

大型双螺杆挤压造粒机组齿轮箱轴系分析及齿轮箱相关核心技术

毕超¹, 何智能¹, 嵇耀², 滕祖荣²

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029;

2. 南京高精齿轮有限公司, 江苏 南京 211103)

摘要: 文章分析了大型双螺杆挤压造粒机组典型传动系统轮系结构, 从速度调整和扭矩分配两方面分析了当前典型大型挤压造粒机组传动系统轮系结构的特征。与此同时, 还对非对称式扭矩分配轮系结构进行了分析。在此基础上, 还对齿轮箱润滑冷却、轴承振动监测、气动摩擦离合器以及工程建设过程中的齿轮箱动载计算等方面内容进行讨论。相关内容可为大型挤压造粒机组齿轮箱的设计、使用以及工程建设提供一定的技术支撑。

关键词: 挤压造粒; 轴系分析; 振动监测; 动载计算

中图分类号: TQ320.663

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2024)11-0052-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2024.11.011

0 前言

大型双螺杆挤压造粒机组是石化企业的重要生产装置之一, 主要用于粉体塑料的造粒。从目前国内石化企业采购相关装置来看, 德国 CWP 公司的 ZSK350、ZSK380 的引进数量占比最高。此外, 国企大连橡胶塑料机械有限公司类似规格机组也呈现扩大市场占有率的趋势。大型挤压造粒机组的核心是挤压系统, 但设备开发设计的最难点还在于传动系统。以直径为 320 mm 规格的造粒机组为例, 其传动装置不仅要以 26 1mm 中心距、200 r/min 以上的转速为两根螺杆输送 10 000 kW 的功率, 而且还要承载来自于机头 35MPa 压力的 270 t 轴向载荷^[1]。这样的要求对传动系统设计开发中箱体制造、轮系结构、轴承布局、材料选择、热处理技术等诸多方面都提出了苛刻的要求。也正是这个原因, 大型挤压造粒生产过程中传动装置出现的故障往往会直接造成机组的长周期停产^[2-4]。

为此, 文章在对大型挤压造粒机组典型传动系统轮系结构进行分析的基础上, 对齿轮箱润滑冷却、轴承位振动监测、气动摩擦离合器以及工程建设过程中的齿轮箱动载计算等方面进行分析。相关内容可为大型挤压造粒机组齿轮箱的设计、使用以及工程建设提

供一定的技术支撑。

1 传动轮系分析

国内早期有关于同向平行双螺杆挤出机传动系统结构方面的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代, 姜晓鸣^[5]对典型的双螺杆挤出机齿轮箱结构形式进行了对比。90 年代末, 随着市场对高扭矩齿轮箱需求的不断增加, 李世通^[6]对高扭矩齿轮箱的轮系设计展开了讨论。2011 年, 笔者^[7]在调研大量国际专利的基础上, 从圆柱外齿轮和行星轮系扭矩分配方案着手, 对比了不同轮系中轮齿的承载情况。

1.1 转速调整

相对比, 中小型挤压造粒机组所采用电机中可以采用变频调速方式控制转速, 大型挤压造粒装置的主电机由于功率过大, 而极少采用类似的无极调速。国际上, 大型挤压造粒机组通常使用如图 1 所示的带有开机盘车系统的两级调速传动方案。使用这样的齿轮箱, 开机时, 大传动比的盘车电机以极低的转速驱动

作者简介: 毕超 (1981-), 男, 副教授, 主要从事大型石化挤压造粒装置等方面的研究。

项目编号: 工信部专项 TC220A04W-4

收稿日期: 2024-06-19

螺杆，以排空螺杆内物料；随后，切换到齿轮箱的低速挡，逐渐增加负载；当设备在低速挡稳定挤出，再将齿轮箱切换到高速挡，同时增加负载。这一结构中，换挡机构是该类型机组的薄弱环节，该类故障屡有报道。另外，从螺杆受力的角度看，即便是在没有增加产量负载的情况，切换档位瞬间对螺杆的冲击也是较大的。特别是螺杆塑化段捏合盘区域，此处物料较硬，且捏合盘元件内物料填充度接近 100%，所以转速冲击会转换为扭矩突变，从而会诱发螺杆芯轴的断裂^[8]。

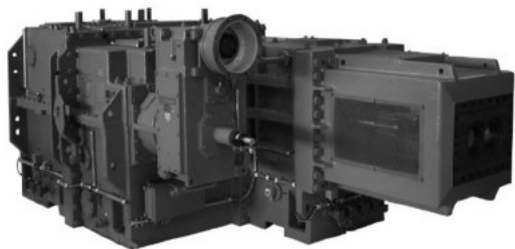


图 1 FLENDER 公司齿轮箱外形照片

RANK 公司的大型双螺杆挤压造粒机组齿轮箱在一定程度上可以解决上述螺杆载荷突破冲击的问题^[9]。如图 2 所示，行星轮系可以将两个电机的转速合成图中行星轮轴架的转速^[10]。主电机提供大功率，在工频下定速转动；而辅助电机功率占比约 20%~30%，可以实现一定范围内的变频调速。通常情况下，2 000~3 000 kW 的变频器和电机的成本是可以接受的。这样一来，开机时辅助电机可以平稳的启动螺杆。并且在正常工作时，可以适当调整辅助电机转速以匹配不同牌号物料生产的需要。

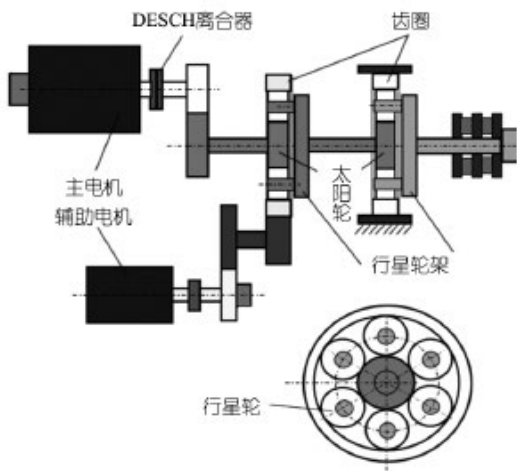


图 2 行星轮系结构示意图

1.2 对称式扭矩分配方案

图 3 中给出了 FLENDER 公司和 RANK 公司大型

挤压造粒机组齿轮箱的对称式双过渡轴扭矩分配方案。其中，长输出轴作为动力轴，同时驱动上下布局的两根过渡轴，两根过渡轴同时驱动短输出轴。这一方案实现了以两个轮齿共同分担扭矩的传动方式，有效地降低了单齿传递扭矩，并且可以有效减少齿轮在高应力状态下的疲劳磨损。从目前设备的应用情况来看，这一类型的扭矩分配方案对实现比扭矩系数 11.3 Nm/cm^3 的齿轮箱来说是具有一定可靠性的。值得注意的是，当前大型化机组的高效利用是石化企业探索的热点。超载运行在很多石化企业的不少牌号生产中普遍存在。这就对齿轮箱的安全性提出了要求。从工程建设公司了解到，业主对齿轮箱的 AGMA 安全系数已经普遍从 1.5 提高到 1.75。进一步提升单齿承载能力可能是实现更高安全性的必经之路。

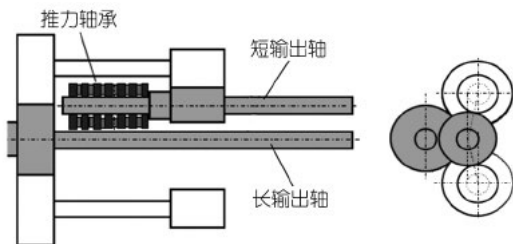


图 3 双过渡轴扭矩分配方案

传动系统中，保证两输出轴相位差变化量处于规定范围是保证两螺杆不发生干涉的前提条件。从扭矩分配的角度来看，对称式双过渡轴扭矩分配方案中，长输出轴的输入端传递的扭矩为总扭矩。在与过渡轴发生啮合后，理论上会将其中 1/2 的扭矩分配给短输出轴。但是，输出轴的输出扭矩实际上是来自于其所驱动螺杆的负载。对于同向平行双螺杆挤出机而言，由于挤出机两螺杆并非处于对称式工作模式，因此两根螺杆的工作扭矩存在一定的差异。所以分配到两根输出轴上的扭矩并不一致。这必定会导致两输出轴相位差的变化。值得思考的问题有：① 齿轮箱的扭矩分配轮系如何根据负载自动调整两输出轴上的扭矩分配。② 齿轮驱动链上各个轴的微变形与两输出轴相位变化之间具有何种关系。不仅如此，从齿轮驱动链的角度来看，长、短输出轴的承载是关联的，变形也是有上下游的关系。短输出轴作为被动轴，其扭转变形量来自于所驱动螺杆的负载；而长输出轴作为主动轴，其扭转变形不仅来自于所驱动螺杆的负载，而且还包括驱动短输出轴造成的变形。当然，还要考虑过渡轴的变形累加。理论计算上可以实现的理想扭矩分配和轮

系变形,但在考虑加工精度、装配精度等多重因素后,经典理论的计算结果就需要进一步的完善。

1.3 非对称式扭矩分配方案

在我国早期齿轮箱专利^[11]中提及了如图4所示的双螺杆挤出机齿轮箱的轮系结构。如图4所示,驱动A输出轴的齿轮12和13具有较大的尺寸和安装空间,其刚度可以得到保证。同样的,驱动B输出轴的齿轮16和18也具有较大的尺寸和安装空间。进一步回溯的上游惰轮11、14、15和17起到了空间过渡和调整转向的作用。实际上,输出轴A和B的同步是来自于共轴齿轮6、7和10。上游动力通过齿轮10输入到轴上,同轴的齿轮6和7则向外输出扭矩。齿轮6和7分别驱动了输出轴A和B的惰轮系。最上游的齿轮系起到减速作用的同时,还采用对称结构将传递扭矩一分为二。这一结构保留了CWP公司专利介绍的扭矩分配中两个过渡齿轮同时向输出轴传递扭矩的形式。不同点在于,这一专利在轮系结构上,解除了两个输出轴扭转变形的关联,两输出轴之间不存在上下游的扭矩传递关系。还保证了两输出轴的扭转变形只来自于其驱动螺杆的负载。

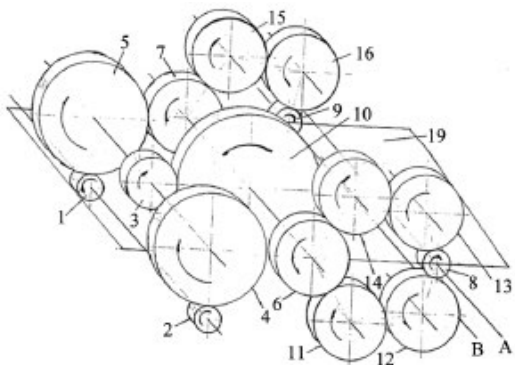


图4 非对称双螺杆齿轮箱传动系统方案

2 齿轮箱的润滑及冷却

齿轮箱的润滑及冷却系统是大型双螺杆挤压造粒机组传动系统的重要辅助系统之一。为了保证每个轴承点能够得到足够的润滑油供给,箱体上油路设计时不仅要充分考虑通往各个点位的油路通畅,而且还要通过油路结构来确保可靠的油量分配。在中小型机组的设计中,油路通畅往往会得到考虑,但精确的油量分配计算却经常被忽略。据了解,日本制钢所的CMP系列大型挤压造粒装置的技术文档中,清晰地给出了每一个轴承位润滑油的供给量。充足的润滑油供给对齿轮箱的正常工作起到了至关重要的作用。对于

大型机组油路设计来说,可以引入计算流体力学仿真软件,对润滑油管路进行优化设计,以得到精确的流量分配结果。

从润滑冷却系统的安全可靠性角度来看,引进装置传动系统的润滑冷却系统的管路仪表方案中,“一开一备”的油泵配置可以有效地保证润滑油的连续供给。设计中,要充分考虑切换泵的工艺逻辑。第一,要保证在故障泵停止工作前完成泵的切换。第二,要保证控制切换泵信号的可靠。针对这一点,油路上的数字化流量计和压力计要做定标定检。要将其采集到的数据与现场仪表数据进行对比,发现问题及时维保。第三,可以考虑无故障下的定期切换在线泵和离线泵。这样,可以避免一台泵长期服役的同时,避免另外一台泵因长期待业所导致的密封失效等问题。

3 轴承位振动监测

轴承位的振动监测是大型挤压造粒机组齿轮箱长期稳定运行的有效技术保障。大量的科研工作是围绕机组的状态监测和故障诊断开展的^[12]。无论如何,通过数据采集获取到机组运行数据和监测数据后,相关的后处理分析方法成为限制监测系统发挥作用的核心因素。基于简单的逻辑判断形成的报警信号中,可能会保护大量的“假”信息,从而让企业对其失去信心。有些企业也在寻求突破的手段,如采用紧急停产系统ESD^[13],无论如何其实际效力还有待验证。毋庸置疑,在当前石化企业造粒装置的维保中,人工经验的应用还是无法替代的主流方案。即便有不断完善的系统上线,也是在为人工分析提供更为丰富的数据来源^[14]。延续这一思路,机器学习等人工智能算法的引入有可能会解决这一问题^[15]。值得注意的是,在整个人工智能算法的范畴内,采用有监督的AI算法得到的是基于输入数据的结果预测;采用无监督的AI算法更多的是偏重于将当前状态归纳入预设的分类。这样看来,可以替代人类进行决策的算法,如围棋机器人alpha Go所采用的深度强化学习方法^[16],有可能成为真正能够解放人力,为大型石化装置提供故障预测、分析和诊断服务,甚至可能是实现设备自主调整的突破口。

4 气动摩擦离合器

在大型挤压造粒国产化攻关中,连接主电机和主减速器的气动摩擦离合器也是技术难点之一。现役大型挤压造粒机组的使用过程中,气动摩擦离合器也是

设备维保的核心重点。相比于液压扭矩安全联轴器,气动摩擦离合器具有传动扭矩大、可以调整最大传动扭矩、磨损小的优势^[17]。根据气动摩擦离合器的工作原理,压缩空气驱动气动摩擦离合器的气缸活塞运动,以实现将摩擦片与外轮毂之间的压紧,这样就实现了依靠端面摩擦力传动扭矩的功能。气动摩擦离合器正常工作时,输入侧和输出侧之间的速差要小于高报限定数值。当挤压机负载发生较大波动,特别是负载突然增加的时候,有可能造成输出侧降速,从而发生速差超限所导致的安全连锁。除此之外,气动摩擦离合器对安装精度以及摩擦片本身的耐磨性也有相对严格的要求^[18]。因此,设备初装时要注意减速器与电机之间的找正。但是,设备长期运行后,特别是在我国东南沿海地区,设备的地基会发生不同程度的沉降。为此,设备日常运维过程中要增加对地基沉降监测的同时,在大修环节还应重复初装过程中的减速器与电机的找正。

5 齿轮箱动载荷计算

齿轮箱动载荷计算是在挤压机厂房建设工程设计所需要的重要数据。挤压机螺杆从静止到工作转速,负载从 0 到 40 t/h,甚至更高,以及物料不稳定造成的冲击,这些变化的过程,从主电机到齿轮箱,再到挤压系统,均会产生复杂的加速度变化,这就是设备动载荷的由来。通常情况下,设备的静载表现为设备重力在数个地基支撑上的分布。由于轮系布局、轴承安装、箱体排布等多方面因素,多个地基支撑点上的支撑反力(静载荷)并不能直接用总重力除以支撑点数所得均值所表示。相比而言,动载荷计算更加复杂。从地基支撑角度来看,不仅要考虑与地基支撑平面垂直的支撑力载荷,还要考虑与地基支撑平面平行的剪切力载荷。这样一来,在计算过程中,就要涵盖各种载荷通过箱体传递给地基支撑的载荷,包括齿轮啮合所产生的径向力和轴向力、来自于机头的轴向力、轴系转动所形成的扭矩等。从技术层面看,使用 Ansys 软件的刚体仿真模块、Adams 软件、Smipack 软件等工程仿真软件都可以一定程度上解决动载荷计算的问题。动载荷问题应该在传动系统设定时进行计算,作为设备销售随机技术资料的一部分。

6 总结

文章从速度调整和扭矩分配方面分析了当前典型

大型挤压造粒机组传动系统轮系结构的特征。还对非对称式扭矩分配轮系结构进行了分析,当采用非对称式扭矩分配轮系结构时,解除了两个输出轴扭转变形的关联,两输出轴之间不存在上下游的扭矩传递关系,从而可以保证了两输出轴的扭转变形只来自于其驱动螺杆的负载。与此同时,还对齿轮箱润滑冷却、轴承位振动监测、气动摩擦离合器以及工程建设过程中的齿轮箱动载计算等方面进行介绍。相关内容可为大型挤压造粒机组齿轮箱的设计、使用以及工程建设提供一定的技术支撑。

参考文献:

- [1] 刘梦华. 浅析大型混炼挤压造粒机组研制中的重大基础问题[J]. 橡塑技术与装备, 2015,41(02):23-40.
- [2] 苟东影. M401 主减速机齿轮故障分析处理[J]. 石油化工设备技术, 2005(03): 38-42+69.
- [3] 王志刚, 田冬冬, 敖宝林, 等. 挤压造粒机组主减速箱故障分析及国产化改造[J]. 机械工程师, 2020(09):92-96.
- [4] 华强. 大型挤压造粒机组齿轮箱故障及原因分析[J]. 设备管理与维修, 2020(11):74-76.
- [5] 娄晓鸣. 双螺杆挤出机传动系统设计及系列化探讨[J]. 中国塑料, 1988(04):28-36.
- [6] 李世通. 双螺杆挤出机传动系统分析及高扭矩设计探讨[J]. 化工机械, 1999(06):352-356+362.
- [7] 毕超, 林桂强, 江波. 平行双螺杆挤出机传动系统结构对比分析及设计中若干问题的探讨[J]. 工程塑料应用, 2011,39(05):91-95.
- [8] 于风云, 戚琳, 史淑艳, 等. 大型挤压造粒机组螺杆芯轴的断裂原因[J]. 理化检验(物理分册), 2020,56(09):68-71.
- [9] 鲁君瑞. 大型双螺杆挤压造粒机主传动系统评价及改进分析[J]. 化工设备与管道, 2017,54(03):48-51.
- [10] 李文. 茂名大型挤压机行星齿轮减速器输出转速验算[J]. 科技通报, 2013,29(06):20-21+24.
- [11] 董立平等. 双圆柱螺杆挤出机的双对齿轮啮合传动装置[P]. 中国: 93241043.X, 1994.11.9.
- [12] 张培. 造粒机状态监测与故障诊断系统研究[J]. 化工设备与防腐, 2004(03):44-48.
- [13] 浦松. GE90-70 GMR 系统在大型挤压造粒机组中的应用[J]. 橡塑技术与装备, 2016,42(18):36-40.
- [14] 孙丰年. CWP_ZSK350 挤压造粒机运行问题诊断及优化[J]. 石油和化工设备, 2020,23(09):90-91.
- [15] 张建超, 王立娜, 王延枫, 等. 基于机器学习的大型挤压造粒机组故障诊断预测技术研究[J]. 制造业自动化, 2021,43(12):140-142.
- [16] 马克西姆·拉潘(Maxim Lapan). 深度强化学习实践[M]. (第2版. 林然, 王薇, 译.) 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [17] 崔悦. 浅析大型挤压造粒机组主驱动联轴器的应用[J]. 石油化工设备技术, 2008(01):35-38+20-21.
- [18] 张福国. 气动摩擦离合器在挤压机的应用[J]. 橡塑技术与装备, 2013,39(10):46-49.

Large twin-screw extrusion pelletising unit gearbox shaft system analysis and gearbox related core technology

Bi Chao¹, He Zhicong¹, Ji Yao², Teng Zurong²

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Nanjing High Precision Gear (NGC) Co. LTD., Nanjing 211103, Jiangsu, China)

Abstract: This article analyzes the typical transmission system wheel system structure of a large twin-screw extrusion granulation unit, and analyzes the characteristics of the wheel system structure from two aspects: speed adjustment and torque distribution. At the same time, this article also analyzed the structure of asymmetric torque distribution wheel system. On this basis, we also discussed aspects such as gearbox lubrication and cooling, bearing vibration monitoring, pneumatic friction clutch, and gearbox dynamic load calculation during engineering construction. The relevant content can provide certain technical support for the design, use, and engineering construction of gearboxes for large-scale extrusion granulation units.

Key words: extrusion granulation; axis analysis; vibration monitoring; dynamic load calculation

(R-03)

大陆集团跻身全球最具可持续发展公司 500 强

Continental ranks among the top 500 most sustainable companies in the world

大陆集团宣布，公司被美国《时代》杂志和全球数据和商业智能平台 Statista 评为 2024 年全球 500 家最具可持续发展能力的公司之一。

此次评估基于《时代》杂志和 Statista 联合开发的特殊方法，共评估了 5 000 家公司，评估依据包括公司的可持续发展战略和报告，以及排放强度、能源消耗和可再生能源占比等 20 多项关键指标。

据宣布获得该奖项的新闻稿称，大陆集团获得了 61.39 分（满分 100 分），排名 265 位。在汽车行业类别中，该公司是前 10 名公司之一。共有三家轮胎制造商跻身全球 500 家最具可持续性发展能力的公司之列。大陆集团排名第二。

大陆轮胎可持续发展主管 Jorge Almeida 表示：“我们为在可持续发展方面做出的广泛努力得到了独立排名的认可，对此我们深感自豪。我们致力于在整个价值链中实施可持续解决方案，同时保持最高的质量和性能标准。”

大陆轮胎的特点是整个价值链上的创新技术和可持续解决方案：从可持续材料的采购，到设计和生产，再到使用阶段和报废轮胎的回收。

大陆集团表示，所有大陆轮胎工厂都在致力于制定单独和全公司范围的解决方案，以最迟在 2040 年实现气候中性生产。今年，大陆集团在葡萄牙洛萨多的轮胎工厂朝着这一目标迈出了重要一步。该公司表示，在这里，它可以实现碳中和轮胎生产，这要归功于电力锅炉产生的蒸汽。大陆集团补充说，它使用内部生产的太阳能和来自电网的可再生能源来产生蒸汽。

到 2023 年，大陆轮胎的年度能源消耗总计减少了约 150 kW 时。该公司表示，这相当于约 12 500 户单户住宅的年度能源需求，并且是通过增加使用可再生能源和隔热材料实现的。此外，仅 2023 年，二氧化碳排放量就减少了 31 000 t。

大陆集团表示，正在努力实现到 2030 年轮胎中使用 40% 以上可再生和再生材料，到 2050 年实现完全碳中和的目标。最迟到 2050 年，大陆集团轮胎应完全采用可持续材料制成。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)