

稀土元素及杂质在铝锂合金中的作用 研究现状与发展

孟 亮

(浙江大学材料科学与工程系, 杭州, 310027)

郑修麟

(西北工业大学材料科学与工程学院, 西安, 710072)

STATUS AND DEVELOPMENT ON EFFECTS OF IMPURITIES AND RARE EARTH ELEMENTS IN Al-Li ALLOYS

Meng Liang

(Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Zheng Xiulin

(College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

摘 要 综述了稀土元素和杂质对铝锂合金微观组织及力学性能的作用, 概括了杂质致脆及稀土微合金化的规律与机制, 根据已有研究结果, 对目前铝锂合金的发展与应用中需要引起重视的问题, 提出了某些观点与建议。

关键词 铝锂合金 杂质 稀土元素 力学性能 微观组织

中图分类号 TG146.2

Abstract The study status for the effects of impurities and rare earth elements in Al-Li alloys has been surveyed. Particular attention has been paid to the mechanical properties in respect of different conditions and the mechanisms responsible for impurity-induced embrittlement and rare earth microalloying. According to the presented investigations, some suggestions and viewpoints have been proposed to solve the noteworthy problem in the development and application of Al-Li alloys.

Key words Al-Li alloy, impurities, rare earth addition, mechanical properties, microstructures

飞行器的不断进步对材料的损伤容限性能及减重效应提出了更高的要求, 因而导致了許多先进材料的发展, 铝锂合金便是其中之一。根据乐观的估计, 如果用铝锂合金直接取代普通铝合金, 则具有约 8% 的减重潜力, 如果其优良的比刚度能被充分开发, 则其减重效益可达到 24%^[1~7]。然而, 铝锂合金的这种潜在优势是否能够被充分利用, 则取决于其工程性能是否可以达到或超过普通航空用铝合金的水平^[8]。目前, 在航空工业中, 铝锂合金的影响力已有所下降, 部分原因是铝锂合金仍然具有较低的塑性、断裂韧性和较高的力学性能各向异性。

铝锂合金之所以表现出尚不满意的力学性能, 基本原因之一便是其对有害杂质的作用比普通铝合金敏感。一种解决这个问题的方法是采用先进的电子束真空熔炼技术来降低杂质的含量^[9]; 另一种更广泛采用的方法是利用有效的合金化造成均匀的微观组织、新的强化

相、合适的硬化粒子分布、高的析出相与基体界面错配度以及适当的晶体学织构等^[10~15]。另外,合适的合金化方法也应当能够促进一些无害的含杂质化合物形成,以降低基体中杂质含量或降低杂质向晶界的偏聚。

稀土元素在铝合金中具有许多值得注意的作用,如除杂、精炼、降低铸态晶粒尺寸、延缓再结晶及细化析出相等^[16~22]。因此,在采用合金化方法改善铝锂合金力学性能的研究中,应该给予稀土元素以额外注意。

由此可见,杂质及稀土元素均对铝锂合金的力学性能有明显影响。本文仅对关于这些影响的研究现状和发展趋势进行综述,并概括与讨论有关这些影响的规律和机制。

1 杂质的作用

1.1 氢

在铝合金熔炼时,若与潮湿环境作用,则能发生吸氢反应。一般,以目前熔铸法生产的铝锂合金含氢量大约是航空用普通高强铝合金的10倍以上^[1,4,23]。同时,在铝锂合金中除气比在不含锂的铝合金中除气更为困难。在铝锂合金中有如此高的氢含量的原因是由于含锂基体对氢具有很高的溶解度,并且容易形成较多的脆性富氢相混杂于组织内部^[4,24]。因此,与普通铝合金相比,铝锂合金中的氢损害更明显。

一些文献报道了氢脆对铝锂合金力学行为的影响。文献[24,25]指出,一些较稳定的氢化物如LiH的形成,能够降低铝锂合金的塑、韧性。Shin等^[26]通过对2090合金充氢试样的测试表明,随充氢时间平方根的增加,断裂应变线性下降。

铝锂合金通常对应力腐蚀断裂比较敏感。氢在铝锂合金应力腐蚀断裂中具有重要作用^[27]。Holroyd等^[28]根据对8090-T651合金的研究结果推断,氢脆是铝锂合金应力腐蚀断裂的原因之一。另外,氢脆也被认为是一种疲劳损伤机制或环境疲劳断裂机制^[29~33]。

1.2 铁和硅

Fe, Si杂质在铝锂合金中能够形成一些脆性化合物粒子,在含有这些脆性粒子的晶粒内部,通常在粒子与基体界面处产生较大的应力集中,进而导致沿界面开裂。

文献[34~36]报道了Fe+Si杂质含量对2090及8090合金力学性能的影响。与较纯合金相比,含较多Fe, Si杂质的合金显示了较低的塑性和韧性,其再结晶比例也较高。然而,含较多Fe, Si杂质的8090合金疲劳寿命却稍高于高纯合金(在280MPa的最大恒定循环载荷下),这是由于Fe, Si杂质在这种试验条件下一定程度地提高了8090合金的强度,而这显然对处在长寿命区试验条件下的材料疲劳寿命有益^[37,38]。

1.3 碱金属

早期的研究即已报道了碱金属杂质对铝锂合金性能有害影响。Vasud van等^[39]观察到随Na含量增加,Al-Li-Mn合金韧性具有线性降低的趋势。Webster^[40]则报道了二元Al-Li合金韧性随Na及K含量增加而下降的试验结果。

文献[34,35,38,41,42]研究了碱金属杂质对2090及8090合金组织和性能的影响。碱金属杂质可明显地降低这两种合金的塑性、断裂韧性及疲劳寿命,并使疲劳裂纹扩展速率增加。另外,含较多碱金属杂质的2090合金强度也有明显的下降。Sweet等^[43]研究了碱金属杂质对2090合金短横间(S-T位向)断裂韧性的影响,结果表明,在428~456MPa的屈服强度

条件下, 随 Na+ K 含量增加, 合金的断裂韧性显著下降。

Lynch^[44]研究了 8090 厚板 S-L 位向的持久载荷断裂特性后指出, 在给定的试验温度及初始应力强度因子条件下, 单级时效状态下含约 40×10^{-6} Na 的 8090 合金蠕变断裂速率是含 10×10^{-6} Na 合金的 3~5 倍, 并且, 前者的断裂韧性仅为后者的 1/2 左右。

2 碱金属杂质致脆原因

对于 H、Fe、Si 杂质造成铝锂合金性能下降的原因已如前述, 现仅对关于碱金属杂质造成脆化的原因进行讨论。

已有若干个碱金属杂质致脆机制被提出。其中 Webster^[9, 40, 45, 46]提出的晶界液态金属脆化机制具有一定的影响: 在铝锂合金中, 碱金属杂质可能会以孤立的、透镜状的低熔点富 Na、K (可能也含有 Cs、Pb 等) 液态粒子形态出现在晶界, 成为应力集中及微裂纹的起源, 进而导致晶界出现高的局部应变和脆性沿晶断裂。另外, 当裂纹形成和扩展时, 这些液相可覆盖于裂纹表面而降低断裂表面能。这些因素均可降低裂纹沿晶扩展所需的应力。

另外, 在某些硬性夹杂物粒子(如含 Fe、Si 等杂质的化合物粒子)与基体界面, 也是碱金属杂质扩散的低能量区域^[9, 44], 容易出现富碱金属的液态粒子。如果这些硬性粒子处于晶粒内部, 在与其界面的液态粒子联合作用下, 容易导致晶内的解理断裂。

Lynch^[44]提出了另一种蠕变条件下的杂质致脆机制。在一定温度的长时间加载过程中, 碱金属杂质有条件迁移到裂纹前沿, 减弱原子间的键合, 便利位错从裂尖发射, 促进裂纹生长。

碱金属杂质造成铝锂合金微观组织的变化也是引起材料脆性的重要原因之一。Na、K 杂质是降低晶界能的元素, 提高了再结晶比例, 使弱化的晶界增多^[34, 38, 42]。碱金属杂质还可促进某些化合物粒子沿晶析出, 并易引起 D 相晶界无沉淀带(D-PFZ)的形成^[41, 42, 47], 这些均是诱发沿晶断裂的因素。另外, 在含较多碱金属杂质的 2090 合金中, 易出现非均匀分布的 T₁ 相粒子而使性能恶化^[42, 48]。

综上所述, H、Fe、Si 和碱金属杂质对铝锂合金的微观组织及力学性能有明显的危害, 产生危害的原因有多种, 有些机制仅根据某些试验结果的唯像推理而提出, 还有些机制随研究的深入而正在被发现或完善。

杂质的危害作用无疑会给铝锂合金在重要航空构件上的广泛应用制造障碍。当然, 借助于真空精炼或使用高纯原材料制备合金, 可以有效地减轻或避免杂质的危害, 但这会给工业生产带来很大困难, 并且显著增加材料成本。因此, 迫切需要寻找适当的合金化方法来降低铝锂合金对杂质有害作用的敏感性。但是, 寻找一种满意的合金化方法消除杂质的有害作用, 在目前还属于相当困难的研究工作。

3 稀土元素的作用

在普通铝合金中, 无论在熔炼过程或在凝固过程, 稀土元素均能显示出有益作用, 可以改善合金的超塑性、热变形性、断裂韧性、腐蚀抗力、焊接性及表面氧化膜颜色等^[16~18, 49~51]。根据稀土元素在普通铝合金的表现可以推断, 这些有益作用在铝锂合金中也有可能以某种程度存在。

3.1 钪和钇

对 Sc 在铝锂合金中的表现, 俄罗斯学者进行了比较充分的研究, 目前已经开发了一系列的含 Sc 铝锂合金, 某些已经获得了实际应用^[6, 52~56]。Sc 对铝锂合金的基本贡献是可以改善屈服强度、塑性和焊接性, 其原因是能够提高再结晶温度, 细化晶粒和 D'相, 生成新的弥散相粒子如 Al_3Sc 及 $Al_3(Sc_xZr_{1-x})$, 并使 S'相均匀分布^[52~60]。我国一些学者也对 Sc 在铝锂合金中的作用进行了研究, 所得结果也证实 Sc 确实是一种有益的合金化元素^[61~64]。

Y 在铝锂合金中的行为在某些方面与 Sc 类似。例如, 在某 Al-Li-Cu-Mg-Zr 合金中添加 0.1% Y, 则可在不降低强度的情况下提高塑性; 若添加 0.5% Y, 则可在不降低塑性的情况下提高强度^[65, 66]。

3.2 铈和镧

Buttinelli 等^[67]研究了 Ce 含量对 Al-Li 二元合金晶粒尺寸及含 Fe 杂质的 Al-Li-Mg 铸造合金性能的影响。随 Ce 含量增加至 1.1%, 晶粒尺寸线性下降; 在 Al-Li-Mg 铸造合金中添加适量 Ce, 其力学性能可得到改善, 并且 Fe 杂质的负面影响也可被控制。

如前所述, 如果 2090 和 8090 合金中含有较多杂质时, 其塑性及断裂韧性相当低。然而, 添加少量的 Ce 则可恢复这些合金的塑性及断裂韧性, 如在含较多 Fe、Si 杂质的 2090 合金中添加 0.05%~0.25% Ce 后, 其薄板的平面应力断裂韧性和延伸率可增加约 70%~90%^[35, 42]。

Ce 在铝锂合金中的另一个有益作用是可以降低板材平面位向内的各向异性, 如在 2090 合金中添加 0.12%~0.25% Ce 及在 8090 合金中添加 0.09%~0.28% Ce 后, 其拉伸强度、延伸率和平面应力断裂韧性在板材平面内各位向上的差异则明显下降^[48, 68, 69]。

在实际航空构件中, 不可避免地存在几何不连续处(如联接孔边缘等)的应力集中, 因此, 如果将铝锂合金应用于实际, 尤其是在铝锂合金仍处于较低塑性水平的条件下, 必然应该研究其缺口敏感性问题。文献[70, 71]研究了 Ce 含量对 2090 合金缺口强度的影响, 结果表明, 添加 Ce 虽然可以提高光滑试样的延伸率, 但并不能明显提高合金的缺口强度。Ce 微合金化仍然不能从根本上解决 2090 合金应力集中敏感性高的本质问题, 原因在于 Ce 在高强铝锂合金中仍然不能根本改变其固有的变形及断裂模式^[71]。可见, 铝锂合金尤其是高强铝锂合金, 其高的缺口敏感性是其作为主要承力构件应用的又一个潜在障碍, 应该给予足够重视。

文献[72, 73]研究了 La 对铝锂合金的影响。例如, 在 Al-Li-Mg 合金中添加 0.55% La, 在欠时效状态下, 可使其屈服强度由 300MPa 上升到 345MPa, 而延伸率则从 6.2% 上升到 7.5%^[73]。

稀土元素固然有一定的合金化效果, 但仅靠现有方法改善铝锂合金组织及性能的效果仍然有限。在目前情况下, 一般的稀土元素微合金化仍然不足以使铝锂合金的塑、韧性达到或超过普通航空用铝合金的水平。

4 稀土元素微合金化机制

稀土元素改善铝锂合金力学性能的主要原因是对其微观组织产生了有益作用。根据已有研究结果, 简单概括稀土元素对微观组织的作用如下:

(1) 减缓了再结晶过程, 结果使再结晶体积和再结晶晶粒尺寸下降。相应地, 组织中影响各向异性的晶体学织构组成与分布也随之变化^[48, 68, 69]。

(2) 细化了一些析出相粒子, 如 2090 合金中的 T₁ 相, 1420 合金中的 D 相和 8090 合金中的 S' 相, 或使这些相的分布更为均匀^[48, 63~67, 70, 72]。

(3) 限制了粗大平衡相的沿晶析出, 尤其在含杂质较多的合金中更是如此^[34, 35, 41]。

(4) 遏制了杂质促进 D-PFZ 形成的趋势^[70]。

稀土元素的上述作用导致了晶界结合力的增强和晶内应变的均匀, 进而增加了韧性穿晶断裂的比例, 由于断裂抗力的增强, 自然可以提高合金的塑性及断裂性能。同时, 稀土元素作用下的析出相的更均匀分布和晶体学织构的更合理组成, 则应是降低各向异性的基本原因。

由此可见, 稀土元素在铝锂合金中的表现行为与杂质的恰相反, 因而可降低合金对杂质危害的敏感性。

文献[74]通过分析含 Ce 的 2090 合金中 Cu 元素的扩散行为, 更深入地研究了稀土元素的作用机制。研究指出, 在含一定量 Ce 的 2090 合金中, 溶质的扩散系数下降, 以此可以解释稀土元素能够延缓再结晶、细化沉淀相、抑制粗大粒子及 D-PFZ 沿晶析出的根本原因, 并因而可以推断, 这种稀土元素能够降低扩散系数的作用, 也同样应该能够降低杂质原子向晶界的偏聚, 进而减轻杂质引起的晶界脆化。

文献[74]认为稀土元素能够减缓溶质扩散的原因主要有 3 方面: 第一, 由于稀土元素有较强的化学活性, 可与其它元素产生较强的交互作用, 进而对原子的迁移有拖曳作用; 第二, 稀土原子尺寸大于铝原子尺寸, 因而稀土原子倾向于占据基体点阵中的空位, 以尽量降低系统自由能^[21], 致使基体中的空位浓度减少, 导致以空位机制扩散的溶质迁移速率下降; 第三, 稀土元素能够提高某些合金元素如 Li、Mg 的结合能^[75], 这也能对溶质的迁移带来额外困难。

5 结 论

铝锂合金目前的塑性及断裂韧性仍然低于普通铝合金的主要原因之一, 是其对有害杂质具有较高的敏感性。

氢能够降低韧性、应力腐蚀抗力及腐蚀疲劳抗力。Fe、Si 能够形成脆性化合物粒子或对微观组织形态产生不利影响而提高合金脆性程度。碱金属能够促进晶界液相、再结晶晶粒、沿晶平衡相和 D-PFZ 的形成而导致合金脆化。

稀土元素微合金化能够在一定条件下改善铝锂合金的力学性能, 而对高强型铝锂合金的缺口强度影响不明显。由于微量稀土元素的作用, 能够使得晶粒细化, 再结晶比例降低, 析出相分布均匀, 沿晶粗大化合物粒子和 D-PFZ 减少。稀土元素能够产生这些作用的重要机制之一, 是其降低了溶质原子的扩散速率。

由于稀土元素在铝锂合金中的作用规律与有害杂质的相反, 并且对杂质原子向晶界的偏聚形成了可能的阻碍作用, 因而稀土元素能够抵消或抑制杂质对铝锂合金的危害。

仅就现有稀土元素微合金化的研究情况, 仍然不能使铝锂合金的塑、韧性达到相当满意的水平。这是由于目前稀土元素在铝锂合金中的作用仅限于细化组织和抑制杂质危害等方面, 其合金化作用的局限性造成了所得效果的有限性。因此, 必须配合以稀土元素微合金化

研究,进一步探寻更有效的合金化途径来使铝锂合金的性能得到根本改善。这种途径的主要作用除了能够进一步保持和提高稀土元素已有效果外,应能增加基体相与D相界面的错配度,引入新的时效强化相并生成更有效的弥散相粒子等,以使铝锂合金的形变与断裂模式能够发生根本的转变。

参 考 文 献

- 1 Starke E A, Sanders T H, Palmer I G. *J Metals*, 1981, 33(8): 24~32
- 2 Lavernia E, Poggiali B, Clark J, et al. *J Metals*, 1985, 37(11): 35~38
- 3 Grimes R, Cornish A J, Miller W S, et al. *Met Mater*, 1985, 1(6): 357~363
- 4 Lavernia E, Grant N. *J Mater Sci*, 1987, 22(5): 1521~1529
- 5 张宝昌. *机械工程材料*, 1989, 13(2): 1~6
- 6 周自强. *兵器材料科学与工程*, 1991, (10): 29~37
- 7 Kaminski T, Willner E, Kerr J, et al. In: Peters M, Winkler P-J Eds. *Aluminium-Lithium, Vol. 2*, Oberursel (FRG): DGM Informationsgesellschaft mbH, 1992. 1311~1316
- 8 Wanhill R J H. *Int J Fatigue*, 1994, 16(1): 3~20
- 9 Webster D. *Adv Mater Processes*, 1994, 145(5): 18~24
- 10 Blankenship C P, Starke E A. *Metall Trans*, 1993, 24A(4): 833~841
- 11 Hornbogen E, Starke E A. *Acta Metall Mater*, 1993, 41(1): 1~16
- 12 Blankenship C P, Starke E A. *Acta Metall Mater*, 1994, 42(3): 845~855
- 13 Wu X J, Wallace W, Raizenne M D, et al. *Metall Mater Trans*, 1994, 25A(3): 575~588
- 14 Gayle F W, Tack W T, Swanson G, et al. *Scr Metall Mater*, 1994, 30(6): 761~766
- 15 Zheng Z Q, Liu M G, Liu X Z, et al. *Scr Metall Mater*, 1994, 30(1): 31~36
- 16 周守则, 潘复生, 丁培道等. *材料科学进展*, 1990, 4(3): 212~217
- 17 赵友昌, 郭晓梅. *材料科学进展*, 1992, 6(2): 93~97
- 18 曹占义, 宋景彦, 曾丽娟, 等. *稀有金属*, 1992, 13(6): 1~5
- 19 杨遇春. *稀有金属材料与工程*, 1993, 22(4): 1~6
- 20 李金富, 侯更生, 叶孔容. *材料科学与工艺*, 1993, 1(3): 59~64
- 21 Zhang B C, Wang Z Z, Zhu W B, et al. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds. *Aluminium-Lithium Alloys, Vol. 1*, Birmingham(UK): Materials and Component Engineering Publications, 1989. 529~538
- 22 孟亮, 郑修麟. *稀有金属*, 1995, 19(6): 424~429, 437
- 23 Webster D, Kirkbride R. *Metall Trans*, 1986, 17A(11): 2007~2016
- 24 Lewandowski J J, Holroyd N J H. *Mater Sci Eng*, 1990, A123(2): 219~227
- 25 Hill D P, Williams D N. In: Starke E A, Jr, Sanders T H, Jr, Eds. *Aluminium-Lithium Alloys II*, PA: AIME, 1984. 201~218
- 26 Shin K S, Kim S S, Lee E W. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds. *Aluminium-Lithium Alloys, Vol. 3*, Birmingham(UK): Materials and Component Engineering Publications, 1989. 1319~1324
- 27 Dorward R C. *Mater Sci Eng*, 1986, 84(12): 89~95
- 28 Holroyd N J H, Gray A, Scamans G M, et al. In: Barker C, Greson P J, Harris S J, Peel C J, Eds. *Aluminium-Lithium Alloys III*, Oxford(UK): Institute of Metals, 1986. 310~320
- 29 Yoder G R, Pao P S, Imam M A, et al. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds. *Aluminium-Lithium Alloys, Vol. 2*, Birmingham(UK): Materials and Component Engineering Publications, 1989. 1033~1037
- 30 Pao O S, Imam M A, Cooley L A, et al. *Corrosion*, 1989, 45(7): 530~535
- 31 Shin K S, Kim S S. In: Moody N R, Thompson A W, Eds. *Effects of Hydrogen on Material Behavior*, PA: TMS-AIME, 1990. 919~928
- 32 Piascik R S, Gangloff R P. *Metall Trans*, 1991, 22A(10): 2415~2428

- 33 Liu Y L, Hu Z Q, Zhang Y, et al. *Metall Trans*, 1993, 24B(5): 857~865
- 34 孟亮, 张宝昌, 田丽. *兵器材料科学与工程*, 1992, (5): 15~19
- 35 孟亮, 郑修麟. *金属学报*, 1997, 33(8): 802~806
- 36 Meng L, Zheng X L. *Scr Metall Mater*, 1995, 33(1): 27~31
- 37 Zheng X L, Lü B T. In: Aliabadi M H, Brebbia C A, Cartwright D J, Eds, *Fatigue and Fracture Mechanics*, Boston: Computational Mechanics Publications, 1990. 175~184
- 38 Meng L, Zheng X L, Tian L. *Mater Sci Eng*, 1995, A196(2): 191~196
- 39 Vasudvan A K, Miller A C, Kersker M M. In: Starke E A, Jr, Sanders T H, Jr, Eds, *Aluminium-Lithium Alloys II*, PA: AIME, 1984. 181~199
- 40 Webster D. In: Barker C, Greson P J, Harris S J, Peel C J, Eds, *Aluminium-Lithium Alloys III*, Oxford(UK): Institute of Metals, 1986. 602~609
- 41 孟亮, 张宝昌, 梁英, 等. *金属学报*, 1992, 28(3): A121~125
- 42 孟亮, 郑修麟. *西北工业大学学报*, 1995, 13(4): 558~562
- 43 Sweet E D, Lynch S P, Bennett C G, et al. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds, *Aluminium Alloys, Vol. 2*, GA: Georgia Institute of Technology, 1994. 321~328
- 44 Lynch S P. *Mater Sci Eng*, 1991, A136(1): 45~57
- 45 Webster D. *Metall Trans*, 1987, 18A(12): 2181~2193
- 46 Webster D. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds, *Aluminium-Lithium Alloys, Vol. 1*, Birmingham(UK): Materials and Component Engineering Publications, 1989. 519~528
- 47 Meng L, Zhang B C, Liang Y, et al. In: Peters M, Winkler P-J, Eds, *Aluminium-Lithium, Vol. 1*, Oberursel (FRG): DGM Informationsgesellschaft mbH, 1992. 639~644
- 48 耿东生, 孟亮, 高杨. *稀有金属材料与工程*, 1993, 22(4): 46~50
- 49 孙伟成, 张淑荣, 张滨如, 等. *稀有金属*, 1992, 16(3): 189~194
- 50 潘复生, 周守则, 石功奇, 等. *兵器材料科学与工程*, 1990, (2): 17~26
- 51 杜挺. *金属学报*, 1997, 33(1): 69~77
- 52 Berezina A L, Volkov V A, Ivanov S V, et al. *Phys Met Metalogr*, 1991, 71(2): 167~175
- 53 Khatsinskaya I M, Grushko O E, Sheveleva L M, et al. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds, *Aluminium Alloys, Vol. 2*, GA: Georgia Institute of Technology, 1994. 183~190
- 54 Kolobnev N I, Grushko O E, Cherkasov V V, et al. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds, *Aluminium Alloys, Vol. 2*, GA: Georgia Institute of Technology, 1994. 305~312
- 55 Fridlyander I N, Kolobnev N I, Berezina A L, et al. In: Peters M, Winkler P-J, Eds, *Aluminium-Lithium, Vol. 1*, Oberursel(FRG): DGM Informationsgesellschaft mbH, 1992. 107~112
- 56 Fridlyander I N, Danilov S F, Malysheva E N, et al. In: Peters M, Winkler P-J, Eds, *Aluminium-Lithium, Vol. 1*, Oberursel(FRG): DGM Informationsgesellschaft mbH, 1992. 381~386
- 57 Fridlyander I N. In: Sanders Y H, Jr, Starke E A, Jr, Eds., *Aluminium-Lithium Alloys, Vol. 3*, Birmingham (UK): Materials and Component Engineering Publications, 1989. 1359~1364
- 58 Miura Y, Horikawa K, Yamada K, et al. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds, *Aluminium Alloys, Vol. 2*, GA: Georgia Institute of Technology, 1994. 161~168
- 59 林肇琦. *材料导报*, 1992, (3): 10~16
- 60 Witters J J, Lee E W, Lisagor W B, et al. In: Peters M, Winkler P-J, Eds, *Aluminium-Lithium, Vol. 1*, Oberursel(FRG): DGM Informationsgesellschaft mbH, 1992. 351~356
- 61 Jiang X J, Gui Q H, Li Y Y, et al. *Scr Metall Mater*, 1993, 29(2): 211~216
- 62 Tan C Y, Zheng Z Q, Liang S Q. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds, *Aluminium Alloys, Vol. 2*, GA: Georgia Institute of Technology, 1994. 329~333
- 63 蒋晓军, 李依依, 桂全红, 等. *金属学报*, 1994, 30(8): A355~361
- 64 谭澄宇, 郑子樵, 梁叔全, 等. *材料工程*, 1992, (7-9): 228~230

- 65 桂全红, 蒋晓军, 马禄铭, 等. 金属学报, 1993, 29(4): A165~169
- 66 桂全红, 马禄铭, 蒋晓军, 等. 材料科学进展, 1993, 7(5): 397~400
- 67 Buttinelli D, Felli F, Lupi C, et al. In: Peters M, Winkler P-J, Eds, Aluminium-Lithium, Vol. 1, Oberursel (FRG): DGM Informationsgesellschaft mbH, 1992. 433~438
- 68 Meng L, Geng D S, Zheng X L. J Rare Earths, 1996, 14(1): 41~46
- 69 孟亮, 耿东生, 郑修麟. 金属学报, 1995, 31(1): A40~46
- 70 孟亮, 郑修麟. 西北工业大学学报, 1996, 14(2): 321~322
- 71 Meng L, Zheng X L. Metall Mat Trans, 1996, 27A(10): 3089~3094
- 72 崔建忠, 胡骏, 马龙翔. 材料科学进展, 1991, 5(2): 147~151
- 73 Zheng Z Q, Zhao Y Q, Liu M G, et al. Trans Nonferrous Met Soc China, 1993, 3(1): 37~42
- 74 孟亮, 张宝昌. 金属学报, 1993, 28(10): B440~443
- 75 Zhang Y, Zhao H E, Gao G Z, et al. In: Sanders T H, Jr, Starke E A, Jr, Eds, Aluminium-Lithium Alloys, Vol. 1, Birmingham(UK): Materials and Component Engineering Publications, 1989. 539~547

电子专业分会第五届年会暨学术交流会在张家界召开

中国航空学会电子专业分会第五届年会暨学术交流会于 1997 年 10 月 11 日至 15 日在湖南张家界市举行, 参加会议的有来自航空工业总公司、航天工业总公司、中国科学院、国防科工委、各军兵种等系统科研单位及高等院校的代表 85 人, 论文集收入了从 140 篇文章来稿中筛选出的 90 篇论文。参加会议交流的论文有 61 篇, 其中青年论文 26 篇。

论文反映了当前航空电子所取得的科研成果、工程应用实际经验以及科技学术界、工程设计界关注的下列热点问题:

- (1) GPS 在定位导航方面应用得到国内各有关单位重视, 并已取得实用成果;
- (2) 信息战是国内外极为重视的问题, 国外已建信息战部队, 代表们建议有关领导及主管部门高度重视;
- (3) SAR 再次成为讨论热点, 一方面反映了所取得的成果; 另一方面也说明我国在 SAR 方面进展的艰难;
- (4) 电子对抗、红外对抗也是讨论的热点之一, 介绍了已取得的成果及面临的艰巨任务;
- (5) 目标识别、高速信息处理、融合技术引起了与会代表的浓厚兴趣, 是当前航空电子信息技术领域急待解决的问题;
- (6) 红外探测器研制是我国红外技术及应用的短线, 引起与会代表极大重视和担忧, 认为是应该当机立断采取措施的时候了。

与会代表及专家提出, 我国应高度重视航空航天电子技术的发展。我们不仅要拥有先进的航空电子高技术产品系列, 而且要建立自己的航空电子产品的制造业, 以促进我国科技现代化和高技术产业化。

(李铁柏)