

doi: 10.7690/bgzd.2015.04.024

大型立式混合机的安全设计及整机维护保养

陆志猛, 杨润军, 杨开国, 曾庆林

(中国航天科技集团公司四院四十二所湖北航鹏化学动力科技有限责任公司, 湖北 襄阳 441003)

摘要: 针对装药设备需具备较高的本质安全度的问题, 从安全设计与维护保养 2 方面对立式混合机进行分析。通过对桨叶、齿轮和轴承游隙进行安全设计分析, 得到混合机远心桨叶的工作寿命为 52 000 h, 综合疲劳安全系数为 6.22, 安全性能较高, 齿轮 3 能安全有效工作 24 000 h, 轴承选型时尽量选取高精度等级的轴承; 并对控制系统安全设计措施、混合机设备维护保养进行简要阐述。分析结果表明: 该研究为立式混合机的安全设计与维护保养, 对复合固体推进剂预混、混合等工艺过程的安全生产提供了参考细节。

关键词: 立式混合机; 安全设计; 静态分析; 疲劳分析; 维护保养

中图分类号: TP207 **文献标志码:** A

Safety Design and Maintenance for Large Vertical Mixer

Lu Zhimeng, Yang Runjun, Yang Kaiguo, Zeng Qinglin

(Hubei Hangpeng Chemical Power Technology Limited Liability Company,
No. 42 Institute of No. 4 Academy of CASC, Xiangyang 441003, China)

Abstract: Aiming at the high intrinsic safety requirement of charging equipment, analyze vertical mixer from safety design and maintenance. Through carrying out safety design for blade, gear and the bearing internal clearance, the work life of the mixer's axifugal blade is 52 000 hours, and safety ratio of the mixer's axifugal blade is 6.22, which means high security. The third axifugal blades' near end gear can safely and effectively work 24 000 hours. And it is necessary to choose bearings with high degree of accuracy. And safety measure of control system design and maintenance of mixer equipment were briefly discussed. The analysis results show that the safety design and maintenance of the vertical mixer provides some advice for the safety design of solid propellant premix and mix.

Keywords: vertical mixer; safety design; static analysis; fatigue analysis; maintenance

0 引言

近年来, 随着复合固体推进剂装药厂家装药任务的不断提高, 立式混合机使用日益频繁^[1]。装药过程的高危险性要求立式混合机等装药设备要有较高的本质安全度, 因此对立式混合机关键部件的强度分析、疲劳分析、寿命评估以及设备维护保养等引起了人们越来越高的关注和重视^[2-3]。基于此, 笔者以大型立式混合机为例, 简要对立式混合机桨叶进行结构设计、静态分析和疲劳分析, 对齿轮寿命、轴承游隙等关键部件的核心问题进行分析, 最后从设备安全使用的角度, 依据相关设计规范及行业标准, 阐述了复合固体推进剂用立式混合机的维护保养情况。立式混合机的安全设计与维护保养对复合固体推进剂预混、混合等工艺过程的安全生产具有重要的指导意义。

1 立式混合机的安全设计

1.1 桨叶设计分析

1.1.1 桨叶的运动分析

从运动学上说, 立式混合机在正常工作时, 桨

叶在自转的同时围绕着大齿轮进行公转。桨叶的自转与公转可以简化为混合锅的绕锅中心旋转与两桨叶的互相混合。两桨叶互相混合过程是: 两桨叶的互相接近-互相混合(混合区域逐渐增大)——互相远离。合力随着混合区域的增大而逐渐增大。

另外, 由于桨叶的形状为空间螺旋线, 其混合区域为一条线, 并且该混合线随着桨叶的旋转而逐渐下移; 因此, 桨叶受力最危险的时候是混合线位于桨叶的最下端。

1.1.2 桨叶的载荷分析

由于近心桨叶是实心的, 而远心桨叶为空心的, 且远心桨叶转速为近心桨叶转速 2 倍, 因此远心桨叶为薄弱对象, 故主要对远心桨叶的受力进行分析。且主要分析远心桨叶受力最危险的时候, 此时混合线位于桨叶的最下端。两桨混合受力分析如图 1。

其中: M_1 为输入扭矩, 28 000 N·m; M_2 为近心桨通过同步齿轮给远心桨的扭矩; M_3 为混合扭矩; M_4 为药浆对远心桨的阻力扭矩; M_5 为远心桨通过同步齿轮对近心桨的扭矩; M_6 为药浆对近心桨

收稿日期: 2014-11-09; 修回日期: 2014-12-26

作者简介: 陆志猛(1985—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事非标机械装备机械设计方面研究。

的阻力扭矩； M_7 为混合扭矩； M_8 为锅沿对远心桨的混合扭矩。

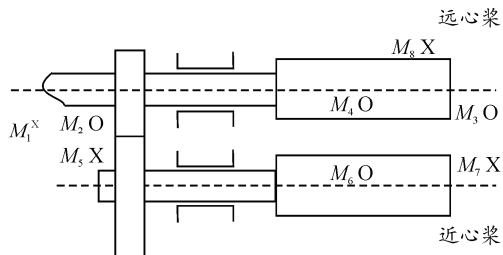


图 1 两桨混合受力情况分析 (X、O 代表受力方向)

通过受力分析可知：

$$M_1 = M_2 + M_4 + M_8 + M_3$$

$$M_5 + M_7 = M_6$$

$$2M_2 = M_5$$

$$M_3 = M_7$$

假设 $M_8 = 0$ ；则有 $2M_1 = M_6 - M_3 + 2M_4 + 2M_3$ ，所以：

$$M_3 = 2M_1 - M_6 - 2M_4。$$

当正向旋转时，在同一药浆中， M_4 、 M_6 与转速与阻力面积有关，若不考虑公转，则 M_4 、 M_6 只与转速有关，而 $n_4 = 2n_6$ ，考虑公转，因为 $n_{公} = n_{远}/8$ ，且公转方向与远心桨的旋转方向一致，可知 $M_4 > 2M_6$ ，且 $M_6 > M_7$ 则：

$$M_4 > 2M_7，而 M_4 = M_1 - M_2 - M_3 > 2M_7，所以$$

$$M_3 = M_7 < (M_1 - M_2)/3 < M_1/3 = 9\ 333\ \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_2 = 0，则 M_4 = M_1 - M_7 = 18\ 667\ \text{N} \cdot \text{m}$$

1.1.3 桨叶的结构设计

桨叶采用整体铸造成型，材料不锈钢，桨柄与叶片过渡部位圆弧 R 为 20 mm (应力集中系数为 1.8)，桨柄直径为 $\phi 350$ mm。远心桨叶结构示意图如图 2。

桨叶材料的疲劳极限为：

$$\sigma_{-1} = 185\ \text{MPa}$$

$$\tau_{-1} = 0.6\sigma_{-1} = 111\ \text{MPa}$$

桨叶抗弯系数与抗扭系数分别为 ($D=350$ mm)：

$$Z = \frac{\pi D^3}{32} = 4\ 209\ 243.21\ \text{mm}^3$$

$$Z_p = \frac{\pi D^3}{16} = 8\ 418\ 486.42\ \text{mm}^3$$

远心桨叶受到扭矩 18 667 N·m (此时中心轴输入扭矩 28 000 N·m)，简化分析后远心桨叶受到的侧向力 $F=37\ 585$ N。

桨叶形心到危险截面的距离为： $s=707.57$ mm。

只考虑弯矩作用时，根据桨叶受到的最大径向载荷可计算出其弯曲应力： $\sigma=6.32$ MPa。

只考虑弯曲时的安全系数为：6.22。

只考虑扭矩作用下，根据该截面承受的最大扭矩可计算出： $\tau=2.22$ MPa。

只考虑扭转时的安全系数为： $S_2=13.33$ 。

利用第三强度理论计算出综合疲劳安全系数： $S=6.22$ 。



图 2 远心桨叶结构优化示意图

取远心桨叶输入扭矩 $M_4=18\ 667\ \text{N} \cdot \text{m}$ 作静强度分析和疲劳强度分析。

1.1.4 远心桨叶 Solidworks Simulation 静态分析

- 1) 新建算例 (图 3)。
- 2) 参数设置 (图 4)。
- 3) 网格划分^[4] (图 5)。

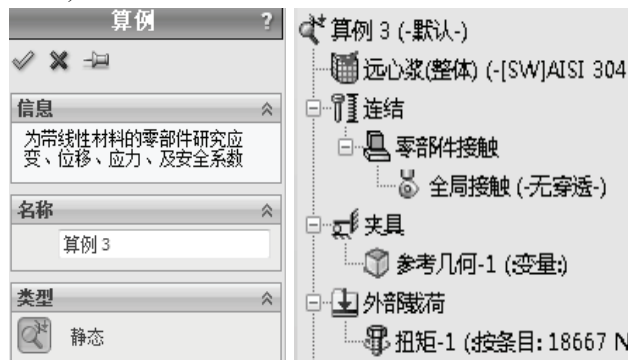


图 3 静态分析

图 4 参数设置

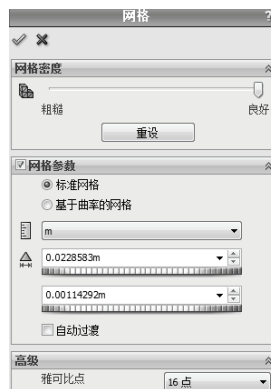


图 5 网格划分

由参数设置表可知：远心桨叶选用材料 AISI 304 (0Cr18Ni9)，材料抗拉强度为 539 MPa，屈服强度为 206 MPa。零部件接触方式为全局接触 (无穿透)，夹具选用远心桨叶上端面为参考面，并理想认

为分析过程中，远心桨叶为刚性体，上端面在 X、Y、Z 3 个平面上均不产生位移。给远心桨叶外部载荷为扭矩 18 667 N·m。

4) 运行结果。

图 6 中的应力为 Von Mises 应力，对于塑性材料，一般用此应力评价结构是否破坏。由图 6 可知最大应力在叶片的内韧带部，最大数值为 124.3 MPa，小于材料屈服强度 185 MPa。由图 7 可知合位移最大值为 0.85 mm。

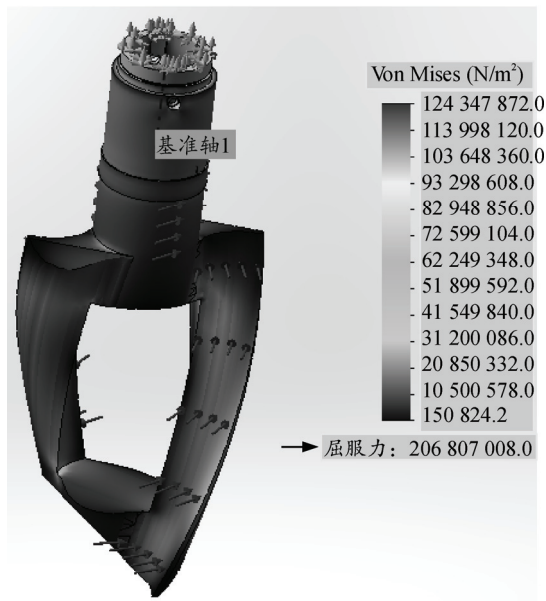


图 6 应力结果图

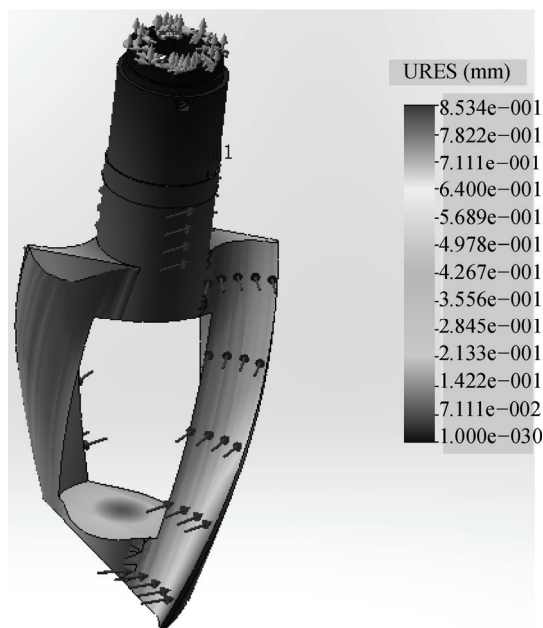


图 7 合位移结果示意图

1.1.5 远心桨叶 Solidworks Simulation 疲劳分析

疲劳分析基于静态分析进行(远心桨叶外部载

荷为扭矩 18 667 N·m)，疲劳分析添加事件设定循环次数为 7 000 000(工程机械有限元分析经验取值)^[5]，负载类型为 LR=0(基于零)，疲劳 SN 曲线定义采用材料库基于 ASNE 奥氏体钢曲线，结果选项定义为远心桨叶。

以静态分析的结果作为事件，对远心桨叶进行疲劳分析，所得疲劳分析结果：生命总数(周期)示意图如图 8 所示。

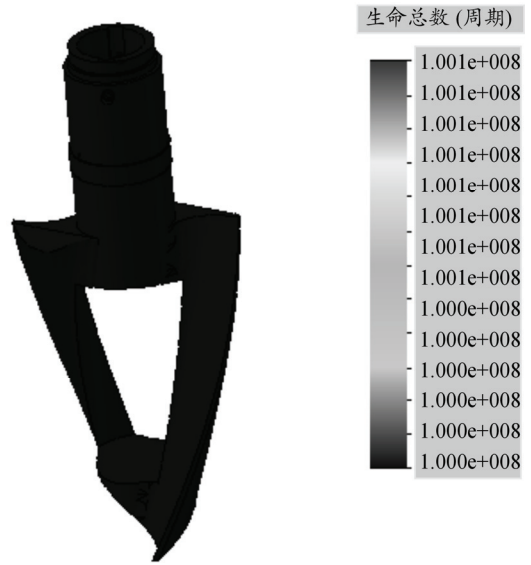


图 8 生命总数(周期)示意图

已知远心桨叶每个疲劳周期为 15/8 s(远心桨叶转速 32 r/min)，则有：

远心桨叶的整个寿命周期 T 为 52 000 h。

循环次数为 7 000 000 时，对应的工作时间为 3 645 h，疲劳分析远心桨叶损坏百分比如右图 9。



图 9 损坏百分比示意图

由疲劳分析损坏百分比示意图可知，当远心桨

叶一直工作在额定扭矩时，经过循环次数为 7 000 000 时，即 3 645 h 后，远心桨叶损害百分比约为 7%。远心桨叶作为混合机的核心组成部分，为保证混合机设备安全运行，认为混合桨叶工作 3 645 h 后，需对远心桨叶进行探伤分析，根据探伤结果决定桨叶是否继续使用。

1.2 齿轮设计计算

大型立式混合机齿轮系为行星机构，齿轮传动箱的设计在齿轮系传动原理图(图 10)基础上进行。从齿轮传动原理图可看出运动传递过程。2 台规格相同的液压马达分别驱动齿轮 10、11，齿轮 10、11 同时带动中心轴上齿轮 9 和齿轮 1。任务书要求的中心轴即指齿轮 9 和齿轮 1 所在的传动轴。齿轮 1 同时驱动齿轮 2 和齿轮 5。齿轮 2 带动齿轮 3、4 完成桨叶自转运动。其中齿轮 3 带动远心桨，齿轮 4 带动近心桨。齿轮 5 经过齿轮 6、7、8 完成齿轮系的公转运动。齿轮 8 是内齿轮，固定不旋转。

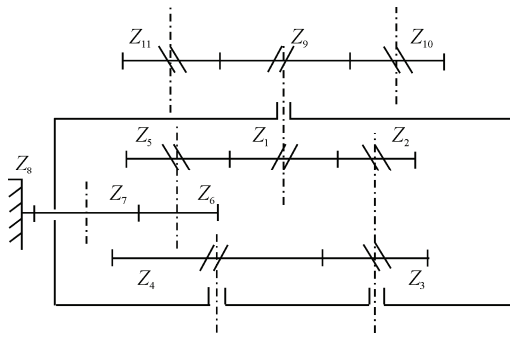


图 10 齿轮传动原理

选取远心桨叶近端齿轮 3 这一典型齿轮进行分析。

分析可知齿轮的接触疲劳极限应力 $\sigma_{Hlim}=1\ 500\ \text{MPa}$ ，接触强度寿命系数 $Z_n=1.12$ (工作时间：每日一班，每班 8 h，一年 300 d，寿命 10 a)，工作硬化系数 $Z_W=1.04$ ，最小安全系数 $S_{Hlim}=1.25$ ，则有：

许用接触应力

$$\sigma_{HP}=1\ 397.76\ \text{MPa}$$

计算可知：

$$\sigma_H=1\ 292.10\ \text{MPa}$$

因为 $\sigma_H < \sigma_{HP}$ ，所有齿轮 3 有效工作 24 000 h 是安全的。

1.3 轴承游隙分析

为保证桨叶正常工作，要求径向摆动越小越好。从齿轮箱结构分析可知，当出现以下 2 种情况时，

桨叶径向摆动量为最大。

1) 上、下两轴承游隙同时向一侧偏移。此时桨叶径向摆动量即轴承的最大游隙 y 。

2) 上、下两轴承游隙各向相反方向移动，整个桨叶偏斜，此时游隙按图 11 及公式计算：

图 11 中，1 390 为两轴承间距，4 229 为上轴承至桨叶下端面距离，若 y 为径向摆动量， x 为游隙值。

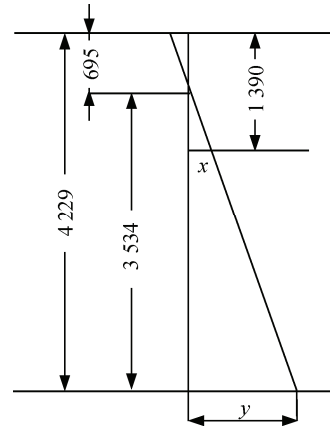


图 11 游隙计算示意图

根据相似三角形计算公式则有： $x=0.2y$ 。

通过轴承游隙分析可知，为减少桨叶径向摆动量，轴承选型时尽量选取高精度等级的轴承。

1.4 控制系统安全设计

随着电控技术不断进步，以提高混合机设备可靠性和本质安全性为目标，采用了一系列改进方案和措施，主要安全设计改进包括：

1) 增加应急下降系统，确保在控制系统核心设备——PLC 瘫痪等紧急情况下，操作人员能够在控制室使用应急回路，远程操作混合锅应急下降。

2) 增加高速采集记录系统，每秒钟真实记录 40 组数据。

3) 增加了操作追溯系统，操作员所有的按钮操作、混合机位置状态等信号、各阀门和各电机开关时间和状态均以文本格式列表记录下来，长期存储，以备查询。

4) 完善联锁和报警系统。在生产过程中，当某些重要的工艺参数超过设定的临界值时，控制系统会自动发出声光报警，并自动转入报警程序，顺序执行一系列相应的动作，如停止混合桨转动、接通“卸真空”、混合锅下降等。

5) 限定手控速时转速的加速/减速速率，即使操作员操作失误，瞬间大幅改变转速设定输入值，

转速也只会以设定速率缓慢加速/减速,避免了转速的急剧变化。

6) 增加装药不同时段设置不同扭矩报警值功能,装药过程中,操作人员可根据工艺特点,设定不同时段不同的扭矩报警值。

7) 增加真空控制区间设置功能,操作人员可根据需要将锅内压力控制在某一个区间内。

8) 增加 Excel 报表功能,操作员可任意选择工艺参数、时间区间、时间间隔进行报表,报表文件以 Excel 格式存储。

9) 使用校时服务器自动对记录仪、计算机、硬盘录像机进行校时,确保了数据记录、视频记录时间的一致性。

2 立式混合机的维护保养

2.1 一般维护保养

混合机设备应保持清洁,投料前所有可能与混合物料接触的表面,如混合锅、中间罩的内表面及混合浆表面应是清洁的,特别不允许有 Al、AP 和残余物料等留在表面。

1) 每次投料前,混合锅、混合浆、中间罩清擦干净,直线导轨注油孔添加润滑油。

2) 每次混合工艺过程结束后,混合机所有表面应保持干净,特别要注意混合浆的表面及混合锅和中间罩的内表面都要擦干净,不允许有粉尘和残余物料。

3) 油箱、油箱盖和液压元件要保持清洁,一般每月应从油箱底部球阀放一次沉淀油,并且是在停机后 12 小时、开机前进行排放沉淀油。用一洁净容器来接放出的沉淀油,在放出的过程中应仔细观察放出的沉淀油,如果油液清澈、无水分则少放,否则就多放,直到油液清澈为止。

4) 液压油(冬季 N32、夏季 N46 抗磨液压油)每一年更换一次(第一次换油期为 6 个月)。加油前须将油箱清洗干净,再通过 20 μm 过滤小车经空气滤清器向油箱内加入,油液加入量在液位计 4/5 刻度处。夏季工作油温不超过 55 $^{\circ}\text{C}$,冬季不得低于 25 $^{\circ}\text{C}$ 。液压系统中空气应从放气嘴和系统最高位置排掉。

2.2 混合机的维护

在混合机的日常使用过程中,对它的合理使用,精心保养,可以延长其使用寿命。但是,混合机经过了长期使用,由于正常磨损,精度下降,性能降

低,还必须通过定期计划修理,恢复原有精度和性能,方能继续满足生产的需要。

混合机的定期维护保养分为三级:一级保养、二级保养、三级保养。简要叙述如下:

一级保养:混合机设备每使用一年或者生产 100 锅次需进行一级保养,一级保养主要由用户负责;二级保养:混合机每设备使用二年或者生产 300 锅次需进行一级保养;三级保养:混合机设备每使用五年或者生产 1 000 锅次需进行三级保养。二级保养和三级保养应由混合机专业制造厂商负责。

3 结束语

笔者首先从运动、载荷、结构设计以及有限元分析等方面对浆叶的安全设计进行了分析,理论分析表明混合机远心桨叶综合疲劳安全系数为 6.22,安全性能较高,SolidWorks Simulation 疲劳分析得出远心桨叶理论上的工作寿命为 52 000 h,而远心桨叶在极限负载条件下,经过 7 000 000 循环次数后,远心桨叶损害百分比约为 7%,考虑到远心桨叶高危使用环境,建议远心桨叶工作 3 645 h 需进行探伤检测;接着分析了齿轮轮系,并对远心桨叶近端齿轮 3 强度进行分析,表明齿轮 3 有效工作 24 000 h 是安全的;对轴承游隙进行了分析,指出为减少桨叶径向摆动量,轴承选型时尽量选取高精度等级的轴承。最后简要介绍了控制系统安全设计措施。在混合机设备维护保养方面,分别从一般维护和三级保养进行了简要阐述。文中从安全设计与维护保养两方面对立式混合机进行了阐述,通过理论和有限元分析,对混合机中关键部件进行评估,保证了设计的可靠性,提高了设备的本质安全度,相关研究对复合固体推进剂预混、混合等工艺过程的安全生产具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 李锡文,杨明金,谢守勇,等.大型立式混合装备设计研究[J].西南大学学报,2007(9):158-161.
- [2] 易朋兴.立式捏合机设计研究与性能分析[D].武汉:华中科技大学,2007:5.
- [3] 王正方,翟瑞清.立式混合机搅拌桨的设计[J].固体火箭技术,1993(3):65-69.
- [4] 汲方林,王有杰,李渊,等.基于 SolidWorks Simulation 对高压容器的静态及疲劳分析[J].机械工程师,2009(5):128-129.
- [5] 张一心,徐必勇.基于 SolidWorks Simulation 的液压破碎锤杆杆优化及疲劳分析[J].CAD/CAM 与制造业信息化,2009(12):66-67.