



熊柏青 XIONG Baiqing

北京有色金属研究总院副院长

Vice President of General Research

Institute for Nonferrous Metals

“新世纪百千万人才工程”

国家级人选

National Candidate of New Century

Talents Project


北京有色金属研究总院教授,博士生导师,有色金属材料制备加工国家重点实验室主任。长期从事先进铝合金材料与制备加工技术研究,主持和参加了60余项国家级科技计划项目研究工作,获得国家科技进步奖、国防科技进步奖、中国有色金属工业科学技术奖等10余项,发表科技论文近300篇,获授权发明专利50余项。享受国务院政府特殊津贴专家、国家人事部“新世纪百千万人才工程”国家级人选、国防科技创新团队带头人。国家科技部国家重点研发计划重点专项规划专家组成员、国家工信部新材料产业发展专家指导委员会委员、国防科工局科技委军品配套分委会委员、国防科技工业标准化技术委员会委员。

持续创新 实现航空铝合金制造强国梦

——访北京有色金属研究总院副院长熊柏青

Continuous Innovation for Powerful Country in Aviation Aluminum Alloy Manufacturing

本刊记者 玲 犀

: 铝合金作为轻质材料,是一种理想航空材料,请您介绍一下其在航空领域的应用发展历程。

熊柏青: 从全世界铝加工行业视角出发,铝合金材料发展并无代际之分,但由于航空铝合金材料技术发展呈明显的“一代飞机、一代材料”特征,为便于归纳航空铝合金材料,特别是2000系和7000系这两种主

干航空铝合金材料的发展,业内通常将二战后的主干航空铝合金材料与飞机的发展同步进行代际划分。

二战后第一代喷气式飞机在机体结构设计中主要关注静强度性能,20世纪30~40年代开发的2024与7075合金是第一代航空铝合金中的代表。由于当时尚未认识到铝合金结构件的应力腐蚀给飞机服役带来

的潜在危害,因此在选用7075合金这类高强铝合金时,普遍采用了追求高的静强度和抗应力腐蚀性能差的T6单级时效热处理状态。直到20世纪50年代后期,因铝合金结构件应力腐蚀开裂,连续导致多架飞机失事,迫使人们对航空铝合金材料及工艺状态进行重新审视,并针对7075合金这类高强铝合金开发了T73双

级深度时效热处理工艺,以牺牲15%~20%屈服强度代价换取抗应力腐蚀性能提升,此时7075合金的屈服强度一般控制在380~450MPa。

20世纪60年代在越南战争中发现,当一些飞机遭受炮火打击后并未造成致命部位破坏但仍出现空中解体,其核心原因在于铝合金结构件的耐损伤性能不足,从而使人们开始关注航空铝合金的断裂韧性和抗疲劳性能,并于20世纪60年代开发出了以2124和7475合金为代表的第二代航空铝合金。以7475合金为例,通过降低合金中的Fe和Si等杂质含量、减少合金对裂纹与缺口的敏感性,在屈服强度没有发生明显变化的情况下,其断裂韧性值与7075-T73状态合金相比提高了1倍以上,疲劳裂纹扩展速率也大幅度降低,在二代喷气式作战飞机的后期型号和民用飞机制造中得到大量应用。

以美国F-15和F-16为代表的第三代喷气式作战飞机以追求亚/跨音速范围内的高机动性为特征,从而使结构件的进一步减重设计受到关注。人们通过提高主合金元素含量、严格控制Fe/Si等杂质含量,于20世纪70年代初发展了以2524合金和7050合金为代表的第三代航空铝合金以及与7050合金匹配的T74双级中度过时效热处理状态,并于20世纪80年代初发展了以7150合金为代表的第三代改型航空铝合金以及与之匹配的T77三级时效热处理状态。第三代7000系航空铝合金的特点是在保持了优异耐损伤性能和抗应力腐蚀性能的条件下,合金的屈服强度可控制在460~540MPa,从而为航空铝合金结构件的设计减重奠定了基础,成为迄今为止航空制造业用量最大的航空铝合金材料。

第四代喷气式作战飞机以追求4S性能为特征,比阶段由于树脂基复合材料和钛合金材料的快速发展,航空铝合金材料的地位受到了严峻

挑战。为支撑飞机结构件的进一步减重设计,20世纪80年代末至21世纪初期发展的第四代7000系航空铝合金,可以归纳为两个分支:一是以7055合金为代表的超高强铝合金,其特点是与7050合金相比耐损伤性能小幅下降、抗应力腐蚀性能基本相当条件下,合金的屈服强度可提高至550~630MPa,适用于高抗压部位结构件的减重设计选材;二是以7085合金为代表的高强高淬透性铝合金,其特点是与7050合金相比耐损伤性能、抗应力腐蚀性能、屈服强度略有提高的条件下,在制造超厚度结构件时,表层与芯部综合性能的均匀一致性大幅提高,特别适合于大型整体铣削式结构件制造,从而可获得与传统的拼装式大型结构相比减重15%~20%效果。

值得指出的是,伴随着飞机结构件设计对材料刚度性能的重视,具有高模量特征的Al-Li合金从20世纪70年代逐步得到了航空界的青睐并获得了应用。当前常用的Al-Li合金一般是在2000系和5000系铝合金中添加质量分数1%~2%的Li,可以产生弹性模量提高8%~10%、比重下降5%~8%的效果。截至目前已经发展了三代Al-Li合金,并在20世纪80年代以后出现的各种军用和民用飞机中得到了一定范围的应用,但制造工艺复杂、成品率低、成本高昂、产品的尺寸规格受限等仍是制约Al-Li合金大范围应用的主要原因。

☞:随着复合材料等新材料的应用,铝合金在航空领域的应用受到一定冲击,您如何看待这个问题?

熊柏青:铝合金具有比重轻、易加工、成本低、资源保障性好等特点,是航空航天等行业不可或缺的轻质结构材料。当前广泛使用的航空合金材料,以2000系和7000系变形铝合金为主,还有少量的5000系和6000系变形铝合金以及铸造铝合金,主要用于飞机蒙皮、机身框和梁、机身和

机翼壁板、机翼梁和肋等的制造,一般占飞机机体结构重量的50%~70%。相对于树脂基复合材料和钛合金材料,航空铝合金材料低成本、结构件制造工艺成熟和加工效率高等优势短期内仍不可动摇。即使在面临复合材料和钛合金材料严峻挑战的今天,最新一代军用和民用飞机的设计制造之中,铝合金结构件的总重仍会占机体结构重量的20%~50%。

☞:今后铝合金材料的发展重点和未来的发展方向是怎样的?

熊柏青:航空铝合金材料的未来发展将主要集中在:以进一步增加合金中沉淀强化相的总量为出发点,通过高合金化成分设计,在保证合金耐损伤性能、耐腐蚀性能和淬透性的前提下,不断提高航空铝合金材料的强度性能,支撑飞机结构件的减重设计;围绕Li含量和富Li沉淀强化相总量的增加,开发综合性能更优的Al-Li合金材料,在保证合金耐损伤性能的前提下,进一步提高Al-Li合金的弹性模量和强度性能;结合新型耐热强化相的设计,开发具有优异综合性能、长期服役温度可达200℃以上的2000系航空铝合金材料以及低成本可铸造、适于在300℃~400℃条件下长期服役的耐热铝合金材料。进入21世纪以来,我国铝加工业发展迅猛,从2013年起,我国铝加工材的年产量均保持在4000万t以上,超过全球总量的50%,企业与科研单位的硬件装备水平稳居国际一流,后发优势明显。“十二五”期间,我国已能大批量生产前三代航空铝合金材料,第四代航空铝合金材料已经下线、在国产大飞机上获得应用,新一代航空铝合金材料亦已进入工程化开发阶段。在未来5~10年中,伴随着科研单位和企业的共同努力,通过在航空铝合金材料与制备加工技术方面持续创新,我国航空铝合金材料的制造强国梦将得以实现。

(责编 古京)