

# 临近空间超声速飞行器短时热强钛合金应用分析

张伟堂

(北京机电工程研究所,北京 100074)

**[摘要]** 临近空间超声速飞行器严酷的使役特点和要求给机体结构选材带来了严峻的挑战。短时热强钛合金材料以耐高温、低密度、高比强度、高比刚度、制造加工成形工艺优良的优点成为临近空间超声速飞行器的首选材料。根据临近空间超声速飞行器的使役特点与选材要求,从性能、制造加工成形工艺、成本3个方面的实际工程应用需求出发,对短时热强钛合金在飞行器结构上的应用研究思路进行了分析并提出了建议,为临近空间超声速飞行器机体结构的选材、设计和研制提供参考。

**关键词:** 临近空间超声速飞行器;短时热强钛合金;热成形;使役特点;力学性能

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.076



张伟堂

高级工程师,长期从事飞行器结构与热防护研究设计工作,主要研究方向为钛合金材料应用、轻量化结构设计、制造加工成形工艺等。

临近空间超声速飞行器指的是在 20~50km 大气层内以超声速飞行的飞行器,相对航空飞行器来讲,一是飞行速度快,二是飞行时间短、重

复使用次数少。

随着临近空间超声速飞行器飞行速度的增加,气动加热现象越来越显著,此时耐热材料与结构成为决定整个系统成败的关键因素,其重要性空前提高。就材料需求而言,主要包括轻质耐高温结构材料及防/隔热材料两大类。轻质耐高温结构材料是构成临近空间超声速飞行器承载结构的主要基体材料,要求在高温下表现出高强韧性以及良好的耐冲击性,同时受飞行器结构质量的限制,要求承载结构材料尽可能的轻质化。目前常规的结构钢、镍基高温合金、铝合金、铝镁合金及树脂基复合材料已难以适应临近空间超声速飞行器的使用环境,需要进一步研究并发展新型的高比强度、高比刚度的轻质耐高温结构材料,以满足我国发展临近空间超声速飞行器的迫切需求<sup>[1-3]</sup>。

新型轻质高温结构材料的研发以及在临近空间超声速飞行器上的应用,除了需要材料科学家们为之付

出心血外,也需要结构设计师们根据飞行器的特点、选材要求开展大量的材料应用研究工作。一代材料,一代装备,新材料在新装备上的成功应用,本身就是材料、结构、工艺紧密结合的过程。本文从实际工程应用角度出发,根据临近空间超声速飞行器的使役特点与选材要求,对中/高温短时热强钛合金在飞行器结构上的应用提出研究思路和建议。

## 临近空间超声速飞行器的使役特点

相比于传统的飞行器,临近空间飞行器具有飞行持续时间长、覆盖范围广、生存能力强的优点,其独特的空间和环境优势将航空与航天技术连成一体,上可制天,下可制空、制海、制地,在未来信息化网络联合作战中将发挥至关重要的作用。临近空间飞行器可以分为低速临近空间飞行器和高速临近空间飞行器,高速临近空间飞行器根据其飞行速度

又可分为超声速飞行器和高超声速飞行器。超声速飞行器飞行速度一般在  $Ma5$  以下,如美国的 SR-71 超声速侦察机(见图 1)、印度与俄罗斯联合研制的布拉莫斯导弹(见图 2)等;飞行速度达到  $Ma5$  以上的可称为高超声速飞行器,如美国正在研制的 SR-72 高超声速侦察机(见图 3)、X-51A 高超声速远程打击飞机(见图 4)等。

高速临近空间飞行器的典型特征是在稠密大气层内高速、长时飞行,有的还具有天地往返运输、重复使用的使役要求和特点。从 20 世纪 50 年代至今的国外临近空间飞行器的发展历程来看,飞行速度在  $Ma3\sim Ma4.5$  的超声速飞行器仍然是各国发展与研制的重点之一,在局部战争和国家安全防卫与威慑中发挥着重要的作用。美国出于未来远程、快速、精确打击的战略需求正在积极发展高超声速飞行器,但在动力系统以及材料、制造工艺等方面面临的难度较大,装备部队并形成战斗力还需要较长的时间。

临近空间(高)超声速飞行器在以较高的速度飞行过程中,机身表面的累积气动加热异常严重。如图 5 所示,在大气层内  $6\sim 30km$  以  $Ma4$  飞行的飞行器,由气动加热引起的机体表面恢复温度达到  $560\sim 685^{\circ}C$ ;而当速度达到  $Ma6$  以上时,飞行器机体迎风表面的恢复温度将在  $1000^{\circ}C$  以上。

临近空间(高)超声速飞行器除了飞行速度较高之外,还需同时满足远程的总体技术指标要求,以达到远程打击、投送、侦察的战略目的,因而其飞行时间要比以往的一次性、短射程飞行器要长的多(相对于飞机的飞行时间、重复使用次数要短);另外,临近空间超声速飞行器在高速、长时、大机动的飞行全程中,机体结构同时也会承受严酷的气动力载荷和振动、噪声等动载荷。严酷的静、动、热载荷以及远程或重复性使用的使



图1 美国SR-71超声速侦察机

Fig.1 Supersonic reconnaissance aircraft SR-71 of USA



图2 印、俄联合研制的布拉莫斯超声速导弹

Fig.2 Supersonic missile BRAHMOS of India and Russia



图3 美国正在研制的SR-72高超声速侦察机

Fig.3 High supersonic reconnaissance aircraft SR-72 of USA

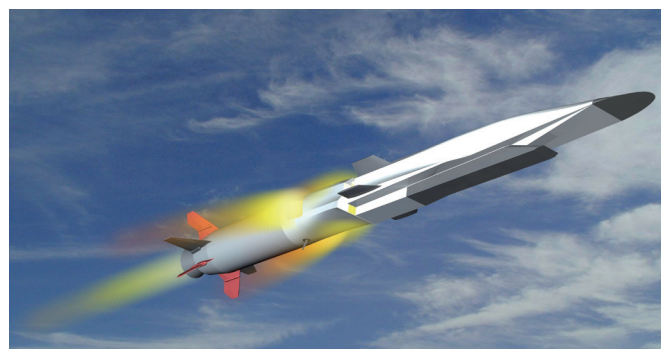


图4 美国正在研制的X-51A超声速远程打击飞机

Fig.4 Long-range supersonic aircraft X-51A of USA

役特点,给临近空间超声速飞行器的机体结构选材、设计、制造带来了严峻的挑战,轻质热强材料、结构与制造加工成形工艺成为临近空间超声速飞行器研制所必须面对和解决的关键技术之一。

### 临近空间超声速飞行器结构选材分析

对于飞行速度在 Ma3~Ma4.5 的临近空间超声速飞行器来讲,在长时高速飞行过程中,机体表面大面积区域温度分布为 300~700℃,而驻点及迎风面的机体头部、翼面前缘等局部温度可能达到 700℃ 以上。严酷的力/热载荷条件与质量约束对临近空间超声速飞行器设计提出很高的要求,机体承载结构必须选择轻质耐高温的结构材料。能够满足 Ma3~Ma4.5 临近空间超声速飞行器机体结构耐温要求的材料主要包括高温合金,钛合金,钛铝金属间化合物材料, C/C、C/SiC 陶瓷基复合材料等。表 1 中从材料轻质性、热强性、

材料成本、结构件制造加工工艺性以及当前工程应用成熟性等方面对以上材料在临近空间超声速飞行器上的应用优劣进行了对比分析。

高温合金材料密度较大,难以满足轻质的机体结构应用要求; Ti<sub>2</sub>AlNb、Ti<sub>3</sub>Al、TiAl 等钛铝金属间化合物材料使用温度可达到 650~900℃,但是该类材料较低的室温塑性问题仍然制约着其工程应用的成熟性; C/C、C/SiC 耐温 1000℃ 以上,但材料的抗氧化、性能稳定性、制造成形工艺技术还没有得到较好的解决,且材料和制造成本较高,短期内难以大面积应用到飞行器研制中;中/高温钛合金以耐高温、低密度、高比强度、高比刚度、制造加工成形工艺优良的优点成为临近空间超声速飞行器的首选材料。

### 临近空间超声速飞行器对钛合金材料的需求分析

钛合金主要是随着航空工业的发展而发展起来的,而高温钛合金或

热强钛合金更是在航空发动机的需求牵引下而发展的。长期以来,受制于航天飞行器研制与装备的紧迫性,我国在临近空间超声速飞行器轻质耐高温机体结构设计时,大多继承或沿袭所引进型号及已研制型号的钛合金体系,对所选用钛合金材料的性能大多参考航空钛合金体系标准,而没有形成航天专用的高温钛合金材料体系。

航空用钛合金材料体系主要包括两方面,一是机身承载结构用钛合金,主要关注钛合金材料在中温、中等应力、重复使用条件下的疲劳性能;二是发动机压气机叶盘、叶片、机匣及加力燃烧室等用高温钛合金,主要关注钛合金材料的蠕变性能、热稳定性、疲劳性能和损伤容限。而临近空间超声速飞行器作为一次性或重复使用次数远小于飞机的飞行器,所用钛合金体系主要关注材料在高温、大应力作用下的强度极限和短时蠕变与持久性能<sup>[4]</sup>,所应用条件与航空钛合金体系应用环境存在明显的不同,传统航空用钛合金材料体系在临近空间超声速飞行器短时、高温、大应力使役特征下的适用性需要进行深入的应用研究;另外,临近空间超声速飞行器与飞机及航空发动机的结构形式也区别较大,临近空间超声速飞行器机体结构大多为薄壁蒙皮+内壁桁条的硬壳式结构,而飞机机体结构大多为框架式结构,航空发动机压气机的叶盘、叶片、机匣等大多为模锻结构。航天与航空飞行器结构形式不同,因此对钛合金材料规格品种、性能的需求不同,机体结

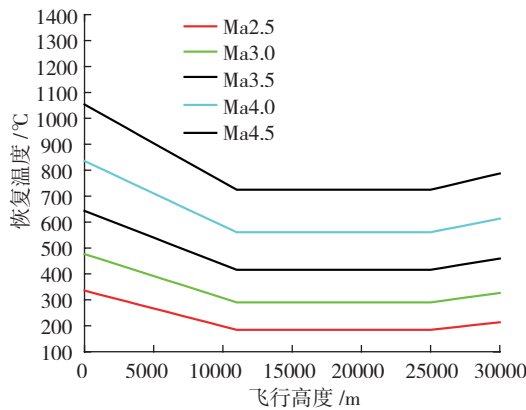


图5 飞行器机体表面恢复温度随速度和高度变化规律

Fig.5 Recovery temperature changes of aircraft surface with speed and height

表1 适用于临近空间超声速飞行器的耐高温结构材料应用可行性对比

材料	选材原则				
	轻质性	热强性	材料成本	结构件制造加工工艺性	工程应用成熟性
高温合金	×	√	中	√	√
C/C、C/SiC 陶瓷基复材	√	√	高	×	×
钛铝金属间化合物	√	√	偏高	×	×
钛合金	√	√	中	√	√

构的制造加工成形工艺也明显不同。表2中从使役特点、机体结构形式、对钛合金材料的性能要求、机体结构件制造加工成形工艺、成本等方面对临近空间飞行器与航空飞行器用钛合金的差异进行了对比分析。

### 临近空间超声速飞行器短时热强钛合金应用研究建议

如上所述,航天飞行器用钛合金材料的选择大多沿用航空钛合金材料体系,但临近空间超声速飞行器与飞机的使役特征又明显不同,对钛合金材料的需求也不同。因此,对于某一临近空间超声速飞行器的设计与研制来讲,材料是基础,结构为灵魂,工艺是关键,如何选择合适的钛合金材料作为机体结构选材方案,需要以结构设计方案和工艺可实现性为基线,对材料的适用性开展大量的应用研究,必要时还需根据超声速飞行器的选材要求研制专用的热强钛合金材料。以下从性能需求、制造加工成形工艺需求、成本需求3方面对临近空间超声速飞行

器用短时热强钛合金材料的应用研究思路给出建议。

(1)以应用需求为牵引,系统评价所选热强钛合金材料的特点和性能适用性。

从国内外的钛合金发展历程来看,高温钛合金主要还是Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si体系,且大多为近 $\alpha$ 型合金,即合金中的合金化元素大部分为 $\alpha$ 稳定元素, $\beta$ 稳定元素的加入量较少,合金中的 $\beta$ 相的体积分数只占5%左右,典型的代表为IMI834、IMI829、Ti-1100、BT-36、Ti55和Ti60钛合金。600℃高温钛合金中Si的加入量较高,其中一部分固溶到合金中,对合金起固溶强化作用;另一部分以硅化物的形式析出,由于硅化物趋向于在位错附近偏聚,阻止位错的攀移,从而提高合金的蠕变抗力,但硅化物的析出对合金的塑性会有不利影响。 $\beta$ 稳定元素Mo对 $\beta$ 相具有中等的固溶强化作用,在高温钛合金中加入少量的Mo(一般<1%),可使合金具有强度、高温蠕变性能和热稳定性的更佳匹配。为了提高

合金的综合力学性能和改善工艺性能,还在高温钛合金中加入一些其他合金元素。如在IMI834合金中还加入了0.7%的Nb,在保证热稳定性的同时,最大限度地提高合金的强度和抗氧化性能;为了扩大两相区的热加工和热处理工艺窗口,IMI834合金中还加入了0.06%的C,通过在两相区热处理使双态组织中的初生 $\alpha$ 相含量在5%~50%范围内,使其一次退火温度区间可以达到42℃,而IMI829合金一次退火的温度区间仅为22℃。Ti60钛合金中加入了1%的Ta,提高了合金的抗氧化性能和蠕变抗力。表3中列出了目前国内几种典型600℃钛合金的成分与性能特点<sup>[5]</sup>。

深入了解高温钛合金的成分和组织性能特点,不仅对于合金材料的设计非常重要,而且对于临近空间超声速飞行器的设计者也至关重要。临近空间超声速飞行器用钛合金高温、大应力、短时与航空飞行器中/高温、中等应力、长时并重复使用、良好热稳定性的使用特点明显不同。在500~700℃的服役温度环境条件下,临近空间超声速飞行器对各型钛合金的使用已达到合金的“耐温极限”,比航空飞行器用钛合金的使用温度“门槛”高出约50~100℃;在严酷的静、动、热载荷环境条件下,临近空间超声速飞行器结构件的应力值较大,接近甚至局部超出所用钛合金材料的屈服强度,而航空飞行器机体结构超过材料的屈服强度是决不允许的;临近空间超声速飞行器大多短时、一次性使用,对钛合金材料的热稳定性和长时高温蠕变/疲劳性能要求不高,而航空飞行器更加关注所用钛合金材料的热稳定性以及在中/高温、中等应力条件下的蠕变和持久性能。因此,发展临近空间超声速飞行器用短时热强钛合金,一方面需要针对其结构零部件的温度和力学性能需求,开展适用于短时高温工

表2 临近空间超声速飞行器与航空飞行器用钛合金对比分析

分类	航天应用	航空应用
使役特点	温度高(最高达700℃); 大应力(近材料高温强度极限); 时间短(几小时)	温度低(600℃); 中小应力(材料强度裕度较大); 时间长(几百到上万小时)
结构形式	薄壁硬壳式结构	框架式结构(机体); 模锻厚实结构(发动机部件)
对材料的力学性能要求	抗短时氧化; 瞬时强度较高; 高温短时持久(大应力)性能高; 抗高温短时蠕变(大应力)性能好	热稳定性能高; 高温长时持久(小应力)性能高; 抗高温长时蠕变(小应力)性能好; 抗疲劳性能优良
主要结构件制造加工成形工艺	钣金热成形; 铸造; 小型锻件、棒材机加; 焊接	模锻; 大型锻件、棒材机加; 钣金热成形; 焊接
材料品种	薄板(0.5~3mm厚)为主; 铸造母合金用量高; 小棒材和锻件为辅	棒材( $\phi$ 20~350mm)和锻件为主; 铸造母合金用量较少; 薄板(1~2mm厚)为辅
材料利用率	较高	偏低
材料与结构件制造成本控制	较严	宽松

表3 国内外高温钛合金的成分及性能特点

钛合金	Al 含量 /%	Mo 含量 /%	$\beta$ 转变温度 / $^{\circ}\text{C}$	成分特色	主要性能特点
IMI834	8.7	0.7	1045	加入有少量的 $\beta$ 稳定元素 Mo 和 Nb; 加入 0.06% 的 C	在 $\alpha + \beta$ 两相区具有宽的热处理工艺窗口; 良好的抗高温蠕变与疲劳性能
Ti-1100	8.6	0.4	1015	Mo 含量较少; Si 加入量较多; 对杂质元素 Fe 和 O 控制严格	良好的抗高温蠕变性能
BT-36	8.5	2.7	980	加入 5% 的 W; 含有 0.1% 的稀土元素 Y	良好的抗高温蠕变性能; 细晶强化结构
Ti60	8.5	1.0	1040	加入有 1% 的 Ta; O 含量控制严格	良好的热稳定性和蠕变性能匹配; 高抗氧化性

作的合金成分体系设计研究,解决包括合金体系选择、合金元素对主要性能影响因素的计算与设计、合金元素成分优化等基础问题;另一方面,需要以应用需求为基础,对临近空间超声速飞行器服役环境条件下所用钛合金的力学性能进行系统的测试,获得完整、可信的高温拉伸性能、短时/高温/大应力条件下的蠕变与持久性能等性能数据,对钛合金材料的适用性进行科学的评价。临近空间超声速飞行器用钛合金的成分体系设计和应用评价是一个相互耦合、迭代的过程。

(2) 根据结构形式与特点,强力攻关复杂外形薄壁钛合金结构的制造加工成形工艺。

钛合金在室温下屈服强度高,塑性相对较差,因此大多数钛合金结构均通过热成形工艺来制造加工。钛合金结构件的成形工艺方法有很多,包括热压/热弯/热滚、铸造、超塑成形/扩散连接(SPF/DB)、热等静压/激光等粉末冶金近净成形、旋压成形、多点模成形、喷丸成形、温/热介质成形等。钛合金结构制造加工成形工艺技术是当今世界最能代表先进制造技术水平的高科技领域之一,技术难度大、耗资大、研究周期长。尤其对于钛合金而言,由于其焊接难度很大,更适合做成整体构件,大型化、薄壁、复杂、整体、精密制造的壁板结构成形工艺技术已经成为国内外航空、航天飞行器用钛合金结构件制造技术的发展趋势,如熔模精密铸

造、SPF/DB、粉末冶金近净成形等。熔模精密铸造是钛合金结构最成功,也是应用最广泛的近净成形技术之一,它具有铸件表面质量好、尺寸精度高、原材料利用率高等突出优点,有利于钛合金结构件的整体强度、刚度、批次稳定性保证以及生产制造效率的提高<sup>[6]</sup>;超塑成形及超塑成形/扩散连接的整体结构具有成形性好、设计自由度大、成形精确、无残余应力、零件数量少等优点,在减轻飞行器结构质量、降低生产成本方面显示出极大的优越性,被誉为现代航空航天工业生产的开创性技术,广泛应用于航空航天飞行器的壁板、舱门、口盖、叶片、舵和翼等重要结构件<sup>[7-8]</sup>;粉末冶金近净成形构件密度很高且分布均匀,能够制造长径比很大、形状复杂、薄壁和近形的零件,且制件性能优异,无织构、偏析,结构内应力小,尺寸稳定性好。对于钛合金来讲,通过粉末冶金热等静压方法成形近净形零件,可保证在低于钛合金相变温度下得到完全致密的构件,避免了有害的过热  $\beta$  相的出现<sup>[9]</sup>。

临近空间超声速飞行器用高温钛合金的使用性能主要指合金材料经热成形后主要力学性能的保持程度和工艺性能。

必须结合合金的成分设计,对合金的热成形机理、影响因素等开展深入的研究。一方面,合理设计合金成分,降低钛合金构件的热成形温度;另一方面,探索高温钛合金构件热成形工艺窗口与热处理工艺窗口之间

的关系。同时,结合飞行器构件的使用环境、力学性能、制造精度、制造成本、制造效率等要求,选择适宜的整体壁板成形工艺技术,并对其存在的难点进行深入的研究与攻关,对于飞行器构件的整体性能保证、工程化装机应用推进具有重要意义。

(3) 围绕研制全流程,着力控制钛合金结构的制造成本。

钛合金构件的制造成本主要由材料成本和生产制造成本构成<sup>[10]</sup>。就目前航空、航天用钛材市场价格来看,锻坯、大宽幅中/薄厚度板材、棒材、铸造用母合金等达到 800~2000 元(RMB)/kg,而各种钛合金零部件的制造加工费用达到 10000~30000 元(RMB)/kg。就钛合金材料成本控制来讲,设计者需要对各种钛合金的成分与性能有着深入的了解,在临近空间超声速飞行器机体结构设计上,尽量选择贵重金属元素含量少、力学性能不降低,同时具有良好工艺性能的钛合金材料;钛合金构件生产制造成本控制,是超声速飞行器研制流程中成本控制最为重要的一方面,是降低研制成本的最有效途径。首先,在结构设计上就要选择制造加工成形工艺相对成熟、制造加工成形效率高、材料利用率高的钛合金构件制造工艺方法;其次,在制造加工工艺研究与制定上,要对材料利用率高、生产效率高的钛合金整体壁板结构制造加工成形工艺开展预先的攻关研究,提高并稳定钛合金整体壁板结构的制造合格率,减少后续

量产过程中的工艺反复,控制因产品报废带来的成本增加。

## 结论

当前,临近空间超声速飞行器成为世界各国重点发展的项目之一,而短时热强钛合金材料是临近空间超声速飞行器机体结构设计与研制的重要基材。中/高温钛合金材料的研究和在超声速飞行器上的应用,应以实际工程应用为中心,坚持材料、设计、工艺一体化思想,对相关钛合金材料的适用性开展系统的应用研究,努力提高材料的工业化生产与应用水平,选择优化的热加工工艺窗口,全面提高大尺寸复杂零部件的制造加工成形工艺成熟度和产品制造合格率,控制并降低钛合金构件的综合成本,从而为临近空间超声速飞行器的成功研制与批量生产提供坚实的技术支持。

## 参考文献

[1] 张绪虎,单群,陈永来,等.钛合金在航天飞行器上的应用和发展[J].中国材料进展,2011,30(6):28-32.

ZHANG Xuhu, SHAN Qun, CHEN Yonglai, et al. Application and development of titanium

alloys for aircrafts[J]. Materials China, 2011, 30(6): 28-32.

[2] 钱九红.航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J].稀有金属,2000,24(3):218-223.

QIAN Jiuhong. Application and development of new titanium alloys for aerospace[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2000, 24(3): 218-223.

[3] 黄张洪,曲恒磊,邓超,等.航空用钛及钛合金的发展及应用[J].材料导报,2011,25(1):102-107.

HUANG Zhanghong, QU Henglei, DENG Chao, et al. Development and application of aerial titanium and its alloys[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 102-107.

[4] 张伟堂.钛合金短时高温蠕变与持久行为初步研究[J].航空制造技术,2013,56(16):119-125.

ZHANG Weitang. A preliminary research on the short-time and high temperature creep and endurance behaviors of titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 119-125.

[5] 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.

WANG Qingjiang, LIU Jianrong, YANG Rui. High temperature titanium alloys: status and perspective[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 1-26.

[6] 阎峰云,陈基东,马孝斌.钛合金熔模铸造技术[J].中国铸造装备与技术,2009(2):1-5.

YAN Fengyun, CHEN Jidong, MA Xiaobin. The investment casting of titanium alloy[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2009(2): 1-5.

[7] 李志强,郭和平.超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J].航空制造技术,2010,53(8):32-35.

LI Zhiqiang, GUO Heping. Application progress and development tendency of superplastic forming/diffusion bonding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(8): 32-35.

[8] 曾元松.先进航空板材成形技术应用现状与发展趋势[J].航空科学与技术,2012(1):1-4.

ZENG Yuansong. Application and development trend of advanced sheet metal forming technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(1): 1-4.

[9] 钟仁显,卢百平.金属粉末成形技术若干进展[J].材料导报,2008,22(3):40-43.

ZHONG Renxian, LU Baiping. Some development of metal powder forming technology[J]. Materials Review, 2008, 22(3): 40-43.

[10] 朱知寿,商国强,王新南,等.低成本高性能钛合金研究进展[J].钛工业进展,2012,29(6):1-5.

ZHU Zhishou, SHANG Guoqiang, WANG Xinnan, et al. Research and development of low cost and high performance titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(6): 1-5.

通讯作者:张伟堂, E-mail: m13426063569@163.com。

# Analysis on Application of Short-Time and Heat-Resistant Titanium Alloys on Near-Space Supersonic Aircraft

ZHANG Weitang

(Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

**[ABSTRACT]** The harsh performance and requirements of near-space supersonic aircraft (NSSA) pose a serious challenge for the materials selection. Short-time heat-resistant titanium alloys with high temperature, low density, high specific strength, high specific stiffness, excellent manufacturing and processing forming properties has become the preferred material for the manufacturing of NSSA. Based on the performance and materials selection requirements of the NSSA, starting from the needs of practical engineering application in three aspects of properties, manufacturing cost and forming process, this article proposed some thoughts and suggestions concerning usage of short-time heat-resistant titanium alloys in the structures of aircraft, which aims to provide references for the material selection, design and development of the structure of NSSA.

**Keywords:** Near-space supersonic aircraft; Short-time and heat-resistant titanium alloy; Thermoforming; Military characteristic; Mechanical property

(责编 玲犀)