

# 3D 打印接头力学分析与验证

刘培风

(北京飞机维修工程有限公司 北京 100000)

**摘要:** 3D 打印亦被命名为增材制造技术,其本质上也就是一种借助逐层建立材料这一形式直接由数字模型生产零部件的新手段。目前 3D 打印技术已经在航空航天和民用方面得到了大量的应用。本文采用试验和仿真相结合的方法对某型飞机上使用的 3D 打印钛合金接头的静力学性能进行了研究。本文主要工作包括两个方面。

一、根据接头的真实受力情况,设计相应的结构静力学试验方案,根据试验方案进行 3D 打印接头和铸造接头两种形式的静力试验。测量关键点的应变和位移,比较两个结构的静力学特性。

二、使用有限元软件建立 3D 打印接头和铸造接头的三维有限元模型,按照真实的受力情况施加边界条件,对两种结构形式的静力学性能进行分析。将分析得到的应变和位移与试验结果进行比较,验证了分析方法的正确性。

**关键词:** 3D 打印;金属材料;静力试验;有限元仿真

## 第一章引言

### 1.1 研究的背景和意义

本文对某型无人机发动机机支座接头进行静力学分析。该发动机支座有两个,一个是通过铸造的结构相对简单的铸件,一个是结构经过拓扑优化后采用 3D 打印技术制造的接头。通过对比两种结构在三向载荷作用下的应变和位移特性,可以分析两种结构设计的优劣,为发动机支座结构设计分析提供依据。

### 1.2 主要研究内容

本文采用试验和仿真相结合的方法对某型飞机上使用的 3D 打印钛合金接头的静力学性能进行了研究。本文主要工作包括以下两个方面。

(1) 确定试验方案。根据接头结构在使用过程中受到的载荷情况,设计合理的试验方案,并确定试验过程中需要测量的应变、位移数据。

(2) 建立 3D 打印接头的有限元模型,分析结构的应力与位移,与试验得到的数据进行对比。<sup>[1][2]</sup>

## 第二章 3D 打印钛合金接头静力学试验研究

根据结构的受力情况,开展接头结构静力试验,校验接头结构在设计载荷指标下的强度、刚度等相关性能。结构静力试验共有三个试验状态。试验件底部通过螺钉固定住,在接头上部连接孔上施加三个方向的载荷。

### 2.1 试验件概述

试验件有两种结构,一种是铸造接头,如图 2.1 所示。另一种是 3D 打印接头,如图 2.2 所示。两种结构形式不同,主要原因是 3D 接头经过拓扑优化后结构复杂,铸造无法加工。

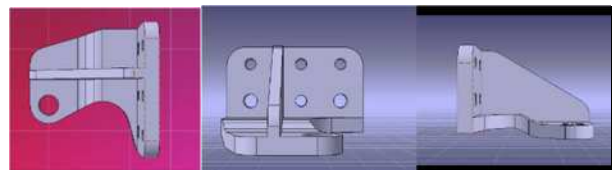


图 2.1 铸件接头

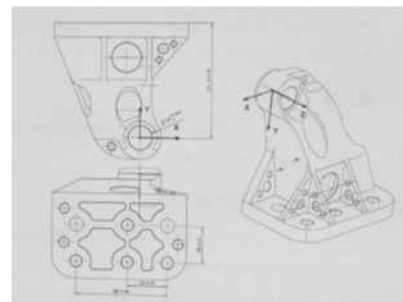


图 2.2 3D 打印接头

### 2.2 试验设备与试验方案

#### 2.2.1 试验设备

此次试验的加载系统采用南京航空航天大学 16 通道多点协调加载设备,检测系统采用江苏省华东测试技术企业的动态应变仪,试验所用的检测仪器,都有测试证书,并且都处于有效期内。

表 2.1 试验加载及测试设备表

| 序号 | 设备名称     | 规格牌号          | 精度       | 有效期/合格  | 数量 | 备注        |
|----|----------|---------------|----------|---------|----|-----------|
| 1  | 多点协调加载系统 | MTS-AeroST    | ± 0.5%FS | 2018.12 | 1  | 100kN 作动筒 |
| 2  | 载荷传感器    | MTS-661.20F   | 0.5%     | 2018.12 | 3  |           |
| 3  | 激光位移传感器  | OD2-P120W60U2 | 0.5%     | 2018.12 | 3  |           |

|   |       |        |                         |         |   |  |
|---|-------|--------|-------------------------|---------|---|--|
| 4 | 动态应变仪 | DH3820 | $\pm 2 \mu \varepsilon$ | 2018.12 | 1 |  |
|---|-------|--------|-------------------------|---------|---|--|

2.2.2 试验方案

(1) 预试试验

每个工况试验前都需要进行预试, 预试试验载荷取 30%Psj ( Psj 为设计载荷), 每个试验状态预试 3 次。预试试验目的是检查试验的加载系统与试验数据测量系统是否满足试验的要求, 试验件的受力状况是否处于正常的状态。预试步骤中检验试验系统性能是否良好。在预试试验达到试验需要后, 才可以开展正式试验。

(2) 正式试验

正式试验按照试验状态 2、试验试验状态 3、试验状态 1 的顺序进行。每个试验状态开展三次正式试验。具体试验步骤如下:

首先, 检查试验件安装状态及试验仪器线路连接情况。检查无异常后, 打开电源, 打开测量设备, 检查其工作状态。

第二步, 开始调零。将载荷加载到 10%Psj, 应变、位移调零。

第三步, 开始加载载荷。试验以分级加载的形式加载, 分级加载按如下顺序进行, 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%, 每级载荷保持 5s, 数据采集使用动态采集, 采集频率为 5Hz。每个状态开展三次正式试验。

2.2.3 数据测量方案

试验过程需要对应变和位移进行测量, 测量采用动态采集, 采集频率为 5Hz。

应变测点如图 2.3 所示, 共有 3 个应变片。其中 1#应变片 A 向 (0 度方向) 沿着 z 向, C 向 (90 度方向) 沿着 x 向; 2#、3#应变片 A 向 (0 度方向) 沿着 z 向, C 向 (90 度方向) 沿着 -y 向。

位移测点如图 2.4 所示, 共有 3 个方向位移。其中 1#位移测量 z 方向位移, 2#位移测量 x 方向位移, 3#位移测量 y 方向位移。位移测量正方向与坐标轴正方向相同。

位移测量 z 方向位移测量点在加载轴的端部, 轴端部位移受到 x 方向和 y 方向加载夹头的影响, 测量数据变化较大。位移测量 y 方向由于加载支座的影响, 无法直接测量, 实际测量时通过在接头

顶部粘帖引伸铝片 (铝片延伸长度 110mm), 在加载支座外部测量。

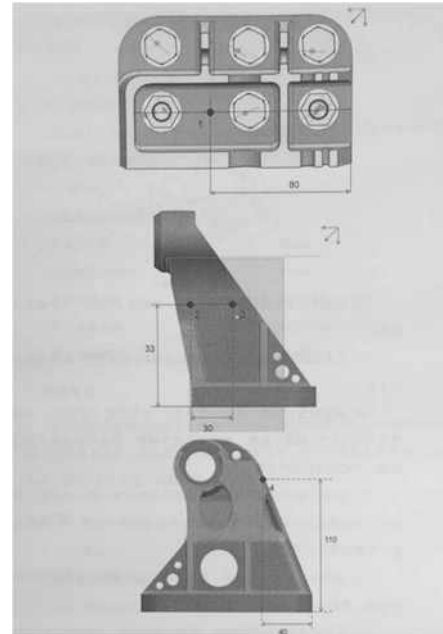


图 2.3 应变测量示意图

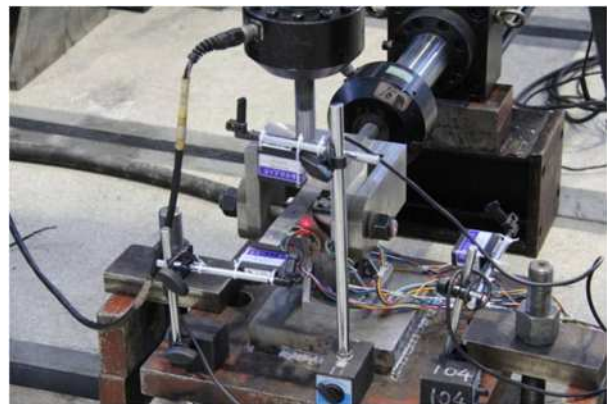


图 2.4 位移测量现场图

表 2.2 加载方案

| 序号   | 试验情况  | 测量    | 试验目的                         | 边界条件 | 载荷              |
|------|-------|-------|------------------------------|------|-----------------|
| 状态 1 | Case1 | 应变、位移 | 消除安装间隙、加载测量等相关干扰, 确认后续试验加载状态 | 底部固支 | $F_x = -50000N$ |
|      | Case2 | 应变、位移 | 考核接头在状态 1 时结构强度和变形           |      | $F_y = -15000N$ |
|      | Case3 | 应变、位移 | 考核接头在状态 1 时结构强度和变形           |      | $F_z = -7500N$  |
| 状态 2 | Case1 | 应变、位移 | 消除安装间隙、加载测量等相关干扰, 确认后续试验加载状态 | 底部固支 | $F_x = -36450N$ |
|      | Case2 | 应变、位移 | 考核接头在状态 2 时结构强度和变形           |      | $F_y = -20475N$ |
|      | Case3 | 应变、位移 | 考核接头在状态 2 时结构强度和变形           |      |                 |
| 状态 3 | Case1 | 应变、位移 | 消除安装间隙、加载测量等相关干扰, 确认后续试验加载状态 | 底部固支 | $F_x = -79500N$ |
|      | Case2 | 应变、位移 | 考核接头在状态 3 时结构强度和变形           |      | $F_y = -7800N$  |
|      | Case3 | 应变、位移 | 考核接头在状态 3 时结构强度和变形           |      |                 |

### 2.3 试验过程

正式试验按照试验状态 2、试验状态 3、试验状态 1 的顺序进行。

#### 试验状态 2

正式试验进行 3 次, 加载载荷为 100%Ps<sub>j</sub>。

在 10%Ps<sub>j</sub> 载荷时调零, 调零完成后, 按照 10%Ps<sub>j</sub> 一级进行加载, 每级加载时间为 5s, 载荷达到后保持 5s。数据收集借助动态应变仪开展收集, 取样频率为 5Hz。试验结束没有发现试验件异常。

#### 试验状态 3

正式试验进行 3 次, 加载载荷为 100%Ps<sub>j</sub>。

在 10%Ps<sub>j</sub> 载荷时调零, 调零完成后, 按照 10%Ps<sub>j</sub> 一级进行加载, 每级加载时间为 5s, 载荷达到后保持 5s。数据收集借助动态应变仪开展收集, 取样频率为 5Hz。试验结束没有发现试验件异常。

#### 试验状态 1

正式试验进行 3 次, 加载载荷为 100%Ps<sub>j</sub>。

考虑到 z 向载荷较小 (F<sub>z</sub>=-7.5kN), 经协商后, z 方向载荷采用手动液压作动筒进行加载, 试验时在 10%Ps<sub>j</sub> 载荷时调零, 调零完成后, z 向载荷先连续加载到 100%Ps<sub>j</sub>, F<sub>z</sub> 达到 100%Ps<sub>j</sub> 载荷后保持不变, 接着再分级的协调加载 x 方向与 y 方向载荷。x 目标与 y 目标载荷根据 10%作为一级开展加载, 每级加载时间为 5s, 载荷达到后保持 5s。利用动态应变仪收集数据, 取样频率为 5Hz。试验结束没有发现试验件异常。<sup>[9]</sup>

由于两种试件试验过程完全相同, 本文就不再重复叙述。

### 2.4 试验数据收集与处理

#### 2.4.1 铸件试验

进行试验状态 1 试验, 试验中 1#应变片 90 度方向测量应变较大, 最大值为 880 μ ε, x 方向位移-1.24mm, y 方向位移为-1.40mm。加载设计载荷三遍后, 试验件没有明显的损伤, 接头结构的刚度、

强度满足设计要求。

进行试验状态 2 试验, 试验中 1#应变片 90 度方向测量应变较大, 最大值为 851 μ ε, x 方向位移-1.09mm, y 方向位移为-1.65mm。加载设计载荷三遍后, 试验件没有明显的损伤, 接头结构的刚度、强度满足设计要求。

进行试验状态 3 试验, 试验中 1#应变片 90 度方向测量应变较大, 最大值为 1178 μ ε, x 方向位移-2.41mm, y 方向位移为-2.88mm。加载设计载荷三遍后, 试验件没有明显的损伤, 接头结构的刚度、强度满足设计要求。

#### 2.4.2 3D 打印件试验

进行试验状态 1 试验, 试验中测量最大应变为 3#应变片 45 度方向, 最大值为 1692 μ ε, x 方向位移-0.61mm, y 方向位移为-0.81mm。加载设计载荷三遍后, 试验件没有明显的损伤, 接头结构的刚度、强度满足设计要求。

进行试验状态 2 试验, 试验中测量最大应变为 3#应变片 45 度方向, 最大值为 1343 μ ε, x 方向位移-0.68mm, y 方向位移为-1.00mm。加载设计载荷三遍后, 试验件没有明显的损伤, 接头结构的刚度、强度满足设计要求。

进行试验状态 3 试验, 试验中测量最大应变为 3#应变片 45 度方向, 最大值为 2286 μ ε, x 方向位移-1.26mm, y 方向位移为-1.39mm。加载设计载荷三遍后, 试验件没有明显的损伤, 接头结构的刚度、强度满足设计要求。

### 2.5 试验数据对比

通过对比两种试验件的应变与位移, 我们发现 3D 打印件在各个状态下的应变大于铸件应变, 而位移小于铸件位移 (见表 2.3)。这说明在同种材料的情况下, 通过 3D 打印制造的零件的材料利用率高于通过传统铸造的零件, 同时结构设计更加合理。

表 2.3 试验数据对比

|     |        | X 方向位移/mm | Y 方向位移/mm | 最大应变/ μ ε |       |
|-----|--------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 状态一 | 铸件     | -1.24     | -1.40     | 880       | -1.4  |
|     | 3D 打印件 | -0.61     | -0.81     | 1692      | -0.81 |
| 状态二 | 铸件     | -1.09     | -1.65     | 851       | -1.65 |
|     | 3D 打印件 | -0.68     | -1.0      | 1343      | -1.0  |
| 状态三 | 铸件     | -2.41     | -2.88     | 1178      | -2.88 |
|     | 3D 打印件 | -1.26     | -1.39     | 2286      | -1.39 |

注: 铸件最大应变方向为 1#应变片 90 度方向, 3D 打印件最大应变为 3#应变片 45 度方向

## 第三章 3D 打印接头有限元仿真

### 3.1 有限元方法简介

有限元仿真研究, 也就是有限元的分析方法, 是一类对微分方程进行求解的相关技术。此解法通常是把偏微分方程 (组) 修改为

常微分方程 (组) 的逼近, 这样便能够开展相关的计算。

### 3.2 仿真结果与分析

#### 3.2.1 仿真结果与试验结果对比

通过仿真得出的数据与之前静力学试验得出的数据对比发现 (见表 3.1-3.2), 试验件的应变大小两者虽然有些差距但是在误差范围内的。仿真得到的位移与试验结果相比较, 误差较大。

表 3.1 铸件和 3D 打印试件关键部位应变数据对比

| 试验状态 |    | 铸件                    |                       | 3D 打印                 |                       |
|------|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|      |    | 应变 1A/ $\mu \epsilon$ | 应变 1C/ $\mu \epsilon$ | 应变 3A/ $\mu \epsilon$ | 应变 3C/ $\mu \epsilon$ |
| 状态一  | 试验 | -554                  | -911                  | -403                  | -1692                 |
|      | 仿真 | -516                  | -901                  | -375                  | -1543                 |
| 状态二  | 试验 | -498                  | -851                  | -334                  | -1344                 |
|      | 仿真 | -464                  | -775                  | -297                  | -1241                 |
| 状态三  | 试验 | -683                  | -1178                 | -512                  | -2286                 |
|      | 仿真 | -622                  | -1260                 | -477                  | -2093                 |

表 3.2 铸件和 3D 打印试件关键位移数据对比

| 试验状态 |    | 铸件        |           | 3D 打印     |           |
|------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |    | X 方向位移/mm | Y 方向位移/mm | X 方向位移/mm | Y 方向位移/mm |
| 状态一  | 试验 | -1.24     | -1.40     | -0.61     | -0.81     |
|      | 仿真 | -0.93     | -0.85     | -0.55     | -0.62     |
| 状态二  | 试验 | -1.09     | -1.65     | -0.68     | -1.00     |
|      | 仿真 | -0.93     | -0.99     | -0.58     | -0.66     |
| 状态三  | 试验 | -2.41     | -2.88     | -1.26     | -1.39     |
|      | 仿真 | -2.06     | -1.89     | -0.98     | -1.05     |

### 3.2.2 结果对比的分析与结论

通过对比两组数据可以发现, 试验的应变数据与有限元仿真得出的应变数据比较吻合。然而静力试验的位移数据与仿真的结果有较大偏差。

经分析认为, 仿真位移与试验测量位移偏差主要由于以下原因, 一是试验时接头通过螺栓固定, 仿真采用固定连接, 导致仿真结果位移较小, 二是测量 Y 向位移时由于加载头挡住无法直接测量, 采用延伸片粘贴在接头顶部, 测量的延伸片的位移, 导致测量有误差。三是 Z 向位移测量的连接轴顶部位移, 由于连接轴受到其他方向载荷会产生变形, 导致 Z 向位移测量不准确。

## 第四章 总结与展望

本次研究分别使用静力学试验以及有限元仿真的方法, 从两个方面探究了 3D 打印钛合金部件的力学特性。

### 4.1 总结

根据接头的真实受力情况, 设计相应的结构静力学试验方案, 根据试验方案进行 3D 打印接头和铸造接头两种形式的静力试验。通过试验测得关键点的应变和位移, 比较两个结构的静力学特性。通过试验分析可知 3D 打印接头相比较铸造结构结构设计更加合理, 材料使用效率更高。使用 CATIA 建立试验件的有限元模型, 导入到 Hyper Mesh 中模拟试验中受到的载荷, 使用有限元分析, 计算出关键位置的应变与位移, 并与试验结果进行对比, 验证了分析结果的

真实性。

### 4.2 展望

本文研究了钛合金 3D 打印接头的力学性能, 但是仅仅是在宏观上研究, 希望以后可以使用更先进的测量手段和图像处理技术, 观察材料微观上的变化, 分析各种力学现象在微观上形成的原因。也希望未来可以使用其他方法来测量位移, 减小设备与测量方法带来的误差。有限元仿真时没有考虑螺钉连接的影响, 也没有建立加载轴的模型, 与试验过程相比简化较多, 希望后续可以建立更加符合真实情况的有限元模型。

### 参考文献

- [1]宋李秦.FRP 组合梁试件静力学性能试验研究[D].重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [2]孟鑫森,冯鹏.FRP 增强 3D 打印构件的力学性能试验[C].第九届全国建设工程 FRP 应用学术交流会,重庆,《工业建筑》杂志社,2015:270-274.
- [3]程实然.金属厚板材料力学性能膨胀试验方法研究[D].常州: 常州大学, 2015.

作者简介: 刘培风(1995年10月——), 男, 汉族, 籍贯上海, 大学本科学历, 工程师, 研究方向: 飞行器设计与工程, 飞机发动机维修工程与技术。