

发动机再生冷却结构和身部一体化设计

伍家威

(贵州航天朝阳科技有限责任公司, 贵州 遵义 563000)

摘要 现在的航天发动机对其再生冷却结构要求较严苛,一般要求其满足布局紧凑、质量轻、价格低廉、可靠性高、体积小等特点。为了满足上一级要求,需对现有产品进行改进设计,而现有的结构已经被改动到极致,改进提升空间不大。因此,使用本文提及的一种3D打印生成的再生冷却和身部一体结构设计,能够使产品满足要求。通过理论计算,经过仿真分析以及试验验证,计算结果与试验结果基本一致,满足发动机使用要求。

关键词 再生冷却结构 发动机 3D打印

中图分类号: V233.54

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)09-0118-03

传统的发动机再生冷却结构分为内夹套、外夹套、集液腔,通过多条真空电子束(一条肋一条焊缝)焊接固定在身部(燃烧室和喷管)上,该方式生产的产品不仅质量重、价格高昂、体积庞大、空间布局受影响,而且由于焊缝较多,生产合格率低,导致产品可靠性较差。为了解决这些问题,将再生冷却结构和身部设计成一个整体,避免了焊接,同时该方式可设计异形流道。

1 再生冷却和身部结构及原理

冷却剂通过导管流入再生冷却结构入口集液腔,从入口集液腔中均匀分散流入再生冷却槽道内,喷管尾部回液腔将冷却剂旋转180°,使得冷却剂重新流入再生冷却槽道内,最后冷却剂在出口集液腔聚集,从导管流出。再生冷却和身部结构见图1。

推进剂在身部内壁面燃烧,产生高温燃气(2200K),高温燃气传递到身部壁面,再通过壁面传递给再生冷却结构内的冷却剂。通过对流和辐射,降低身部温度,防止温度超过材料许用温度。同时冷却剂将吸收的热量重新带入燃烧室,提高了燃气利用率。

2 传统设计方式与优化后设计方式

传统的再生冷却结构分为身部、夹套、进口集液腔、出口集液腔和进出口接头。传统再生冷却结构形式见图2。

传统的再生冷却结构形式一般在身部外壁利用聚变铣刀加工出等深的槽道。再利用棒材加工出一个与身部外型面相同的夹套,同时加工出两个集液环槽。由于夹套和集液环槽与身部干涉,因此焊接前还需将这3个零件从中间对称切割成两个零件。最后将身部、

夹套、进出口集液腔、接头利用电子束焊接方式将其焊接成一个部件。为了防止再生冷却结构内液体将夹套挤压变形,还需对夹套和身部连接处进行焊接,一般焊接在身部每条肋上,以此加固再生冷却结构强度。

由于传统再生冷却结构需要加工、线切割、焊接等工序,其缺点明显:

1. 零件较多。一个再生冷却结构需要9个零件合成。
2. 焊缝较多。9个零件焊接在一起,均需要焊接方式将其拼接在一起,且身部每条肋均需要焊接。
3. 加工较复杂。为了将夹套、进出口集液腔和身部贴合,需加工工装用于固定加工的零件。
4. 耗材较多。每个零件均需用棒材掏空内部,加工成需要的形状。
5. 设计较困难。设计时为了让零件能够严丝合缝地贴合在一起,需精确计算尺寸链。
6. 优化较困难。受加工形式影响,产品能够优化的可能性较小。
7. 成本较高。由于需要设计工装,且为小批量产品,工装性价比较低。且电子束焊接费用较昂贵,浪费的材料成本也较高。
8. 可靠性较差。焊缝较多导致产品可靠性较差,容易出现质量问题;在承压时容易出现泄漏的可能。

为了解决以上问题,现通过优化结构设计来达到改进目的。通过对产品多次优化后,找到了一种能够同时解决以上问题的设计方法,及一体化设计。

优化后的再生冷却结构融入了身部内,将再生冷却结构和身部设计成了1个零件。通过优化设计,取消了传统的加工、切割、焊接方式。产品直接通过3D打印生产。

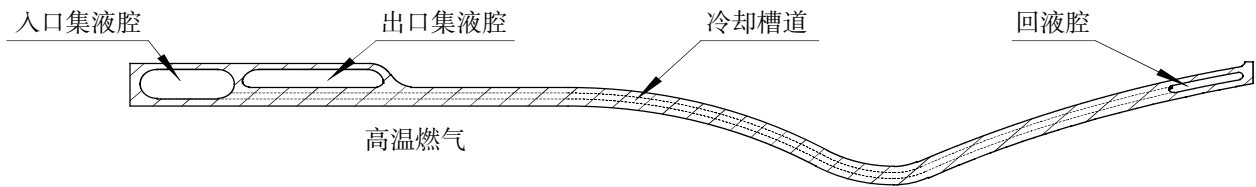
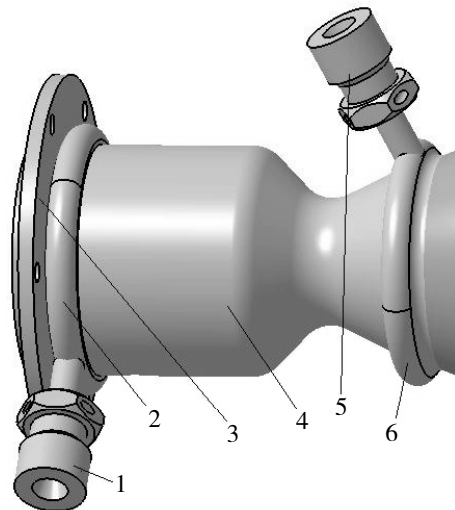


图1 再生冷却和身部结构



1、5- 进出口接头；2- 出口集液腔；3- 身部；
4- 夹套；6- 进口集液腔

图2 传统再生冷却结构形式

3 再生冷却和身部结构设计和生产

通过控制身部内壁面厚度、流道肋条厚度、冷却通道高度参数，再通过再生冷却结构通过下面的热流密度计算出冷却剂温升不超过 80℃、身部气体壁面温度不超过 900℃。

$$q_k = h_g (T_{aw} - T_{wg})$$

式中：

T_{wg} ——壁面温度。

T_{aw} ——近壁面气体温度。

h_g ——换热系数。

由于再生冷却结构内有大量流道，因此传统的加工方式，无法将该产品生产成一个零件。因此本产品通过 3D 打印生产出来，后期通过机加方式加工密封面。

本产品生成的难点在于控制 3D 打印后的粉末清理。通过合理设计再生冷却结构流道，减少流道内菱角和死角，使得产品清理粉末时没有粉末残留在流道内。同时对产品施加一个合理的振动，让挂在流道内的可松动颗粒物从产品内脱离出来。通过多次试验，确定了合适的材料，通过 X 光探伤发现不同材料生产

的产品中流道内可见颗粒物数量不同，最终通过试验发现了某高温合金生产的没有可见颗粒物。同时通过三维扫描发现高温合金打印的产品收缩不大于 0.2mm。

4 仿真验证

4.1 传热仿真

为研究不同材料对再生冷却传热影响，对不同材料（高温合金、钛合金、TD3）的再生冷却进行传热特性分析。

初始条件：

1. 发动机性能参数：发动机室压，推进剂流量等。
2. 发动机尺寸：发动机面积比，收缩比、冷却通道尺寸等。
3. 冷却剂性质：冷却剂在不同压力下的沸点、导热系数、粘性系数等。

4. 发动机材料性质：发动机再生冷却结构材料（高温合金、钛合金、TD3）在不同温度下的导热系数等。

4.1.1 高温合金材料

经传热分析计算，高温合金材料再生冷却结构各温度沿身部轴向的分布曲线。

冷却剂平均温度范围为 298.15K (25℃) ~ 371.55K (98.4℃), 最低冷却剂平均温度在冷却剂入口处取得, 最高冷却剂平均温度在再生冷却结构出口处取得。

燃气壁面温度范围为 452.36K (179.21℃) ~ 790.86K (517.71℃), 最低燃气壁面温度在发动机入口处取得, 最高燃气壁面温度在发动机喉部处取得。

液体壁面温度范围为 420.01K (146.86℃) ~ 570.83K (297.68℃), 最低液体壁面温度均在发动机入口处取得, 最高液体壁面温度在发动机喉部处取得。

4.1.2 钛合金材料

经传热分析计算, 钛合金材料再生冷却结构各温度沿身部轴向的分布曲线。

冷却剂平均温度范围为 298.15K (25℃) ~ 365.15K (92℃), 最低冷却剂平均温度在冷却剂入口处取得, 最高冷却剂平均温度在再生冷却出口处取得。

燃气壁面温度范围为 459.62K (186.47℃) ~ 864.44K (591.29℃), 最低燃气壁面温度在发动机入口处取得, 最高燃气壁面温度在发动机喉部处取得。

液体壁面温度范围为 410.37K (137.22℃) ~ 543.96K (270.81℃), 最低液体壁面温度均在发动机入口处取得, 最高液体壁面温度在发动机喉部处取得。

4.1.3 TD3 材料

经传热分析计算, TD3 材料再生冷却结构各温度沿身部轴向的分布曲线。

冷却剂平均温度范围为 298.15K (25℃) ~ 365.78K (92.63℃), 最低冷却剂平均温度在冷却剂入口处取得, 最高冷却剂平均温度在再生冷却结构出口处取得。

燃气壁面温度范围为 458.70K (185.55℃) ~ 848.82K (575.67℃), 最低燃气壁面温度在发动机入口处取得, 最高燃气壁面温度在发动机喉部处取得。

液体壁面温度范围为 411.40K (138.25℃) ~ 557.15K (284.0℃), 最低液体壁面温度均在发动机入口处取得, 最高液体壁面温度在发动机喉部处取得。

4.1.4 小结

从冷却剂温度角度考虑, 通过计算得到高温合金发动机冷却通道中冷却剂平均温度上升为 73.4℃; 钛合金发动机冷却通道中冷却剂平均温度上升为 67℃; TD3 发动机冷却通道中冷却剂平均温度上升为 67.6℃。冷却通道出口的平均温度低于该压力下冷却剂沸腾温度, 上述材料的发动机均可正常工作。从成本考虑, 高温合金为 3 种材料中价格最低的材料。

首先, 从冷却剂化学性质分析, 对肼类冷却剂的液壁温度而言, 该温度不得超过 600K (326.85℃), 否则肼类燃料将因分解导致爆炸, 本计算中所有发动

机液壁温度在上述要求范围内。

其次, 将液壁温度与冷却剂沸点相比, 虽然通过本计算得到的高温合金、钛合金、TD3 材料的发动机喉部附近液壁温度分别比该压力下的冷却剂沸腾温度高 93.68K、66.81K、80K, 但在计算液体壁面与冷却剂时, 本计算采用了单相对流模型, 即该模型在液壁温度低于冷却剂沸腾温度时使用。但若液壁温度升高至该压力下的沸腾温度时, 接触壁面的液体因达到了沸腾温度而开始汽化, 开始产生微小气泡, 但由于主流温度未达到沸腾温度, 进入主流体的微小气泡很快冷凝消失, 即进入了泡沸腾状态。进入泡沸腾状态后, 液体壁面与冷却剂间的对流换热系数会迅速增加, 大大超过单相对流换热模型内取定的对流换热系数, 对流换热能力大大增加, 从而会引起冷却剂平均温度上升, 而液体表面壁温与燃气表面壁温有所下降。因此, 在本计算的初始条件下, 可认为高温合金、钛合金、TD3 材料发动机冷却剂工作在泡沸腾状态下, 液壁温度满足使用要求。

4.2 强度仿真

4.2.1 再生冷却结构内表面强度仿真

假设身部内承受 2MPa 内压, 再生冷却结构内承受压强为 3 MPa, 工作温度为 673.15K 等条件后, 使用高温合金材料, 经应力分析计算。

4.2.2 再生冷却结构外表面强度仿真

经应力分析计算, 高温合金材料再生冷却外壁各强度沿夹套轴向的分布云图, 再生冷却结构外壁平均强度范围为 0.1551MPa ~ 128.3MPa。

4.2.3 小结

通过仿真计算, 材料长时间工作温度在 673.15K, 本方案材料的预估所受强度低于 128.3 MPa, 远远小于材料的屈服强度。

5 再生冷却和身部结构试验

产品进行了 20MPa 的水压试验, 试验后再生冷却结构保压压力 5MPa, 保压时间 5min, 未发现泄漏和明显变形情况。

用水代替推进剂, 通过对超过 70 件再生冷却结构的流阻试验, 发现其流阻均在 0.4MPa 以下, 比传统的再生冷却结构流阻低 0.1MPa。

产品装配在发动机上进行了超过 100 台次热试车试验, 累计点火时间超过 3000s 和累计点火次数超过 26000 次。单台产品最长点火时间超过 400s, 点火次数超过 5000 次。试验后检查产品外观良好、结构完好。