

# 航天用轻质结构材料研究进展及应用需求

王 群 王婧超 李雄魁 孟德浩 高艺航

(北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

**文 摘** 从轻质金属和复合材料出发,简要介绍了航天用几大主要轻质结构材料国内外研究进展,并在此基础上,结合航天的应用需求,浅析了轻质结构材料的研究和发展方向。

**关键词** 航天,轻质结构材料,研究进展,需求

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.01.001

## Research Progress and Application Requirements of Lightweight Structure Materials for Aerospace Applications

WANG Qun WANG Jingchao LI Xiongkui MENG Dehao GAO Yihang

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

**Abstract** The main lightweight structure materials including lightweight alloy and composite materials for aerospace applications were introduced in the article. The development direction of the lightweight structure materials are analysed briefly combining the application requirements of aerospace.

**Key words** Aerospace, Lightweight structure materials, Research progress, Needs

### 0 引言

随着航天飞行器迫切的减重需求,对应用材料提出了更高的要求,具有优异力学性能的轻质结构材料,尤其是以铝合金、镁合金、钛合金及复合材料等材料为代表的轻质结构材料成为航空航天研究的热点。目前,国内航天箭体结构系统在轻质结构新材料应用方面完成了部分尝试和探索。但就现在各材料行业内应用现状和新材料预先研究结果看,各种材料性能、规格还有大幅提升的需求和潜力。从调研结果来看,技术成熟度还偏低,尚不能满足全弹结构和未来型号发展的紧迫需求。本文从航天结构发展需求的角度出发,列举了航天目前需要发展和研究的部分先进轻质结构材料,介绍了各材料发展的现状,并进一步提出研究和发展的方向。

### 1 轻质合金结构材料

#### 1.1 超高强铝合金

不断提高结构极限承载能力是航天运载器结构

设计所追寻的目标,应用高强度材料是必然选择。从第一代铝合金到第四代高性能铝合金在运载火箭上的应用不断更新替换,铝合金材料的发展趋势也是对材料强度要求越来越高。国内以 7A04 为代表的第一代,以 7A09、7075 为代表的第二代变形铝合金已得到广泛应用。以 7050 为代表的第三代,以 7A60、7055、7056 等第四代高强变形铝合金仍然处于实验室或半工业试制阶段,还未具备在运载器结构上大范围工程化应用的条件。

超高强铝合金主要以 7XXX 系铝合金为主,即 Al-Zn-Mg-Cu 系合金。20 世纪初至今,国外,主要以美欧等发达国家为主,已先后成功开发出了 7X75、7X50/7010、7055/7449、7136/7056 等几代典型的 7XXX 系铝合金,并在航空航天工业中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。20 世纪 90 年代,美国、英国、日本等工业发达国家,利用先进的喷射成形技术开发了含 Zn 8wt% 以上的新一代超高强铝合金,用于制造交通运

输领域强度高、抗腐蚀性能好的高应力结构件<sup>[3]</sup>。国内超高强铝合金的研究起步较晚,主要以中南大学、东北轻合金有限公司、北京航空航天大学等研究机构为主。部分普通 7XXX 系铝合金在我国已进入实际应用阶段,主要包括 7075, 7050, 7175 等。由江苏豪然公司开发的喷射挤压成形 7055 铝合金 T6 态抗拉强度最高可达到 745 MPa<sup>[4]</sup>,目前还成功研制出抗拉强度 800 MPa 级喷射成形超高强铝合金。

以 7055 为代表的 7XXX 系超高强铝合金逐渐成为航天产品应用的翘楚。7055 铝合金于 20 世纪 90 年代研制成功,美国铝业公司于 1993 年申请专利,是 Zn 含量超高的新一代铝合金,据美国军标记载,其抗拉强度高达 648 MPa,是现在应用中使用的最高强度铝合金。目前美国已将 7055 铝合金板材成功应用于波音 777 飞机上翼结构,将型材和锻件应用于龙骨架、行李轨道和座椅轨道结构。国内江苏豪然公司将喷射成形材料制备工艺和 7055 牌号成分相结合制备出更稳定、更均质的高性能铝合金。国内商飞在机翼长桁、某些航天运载器发动机燃烧室壳体、喷管、飞机轮毂等结构中也应用了 7055 铝合金材料,取代了部分 30CrMnSiA 及钛合金产品。

但是,超高强铝合金因力学性能的大幅度提升造成相应的塑性降低、淬透性差、淬火残余应力大、机加工难度大等一系列问题。从前期工程化应用的情况来看,后续还需要针对 7XXX 系超高强铝合金开展大量机理性及工艺性研究,系统评价材料成形工艺、热处理工艺、综合力学性能、切削加工工艺等,为航天运载器上材料的选用提供依据。

## 1.2 耐高温高强镁合金

镁合金被誉为“21 世纪绿色金属结构工程材料”。因其高比强度、高比模量、良好的高温性能、阻尼减振性能及高性价比、优异的机加工性能越来越受到航空航天的青睐。可以预见,随着镁及镁合金的深入研究,有望取代铝合金,为航天飞行器的结构减重奠定重要的技术基础。

目前,镁合金在航天飞行器上的应用正由简单的构件向复杂承力耐热构件跨越,主要应用于火箭、飞机(包括军用和民用)、卫星和飞船上比较重要的零部件,这对镁合金的耐热高强性能提出了更高的要求。早在 20 世纪 60 年代,国外在大力神、丘辟特、雷神和北极星等战略导弹上都曾选用变形镁合金做结构材料,其中“大力神”Titan 号洲际弹道导弹上用变形镁合金达 900 kg,其蒙皮选用了 Mg-Th 系(HK31A、HM21A)板材、AZ31B 板材。另外,小型导弹上用镁量更大,如以色列“猎鸟”Falcon 空对空导弹结构件上用镁量达到 90%,其中,导弹壳体由

ZK60A 管材和 AZ31 板材制备而成,而舵选用了 ZK60A 锻件。在常规武器上,镁合金也广泛应用。如:英国大口径 120 mm BATL6Wombat 无后座力反坦克炮采用了镁合金,大大减轻了质量,加上所配的 M80.5in 步枪,总重才 308 kg<sup>[5]</sup>。美国 M274 A1 型军用吉普车采用了镁合金车身及桥壳,大大减轻了结构质量,具有良好的机动性及越野性能,4 个士兵可以抬起来<sup>[6]</sup>。

近年来,随着新技术的应用,铸造镁合金性能也有很大提升,如上海交通大学应用坍塌液态金属密封技术与精密低压铸造技术开发的高温高强铸造镁合金 JDM1 和 JDM2 取得了成功,但规模较小。国内镁合金结构件的应用以铸件为主,军用方面,如在直径 1 m 以下的战术舱段、支架及局部结构等;民用方面—如汽车、3C 产品等。同时变形镁合金的研究也越来越多,因为变形镁合金相对铸造有力学性能好、延伸率大、缺陷少、用途广等优势。对于小尺寸结构件,变形镁合金抗拉强度能达到 400 MPa 以上,且耐高温。在航天运载器上的局部结构及支架上正在推广应用。对于占航天运载器结构主要质量的整体舱段,特别是直径 1 m 以上的大尺寸舱段,变形镁合金潜力巨大。

但目前耐热镁合金在工程化应用方面还面临一些问题,主要表现在国内的工业化变形镁合金总体强度水平不高,抗拉强度基本在 200~300 MPa,且塑性较差,还不能很好满足航天发展的需求;小尺寸结构件,变形镁合金抗拉强度可达到 400 MPa 以上,但对于大尺寸结构件,其抗拉强度和延伸率有待进一步提高;高强耐热变形镁合金大尺寸铸锭的熔铸技术有待进一步提升和发展,成熟的大尺寸铸锭的缺失影响了变形镁合金在航空航天中的大规模应用;高强耐热变形镁合金的加工成型,特别是大直径与大变形量结构的成形,虽然有一定的基础,但是还没有成熟的技术;镁合金的表面防护技术已开展较多研究,但对于结构件的全生命周期的防护,特别是有较长贮存期要求的结构件,还有待进一步研究。

## 1.3 耐高温高强钛合金

耐高温高强钛合金的研制与应用在世界范围内都受到了高度重视。早期,高温钛合金是指在航空发动机上使用温度超过 350℃ 以上的无序固溶强化钛合金。

1954 年,美国成功研制出世界上第一个高温钛合金 Ti-6Al-4V,奠定了高温钛合金研究的基础。后来美国的艾伯星火箭、阿波罗飞船和发现者卫星均采用了 Ti-6Al-4V 合金<sup>[7]</sup>。之后各国学者研制高温钛合金也多是以此为基础进行的。

从 20 世纪 50 年代起到 80 年代的近 40 年,是国  
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 1 期

外高温钛合金的快速发展时期,使用温度从最初的350℃提高到600℃。20世纪90年代以后,高温钛合金的研究热点转向Ti-Al系金属间化合物。在此期间,以美、英、俄等为主的航空发达国家均建立了各自相对独立的高温钛合金材料体系,如表1所示<sup>[8]</sup>。美国的麦道公司采用快速凝固或粉末冶金技术研制出一种高纯度、高致密性的钛合金,在760℃下的强度相当于目前常温下使用的钛合金强度。

表1 美、英、俄系高温钛合金

Tab.1 High temperature titanium alloys developed in USA, UK and Russia

使用温度/℃	英国	美国	俄罗斯
≤350	-	Ti-6Al-4V	BT6
400	IMI550	Ti-17	BT3-1
450	IMI679	Ti8-1-1、Ti6246	BT8M-1
480	-	Ti6242、Ti-5Al-2.5Sn	BT8M
500	IMI685	Ti6242S(520℃)	BT8、BT9、BT8-1、BT20
550	IMI829(540℃)	Ti5621S(540℃)	BT25、BT25y
600	IMI834	Ti-1100	BT18y、BT36

我国钛合金研究起步于20世纪60年代,从前期仿制TC4、TC6、TA7、TA11等低温钛合金,到90年代末,研制出TA12、Ti633G、Ti53311S等550℃高温钛合金,近10年,又研制具有自主知识产权的600℃至650℃高温钛合金Ti60、Ti600、TG6、Ti65等<sup>[9]</sup>。就研究成果而言,我国当前已经研究出了一些性能较为优越的合金,但大多耐高温合金工程化应用水平尚不成熟,未能得到大批量应用。尤其随着我国航天飞行器的发展,耐高温高强钛合金的需求日益明显,为了支撑与促进我国航天的发展,应加快对高温钛合金的研究工作。一方面,尽快完成对已研发高性能钛合金的材料评价;另一方面,要积极借鉴外国研究者的研究方法,研发更高级别的耐高温高强钛合金。

## 2 轻质复合材料

### 2.1 高强/高模碳纤维树脂基复合材料

树脂基复合材料常用的增强纤维包括碳纤维和其他高性能有机纤维,而目前用得最多和最重要的是碳纤维<sup>[10]</sup>。以碳纤维为增强体的树脂基复合材料因其高比强度、高比模量、高温尺寸稳定性和可设计性等一系列突出的优点,广泛应用于战略导弹舱段等弹体结构上,已成为先进导弹结构轻质化不可缺少的关键材料。

航天用碳纤维的应用以高强、中模为主,高模也有少量应用。碳纤维复合材料在国外航天领域主要应用在运载火箭、战略导弹、卫星结构、承力构件等方面。如美国的战略导弹“侏儒”、“三叉戟”、民兵系宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017年 第1期

列<sup>[11]</sup>,战术导弹THAAD、ERINT等在发动机壳体、发动机喷管等部位都有成熟应用<sup>[12]</sup>;同时,日本“M-5”、法国“阿里安-2”、“阿里安-5”等火箭发动机壳体上也大量采用碳纤维复合材料<sup>[13]</sup>。由美国赫克利斯公司生产的IM-7碳纤维是目前使用量最大的碳纤维<sup>[14]</sup>。我国各类航天运载器上也大量采用碳纤维复合材料作为壳段结构、主承力构件。目前,已形成T300级、T700级、T800级等约20多个品种<sup>[15]</sup>,广泛应用于航空航天。

2014年,据东丽工业公司报道,已开发出一种新型高强高模碳纤维,称为TORAYCA T1100G;同时开发出了T1100G高性能预浸料(树脂浸渍碳纤维薄板)。东丽利用碳化技术,在纳米尺度上精确控制纤维结构。与东丽现有的应用于航空航天中的碳纤维产品如T1000G和T800S相比(T-800纤维,拉伸强度5.65 GPa,弹性模量300 GPa),新型的T1100G性能得到了显著提高。随着航天运载火箭对减重增程等战标的要求不断提高,对碳纤维,尤其是高强/高模碳纤维复合材料提出更高的要求,因此,高性能的碳纤维材料是一个必然的趋势和发展方向。面对国外的技术封锁,我国应该从制造工艺、生产成本等方面分步推进,在研发的同时逐步提高碳纤维工程化应用的成熟度。

### 2.2 耐中高温树脂基碳纤维复合材料

树脂基复合材料的耐温性主要取决于基体。耐高温树脂基复合材料通常指在250~300℃(目前可以提至更高)内可以长期使用<sup>[16-17]</sup>。

近年来,先进材料耐温等级不断提升,从工程中广泛应用的耐温材料来看,从轻质铝合金、双马树脂基复合材料、钛合金到聚酰亚胺树脂基复合材料,耐温等级依次升高。采用力学性能好、密度小、耐温等级高、生产工艺相对成熟的耐高温树脂基复合材料进行承力结构设计,不仅可以实现承力结构质量的降低,而且可以有效减少热防护材料的使用,是实现高速飞行器轻质化的有效途径。

20世纪50年代末,美国“北极星A-2”导弹发动机圆柱壳开始采用玻璃/环氧缠绕成型,与相应的高强度钢发动机相比较,在减轻质量与减小脆性方面都有明显的改进,质量约可减轻50%,射程增大27%<sup>[18]</sup>。直到20世纪60年代末,玻璃纤维/环氧复合材料一直是弹道导弹与运载火箭固体火箭发动机圆柱壳的标准材料,应用于“民兵”、“海神”等固体导弹的发动机圆柱壳。美国潜基战略导弹“三叉戟”、MX、法国的M-4和前苏联的SS-24、SS-25的发动机圆柱壳设计均采用了芳纶纤维/环氧树脂基复合材料<sup>[19]</sup>,通用动力(General Dynamics)公司在F-111

水平安定面上首次使用了环氧复合材料,减重达25%,并且通过了静力、疲劳和地面振动试验,安全飞行250 h。后来此项设计还应用在了F-14、F-15上。在航天飞机有效载荷舱门上也采用了石墨/环氧复合材料面板夹芯结构,相比于铝蜂窝结构,质量减轻了410 kg。同时环氧树脂基复合材料在空间结构如卫星天线、光学结构和桁架结构设计中也占有很大的比例<sup>[20]</sup>。

随着航空航天器飞行马赫数的不断提高,气动加热日趋严重。耐中高温树脂基复合材料的需求愈迫切,并受到越来越多国内外研发机构的重视,树脂基复合材料的发展趋势是继续提高其耐热性、对高性能树脂基体改性、研发新型高性能树脂基体,以满足运载、导弹武器等飞行器的使用需求。

### 3 结语

总的来说,目前普通高性能金属材料仍是航天结构材料的重要组成部分,但其应用已基本接近技术的极限,而高强、耐高温的轻质金属结构材料将是未来航天应用和发展的必然趋势。同时,先进的复合材料在航天中的应用前景广阔,逐步取代了部分金属材料,在导弹和航天器结构中所占比例日益增加,提高结构复合材料的耐高温性能、力学性能,掌握耐高温树脂基结构成型技术,降低制造成本,形成具有自主知识产权的结构复合材料体系成为当今航天新材料研究和发展的重点。

航空航天是引领带动新材料、新工艺发展的主要领域,随着新材料的出现也给航天飞行器的设计提供了更多的可能和选择空间。除了上述文中提到的轻质结构材料外,还有许多耐热材料、密封材料、智能材料等功能材料也是航天领域需要扩展的方向。深入开展先进轻质新材料的研究,在新材料研发的同时对新研材料做深入的机理性研究,系统评价新材料的综合性能,进一步提升新材料的可靠性和成熟度,对于促进新材料的工程化应用和航天的发展具有重要的意义。

### 参考文献

- [1] WARNER T. Recently-developed aluminium solutions for aerospace applications[J]. Mater. Sci. Forum., 2006, 519-521: 1271-1278.
- [2] JOHN L. Advanced aluminum and hybrid aerostructures

for future aircraft[J]. Mater. Sci. Forum., 2006, 519-521: 1233-1238.

- [3] 张永安, 韦强. 喷射成形制备高性能铝合金材料[J]. 机械工程材料, 2001(4): 22.

- [4] 李先聚, 杨杰, 张豪, 等. 喷射成形7055铝合金的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(12): 1987-1992.

- [5] 张文毓. 镁合金及其加工技术研究进展[J]. 稀有金属快报, 2007(8): 15-19.

- [6] 肖冰, 康凤, 胡传凯, 等. 国外轻质结构材料在国防工业中的应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2011(11): 94-97.

- [7] 任朋立. 高温钛合金的应用及其发展前景[J]. 新材料产业, 2014(3): 56-58.

- [8] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 1-26.

- [9] 侯金健, 高强强, 安晓婷. 国内外高温钛合金研究及应用的最新发展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(1): 11-15.

- [10] MAZUMDAR S K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering[M]. USA: CRC press Ltd, 2002.

- [11] 唐见茂. 碳纤维树脂基复合材料发展现状及前景展望[J]. 航天器环境工程, 2010(3): 269-280.

- [12] 张晓虎, 孟宇, 张炜. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J]. 纤维复合材料, 2004(1): 50-53.

- [13] 葛明龙, 田昌义, 孙纪国. 碳纤维增强复合材料在国外液体火箭发动机上的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2003(4): 22-26.

- [14] 林德春, 潘鼎, 高健, 等. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用[J]. 玻璃钢, 2007(1): 18-28.

- [15] 李国丽, 彭公秋, 王迎芬, 等. T700级碳纤维/QY9611双马树脂复合材料界面性能研究[J]. 航空制造技术, 2014(15): 93-97.

- [16] 黄晓艳, 刘波. 先进树脂基复合材料在巡航导弹与战机上的应用[J]. 飞航导弹, 2011(8): 87-92.

- [17] 刘蓓威, 曹运红. 高温树脂基复合材料在超声速导弹弹体上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(5): 15-19.

- [18] LOVELACE, A. M., Advance composites[C]. AIAA 10<sup>th</sup> Annual Meeting and Technical Display, Washington, D. C., January 28-30, 1974.

- [19] 宋健朗. 先进聚合物基结构复合材料在导弹和航天中的应用[J]. 工程塑料应用, 2008(7): 50-54.

- [20] PURDY, D. M., Evolution of new materials for space applications[C]. Structure, Structural Dynamics & Materials Conference, May 2-4, 1983.