

# Masterbox: 世界最大实验室用热压罐的固化工艺优化

## Masterbox: How to Optimize the Curing Process in the World's Biggest Laboratory Autoclave



Hakan Ucan  
德国航空航天中心

随着航空工业的需求激增,碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)工业面临着巨大挑战,其已无法满足现代技术的需求。本文介绍了一种能够改善热压罐工艺的新理念,以期低成本、低消耗地制备出高质量、高产量的构件。

为使复合材料构件制造更经济、更环保,德国航空航天中心(DLR)正专注于研究可灵活控制热压罐工艺的“Masterbox”,这种全新的理念源于“热压罐工艺在线质量监控(Online Quality Assurance in Autoclave Process)”计划,主要建立在大量数据采集系统和数值模拟计算机模型的基础上。为了更好地了解与质量密切相关的参数和各参数之间的相关性,正在开发高质量“鲁棒(自适应)”控制的热压罐工艺。与之相关的参数主要通过传感器测试和树脂模拟计算得到,树脂模拟可预测多种状态以达到可控的效果。总之,与现在当前技术相比,此方法可减少生产周期和降低成本。

图1为世界最大实验室用热压罐,其主要特征为:长27m(最大使用长度20m);直径6.5m(最大使用直径5.8m);最大操作压力1MPa;最高操作温度420℃。

### 热压罐技术现状

传统的热压罐工艺费用高、周期

长,且可靠性、灵活性和生产能力均存在局限性。而且热压罐工艺过程不可见,严重依赖于设定的温度和压力周期,只能通过经验实现工艺优化,并且需要保留一定的余量以确保树脂基体能够完全固化。在传统的热压罐工艺中,需要通过分析构件和模具表面局部温度以获取与固化度相关的信息,通过热电偶获得的温度数据来控制固化工艺,其他传感系统如用于固化监测的介电传感器仅用于文档存储。传统热压罐工艺必须避免以下三大风险:(1)固化度不确定性;(2)工艺故障;(3)产品报废。

### 新理念

通过分析与质量相关的参数,就会对材料内部发生的物理和化学作用有更好的认识。如果在整个固化过程中,这些参数都能够通过一个中央控制和处理单元进行记录和分析,便能形成更好的认识。正是基于以上出发点,创造了

“Masterbox”来记录、处理和分析系统内部的信息流。

“Masterbox”分析的数据可用于开环过程控制,以获取所需要的构件质量、优化工艺循环周期、确保产品质量和防止产品报废。实验室开发的这套固化工艺,除了可用于生产制造外,还能够实现可控运行。

### 工艺透明的高效通信系统

“Masterbox”能够通过可以反映构件质量和性能信息的高效通信系统为用户提供决策。通过传感器直



图1 世界最大实验室用热压罐

接检测的相关工艺参数与某些不能直接测试而必须通过数值模拟计算的参数存在一定差别。

传感器是获取高品质产品的重要基础,每个传感器都能提供有价值的信息,可借此对热压罐内部工艺有更加深入的了解。热压罐内部环境苛刻,压力达到 1MPa,温度达到 250℃,并且传感器工艺传输和操作过程的调试时间也非常长。除了常规的热电偶以外,用于温度测量的传感器主要有可检测自身温度的电阻温度探测器(RTD)和收集部件表面温度分布的移动热感摄像机。本文主要采用压电陶瓷、超声波和介电传感器固化检测,模具上的压力传感器主要是监测真空袋内的压力。最后,CCD 相机可适时获取热压罐内的固化过程。

在模拟热压罐工艺时,一种基于计算流体力学的物理—数学模型被嵌入到该通信系统。虚拟热压罐可获取树脂反应、树脂流动及热传递过程,并以数值模型的形式准确地预测整个工艺过程。相对于实际热压罐工艺,该虚拟热压罐可利用上述预测信息生成不同的控制策略以实现热压罐的工艺优化。

不同于传统的传感器系统,虚拟传感器嵌入的物理—数学数值模拟模型可以计算直接或间接测量的参数,包括三维温度、固化度分布、化学收缩及翘曲等参数。一旦传统的传感器系统数据丢失,丢失的数据还可以通过虚拟传感器的计算值进行补偿。这项独特的技术比所关心的测量数据更丰富,更具有灵活性。

整个工艺过程中,系统获取的数据将被记录在中央数据库中。对于传统系统,数据库的所有信息仅用于后期处理,而对于这项新技术,数据将在整个工艺周期中被反馈,用于生成关键参数,接下来对这些数据进行分析评价以评估整个工艺,最后反映出构件在整个生产过程中任意时间的质量信息。

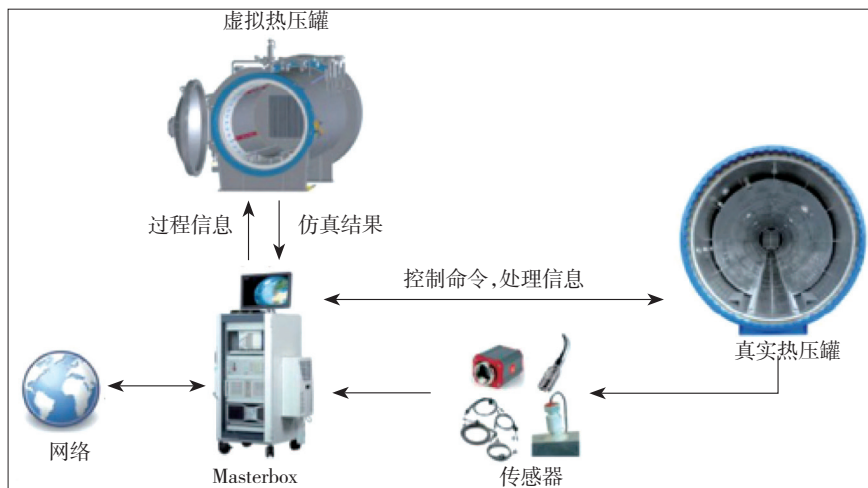


图2 系统信息传输

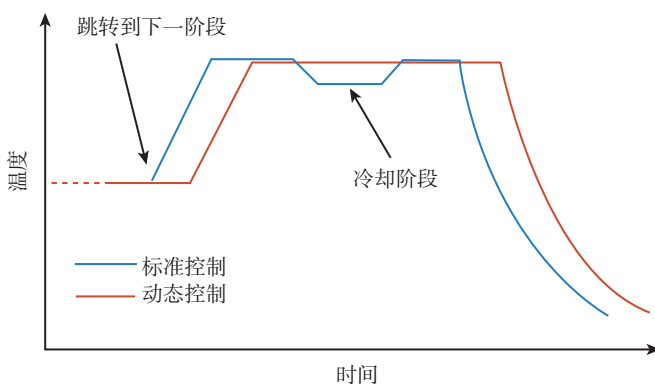


图3 标准控制和动态控制下的热压罐工艺

中采用实时仿真,以提前预知热压罐过热现象,同时在工艺过程中增加辅助降温阶段予以校正,如图 3 所示。

另外一种情形,当预计的固化状态提前达到时,工艺将提前进入下一个阶段。相反,固化度不足时,则需要延长这个工艺阶段。总之,只有综合掌握了通过传感器和模拟工具获得的过程信息,才有可能运用合理的校正措施以监控其影响。

### 决策过程

基于传统可编程逻辑控制器(PLC),该热压罐工艺控制理念可控制热压罐内温度和压力周期。通过分析和评估系统的信息流,当实际值和目标值偏差太大时,“Masterbox”就会干预 PLC,并做出控制策略,设定新的工艺过程。新的工艺参数被反馈给可编程序控制器,使其与原始设定的工艺保持一致性,如图 2 所示。热压罐工艺中可能出现的偏离是由于固化反应放热,热压罐过热。尤其对于厚层压板,树脂导热很慢,层压板内部放热无法及时释放,容易造成部件热损伤。鉴于高的热惯性,这种现象需要监测,并且最好能提前预见。为提前检测过热现象,仅靠测量还远远不够,需要在热压罐运行过程

中采用实时仿真,以提前预知热压罐过热现象,同时在工艺过程中增加辅助降温阶段予以校正,如图 3 所示。

### 结论

本文提出了一种用于优化热压罐固化工艺的新理念。通过中央控制和处理单元掌握热压罐系统信息流,从而获得预期的构件质量,以应对碳纤维增强树脂基复合材料工业面临的主要挑战。同时,还可优化固化工艺,确保产品质量和防止产品报废。“Masterbox”作为热压罐工艺枢纽,可借助有效的通信系统,实现碳纤维增强树脂基复合材料固化工艺的自我优化。

(翻译 王迎考 责编 深蓝)