

航天飞机主发动机用材料

航天飞机尾部有三台以液氢液氧为推进剂的液体火箭发动机,称之为主发动机。三台主发动机的结构是完全一样的。发动机具有两个预燃室,涡轮泵输出的大部分燃料和小部分氧化剂在预燃室内进行富燃料燃烧(氧:氢约为0.8),燃气温度在600~700℃左右,用来驱动涡轮,然后排入主燃烧室与其余的氧化剂进行补充燃烧,形成高温高压燃气从燃烧室喷口排出。三台主发动机合起来可以提供600多吨的推力。发动机中氢系统和氧系统的工作环境是极其恶劣的,这就对其材料提出了特殊而苛刻的要求。下面分别就氢系统和氧系统对材料的要求以及部分零部件的用材做一些介绍。

氢系统用材

氢系统用材主要应克服发动机启动/关车和载荷急剧变化而引起的强烈热振动,以及工作中的高温高压,特别是氢腐蚀。因此,氢系统用材一般要满足:具有氢脆抗力;具有平均应力下从低温到高温的较好的高周疲劳寿命;在氢环境中具有较好的低周疲劳寿命;热疲劳阻力;在7.5小时内承受高应力;较好的焊接和机械加工性能等。为满足这些要求,主发动机中广泛使用Ni、Co和Fe-Ni基高温合金。

主发动机用的高温合金主要有:Inconel 718、Incoloy 903、Incoloy 88、DS MAR-M 246(加钎)、TMP Waspaloy、Haynes 188、Rene'41和316L不锈钢。其中Inconel 718和TMP Waspaloy的氢脆现象严重;氢对Haynes 188和DS MAR-M 246有轻微的影响;而Incoloy 903、Incoloy 88和316L不锈钢则无氢脆现象。图1示出上述部分合金在主发动机头部的应用。

Inconel 718合金在主发动机中的应用是很多的,例如:高压燃料涡轮泵和高压氧化剂涡轮泵壳体、喷注器主体及其喷嘴歧管和燃烧室承力套等都是由它制成的。这种Fe-Ni基高温

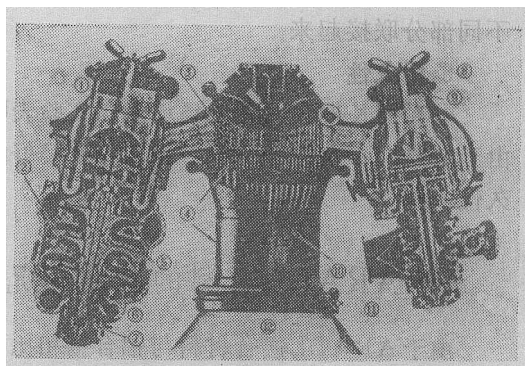


图1 主发动机头部用材

①燃料预燃室;②MAR-M246(Hf);③Haynes 188;④Inconel 718;⑤TMP Waspaloy;⑥氢涡轮泵;⑦440C不锈钢;⑧氧化剂预燃室;⑨304不锈钢;⑩NARLOY-Z;⑪氧化剂涡轮泵;⑫主燃烧室

合金用于涡轮机时,采用常规热处理:855℃/1小时+718℃/8小时+622℃/8小时,容易形成 δ 相,不仅会降低断裂韧性,而且还会使Inconel 718对氢敏感。为防止 δ 相的形成,改进了热处理规范,即1038℃/0.5小时+760℃/8小时+649℃/12小时,使之变成无 δ 相的合金。尽管如此,如果暴露于 H_2 中仍需要防止氢脆,为此要在暴露于 H_2 中的表面上镀一层铜。

燃烧室由内壁、外壁和承力套组成。内壁是铜-银-金合金(即NARLOY-Z)。这种材料在导热性、高温强度、延展性、稳定性和长寿命等方面都比较好。燃烧室内壁的外表面上铣有390个矩形截面(1.00 mm宽×2.54 mm深)的冷却槽。外壁用铜-镍合金制成,厚度约为1.3 mm。内外壁组成了用液氢进行再生冷却的冷却套。这样,燃烧室喉部的热流虽然高达163020000 W/m²,但是从燃烧区域到喉部区域的燃气壁面温度仍比较均匀,大约为536℃。承力套承受燃烧室的高压、喷管的推力、摆动载荷和侧向载荷等。由内、外壁构成的冷却套位于承力套的内侧。

发动机的高压燃烧涡轮泵和高压氧化剂涡轮泵在富氢气氛中以30000~40000 r/min运行,TMP Waspaloy合金涡轮盘靠4000 Pa至5000 Pa的 H_2 冷却,稳定阶段时的温度仍会达到649℃。为防止Waspaloy合金在氢气氛中性能

变坏,应在涡轮盘的榫槽和表面镀一层约1.5密耳厚的金。表面镀金价格昂贵,时间长,难于采用,并且在运行中容易磨损和脱落,从而导致运行过程中的氢致失效。因此,镀金层的整体性十分重要,需要严格控制工艺过程。

氧系统用材

在主发动机中,既使用气态氧,也使用液态氧,所以氧系统中的金属和非金属材料要具有下列特性:高的着火温度;好的急冷性能;低的冲击敏感性;高的导热性;能与氧产生反应;耐磨和抗点腐蚀;低的摩擦系数;金属表面应有较厚的氧化膜等。

表1列出主发动机氧系统用的几种有机材料的性能。

表 1 几种有机材料性能

材 料	温度 °C	抗拉强度 MPa	延伸率 %	弯曲强度 MPa
聚四氟乙烯	25	31.0	230	24.1
	-196	103.4	6.0	165.5
聚三氟氯乙烯	25	37.9	140	87.6
	-196	172.4	5.0	294.4
聚酰亚胺	25	44.8	6.5	68.9
	-196	68.9	2.2	—

对大多数聚酰亚胺材料来说,抗拉强度提高时往往伴随延伸率的下降,而延伸率又是影响密封材料性能的关键,所以在-196℃保持一定的延伸率是非常重要的。

氧化剂主活门示于图2。它主要用来控制液氧的流量和流速。这种球形活门的主要优点是流阻损失小。为满足长寿命和多次使用的要求,在这些球型活门上专门采用一种可收缩的密封结构。在球体开始转动之前,活门上的旋转机构先转动一个角度,使压紧在球体上的密封结构收缩,以消除球体与密封结构之间的摩擦和磨损。球体用Inconel718制成,密封件用聚三氟氯乙烯(Kel-F)制成。聚三氟氯乙烯

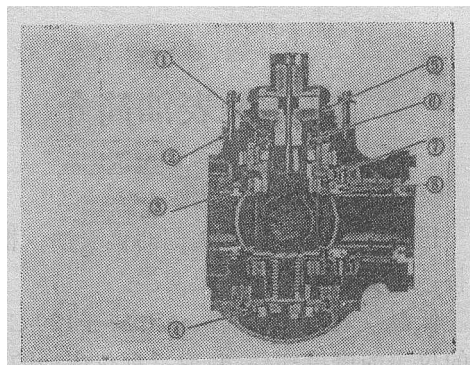


图 2 氧化剂主活门

①Vespel密封(sp-211);②含磷粘结干膜润滑;
③硅酸盐粘结干膜润滑;④导槽(TFE);⑤联轴器护圈
(TFE/FEP管材);⑥密封(A286-TFE涂层);⑦轴承
垫圈(GLASS TFE);⑧密封圈(Kel-F)

具有较低的冷态流动性、与氧的相容性、强度和低温韧性。氧化剂主活门的另一个重要密封件由E I Du Pont's Vespel sp-211制成。与含15%石墨的聚四氟乙烯,含40%氮化硼的聚四氟乙烯,含25%玻璃纤维的聚四氟乙烯和含15%石墨的聚酰亚胺相比,sp-211在-196℃和负载条件下,具有高的弹性模量,因而具有较大的变形抗力,同时还有优良的摩擦性和耐磨损性。玻璃纤维增强的聚四氟乙烯已成功地用在高速火箭发动机泵的轴承壳体上。近年来,这种材料又用来制造航天飞机主发动机低压和高压氧涡轮泵的轴承罩。轴承罩最苛刻的工作条件是:以28000r/min的转速暴露在600Pa压力的液态氧中。这种材料与氧有较好的相容性和抗冲击性能,而且还能实现自润滑。由于采用玻璃纤维加强,所以在-196℃时抗拉强度被提高到268.9MPa,弯曲强度提高到100.0MPa,均比聚四氟乙烯性能高。

预计,航天飞机的设计和生产将使新型金属和非金属复合材料有更广泛的用途。激光焊和电子束焊等先进的生产技术也会得到迅速发展。

(张 峰)