

# 高性能铝合金厚板的生产技术及应用

庾莉萍, 阮鹏跃

(温州大学瓯江学院, 浙江 温州 325100)



庾莉萍

**摘要:** 介绍了高性能铝合金厚板的世界生产格局。世界铝合金厚板产量主要集中在发达国家, 特别是美国。高性能铝合金主要是通过调整合金成分, 采用新的合金元素、新的加工和制造技术等途径达到改善性能的目的。通过强韧化技术挖掘现有铝合金的潜力, 以及研究和开发新型高强铝合金甚至超高强铝合金的工作还任重道远, 大量基础研究工作有待深入开展。高性能铝合金厚板主要应用于航空工业、船舶工业、交通运输等领域。我国在高性能铝合金厚板领域已经取得了长足的进步, 但与国外先进水平相比还有一定差距。

**关键词:** 高性能铝合金厚板; 生产技术; 应用现状

中图分类号: F426.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2011)03-0054-06

## Technology and Application of High-Performance Thick Aluminum Alloys Plate

YU Liping, RUAN Pengyue

(Oujiang College, Wenzhou University, Wenzhou 325110, China)

**Abstract:** The world production pattern of high-performance aluminum alloy thick plate is introduced. Manufacturers of aluminum alloy thick plate are mainly from developed countries, especially the United State. High-performance aluminum alloys can be developed mainly through adjusting alloying component, using new alloying element, and adopting new technologies of machining and manufacturing. There is still a long way to go either to develop the potential of aluminum alloys available through strengthening and toughening technology, or to develop new types of high strength aluminum alloy or even ultra high strength aluminum alloy. Therefore, much basic research work still needs to be done. High-performance aluminum alloy thick plate is mainly applied in fields like aviation industry, shipping industry and transportation. In China, great progress has been made in the realm of high-performance aluminum alloy thick plate, but there is still a lot of work to be done to catch up with advanced countries.

**Key words:** high-performance aluminum alloy thick plate; technology; present situation of application

### 1 前言

铝合金板带材按厚度分类, 可分为厚板和薄板2大类。在中国有关标准中没有对厚板下定义。根据美国“铝及铝合金薄板和中厚板的技术规范”标准 B209M-02, 工业上通常把厚度大于6 mm的铝合金板材称为厚板(Thick Plate), 厚度为10~50 mm的称为中厚板(Medium-Thick Plate), 而将厚度大于50 mm的称为特厚板或超厚板(Ultra-Thick Plate)。高性能铝合金厚板的生产和技术主要掌握在欧美发达国家手中, 我国在研发和产业化方面虽然取得了长足的进步, 但与国外先进水平相

比还有一定差距。

### 2 世界高性能铝合金厚板生产格局

世界铝合金厚板的生产主要集中在发达国家, 特别是美国。美国能生产厚度达180 mm、宽度达5 440 mm的特厚板, 世界上凡是需要宽度大于3 700 mm的铝合金厚板都必须向美国铝业公司达文波特轧制厂订购。美国生产的厚板约占其铝板带材总产量的4.083%。德国、日本和法国还不能生产宽度大于3 500 mm的特宽厚板, 但各国厚板产量约占其铝板带材总产量的3.8%。我国生产的厚度大于20 mm的高性能铝合金厚板约占铝板带材总产量的50%左右, 主要用于航空工业、船舶工业、交通运输业、铁路和机车业、化工及轻工业等领域。

收稿日期: 2010-05-11

通信作者: 庾莉萍, 女, 1972年生, 博士, 高级工程师

如果考虑到许多制造领域以铝代钢的结构性调整,未来国内铝合金预拉伸厚板及中厚板市场前景十分广阔。对大多数发展中国家与某些地区如墨西哥、南美洲、东南亚地区、印度次大陆、阿拉伯国家、非洲等,既不能生产特宽的(大于2 500 mm)厚板又不能生产特厚的厚板,因此厚板产量较低,它们生产的厚板产量仅占铝板带总产量的3.0%以下。

当前,全球可生产可强化铝合金厚板(厚度 $\geq 6$  mm)即航空级铝合金厚板的企业有:美国铝业公司(Alcoa),它是全球最大可生产可强化铝合金厚板的生产者与供货商,在世界各地有4个生产厂,其从2005年中期起投资1亿多美元对4个厂进行改扩建,使其厚板生产能力提高了50%,它们分别是美国的衣阿华州(IOWA)达文波特(Davenport)厂,于1971年投产的5 588 mm的4辊可逆式热粗轧机是世界首条用计算机控制的铝板带热轧机,可生产5 100 mm宽的厚板,不过4 000 mm宽以上的厚板的厚度不得小于40 mm,否则不易控制板形,可轧制厚达660 mm的锭。还有设在英国的基茨格林(Kitts Green)轧制厂,意大利的富西纳(Fusina)轧制厂和俄罗斯的别拉雅卡利特娃(Belaya Kalitva)轧制厂;第二大厚板企业是加拿大铝业公司

(Alcan),有2个厚板生产厂,分别为美国的雷文斯伍德(Ravenswood)轧制厂和法国的伊苏瓦尔轧制厂;第三大厚板生产企业是美国凯撒铝业及化学公司(Kaiser Aluminum & Chemical Co.),其投入巨资对其华盛顿州的特雷特伍德(Trentwood)轧制厂的厚板系统进行了大规模的改扩建;第四大厚板生产企业是阿莱利斯公司(Aleris)设在德国的科布伦茨(Koblenz)轧制厂;第五是俄罗斯铝业公司(Rusal)的卡姆斯克·乌拉尔斯基冶金厂(Kamensk · Uralski Metallurgical Plant),其新近从埃布纳公司(Ebner)引进的厚板固溶处理炉可处理长30 m、宽3 200 mm、厚155 mm的厚板。

高性能铝合金的研究开发基本上是经历了高强度、低韧度 $\rightarrow$ 高强度、高韧度 $\rightarrow$ 高强度、高韧度、耐腐蚀的发展过程,其热处理状态开发则是沿着T6 $\rightarrow$ T73 $\rightarrow$ T76 $\rightarrow$ T736(T74) $\rightarrow$ T77方向进展;在合金设计方面的发展特点是:合金化程度越来越高,Fe, Si等杂质含量越来越低,微量过渡族元素添加越来越合理,最终达到在大幅度提高强度的同时保持了合金优良的综合性能。高强铝合金发展的特点,可从图1所示的通过改善飞机用铝合金性能而开发的新合金示意图上充分体现出来<sup>[1]</sup>。

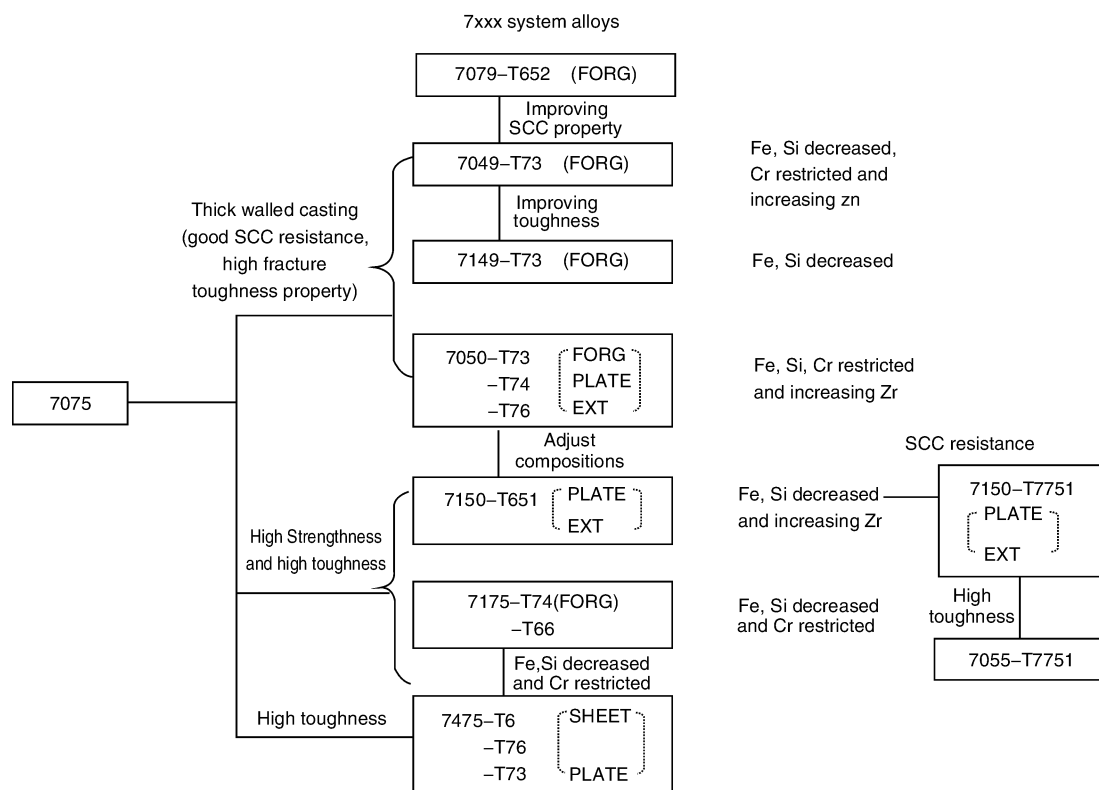


图1 飞机用高性能铝合金的发展历程

Fig. 1 Development of new high-property aluminum alloy for aircrafts

### 3 高性能铝合金的强韧化措施

半个多世纪以来,高性能铝合金的开发和发展主要是围绕提高材料的强度、塑性、韧性、耐蚀性以及疲劳性能等综合性能来展开研究,其新型合金主要通过调整合金成分,采用新的合金元素、新的加工和制造技术等途径进行开发。但是采用传统铸造法(IM)制备的 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金仍然是目前应用量最大和应用领域最广的航空结构材料。事实上,这些采用传统方法制备的铝合金的性能还大有潜力可挖,因此,通过各种改善强韧化措施和开发传统高强铝合金的研究工作在世界各国都一直在开展,这些工作主要包括以下几个方面。

(1) 调整合金中的主要合金元素含量以及各组元的比值,添加微量过渡族元素以及稀土元素,从而改变合金中各种化合物的比例和合金的物理性能,以开发出对应各种不同需要的新型合金。例如,利用有模低频电磁铸造技术可开发更高强度的新型高强铝合金,这种技术可以使基体固溶更多的合金元素,使 Al-Zn-Mg-Cu 合金中的 Zn 含量超过 10%,总合金元素含量超过 15%,达到开发出强度稳定超过 700 MPa 的新型超高强铝合金。在 Al-Zn-Mg-Cu 合金中添加 Sc 元素,既可以细化晶粒,又能显著提高合金的强度。研究表明,添加 0.1% Sc,铝合金强度可以提高 10~20 MPa。另外,Sc 对铝合金的耐腐蚀性能、焊接性能均起有益的作用。近年来,俄罗斯采取向 Al-Zn-Mg 合金中同时添加 Sc 和 Zr 的方法,开发了抗疲劳性能、焊接性能和韧性优良的高强铝合金 01975 和 01970<sup>[2]</sup>。

(2) 进一步减少 Fe, Si 等各种杂质含量,提高合金的纯度,研究控制杂质含量的方法和技术,改善高强铝合金的断裂韧性,抗疲劳性能和抗应力腐蚀开裂性能,以及抗铸造裂纹能力。当 Fe, Si 含量均小于 0.1% 时,上述性能会大幅度提高。

(3) 开发和应用各种新的热处理工艺与技术,提高高强铝合金的综合性能。研究和采用高温均匀化退火(在过烧温度以上)工艺,其目的是使残留的非平衡相和时效强化相最大限度地固溶到基体中,并均匀分布,提高固溶处理后固溶体的过饱和度,从而提高时效强化效果。研究和开发“热变形+中间高温均匀化+高温固溶处理”工艺,该工艺主要是针对 7175-T736(后改为 T74)合金大型锻件而开发的新工艺,它使 7175-T74 合金强度接近 7075-T6,抗应力腐蚀性能接近 7075-T73。这种工艺目前尚未见用于其它合金上,因此有必要研究其对其它高强铝合金性能的影响<sup>[3]</sup>。

(4) 研究开发各种先进的熔体净化和变质处理技术,重点解决铸锭冶金质量不高的问题。熔体净化和变质处理方法可以明显影响合金的性能,尤其是断裂韧性和电导率。目前,熔体净化处理方法有:炉内的熔体静置+溶剂处理、氯气处理、N<sub>2</sub>+Cl<sub>2</sub> 处理、Ar+Cl<sub>2</sub> 处理、C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> 处理、N<sub>2</sub>+Cl<sub>2</sub>+CO 处理、喷粉精炼处理、动态和静态真空处理等。炉外净化处理方法有:在线处理的 SNIF 法、Alpur 法、FILD 法、MINT 法、Aleoa469 法、Aleoa662 法、RDU 法、GBF 法、CFF(陶瓷)过滤法等。美国 Almex 公司在 20 世纪 90 年代中期研制开发的新型铝熔体净化系统 LARS(Liquid Aluminum Refining System),具有巧妙的构思与独特的结构,除氢、去渣效果更好,除氢率可达 75% 以上,可除去 99% 的粒度大于 20 μm 的夹杂物,是目前最先进的铝熔体精炼技术,可为高性能铝合金厚板生产提供大规格优质铸锭。此外,微量元素和 Ti, B 等变质剂的加入方法,以及它们在铝合金中与其它元素的交互作用也是值得关注的重要课题之一,因为它们影响铸锭中一次粗晶化合物的形成,进而影响其在组织中的存在形态和分布,对合金性能产生严重影响。

(5) 研究开发各种先进和特殊加工技术来提高合金的综合性能以及特殊性能,如超塑成形,精密,等温,半凝固模锻,等温挤压,厚板锻轧等。先进的铸造技术也是保证和提高高强铝合金强韧化性能的重要手段。电磁铸造技术既可以获得细晶组织,又可以强化合金元素的固溶,同时改善高强铝合金的铸造性能,因此被列为重点研究方向。另外,振动铸造技术、超声波铸造技术、同水平铸造技术、热顶铸造技术等都是值得重视和深入研究的技术。

综上所述,通过强韧化技术挖掘现有铝合金的潜力,以及研究和开发新型高强铝合金甚至超高强铝合金的工作还任重道远,大量基础研究工作有待深入开展。专家指出,研究开发新型高强高韧铝合金应特别重视 2 点:①一种新的合金不仅仅是改变合金成分,还应该包括加工工艺和应用,只有这三者结合起来,才能成为一种优良的合金材料;②新合金材料的研制不能仅仅停留在实验室里,最重要的是要能够在工业化生产条件下进行批量生产。

## 4 高性能铝合金厚板的应用

### 4.1 航空航天与兵器工业

航空航天与兵器工业是铝合金厚板及超厚板的重要应用领域,主要用于制造高强度、高抗应力腐蚀和剥落

腐蚀、高断裂韧性的结构件,如飞机机身框、机翼壁机、隔框、翼梁、翼肋、起落架支撑零件等。A330/A340 飞机上结构件应用的复合材料的 78% 是铝合金材料,其中 50% 为厚板,13% 为薄板材,10% 为挤压件,5% 为锻件。这些材料一般为硬铝(2×××系)及超硬铝(7×××系),规格为(5~150) mm×(1 000~3 500) mm×(600~12 000) mm,其中少量厚度为 220 mm 左右。此外,铝合金厚板在新一代航天飞行器和武器装备上正得到越来越广泛的应用。由于涉密和用量较少,高强铝合金厚板在航天工业和军事工业上应用的报道很少。

现代新型飞机设计的主导思想是减少油耗、提高飞行速度、增加载重和航程等,以便提高战术性能和经济效益。因此在结构设计上尽可能要求减轻机体重量,在选材方面一般选用能代表当代的最高比强度的材料,高强度铝合金当然成为首选材料。在新一代军用飞机中,由于复合材料和钛合金用量的增加,铝合金的用量有所减少,但高性能铝合金厚板量却增加了。

高性能铝合金厚板作为主要承力构件,其使用比例占飞机上总的铝材用量的 35%~50% (质量分数)。自从第二次世界大战以来,在亚音速客机上就广泛使用了高强铝合金厚板和锻件。飞机上最早是在损伤关键部位使用传统的 2024 铝合金,在强度关键部位使用 7075 铝合金。由于铝合金的应用使飞机重量得到明显降低,于是 20 世纪 40 年代中期开发了一大批新型铝合金,但其中只有 20% 在飞机上获得了应用。某些改良型的合金在试用初期即被终止或淘汰,例如 7178 铝合金因断裂韧度低而被淘汰,7079 铝合金因抗应力腐蚀性能差而被停止使用。用于亚音速飞机上改良最成功的是上机翼结构用 7050, 7150-T651X 铝合金厚板和锻件, 2324-T39 及 2224-T3511 铝合金机翼面板。这些新型机翼上铝合金的使用,使每架亚音速飞机(B737, 747, 757, 767)减重约 250~450 kg。在新一代的亚音速客机上(例如 B777)主要选用美国 Alcoa 公司开发的高强铝合金,其中包括 7055-T77 铝合金厚板和挤压板(用于上翼面壁板)和 7150-T77 铝合金厚板和锻件(用于座舱滑轨、龙骨架、翼面壁板、机体长桁等)。正是由于这些高强铝合金的应用,使 B777 客机比设计重量减轻约 650 kg<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 船舶制造业

为了减轻重量、改善防腐性能、提高船速,船舶工业中的客轮及舰船上铝合金厚板的用量也正在逐渐增加。船舶工作环境要求结构材料应有一定的抗拉强度、

屈服强度、伸长率和抗冲击能力等。船舶用铝材品种有薄板、厚板、型材、整体挤压壁板和管材。铝板的厚度在 0.5~50 mm 之间,个别情况也使用更厚的铝合金板,主要规格为(4~81) mm×(200~400) mm。

例如,前苏联“吉尔吉斯斯坦”号远洋客轮上,铝合金上层结构,如驾驶舱、桅杆、烟囱、支索、天遮装置、水密门等,使用 5.6 mm 和 8 mm 厚的 LF5 合金板及 10 mm 和 14 mm 厚的 LF6 合金板。军舰上也广泛应用铝合金材料。油船和运送各种化学物质的驳船采用铝材做壳体也更为合适。20 世纪 60 年代联邦德国开始用焊接的铝合金船体。该船用 9 mm 厚的波纹板做纵向密封舱壁,用 7 mm 厚铝板做横向舱壁,形成 5 个独立货舱,船舷由 9 mm 厚铝板制作,甲板用 12 mm、盖板用 15 mm 厚铝板制成。

目前,世界上液化天然气(LNG, Liquid Natural Gas)船已达 128 艘。LNG 船经过不断的发展演变,现分为球型和薄膜型 2 大类。球型船的货舱是用 27~60 mm 厚的铝合金板焊接而成,由于中部受力很大,板厚达到 170 mm,球型舱靠四周强有力的圆柱体支撑,使它与船体分离。由于货舱与船体分离,航行时它不受船体交变应力的影响,在船舶发生严重碰撞或搁浅时,不容易损坏到货舱绝缘层,从而防止货物外泻。

#### 4.3 铁路运输与机车制造、公路运输及汽车制造业

目前,铝合金板在机车和保温车、冷藏车和高速列车的应用主要是:车厢地板,厚度为 6~7 mm;车顶棚,厚度在 25.5 mm 以下。列车提速后对列车、机车轻型化有更高的要求,新的样车都在试用铝合金,而现有机车、列车也有相当一部分需更新换代,以适应提高列车运行速度和客车双层化的发展趋势。车辆厂制造的客车内、外壁板主要使用规格为(3~5) mm×(200~4 000) mm 的铝合金板;地板和车厢板使用厚度为 6 mm×7 mm 铝合金板。据统计,目前我国铁路系统年用铝合金厚板总量已超过 2 000 t。

为了解决和改善我国的交通运输,近几年来我国全面发展公路建设和汽车制造业。为提高车速和改善公路运输情况,同时为适应轻型、节能和环保的要求,汽车制造业的铝化率在逐年提高,除汽车轮毂用铝合金铸件代替钢质轮毂外,保温车、冷藏车、运钞车、宿营车、越野车、营房车及旅游特种汽车和大客车、小客车(面包车)使用铝合金厚板的比例也在增加,主要用于车身壁板、装饰板、顶板。

#### 4.4 其它应用

铝合金厚板广泛用于化工工业的贮罐车,主要储

藏、装运硝酸、冰酸等化学物品。制造槽、罐所使用的铝合金厚板规格为 $(20 \sim 60) \text{ mm} \times (1\,800 \sim 2\,000) \text{ mm} \times (2\,000 \sim 8\,000) \text{ mm}$ ,  $100 \text{ m}^3$  容量的贮罐车每辆需铝合金厚板 20 t。目前全国化工槽、罐每年用铝合金厚板 800 t 左右, 2006 年后估计其用量增加到  $1\,100 \sim 1\,200 \text{ t}$ 。目前在石油天然气工业中, 铝合金厚板主要用于特种车辆及钻探设备配件, 板厚约 20 mm, 年用量 200 t 左右。

## 5 我国高性能铝合金厚板生产现状

我国从 20 世纪 60 年代开始, 对高强高韧铝合金及其制备技术进行了深入研究, 并相继开发和生产了适合我国国情的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金, 例如与 7075 相近的 7A04(原 LC4)和 7A09(原 LC9)等。在新的国家标准中包括了 18 种 Al-Zn-Mg-Cu 系合金, 并定义为  $7 \times \times \times$  (原 LCX)。但是, 我国高强铝合金的研究大部分属于仿制性质, 自主开发的合金尚少, 只有加工工艺和部分热处理状态由于属于国外专利技术而无法仿制, 所以在在这方面倒具有真正属于自己的知识产权。我国曾经仿制研究的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金有: 美国的典型合金 7075, 7022, 7001, 7175, 7475, 7050, 7150 和 7055 合金等, 仿原苏联的典型合金有 B95, B95Π<sub>II</sub>, B96Π 和 B96Π-1, B96Π-3 合金等。

近年来, 我国投入大量资金, 由东北轻合金有限责任公司(101)、西南铝业有限责任公司(112)、东北大学、中南大学、北京航空材料研究院等单位承担并完成了多项国家攻关课题, 对高强铝合金、超高强铝合金及其制备技术进行了深入研究, 尤其是通过开展国家 973 项目“提高铝材质量的基础研究”, 许多研究成果达到了国际先进水平, 并具备了批量生产能力, 基本跟上了时代发展的步伐。

尽管如此, 有关专家指出, 我国在高性能铝合金及其加工制备技术方面与国外先进水平相比仍有很大差距, 具体表现在以下几个方面: ①我国在新合金开发方面基本上还处于仿制阶段, 独立研制的合金品种很少, 而国外除了不断开发新合金、改良旧合金外, 对每种合金还根据用途和品种的不同, 相应地制定许多内控标准; ②在合金化基础理论方面, 我国的研究较少, 而国外已建立了雄厚的合金化理论基础; ③在合金的强化、断裂机理, 热处理、位错、塑性变形、腐蚀理论, 组织与性能的关系等方面的基础理论研究没有国外研究的广泛和深入; ④在合金的熔铸、塑性加工和热处理等生产工艺研究方面, 我们同国外的差距还非常大, 具体说一是受设备条件影响, 我们的生产工艺比较原始和粗糙; 二是工模具的设计制造水平比较低; 三是因为缺少一对

一的中试研究设施, 因此对加工工艺研究难以系统和深入; 四是国外已有的许多生产工艺我们还没有研究和应用; ⑤在冶金质量方面与国外的差距更大, 我们的熔体净化工艺和净化设备非常原始落后, 气体含量、氧化膜、夹杂等缺陷一直是困扰铝加工企业和航天航空工业用铝材的老大难问题, 美国 Almax 公司研发的 LARS 技术可有效解决铝熔体质量的问题, 且已在全球多个国家共投产 21 套, 而我国至今尚无一家企业引进该项技术; ⑥我国的生产设备与国外相比相当落后, 目前我国铝加工的技术装备仅相当于先进国家 20 世纪七八十年代的水平, 有些甚至是五六十年代的水平; ⑦我们的质量保证体系虽然比较健全, 但由于受体制、管理、员工素质等影响, 在执行上相当粗放, 难以严格执行到位, 使产品质量经常出现较大波动, 而国外特别重视质量的过程控制, 许多质量控制实现了现代化、自动化、信息化等高级管理模式。正是由于有上述的差距, 在高性能铝合金产品上表现为: 组织不洁净、含气量高、力学性能偏低, 有些产品 T74 状态的电导率偏低、断裂韧性偏低、产品表面质量较差, 有些产品晶粒粗大, 厚壁产品的各向异性控制较差, 部分产品预拉伸或预压缩后仍残存有较高的内应力, 产品质量的稳定性和性能的均一性差等等; ⑧铝合金发展的一个最重要的需求动力是航空航天工业的发展, 我国多年来飞机制造业的落后一直未能给铝合金的发展提供强有力的技术刺激, 而高性能铝合金产品性能的缺陷反过来又制约了航空航天工业的发展, 形成恶性循环。

厚板作为高性能铝合金材料的一种重要产品, 随着其在航空航天领域的应用和铝的合金化研究而发展, 更随着铝合金的加工制备技术(熔铸、塑性加工、热处理等)的进步而发展。纵观铝加工技术的发展历史, 发达国家的先进技术无一不是建立在扎实的基础理论与实验研究的基础上, 而我国在高性能铝合金厚板制备技术与理论方面与国外的差距体现得更为明显。

高强高韧铝合金及其厚板是国家航空、航天以及军事领域的重要材料, 在国家未来的军事、政治和经济中将具有重要的战略地位。随着国际形势的复杂化和国外宇航工业的飞速发展, 我国也正在大力发展宇航事业, 对高性能铝合金厚板的需求将越来越迫切, 并急需在国内建立一套从研制到开发最后能批量生产的独立自主的完整体系。然而, 目前我国在高性能铝合金研究和生产方面却与国外存在巨大差距, 充分认识我国高性能铝合金及其厚板的研究与生产现状, 并将其作为重大基础研究和攻关项目进行深入研究具有重大意义。

与铝合金薄板、挤压件、锻件等产品形式相比, 高

性能铝合金拉伸厚板制备技术有如下几个特点:①因高强度铝合金塑性较差,主要是通过热塑性加工而成形,只有在厚度小于12 mm的情况下,有时采用小压下量的冷轧实现最终成形,因此铝合金热变形过程中的组织演变特征是厚板制备的一项重要基础理论;②因厚向尺寸大而难以实现95%以上的连续大变形,难以实现合金的组织细化与均匀化,因此,在现有技术装备条件下,使铝合金获得充分塑性变形并得到有效细化,是铝合金厚板加工的一项关键技术;③尤为严重的是,因淬火过程中厚板内显著的温度梯度而形成较高的宏观残余应力,铝合金厚板必须采用拉伸方法进行矫直和降低残余应力,所以对于淬火残余应力形成机理、分布规律及控制技术的研究是制备高性能铝合金厚板的另一项重要基础理论和关键技术。

## 参考文献 References

- [1] Zhang Shuting(张淑婷), Shen Guangwei(沈光伟), Xiao Ning(肖宁), et al. 铝合金用添加剂的现状与发展趋势[J]. *Mining and Metallurgy(矿冶)*, 2009(4): 50-52, 86.
- [2] Liu Guoli(刘国利). 铝合金熔模铸造技术现状及发展[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*, 2010(1): 72-74, 126.
- [3] Lou Juhong(娄菊红), Yang Yanqing(杨延清), Yuan Meini(原梅妮), et al. 金属基复合材料界面残余应力的研究进展[J]. *Materials Review(材料导报)*, 2009, (19): 75-78.
- [4] Liao kai(廖凯), Wu Yunxin(吴运新), Gong Hai(龚海). 基于积分法的铝合金厚板深度残余应力分析[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology(中南大学学报:自然科学版)*, 2010(1): 179-183.

## NIST Expert Software ‘Lowers the Stress’ on Materials Problems

Once provided with a microscope's image of a composite material (inset), OOF software can help analyze the effects of the material's internal structure on stress. Using OOF, researchers can identify the different substances (blue and gray areas) that make up the material and compute their response to stress or other effects, providing clues about how the overall sample will behave.

Before you can build that improved turbojet engine, before you can create that longer-lasting battery, you have to ensure all the newfangled materials in it will behave the way you want—even under conditions as harsh as the upper atmosphere at supersonic speed, or the churning chemistry of an ion cell. Now computer scientists at the National Institute of Standards and Technology (NIST) have improved software that can take much of the guesswork out of tough materials problems like these.

The software package, OOF (Object-Oriented Finite element analysis) is a specialized tool to help materials designers understand how stress and other factors act on a material with a complex internal structure, as is the case with many alloys and ceramics. As its starting point, OOF uses micrographs—images of a material taken by a microscope. At the simplest level, OOF is designed to answer questions like, “I know what this material looks like and what it's made of, but I wonder what would happen if I pull on it in different ways?” or “I have a picture of this stuff and I know that different parts expand more than others as temperature increases—I wonder where the stresses are greatest?”

OOF has been available in previous versions since 1998, but the new version (2.1) that the NIST team released on Feb. 16, 2011, adds a number of improvements. According to team member Stephen Langer, version 2.1 is the first dramatic extension of the original capabilities of the software.

“Version 2.1 greatly improves OOF's ability to envision ‘non-linear’ behavior, such as large-scale deformation, which plays a significant role in many types of stress response,” says Langer. “It also allows users to analyze a material's performance over time, not just under static conditions as was the case previously.”

Jet turbine blades, for example, can spin more efficiently with a layer of ceramic material sprayed onto their surfaces, but the ceramic layers are brittle. Knowing how these ceramic layers will respond as the metal blades heat up and expand over time is one of the many problems OOF 2.1 is designed to help solve.

“We've also included templates programmers can use to plug in their own details and formulas describing a particular substance,” Langer says. “We're trying to make it easy for users to test anything—we're not concentrating on any particular type of material.”

Later this year, the team expects to enable users to analyze three-dimensional micrographs of a material, rather than the 2-D “slices” that can be analyzed at this point.

(From <http://www.physorg.com/news/2011-03-nist-expert-software-lowers-stress.html>)