动机上采用 Nd-FeB 永磁体, 使发动机重量减少 40% ~ 50%, 尺寸减少 45%。若能进一步提高其使用温度, 将开辟这种 NdFeB 永磁材料更为广泛的应用前景。

### 3 稀土元素在航空材料发展中的作用

稀土元素的原子半径大于常见金属如 Al、Mg 等, 因此稀土元素在这些金属中的固溶度极低, 几乎不能形成固溶体; 由于稀土元素具有很高的化学活性, 稀土元素在化学反应中异常活泼, 极易与气体 (如氧)、非金属 (如硫) 及金属作用, 生成相应稳定的化合物; 这些新形成的化合物多数是熔点高、密度小、化学性质稳定。稀土元素在金属中的作用大体可归纳为如下几个方面:

(1) 减轻非金属杂质的有害影响。氢是钢和铝合金的有害杂质, 溶入液态金属的氢凝固时以原子态析出, 聚集成分子, 导致晶间裂纹、疏松和针孔等氢致缺陷, 给铸造、塑性加工和性能带来严重危害, 实验表明铝合金中加入适量稀土 (0.1% ~ 0.3%) 将明显降低氢含量, 减少氢的危害并提高合金性能。此外稀土金属也有降低铝中硫和氧含量的效果, 其化学反应式如下:



反应生成的稀土化合物熔点高、比重轻, 上浮成渣。它们的微小质点则成为铝结晶过程的异质晶核。

(2) 细化晶粒和枝晶组织, 提高热塑性。稀土可细化合金的铸态组织, 使枝晶网络更为清晰, 从而改善合金的热塑性。稀土化合物微小的固态质点提供了异质晶核或在结晶界面上偏聚阻碍晶胞长大, 为钢液结晶细化提供了较好的热力学条件。

(3) 改变夹杂物的形态和分布。稀土与杂质形成化合物, 在晶界析出, 改变了原来的固溶存在方式, 使夹杂物量降低。

(4) 产生强化作用。稀土加入合金中使氢氧和夹杂物量降低, 又细化了晶粒和枝晶网络, 稀土与非金属元素作用产生高熔点的化合物弥散于基体中, 稀土与金属元素生成高熔点的金属间化合物, 既消除粗大块状组织, 又稳定晶界, 这些都起到了提高材料强度的作用。

(5) 稀土的引入提高了含稀土合金材料的耐腐蚀性和抗高温氧化性能。

就稀土元素的加入对铸造、锻造、焊接、热处理及表面涂层等工艺的影响也作了一些研究, 发现在许多情况下稀土的加入都取得了正的效应, 但稀土元素在这些热工艺过程中及制件中所起的作用机理有待进一步开发研究。

### 4 稀土在航空材料上的应用展望

由于稀土金属的原子半径大, 极易失掉最外层 2 个 s 电子和次层的 5d 一个电子或 4f 层的一个电子, 而成为三价离子。因此稀土金属在化学反应中异常活泼, 极易与其它物质反应。又由于稀土元素具有电子未完全充满 4f 层的特性, 而引导出各种磁、电和光的特性效应以及其它特殊性能。稀土元素的这些有吸引力的性能及广阔的潜在用途, 引起了航空材料科学家的极大重视及广泛的研究。

#### 4.1 稀土陶瓷材料

稀土材料在高推重比航空发动机上的应用出现新进展。氮化硅陶瓷具有高温强度高、抗热震性能好、高温蠕变小等优良的性能, 是一种最有希望用于高推重比发动机的新型结构陶瓷材料。氮化硅陶瓷仍遵循着液相烧结机理, 需加入一些氧化物添加剂与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  颗粒表面的  $\text{SiO}_2$  层反应, 生成液相以促进烧结。引入  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  等氧化物为烧结助剂后, 氮化硅陶瓷的断裂韧性和强度并不高, 但引入稀土氧化物  $\text{Y}_2\text{O}_3$  即  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  为烧结助剂, 氮化硅陶瓷的常温断裂韧性和强度得到明显的改善, 但高温性能并不突出。近年来的研究发现以稀土氧化物  $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  为添加剂, 材料的力学性能大幅度提高, 尤其是高温断裂韧性得到明显改善。研究表明:  $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  的引入对氮化硅陶瓷中  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  晶粒的生长行为有重要影响, 从而影响了氮化硅陶瓷的结构和性能。选择适当比例和含量的  $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  作添加剂, 可得到比较大的  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  晶粒, 这样使氮化硅陶瓷产生了自增韧的效果。陶瓷属脆性材料, 一般不能用于结构件。为了克服其脆性, 通常引入纤维、晶须等增强组分, 但这就产生了不同形态的组分难以均匀分散, 给制造工艺带来困难。目前这一问题正是限制陶瓷材料在高技术领域里应用的关键。将稀土氧化物引入陶瓷粉末中, 能够在陶瓷烧结过程中产生原位增韧即自增韧的效果, 恰好克服了上述引入纤维、晶须等带来的制造上的困难。因此在陶瓷材料中引入稀土氧化物, 将为陶瓷材料在高新技术领域里开辟一个更为广阔的应用前景。

为适应作战需要, 专用集成电路必须抗辐射加固, 提高可靠性, 同时集成电路和计算机技术的发展, 均推动陶瓷材料基片及其封装向更高性能和更精细工艺方向发展。作为基片材料, 必须有低介电常数, 高热导率, 高机械强度, 与半导体芯片相匹配的热膨胀系数。氮化铝 (AlN) 多层基片与传统的氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 基片相比, 有较高的导热率, 适用于高功耗、高引线数和大尺寸芯片, 成为近年来航空及军工行业开发的重点。采用稀土氧化钇  $\text{Y}_2\text{O}_3$  和氧化钙混合添加剂, 可以降低氮化铝的烧结温度, 促进烧结。这种掺杂氮化铝 (AlN) 陶瓷, 导热率达  $260\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 适于高密度布线, 热阻仅为同样结构和相同引线数的氧化铝封装的  $1/4$ 。这种基片已用于含 1800 个输入/输出头的计算机系统的多层布线阵列的封装。

#### 4.2 稀土永磁材料

稀土永磁材料是制备高性能微波功率管-行波管的关键材料。现代军事通讯、雷达、导弹制导和电子战都需要各种行波管, 其特点是工作频带宽 ( $2\sim 18\text{GHz}$ ), 效率高 (达 50%)。海湾战争中美国使用的电子干扰设备、预警飞机、火控雷达、精密制导系统, 都用了大量高性能宽带大功率行波管, 制造这些高功率行波管的关键是高磁能积、低温度系数的稀土永磁材料。这种材料对实现军用电机的高效率、小型化和轻质化, 以及促进军用计算机性能的提高也是十分重要的。航空航天领域应重点开发下列稀土永磁材料: (1) 高稳定性 SmCo 系永磁材料; (2) 高工作温度 NdFeB 系永磁材料; (3) 快淬 NdFeB 磁粉及粘结 NdFeB 系永磁材料; (4) 新型 SmFeN 系永磁材料; (5) 低成本、高性能第四代稀土永磁材料。

#### 4.3 稀土铝合金

航空用 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 系耐热铝合金 LD7 和 LD8 的工作温度不超过  $270^\circ\text{C}$ , Al-Cu-Mn 系的 LY16 或 2021 的工作温度不超过  $300^\circ\text{C}$ , 除了烧结铝粉末外, 还没有可在  $350\sim 400^\circ\text{C}$  下工作的铝合金。研究表明, Sc 能将铝合金的再结晶温度提高到  $450\sim 550^\circ\text{C}$ , 共格沉淀相  $\text{Al}_3\text{Sc}$  特别是与 Zr 复合形成的  $\text{Al}_3(\text{ScZr})$  的热稳定性极高, 在  $350^\circ\text{C}$  或  $450^\circ\text{C}$  长时间加热时质点尺寸长大速度极慢, 而且能长期保持共格性不破坏, 因此, Sc 是开发工作温度大于  $350^\circ\text{C}$  的耐热铝合金最有希望的合金元素。

在目前, 航空用综合性能最好的高强高韧铝合金 7075、7150 和 7010 中, 用 Zr 代替了 Mn 和 Cr, 显著提高了合金的淬透性, 适于生产厚板 ( $\geq 75\text{mm}$ )。但是这类合金的铸造性能极差, 厚向强韧性不够高。若

加入  $0.1\%\sim 0.2\%$  Sc 与 Zr 形成共格沉淀相  $\text{Al}_3(\text{ScZr})$ , 除了增加强度外, 还能使再结晶温度提高,  $\text{Al}_3\text{Sc}$  质点抑制合金的再结晶, 得到未再结晶组织, 起到亚结构强化作用, 能改善板材厚向的强韧性。经过充分时效, 疲劳强度、断裂韧性 ( $K_{IC}$ ) 和抗应力腐蚀能力 (SCR) 得到明显的提高, 有可能为火箭和飞行器开发出新一代超高强度高韧铝合金。

#### 4.4 稀土高温合金

稀土能显著改进高温合金性能。高温合金用于航空发动机的热端部件, 但由于在高温下抗氧化、耐腐蚀以及强度的下降, 使得航空发动机性能的进一步提高受到限制。近期的研究表明: 镍基合金中添加少量稀土后, 提高了抗硫化性能及高温强度和热塑性。钴基合金中加入  $0.1\%\sim 0.2\%$  钇、镍基合金中加入镧或铈, 其耐腐蚀性能提高 10 倍。在镍铬合金中, 稀土明显提高合金抗氧化性能, 如在 Ni-30Cr 合金中加入  $0.3\%\text{Y}$ ;  $0.05\%\text{La}$  和 Ce, 合金在  $1200^\circ\text{C}$  和  $1300^\circ\text{C}$  下的寿命分别为 2970h 和 613h, 而未加稀土同一镍铬合金, 在上述温度下, 其寿命仅为 1518h 和 270h。

稀土元素对高技术新材料研究与发展有密切的关系, 更深入地研究稀土元素在航空材料中的作用及其机理, 稀土元素对性能变化的影响规律, 从而更广泛地探求新的航空材料, 开发高技术产品是稀土材料研究者的历史使命。近年来偏重于研究稀土对改善材料性能的作用, 而对稀土的作用机理研究得不够, 为使稀土在材料中的应用建立在扎实的科学基础上, 必须就稀土对材料的改性机理进行更系统深入的研究。我国有丰富的稀土元素 (La、Ce、Nd、Yb、Dy、Sc 等), 应开展对这些稀土与材料科学的系统深入研究, 旨在为有效合理利用各个稀土的特性开拓新的应用途径。

近年来, 虽已在稀土元素对新材料的作用及提高材料的应用功能, 延长其使用寿命, 提高经济效益等方面做了许多工作。但在稀土材料的开发应用方面, 在更好发挥航空稀土材料功能方面, 还远没有挖掘出其巨大的潜力, 需要进一步深入研究。稀土作为我国在国际上的优势产业, 其国际市场的占有率逐年提高, 其地位也越来越重要。应该抓住机遇, 加大投资力度, 加速稀土在航空工业的开发和应用, 建立具有中国特色的稀土材料科学及其工程应用体系。

稿件收到日期: 1997. 8. 12

修改稿收到日期: 1998. 3. 18

李凤梅, 女, 1969 年 8 月生, 北京航空材料研究院工程师, 联系地址: 北京市 81 信箱 28 分箱 (邮编 100095)。