

同向双螺杆挤出机传动箱输出轴强度分析及优化

张晓, 马永寿, 梁晓刚

(天华化工机械及自动化研究设计院有限公司, 甘肃 兰州 730060)

摘要: 双螺杆挤出机传动部分将高转速低扭矩值通过减速转换成低转速高扭矩值, 进而带动螺杆挤出物料向前输送。本文以 SHJ-600 高扭矩同向双螺杆挤出机传动箱箱体的输出轴为研究对象, 采用有限元方法进行静力学和疲劳分析, 得到了输出轴的变形量及等效应力应变云图、寿命及安全系数等相关参数, 发现输出轴断裂原因为疲劳失效, 进而对输出轴的结构和材料进行相应优化和改进, 结果表明优化后的输出轴最大应力降低为原来的 38.8%, 安全系数显著提升, 优化方案可行可靠并为今后高强度轴设计与优化提供了思路。

关键词: 有限元; 输出轴; 静力分析; 疲劳强度分析

中图分类号: TQ330.43

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)03-0050-05

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.03.012

0 引言

挤出机核心技术分传动和挤出模块, 传动模块和挤出模块是其领域内技术创新和更新换代的关键所在^[1]。其中传动模块是挤出机的动力源泉, 在传动模块的设计计算中, 要考虑效率、稳定性及可靠性; 挤出模块由筒体、螺纹元件和芯轴构成。筒体作为物料反应的场所, 螺纹元件用来挤压和推送, 使其在筒体内完成一系列复杂的反应过程。芯轴位于筒体中心内部, 为螺纹元件提供支撑和导向作用。

扭矩分配技术是在一个相对受限的空间内, 将动力均匀且有效地分配到两根螺杆上^[2]。不同的扭矩分配技术, 影响齿轮箱的承载能力、甚至整机的寿命和性能^[3]。为了实现高效的扭矩分配, 双螺杆挤出机通常采用先进的扭矩分配装置。这些装置能够精确地控制两根螺杆之间的扭矩分配比例。输出轴也是传动系统中重要组成部分。在双螺杆挤出机的工作过程中, 输出轴需要承受较大的扭矩和冲击载荷^[4]。

目前广泛应用的螺杆挤出机齿轮箱设计大多是参考国外先进技术, 尽管这种借鉴在一定程度上推动了国内齿轮箱技术的发展, 但由于在材料选用和制造工艺上的误差影响因素, 国内齿轮箱仍遗留很多问题亟待解决, 包括冲击力大、功率低、温升高、密封性不好、

可靠性差以及噪音大等。通过深入分析和研究这些问题产生的原因和解决方案, 可以进一步提高齿轮箱的性能和质量, 推动挤出机行业的发展和进步。

因此, 有必要对 SHJ-600 同向双螺杆挤出机传动箱输出轴进行强度分析及优化。本文利用有限元技术^[5], 对传动箱输出轴进行了深入的静力学和疲劳强度分析, 得到了输出轴的变形量及等效应力应变云图、寿命及安全系数等。根据分析的结果, 进一步优化输出轴结构设计, 增强该部件的可靠性, 确保挤出机稳定高效运行。

1 传动箱工作原理

SHJ-600 挤出机传动箱包括主箱体、齿轮、输入轴、输出轴 I、输出轴 II、轴承、端盖以及盖板等, 采用调心滚子轴承。传动箱基本结构如图 1 所示, 其中 I、II、III 表示齿轮啮合位置, 1~12 表示安装轴承位置。

该传动箱为三级减速传动箱。电机功率通过输入轴、中间轴和输出轴的齿轮传动, 将扭矩和功率平均分配到两根输出轴, 以相同的转速输出到芯轴上。传

作者简介: 张晓 (1992-), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事橡塑机械的研发设计。

项目编号: 工信部专项 TC220A04W-4

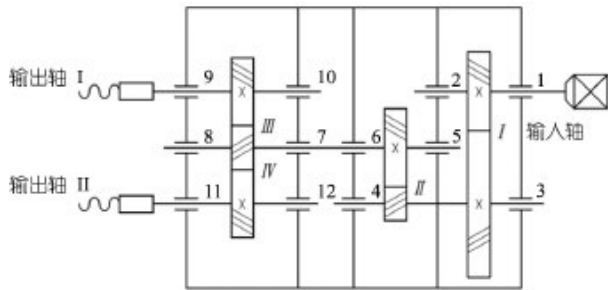


图1 SHJ-600同向双螺杆挤出机传动系统原理图

动箱的基本参数见表1所示。

表1 传动箱基本参数

额定功率 / kW	输入转速 / (r·min ⁻¹)	总传动比	输出转速 / (r·min ⁻¹)	输出轴间距 / mm
315	1 000	20	50	448

2 输出轴静力分析

在复杂的机械运作过程中，输出轴以其强大的推动力，确保齿轮箱顺利完成各项任务。同时由于两螺杆中心距较小，要求整个传动结构精度高。为了满足这些需求，输出轴必须有足够强度和刚度，因此有必要对输出轴进行有限元静力分析，研究输出轴的变形及应力分布情况。

2.1 建立有限元模型

根据双螺杆挤出机传动箱其高扭矩、同向、平行、带负载的特性，建模过程对输出轴进行一定的简化^[6]，简化后的箱体模型如图2所示。



图2 输出轴模型

表2为输出轴材料特征表^[7]。材料选用40Cr。采用四面体网格划分，划定后网格数量为25 614，节点数量为42 678，网格划分如图3所示。

表2 输出轴材料特征表

材料	密度 / (kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量 / GPa
40Cr	7.810 3	0.28	211

2.2 施加载荷约束

输出轴作为机械装置中的关键部件，承载着多种载荷，在这些载荷中，轴自身重力、轴承施加的载荷、



图3 网格划分

输出端扭矩，而其余零部件所受的重力影响相对较小，因此在此处我们将其忽略不计。如图4所示，为输出轴的载荷约束示意图。

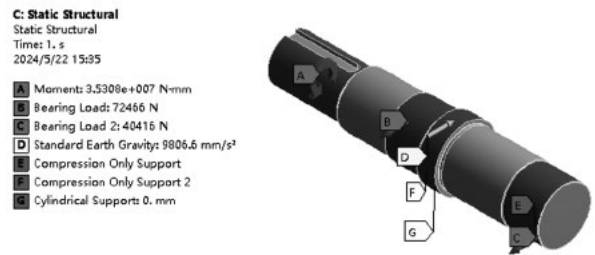


图4 载荷约束示意图

2.3 结果分析

图5为输出轴在约束和载荷条件下的变形云图。由图5可知，输出轴的总变形量总体处于一个比较低的水平，最大变形量约为0.002 5 mm，发生最大变形量的位置在左轴承靠近轴肩的位置，说明在稳定工作状态时，载荷对轴系统的平稳运转影响较小。



图5 输出轴总变形云图

由图6可知，输出轴的最大等效应力为44.39 MPa，查阅相关机械手册可知^[8]，输出轴的最大应力虽然比40Cr的屈服极限小许多，但应力集中在交变作用下会导致轴的低周疲劳，甚至突然断裂。从分析结果可知，输出轴所受的应力危险位置和轴实际断裂部位一致，依据疲劳损伤理论，可以断定输出轴断裂失效的原因为疲劳破坏。由图7可知，最大等效应力

为 8.65×10^{-5} mm，应力应变主要集中在左轴承限位的靠近轴肩的位置。



图6 输出轴等效应力云图



图7 输出轴等效应变云图

3 疲劳分析

3.1 载荷谱设计

传动轴使一个往复旋转的过程，因此，输出轴轴肩的接触应力随时间变化而变化。表现为规律的正弦曲线，从最小值 0 到最大值往复循环变化的过程，如图 8 所示。

3.2 疲劳强度影响因素

轴某一位置发生疲劳破坏失效所需的循环周期数取决于轴所受应力波动情况和材料自身性质^[9]。对于特定材料而言，其疲劳失效由 S-N 曲线决定。本文采用有限元软件中提供的数据估算出 40Cr 的 S-N 曲线作为疲劳分析数据，如图 9 所示。

平均应力对疲劳寿命影响较大，平均应力修正理论有 SN-None、Goodman、Soderberg 和 Gerber，本文采用应用广泛的 Goodman 理论^[10]，如图 10 所示，为 Goodman 平均应力修正图。

3.3 疲劳分析结果

在静力学分析的基础上，将计算数据信息继续导入有限元模块，计算输出轴的疲劳分析。如图 11、12

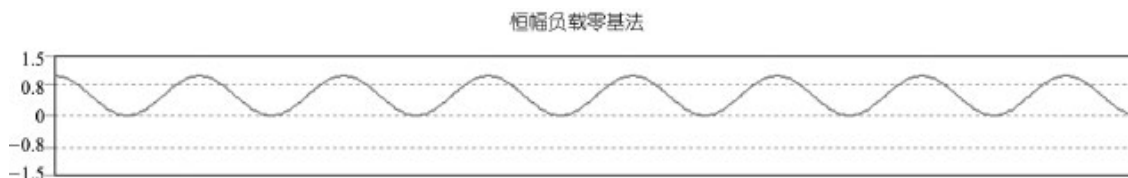


图8 循环载荷图

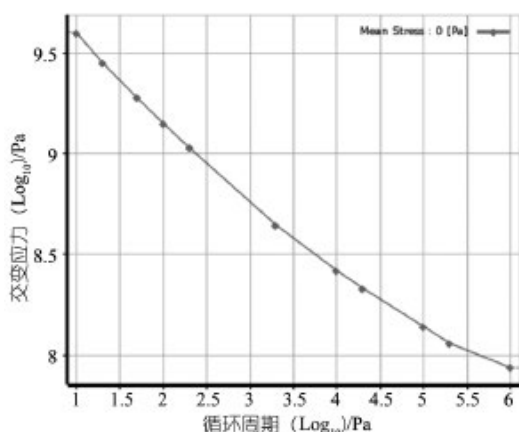


图9 40Cr 的 S-N 曲线

所示，分别为输出轴的寿命云图和疲劳安全系数。从图 11 中可以看出，寿命是疲劳作用直到失效的循环次数。可以看出，输出轴疲劳寿命最低循环次数为 $1e6$ 。从图 12 中可以看出，输出轴安全系数最小为 0.491

96，安全系数最小值和最低寿命均发生在同一位置靠近轴肩处。表明该位置在工况条件下易产生疲劳失效，因此需要对该位置结构进行优化。

3.4 输出轴结构改进及优化

通过对传动箱输出轴进行静力学和疲劳分析，发现靠近轴肩位置会发生应力集中，进而可能造成疲劳失效。因此，本文在原来输出轴结构的设计方案中将轴肩位置增加 4 mm 倒角，减少应力集中的可能。如图 13 所示。同时将输出轴的材料更换为 42CrMo，其材料对比参数如下表 3 所示。

表3 输出轴材料对比参数表

材料	密度 / (kg·m ⁻³)	泊松比	屈服极限 / MPa	弹性模量 / GPa
40Cr	7.910 3	0.28	785	211
42CrMo	7.851 03	0.30	930	210

将优化后的结构进行应力分析和疲劳分析，如图 14、15 所示。根据后处理结果可以看出，优化后的输

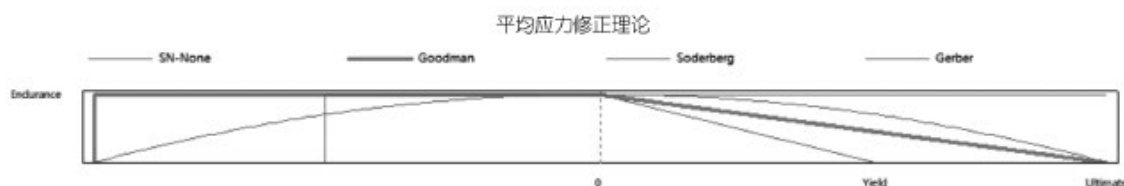


图 10 Goodman 平均应力修正图



图 11 输出轴寿命云图



图 14 优化后的等效应力云图



图 12 输出轴疲劳安全系数



图 15 优化后的安全系数

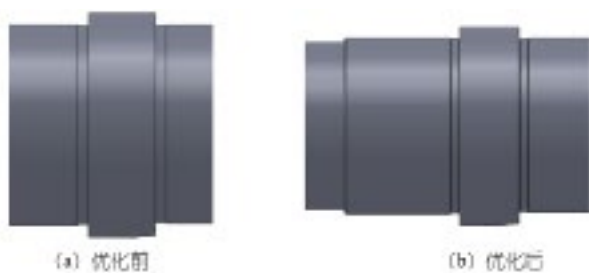


图 13 输出轴优化结构示意图

出轴所受的最大应力位置和优化前相同，均在靠近轴肩位置处，最大应力降低为 17.217 MPa，约为改进前的 38.8%。从改进后的输出轴安全系数云图中可以看出，安全系数最小值提升为 6.966 2，符合设计需求，说明优化后的输出轴不会发生疲劳破坏，优化方案可行。

4 结语

双螺杆挤出机传动系统设计过程复杂，实际运行工况特殊，本文对传动箱输出轴的实际工况进行分析，

利用有限元模拟技术，对输出轴进行静力学分析和疲劳分析，得出输出轴疲劳断裂位置，并对该位置进行相应优化改进，得出以下结论：

(1) 由静力学分析结果可知，该输出轴的变形、应力应变情况总体处于较低水平，其最大应力值远小于输出轴材料的屈服极限，位移变形量较小，满足使用要求，发生最大变形量和最大应力应变的位置均在靠近轴肩的位置。

(2) 由疲劳分析结果可知，安全系数最小值和最低寿命均发生在同一位置靠近轴肩处，故该输出轴在靠近轴肩处发生疲劳失效。优化输出轴结构和材料后，最大应力降低为 17.217 MPa，约为改进前的 38.8%，说明优化后的输出轴在承受相同的工作载荷时，所承受的应力已经大大减少，降低了疲劳失效的风险。此外，优化后的输出轴获得了更高的安全系数。安全系数的提升意味着输出轴在承受工作载荷时具有更大的安全裕量，即使遇到过载情况，也能更好地抵抗疲劳

损伤。综上所述,通过对输出轴的结构和材料进行优化,降低了最大应力并提升了安全系数。优化后的方案不仅可行,而且显著提高输出轴的疲劳寿命和可靠性。这一研究成果为今后工作提供了有益的参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 韩彦林. 阴阳转子型双螺杆挤出机挤出成型机理及设备研究[D]. 沈阳化工大学, 2022.
- [2] 李世通. 双螺杆挤出机传动系统分析及高扭矩设计探讨[J]. 北工机械, 1999(6):23-28.
- [3] Kish J. Comanche Drive System. Rotary Wing Propulsion Specialists Meeting: Proceedings[J]. American Helicopter Society, 1993.
- [4] 杨成云, 林腾蛟, 李润方, 等. 中心传动齿轮箱体有限元分析及结构优化设计[J]. 重型机械, 2001(2):42-45.
- [5] 王鹏, 张柱银, 夏建生, 等. 基于 ANSYS Workbench 的高速轴瞬态动力学分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2017,30(03):22-25+34.
- [6] 徐彩玲. 渐开线直齿齿轮轴楔横轧三维有限元模拟分析[J]. 热加工工艺, 2013,42(05):91-93+96.
- [7] 余焕伟, 陈仙凤, 任绪凯, 等. 某 40Cr 汽车稳定杆球头销断裂失效分析[J]. 汽车实用技术, 2024,49(09):141-145.
- [8] 吴宗泽. 机械设计实用手册(第三版)[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
- [9] 张志宏, 刘忠明, 王征兵, 等. 起重机减速器疲劳强度计算方法分析[J]. 机械传动, 2018,42(11):72-75.
- [10] 吕志强. 航空发动机轮毂低周疲劳寿命预测方法研究[D]. 电子科技大学, 2016.

Strength analysis and optimization of output shaft for co-rotating twin-screw extruder transmission box

Zhang Xiao, Ma Yongshou, Liang Xiaogang

(Tianhua Institute of Chemical Machinery & Automation Co. LTD., Lanzhou 730060, Gansu, China)

Abstract: The transmission system of a twin-screw extruder converts high-speed, low torque power into low-speed, high torque output through a reduction device, thereby driving the screw to transport the material forward. This article takes the output shaft of the SHJ-600 high torque co rotating twin-screw extruder transmission box as the research object, and uses finite element analysis method to conduct static and fatigue analysis on it. Through analysis, key parameters such as deformation of the output shaft, equivalent stress-strain cloud map, life prediction, and safety factor were obtained. Research has found that the main cause of output shaft fracture is fatigue failure. Based on this, the structure and material of the output shaft have been optimized and improved. The results showed that the maximum stress of the optimized output shaft decreased to 38.8% of the original, and the safety factor was significantly improved, verifying the feasibility and reliability of the optimization scheme and providing reference ideas for the design and optimization of high-strength shafts in the future.

Key words: finite element; output shaft; static analysis; fatigue strength analysis

(R-03)

《橡塑技术与装备》投稿邮箱: crte@chinarppte.com

欢迎投稿, 欢迎订阅, 欢迎惠登广告