仿真技术在锂离子电池极片轧制中的应用

[摘 要] 随着国内外对电池极片轧制设备的高速、高精度发展需求，促使仿真技术研究极片轧制的课题越来越多。介绍了非对称涂布的电池极片轧制仿真分析，仿真结果说明液压伺服加压式极片轧机能够轧制非对称涂布电池极片，克服了气液增压泵加压式电池极片轧机对此类极片无法正常轧制的缺点。综述了仿真技术在液压领域和热辊压机方面的研究进展，并进行了总结及其所存在的不足。

引言

近年来新能源行业蓬勃发展，给锂离子电池行业带来了巨大的发展空间，同时对锂离子电池的质量和寿命等也提出了更高的要求。在锂离子电池的生产过程中，极片的制造完成决定了电池80%以上的性能。因此，正负极片质量的好坏对锂离子电池的好坏有重大的影响，极片的制造在电池制造工艺中占有重要的地位。

国内外大量研究表明，正负极片的压实密度对锂离子电池的容量等电池性能有较大的影响，合适的压实密度可以增大电池的容量，减少内阻，减少极化损失等。轧制后的电池极片密度的均匀性和厚度的一致性直接决定着电池使用寿命的长短和储能的多少。可见，用轧机对极片进行轧制是生产极片过程中极其重要的一道工序，由于极片轧机对电池生产的重要性，也必然要求轧制设备向高精度，自动化发展。

仿真技术以数学模型的建立、验证、实验为核心，综合计算机技术、自动控制及系统工程、信息处理技术等多学科。用计算机对设备系统进行仿真的一般过程如下：

（1）建立所研究的控制系统数学模型。

（2）通过仿真软件把数学模型转化为计算机仿真模型。

（3）采用合适的算法编写仿真程序或者直接采用他人程序。

（4）通过仿真，得到系统的动态响应曲线和数据。

（5）分析系统仿真结果，提出提高系统动态性能的方法和措施。

随着计算机技术和科技的不断发展，人们可以利用仿真技术方便的分析轧机设备系统动态性能，确定最优参数，获得最佳的设备控制系统。电池极片负载特性是非线性的，轧制过程负载也随时间变化，电池极片轧机的伺服控制系统具有非线性和时变性，进而有必要对电池极片的轧制过程进行仿真研究，以了解各个因素对电池极片轧制质量和轧制效率的影响规律，对后续电池极片轧机的设计具有重要的理论指导意义。因此，仿真技术已成为锂电轧机设备系统设计的重要辅助手段之一。

国内外通过仿真技术研究轧机的课题越来越多，非对称涂布电池极片轧制仿真分析是应用仿真技术的典型课题，与此同时，提出了许多仿真技术在液压领域的应用课题。此外，仿真技术在热辊压机中的应用课题也备受关注。因此，本文分别从以下三方面进行介绍及综述。

1 非对称涂布电池极片轧制仿真分析

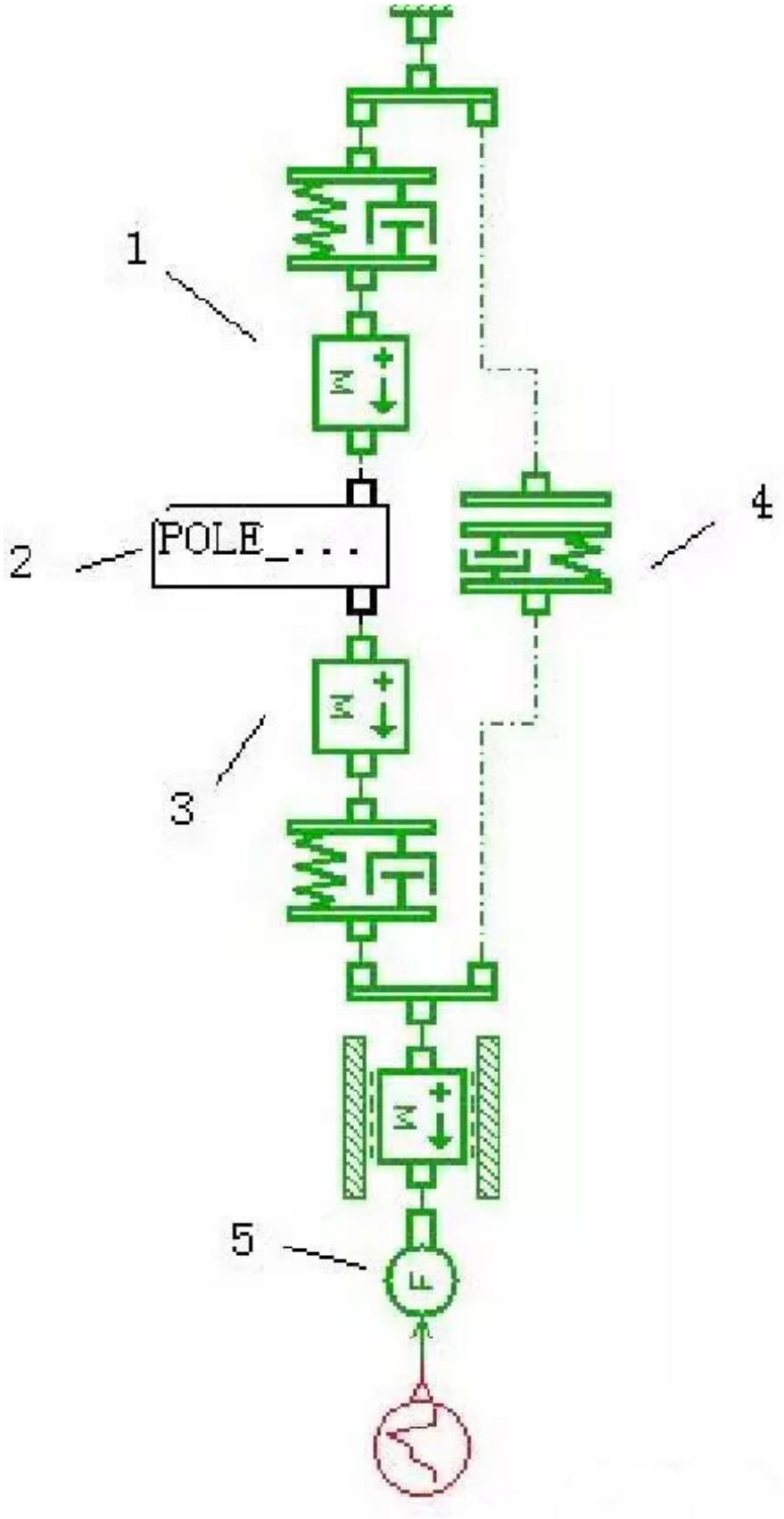
电池极片的涂布方式有对称涂布与非对称涂布。因为实际使用气液增压泵加压式电池极片轧机对非对称涂布的电池极片的轧制效果差，由此，北京北方华创新能源锂电装备技术有限公司与王益群等人合作以该司轧机为主要研究对象，分别对气液增压泵加压式电池极片轧机和液压伺服控制加压式极片轧机进行非对称涂布电池极片轧制仿真分析。

1.1 气液增压泵加压式电池极片轧机

气液增压泵加压方式电池极片轧机成本较低，能够轧制对称涂布的电池极片，但是它采用楔铁和丝杠离线调节辊缝，不能对轧辊间隙和轧制力进行实时在线调节，使其轧制速度、极片的质量及应用范围受到一定程度的制约。

研究者们基于气液增压泵加压式电池极片结构与轧制特性的分析，建立的电池极片模型及轧机轧制极片过程的仿真模型如图1所示。由于实际使用气液增压泵加压式电池极片轧机对非对称涂布的电池极片（其示意图如图2

所示）的轧制效果差，下面对此种情况进行仿真分析，仿真结果如图3所示。



1-上轧辊；2-电池极片；3-下轧辊； 4-楔铁；5-液压缸作用力.

图 1 液压缸调定压力与辊缝预调节值匹配的规律

通过仿真结果可以看出在极片从双层滚压到单层时，作用在极片上的轧制力由346kN 减小到 96kN，单层部分的密实度不能满足要求。油缸压力与辊缝间隙是根据双层部分的轧制需要进行离线设定的，一旦设定，就不能改变。作用在单层上的轧制力是由轧辊和楔铁的刚度决定的，是不可调节的。轧辊的刚度越大，作用在单层上的力就越小。在轧辊滚压到极片间隙时，轧辊与极片脱开，作用在极片上的力为零。

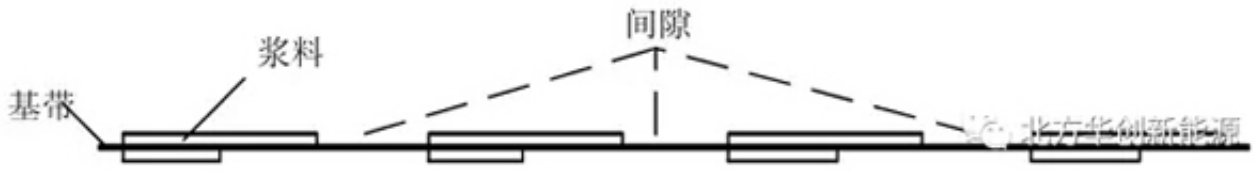
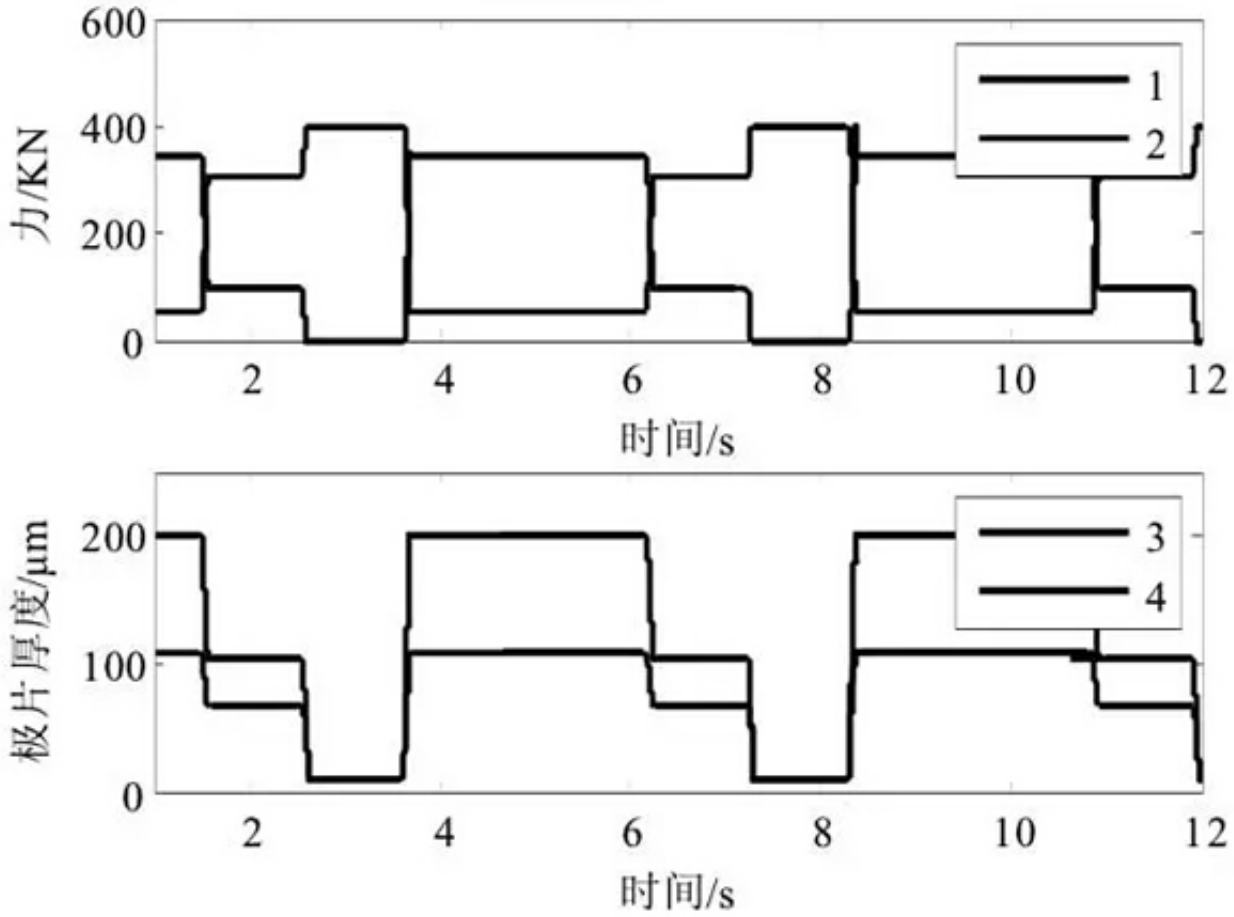


图2 非对称涂布电池极片示意图



1-作用在极片上的轧制力；2-消耗在楔铁上的力；3-极片入口厚度； 4-极片出轧出厚度.

图3 轧制极片仿真结果

1.2 液压伺服控制加压式极片轧机

液压伺服控制加压式极片轧机不再使用楔铁调节辊缝值，液压缸压力能够完全作用在电池极片上，为了能够实时控制作用在电池极片上压力和液压缸活塞位置，加压系统采用阀控缸的液压伺服控制系统。由于没有楔铁，当使用位置环轧制时，可以实现负的预辊缝轧制，不再像气液增压泵加压式极片轧机那样使用塞尺检测辊缝，只能设定正值辊缝，克服了由于楔铁的作用而使有效轧制力不能不断提高的缺点。

气液增压泵加压式电池极片轧机无法轧制非对称涂布电池极片，由于在做轧制实验时没有非对称涂布的电池极片，

研究人员对非对称涂布情况进行恒轧制力的仿真分析，仿真结果如图4所示。通过仿真结果可以看出，轧辊从双侧涂布浆料部分滚压到单侧涂布部分时，轧制力有一个减小的波动，但是能够迅速恢复到设定的轧制力值，能够保证轧制力基本恒定。说明可以采用本课题所设计的轧机轧制此类电池极片，克服了气液增压泵加压式电池极片轧机的缺点。

伺服加压式电池极片轧机压力设定值可以在线实时调节，在轧制非对称涂布的电池极片时，还可以根据工艺要求，使双层涂布与单层涂布的地方使用不同的轧制力或不同的辊缝轧制，进一步加大了轧机的应用范围。

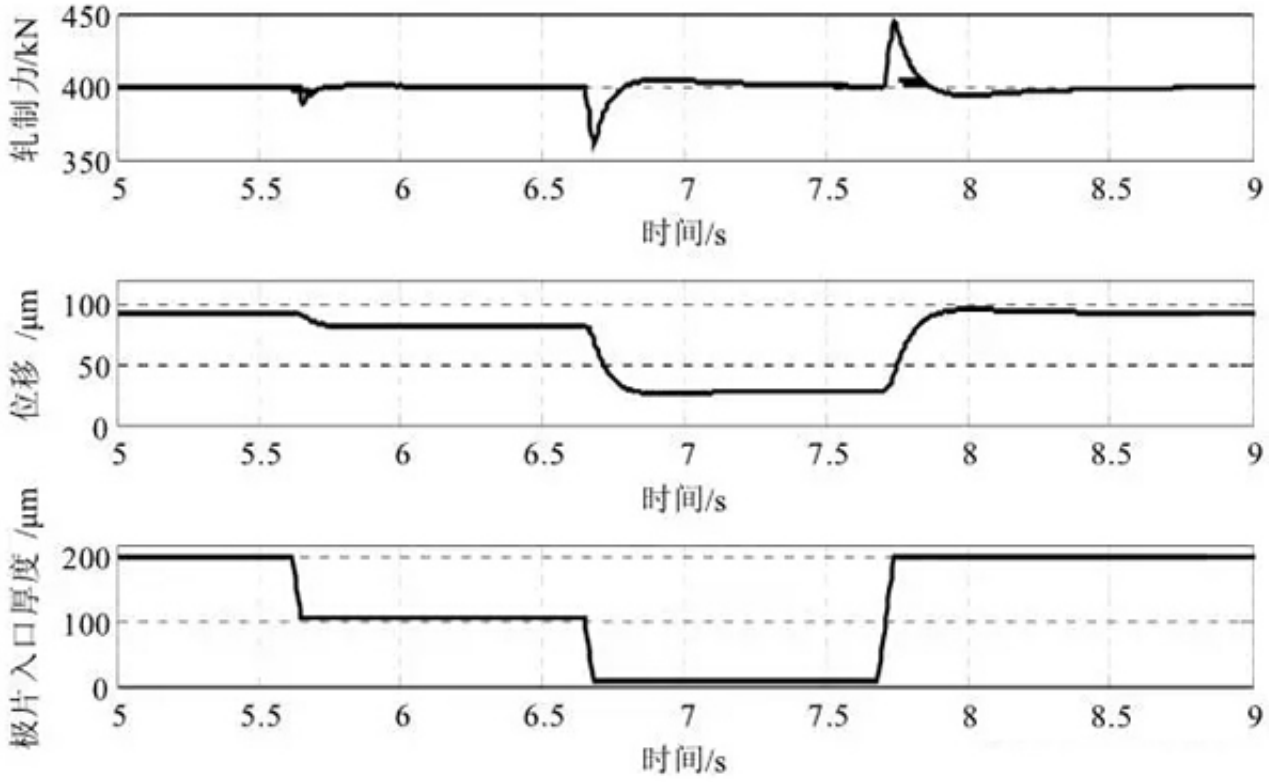


图4 恒轧制力（单侧 400kN）轧制非对称涂布电池极片仿真结果

传递的力和功率大的液压伺服控制系统的引入使得极片轧机能够实现压力和辊缝的在线实时调节，轧制单双层交替涂布的极片时，单层部分也能得到比较好的轧制效果，使得轧制极片的质量大大提高。但是由于极片涂布形式的多样，极片间隙处厚度突然变薄，极片负载的突变，还是影响了轧制速度的进一步提高。极片轧机具有非线性和时变性，电池极片负载也是非线性的，也都对轧机的设计与控制提出了挑战。

2仿真技术在液压领域的应用

所谓液压系统仿真就是建立所研究液压系统的数学模型，并转化为计算机上的仿真模型，然后进行求解运算来分析所研究系统的动静态特性的过程。

液压系统仿真不仅可以找出现有系统的缺陷所在，提出对系统的改进措施，对系统进行实质上的改进和修正；而且可以对系统设计过程中的某些参数进行检验分析，确保系统具有良好的动态性能。在实际项目中，所研究内容要在系统最脆弱的地方展开分析。这种情况下要忽略一些次要矛盾，突出主要矛盾，做到有的放矢，解决问题的关键。

液压系统计算机仿真的关键和难点在于：一建立描述液压系统的准确数学模型，二是合理的编写仿真程序。一个准确的数学模型的建立是仿真的基础和前提，目前建立数学模型的常用方法主要有传递函数法、解析建模法和功率键合图法。

仿真技术的应用在液压领域主要包括下面几个方面

（1）设计液压系统时，通过理论推导建立所设计液压系统的数学模型，经过仿真，把仿真数据和实验数据进行对

比来验证所建立数学模型的准确性，并把经过验证的数学模型作为以后改进和设计类似系统的依据。

（2）利用建立的数学模型和仿真模型，通过仿真实验来确定已知系统参数的调整范围，从而缩短系统的调整时间，提高效率。

（3）通过仿真实验，研究所建液压系统的可行性，以及各个液压元件参数对系统的影响，最后获得最佳的元件参数和控制方案。

（4）利用仿真技术研究新设计元件各结构参数对系统动态特性的影响，确定元件合适的结构参数。

电池极片轧机液伺服控制系统的设计，主要解决传统极片轧机依靠楔铁丝杠调节辊缝所带来的缺陷，实现恒辊缝和恒轧制力制，提高轧制速度。利用仿真验证所设计液压伺服系统的准确性，并研究提高极片轧机伺服系统性能的措施。

董敏等人为了全面研究轧机液压厚控系统动态特性，建立直观真实的虚拟轧机模型，提出基于AMESim和ADAMS联合建模的仿真方法。在ADAMS中构造轧机实体刚柔耦合动力学模型，实现了轧机的负载特性研究；在AMESim中建立液压系统物理模型，实现了液压伺服系统精确建模和分析，两者通过接口实现数据交换，保证了液压系统模拟的准确性和负载系统模拟的真实性。通过联合仿真模型得到了系统实时响应以及出口板厚实时数据，将模型仿真输出数据与实测数据进行比较，证明仿真模型能准确体现系统动态响应，并能体现机械部件在载荷下弹性变形和板厚实时输出情况。

Liu等人为了提高极片轧机轧制效率和轧板的质量，建立了液压系统的动态仿真模型，给出负载特性方程，模拟了恒轧制力、恒辊缝等轧制过程，仿真与实验结果基本一致。该课题组以北京北方华创新能源锂电装备技术有限公司液压伺服加压式电池极片轧机为依托，分析了液压伺服加压式极片轧机液压系统，建立液压泵、蓄能器和减压阀等的动态仿真模型，对模型进行仿真，并作了相应的实验，对元件模型进行了实验验证。在元件模型的基础上对整个液压系统进行建模，使得建立的系统模型考虑了液压泵和蓄能器对伺服阀前压力的影响，减压阀对伺服缸背压的影响。在模型上对闭环轧制力阶跃响应和轧制过程进行动态仿真分析，并在所研究极片轧机上作了相应的实验，仿真结果与实验结果基本一致，验证了模型的正确性，所建立的仿真模型具有实际参考价值，为液压控制系统参数优化提供了重要依据。

3 仿真技术在热辊压机中的应用

热辊压机是指能加热轧辊的辊压机，当利用热辊压机辊压极片时，可提高极片的压实密度、质量和生产速度。运用不同的加热工艺对轧辊进行加热的加热过程、辊面温度分布均匀性和能耗进行分析，并在此基础上对不同结构轧辊的加热过程、辊面温度分布均匀性和热应力进行分析，对指导现场加热工艺，改进轧辊结构，提高极片轧制质量有着重大的意义。国内外对轧辊的研究主要分为两个方面：1）加热轧辊的方式及其相应的控制系统，对轧辊的加热方式主要包括电加热和油加热；2）轧辊的温度分布和内部应力等。

王文成等人研究了感应加热下圆柱体的电磁场和温度场，指出电磁加热具备精度高，能耗低等特点，并开发了轧辊感应加热系统；李徽通过实际生产论述了边部加热器在热轧宽带钢生产中的应用，通过对轧辊边部进行加热，有利于提高热轧钢板凸度精度。

申世杰等人利用有限元软件对万能轧机进行了温度分析、热力耦合分析和疲劳寿命研究，指出辊颈与辊身之间的圆角处是热应力集中的位置，此处最危险，增大辊颈的直径和倒角，可使应力集中得到明显改善；胡仕成等人建立了轧辊辊套和铸坯之间的接触导热模型和传热数学模型，对轧辊和铸坯进行了仿真分析，轧辊辊套的粗糙度越低，其导热能力越强；王永洲等人对轧机轧辊进行了应力分析和模态分析；罗丽萍等人通过有限元软件对轧辊表面电渣加热和渣池热电场进行了模拟研究，分析渣池内的温度分布。

王兴东等人运用传热学知识及有限元软件进行仿真分析的方法，通过更改横向油道与辊面之间的距离δ，按照同种加热工艺对三种不同结构的轧辊进行加热。给出了轧辊内部应变图如图5所示，δ=70mm辊面的应变为0.53mm/m，δ=50mm辊面的应变为0.61mm/m，说明δ越小，辊面的变形越大；并利用有限元软件对轧辊进行温度和应力分析。分析结果表明δ值越小，加热时间越短，辊面的温差越小；三种不同结构轧辊的最大应力和应变差别不大；δ越小，油道处的应力越大，为改进轧辊内部油道结构提供理论依据。

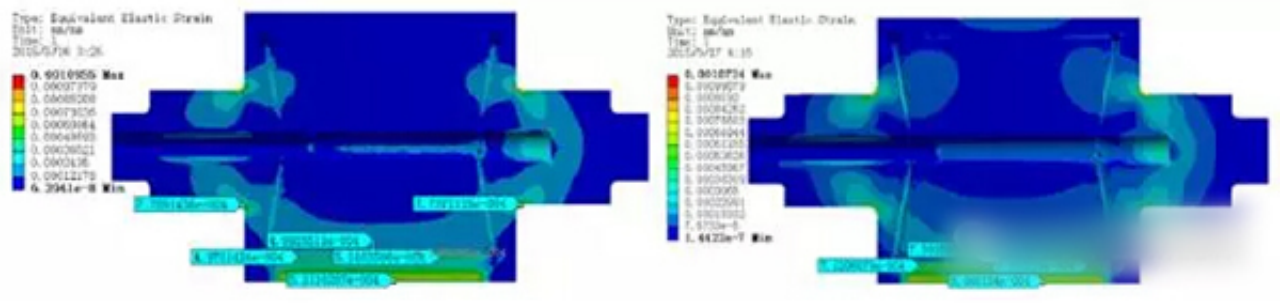


图5 δ=70mm（左）与δ =50mm（右）轧辊内部应变图

此外，通过轧辊辊面及内部温度图6可知，轧辊进油端的温度高于另一端；两端轴颈表面温度达到了100℃以上，应选择耐高温的轴承；轧辊辊身温度分布较为均匀，不存在较大的温差，芯部的温度高于辊面。该研究还指出，轧辊相当于一个集热容器，加热时间越长，轧辊对导热油的吸热量越少，进出口处油温差越小，导热油损失的能量越少，轧辊内部温度越均匀，轧辊辊面温度分布越均匀。

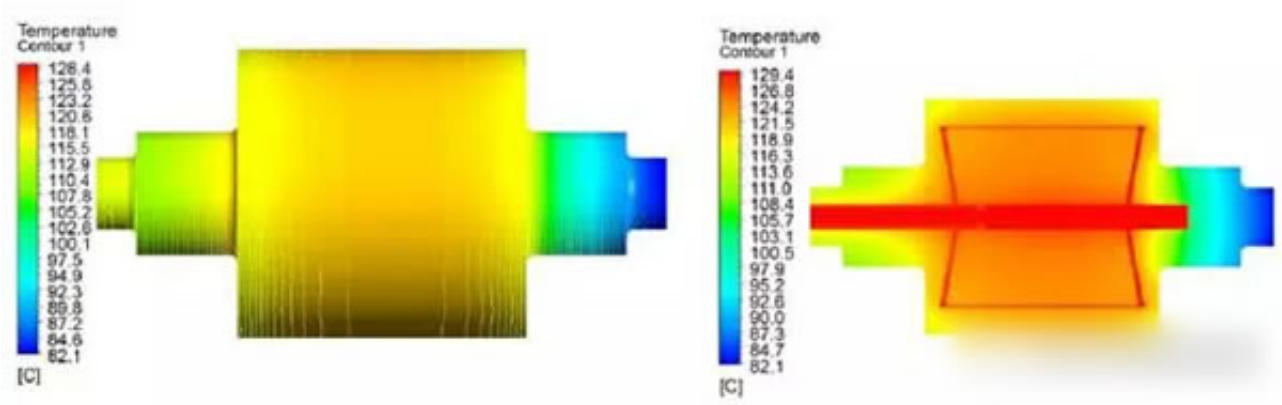


图6 轧辊辊面温度（左）及内部温度（右）分布云图

陈国樑等人运用有限元软件建立了油加热轧辊模型，对热轧辊三维温度场进行分析计算，分析结果表明：在轧辊内部，温度的梯度变化主要是径向的变化，但还有一些温度梯度沿轴向变化，提高轧辊端部温度均匀性可改善轧辊温度分布均匀性。李立新等人通过测量工作辊表面温度值，利用有限元软件建立CSP工作辊温度场模型，研究了轧制过程中的轧辊的温度场。蔡辉发明了一种主要用于加热轧辊轧辊温度控制系统，将导热油控制在一定的温度范围内，同时可以向轧辊内部导入常温导热油，导热油被密封在系统中，不结触镁合金板带，不对其产生仍何影响，导热油也不会污染环境，从而使轧辊的工作温度控制在合适的范围，提高了产品成品率和生产效率,轧制出产品质量良好。

Denis等利用有限元软件对热辊压机的轧辊进行了热应力分析和疲劳寿命分析。Luks等人通过实验的方法分析了轧辊之间的接触应力和辊面温度。

综上所述，目前对于轧辊的温度场、应力场和使用寿命研究得比较多，有必要进一步对油加热的轧辊如轧辊辊面温度分布、加热过程和能耗、应力应变等进行深入的分析，如探讨油道数量对轧辊的辊面温差、加热过程及应力等的影响。

4 结语

经过实验验证了的电池极片轧机模型上，进行了非对称涂布的电池极片的虚拟轧制，仿真结果说明了气液增压泵加压式电池极片轧机无法正常轧制非对称涂布的电池极片，而液压伺服加压式电池极片轧机能够轧制类似的电池极片。仿真技术的应用为液压控制策略的改进提供了有效的模型平台。对轧辊的加热过程和应力等有待进行深入的仿真分析。

在仿真分析过程中，改变模型参数，可以模拟实际物理系统中各个元件，机械部件等参数的变化，从而可以了解这

些实际参数的变化对整个系统的影响，便于寻找影响系统性能的主要因素。这些都非常利于设备的改进设计，提高设备的性能，缩短设计周期，调高效率。对于特别的控制系统，还可以在仿真模型上进行控制算法的仿真实验，便于探索更好的提高系统性能的控制算法，减小进行多次物理实验的时间和财力投入。

在理论计算和仿真分析过程中，采用了很多假设条件，运用实验关联式求解，存在较大误差，因此还需进一步修正仿真分析中的边界条件。（丁莹）

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/117035.html