

干法锂电池隔膜生产线关键技术研究

王 军

武汉现代精工机械股份有限公司 湖北武汉 430040

摘要: 随着“双碳”战略与绿色发展理念的全面推进,新能源已经成为我国注重关注和重点发展的产业方向。锂电池作为当前新能源汽车发展的核心技术之一,隔膜则是其中最关键部分,不仅直接影响电池的容量、循环能力与安全性能,而且是锂电池产业中技术壁垒最突出的组件。本文即在此背景下展开研究,通过分析隔膜的用途、功能、分类与指标要求,提出干法锂电池隔膜生产设备特征,并着重探索干法锂电池隔膜生产线的关键技术。

关键词: 锂电池;干法;隔膜生产线;关键技术

引言

锂电池隔膜生产主要包括湿法与干法两种,其中干法隔膜有着工序简单、投入低、污染小、质量好等优势,因此也是未来锂电池技术与革新的重要方向。隔膜作为锂电池中支撑锂离子完成充放电化学过程的重要组件,其不仅具有重要的技术价值,而且是我国新能源产业发展的关键因素。随着电动汽车、可再生能源储存等领域的快速发展,对锂电池的需求增长迅猛,进而推动了锂电池隔膜市场的扩大^[1]。因此,干法锂电池隔膜生产线关键技术成为行业领域内必须关注的重要内容。

1. 隔膜基本情况介绍

1.1 用途及功能

锂电池主要包括正负极、隔膜与电解液几个主要组件构成,隔膜则是其中最重要的一个组件。本质上来说,隔膜是一种具有微孔结构的薄膜,通常以PE/PP等树脂为基本材料,并添加多种添加剂制成。隔膜的性能会直接影响电池的界面结构与内阻,也会影响电池的容量大小、循环次数与安全性能,进而对电池的综合品质产生直接影响。隔膜本身有着不导电的特征,根据电池种类分别选择PE或PP材料。隔膜的功能主要体现在两个方面,其一可以分隔电池正负极,由此避免电池内部短路;其二可以保证充放电化学过程中电解质离子可以来回通过,以此确保通过化学反应完成放电过程。

1.2 分类与指标要求

锂电池隔膜根据材料特性有多种类型,目前主要采用聚乙烯或聚丙烯制成的微孔膜。隔膜影响电池性能,特性越

优质,应用价值越高。对隔膜的主要要求有:电子绝缘特性,防止正负极短路;合适的孔径与孔隙率,提高锂离子放电效率;抗腐蚀性,能抵抗电解液的腐蚀;良好的力学性能,如穿刺和拉伸强度;以及空间稳定性、平整性、热稳定性、自动关断性能等。

2. 干法锂电池隔膜生产设备特征分析

2.1 干法锂电池隔膜生产特征

隔膜生产分为干法与湿法两种,其中干法的优势较为突出,第一,其生产工序更简单,因此固定资产投入更低,有着更高的推广与产业化发展优势。第二,干法制备的隔膜更薄,因此可以制作三层的复合膜,而湿法只能制作单层膜。第三,在生产链条方面,干法同时兼具成本低、污染小、孔均匀等特点优势,并且由于隔膜熔点更高,有着更好的安全性能。此外,干法隔膜主要应用于磷酸铁锂电池,相比较三元锂电池其有着更高的能量密度,因此也有更好的应用前景,由此为干法隔膜创造了更好的发展空间,而干法隔膜的应用占比也将不断提升。

当前干法隔膜生产工艺主要为单向拉伸工艺,其需要将聚烯烃树脂熔融、挤压,由此通过吹膜形成结晶型聚合物薄膜。在此基础上进行结晶化处理与退火处理,确保隔膜形成高度取向的多层结构。在高温环境下,还需要将其进一步拉伸,进而将结晶界面进行剥离,形成符合锂电池应用需求的多孔结构,同时还增加了薄膜孔径。在干法工艺中,影响隔膜结构成型的因素包括熔融牵伸比、挤出温度、隔膜性能参数等^[2]。

2.2 干法锂电池隔膜生产设备及工艺流程

干法锂电池隔膜生产设备主要包括挤出流延机、单向拉伸机、复合机、分层机、分切机等。其中流延机和拉伸机作为核心，将 PE 或 PP 材料以及添加剂按照原料配方预处理后，即可将其投入原料挤出系统。经过预处理的原料可以通过挤出系统进行一系列的加工，通过熔融塑化后，就会从模头挤出熔体。

而后，将其传送到铸片机中，通过流延辊的高速牵伸，借助其形成的应力场逐步冷却结晶，由此即可得到与挤出方向垂直的片晶结构，其以平行排列的方式呈现。该结构即为流延基膜，其已经具备了良好的硬弹性能。在此过程中，铸片机即为模头挤出的熔融态原料，其在温度逐渐冷却后形成了基础片材，在通过工艺加工后，即可进入后续工序。铸片机是挤出系统后连接的设备，其一般通过多辊面为铸片提供冷却处理，辊筒内通过冷却水使得铸片通过成型、定型、冷却。在该过程中可以借助自动控制技术，确保辊面温度处于均衡稳定状态（辊面温差 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ）。

当铸片成型后，则可以经过收卷机形成一卷一卷的基膜，牵引收卷机是主要生产工艺的最后一道工序，在此过程中其辊筒温度控制要求较高，需要保证隔膜可以在该过程中自然定型，并且能够将其应力释放，确保隔膜自身稳定且优质。而后通过切边测厚、瑕疵检测、展平隔膜、去除静电等工艺流程，最终将隔膜收卷成膜。通过 AGV 转入下一道工序复合机完成进行多层复合处理，由此进一步单向（纵向）拉伸机，以达到产品所要求的性能指标。

铸片成型后，在工艺要求的温度下加热，可以重新恢复拉伸能力。纵向拉伸机可以为铸片提供多个高精度加热辊筒，而辊筒可以根据提前设定的拉伸比例进行单点拉伸或多点拉伸。通过纵向拉伸后，隔膜在纵向方向的长度得以加长，

由此可以进一步优化隔膜的厚度、孔隙率，同时也能保证其仍然具备良好的拉伸强度，以此达到隔膜的性能指标要求^[3]。

更详细一点来说，干法隔膜生产工艺的主要流程包括“流延机（挤出一流延—测厚—瑕疵检测—牵引收卷）—复合机（多工位放卷—复合—牵引收卷）—拉伸机（多工位放卷—预热—热复合—热处理—冷拉—过渡—热拉—热定型—冷却—切边收卷）—分层机（单工位放卷—分离—多工位收卷）—分层机（单工位放卷—分切—双工位收卷）”等步骤^[4]。但随着自动化工厂的建设与发展，如今在该工艺流程中还增加了 AGV、RGV 等环节（如下图）。

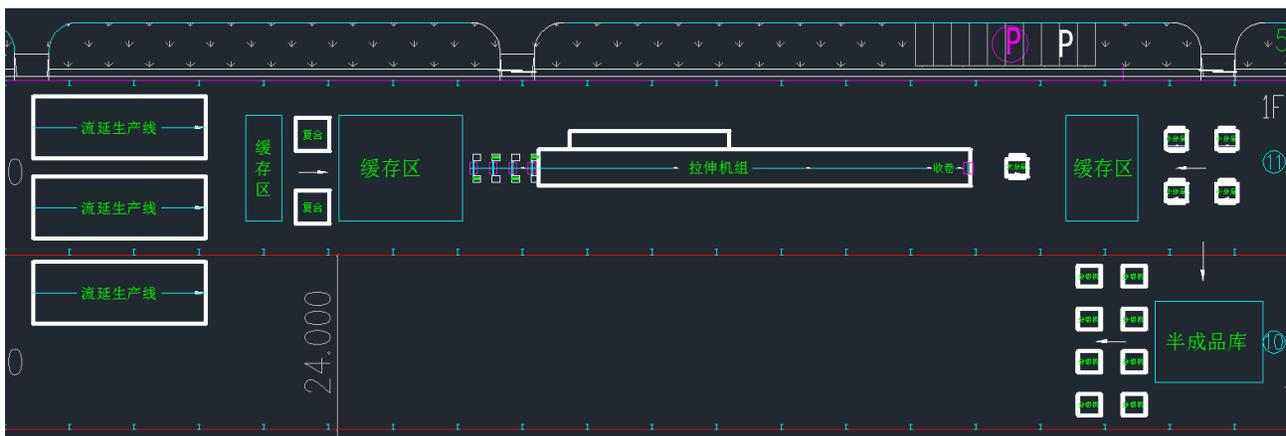
3. 干法锂电池隔膜生产线关键技术

3.1 隔膜张力控制技术

在干法锂电池隔膜生产线中，张力控制技术至关重要，其设备系统的张力稳定性直接影响产品质量，成为生产环节中必须解决的关键问题。当设备张力不足时，生产中的隔膜容易出现位移，进而导致隔膜发生褶皱问题；当设备张力过高时，隔膜则容易被拉断。

当前生产线中，张力控制系统主要有三种不同的控制方式，包括基于张力传感器的直接控制方法、基于摆辊设计的张力控制方法以及基于磁粉制动器的间接控制方法。在锂电池隔膜生产设备中，纵向拉伸机部分一般采取张力传感器进行控制，主要原因在于该方法结构简单，不需要太大的安装空间，同时还能对隔膜张力进行直观测量。

在放卷机中，则一般采用磁粉制动器进行控制。该方法主要以电磁原理为依据，通过磁粉传递转矩，由此达到间接控制的效果。在这样的工作机制下，辊筒的扭矩特性可以保持稳定的状态，进而通过控制转动转矩，就实现了控制张力的效果。



在收卷机中,通常采用摆辊张力控制方法。该方法增加了隔膜包角的大小,进而通过低摩擦气缸、精密电气比例阀、高精度直线位移传感器等设备的辅助,就可以实现对张力系统的动态控制。

3.2 原料挤出工艺

在锂电池隔膜生产线中,将熔融聚合物制成片材是第一步,因此也是整个工艺流程的重要技术环节。薄膜挤出的质量会影响后续隔膜的质量,尤其在挤出过程中,一旦压力控制不稳定,就会导致片材出现气泡、条纹、波浪等问题。

因此,原料挤出系统必须具备强力且稳定的塑化能力,既要让片材塑化均匀,呈现出均匀的孔洞,又要保持稳定的温度与压力,确保片材质量统一。

3.3 计算机自动控制技术

随着自动化工厂的建设与发展,计算机自动控制技术也成为当前干法锂电池隔膜生产线中的关键技术。首先,从整体系统体系来说,应当保证全流程工作设备协调一致,具备高精度、高动态响应的效果。其次,从各个自动控制模块来说,需要针对不同环节中的生产温度、压强、压力等数据

进行控制,以此避免人工操作的不稳定影响。此外,还应建立自动化干冰清洗、传感器自动测厚等系统模块,以此辅助隔膜生产与质量检测。

4. 结语

经济社会的发展需要我国加快现代控制理论的运用进程,提高现代控制理论在我国运用的质量,将现代控制理论与我国社会生产、生活的实践相结合,充分发挥现代控制理论的作用,实现社会生产与生活的高效。

参考文献:

- [1] 刘洪永,颜晗,周其鼎等.锂电池隔膜安全性能及测试方法研究进展与展望[J].消防科学与技术,2023,42(03):303-308.
- [2] 刘倩.锂电池隔膜用 UHMWPE 树脂的制备及性能研究[D].天津科技大学,2022.
- [3] 付莹,付传玉,张彬等.锂电池隔膜专用聚丙烯生产过程的研究[J].塑料工业,2020,48(11):31-34.
- [4] 王林,唐夏军,黄静等.锂电池隔膜生产线设备关键技术的研究[J].自动化应用,2018,(05):133-134+150.