新型聚酯纤维复合材料生产设备关键技术研究

1. 绪论

1.1概述

材料科学的不断发展，社会需求不断提升的背景下，更轻便、更强韧的新型复合材料材料成了科技工作者们寻求的目标，从国防科技到民用设备、从航空母舰到家用电器，高强度复合材料的影子随处可见。此类复合材料的代表就是已被广泛使用的纤维复合材料，而且依旧在推陈出新，如早在“神舟七号”建造时，大量碳纤维复合材料的使用使得其结构重量降低了30%，结构性能却未有折损[1]，又如在生活中的汽车，尤其是跑车(Fast Car)上，各种碳纤维复合材料制品屡见不鲜，增强车身强度的同时，降低了车体质量，大大节省了燃油消耗。由此可见，纤维复合材料有着极高的市场价值与研究意义。

本课题所聚焦的即是一种新型纤维复合材料制备工艺及其实现设备，此种复合材料的主要原料是玻璃纤维、聚醚多元醇及异氰酸酯，而其用途则是制造保温墙板。保温墙板又是一种新型的建筑材料，它不仅能使建筑隔热保暖、抗震防震，而且能节省人力物力，减少大量废气、废水、建筑垃圾排放，是绿色建筑的必然选择。具初步估算，若全国推广，可节省水泥1亿吨、减少建筑垃圾1亿吨、节约用水8千万吨、节约用电2亿度……故而保温墙板的材料与工艺是一热门的研究方向，于是随着材料技术的进步，新型材料的制备与墙板的成型就需要有合适的生产设备，以支持新材料制造墙板的产品化。这对建设资源节约型、环境友好型社会有着重要的意义。

本文围绕此种材料的生产工艺实现难点，展开对材料生产及实验设备关键技术的研究。一直以来，化工机械都是化工、发电、冶金、制药等诸多工业领域快速发展的重要支撑，不断支持着新材料、新技术的创新与发展，无论是国防事业还是人民生活都与之息息相关，因而它是一类十分重要且用途广泛的机械设备。同时随着科学技术的不断突破以及人民生活水平的日益提高，新材料、新工艺的需求越来越多，因此化工机械的设计、制造与运行也需要不停革新以满足不同需求。纤维复合材料的性能很大依赖于制备工艺，一是各组分材料的配比方案，二是各组分材料的反应方式。最优的配比需要不断的试验，所以为缩短研发周期，设备上必然要有能够快速及时调节各组份材料比重的装置。特定的反应方式同样对生产设备提出了苛刻的要求，良好的制备要有针对性的生产装备设计来保证。因此，本文重在攻克满足新型聚酯纤维制备工艺装置的设计难题，为进一步用于加工生产线的整体装备设计及制造提供充分的理论准备。

1.2 研究内容与研究意义

本文的研究内容即为聚酯纤维墙板材料的制备工艺的实现方式，具体地讲就是材料的配比与反应。虽然两者均属于传统化工工艺的范畴，但因为新材料的突破，配比与反应控制无法采用传统方式实现，因而有能否有针对性的设计出满足需求的生产装备是材料能否大规模投入生产的关键，同时也决定了环保墙体材料能否有所革新，这也是本文的研究意义所在。

新研制的这种墙板纤维复合材料的原料有固液两种，其中固体是纤维料，制备时需按照一定比例均匀混合，再出料发泡，由生产线上的后道工序作板材成形。因而首先需要实时控制投入投料比例以确保满足生产要求，对于液体料可直接用泵抽取计量，而固体料即纤维料既没有固定的形状也没有固定的体积，因而无法用传统的体积计量方式输送。虽然可以采用实时称重反馈控制液体料输送量，但不仅会使得整个设备的结构更为复杂，加大了研发周期和成本，而且无法消除或减少纤维聚团，不利于后续的固液混合工艺。考虑到配比是以质量为计量单位且比例控制并非十分严苛，所以可以在纤维输送时将其震松，使其均匀输送，以使得单位输送纤维体积相近，从而确保配比在要求范围内。所以在第一个研究点就是纤维料的振动输送效果，有两个衡量标准，一是能否实现纤维料单位时间等体积喂料，二是投料过程中纤维团聚的程度，如果能松散匀速喂料，则将振动送料机与液体泵结合便能实现高效率且成本低的送料装置。

对于液体料的计量已经有成熟的解决方案，即采用泵输送。而对于纤维料，既没有固定的形状也没有固定的体积，因而无法用传动的计量方式输送。虽然可以采用实时称重反馈控制液体料输送量，但会使得整个设备的结构更为复杂，加大了研发周期和成本。考虑到配比是以质量为计量单位且比例控制并非十分严苛，所以可以在纤维输送时将其震松，使其均匀输送，以使得单位输送纤维体积相近，从而确保配比在要求范围内。为了实现这种输送方式，必须选用合适的震动设备。

喂料问题解决后便是混合工艺，这也是本文研究的重点，与一般的混合工况不同，本课题的固体料为多组分料，众所周知液体量越少、固体越难流动，混合难度越大，但为了确保材料的性能，混合需要十分均匀，并且混合的均匀性要求高，同时物料具有发泡特性，极易粘结，因而需要在基本混合理论的基础上研究出新的混合技术和一套新的仿真方法，并用合适混合机械实现。现有的化工工艺设备中，双螺杆挤出机可以作为优先选择的混合设备并加以改进。双螺杆挤出机是一种用于物料混合改性挤出的工艺设备，被橡胶、塑料混炼加工行业广泛应用。其中同向啮合双螺杆型式更是具备过程自洁功能，因而适合作为固料、液体料的混合设备。但在实际使用中，由于本项目与塑料加工的溶融条件不同，设备使用过程中会出现卡死停机、功耗大等问题。经整理相关文献数据研究发现，这些问题的出现主要是因为挤出机中的混合元件选择不当，混合元件是双螺杆挤出机重要的组成元件，决定了双螺杆挤出机的混合性能，目前研究的有菱形捏合盘、拧揉捏合块（TKD）和开槽螺纹元件（SME），其中菱形捏合块就是最普通应用最广泛的混炼元件，但实践证明，它并不适合于本课题的化工工艺。但鉴于如TKD、SME具有较强的输送性，实现规定工艺具有一定的可行性。另一方面，双螺杆挤出机在混合方面有着较好的自洁性，能够很大程度上降低因材料发泡凝结导致机器卡阻故障的概率。

因而本文重在改进或设计一种新型的挤出机混合元件，使得挤出机的混合性能将很好的贴合材料制备的工艺需求，因而对双螺杆挤出机的改进主要集中在混合头的选择上。可选取一些市场上现有的混合头，运用流体力学理论分析或用Ansys CFX模拟分析后，选定形式适当的混合头再进行实际实验分析并加以改进，从而取得双螺杆挤出机的最佳改进方案。

1.3研究现状

1.3.1纤维计量研究

纤维具有结构疏松、不易流动的特点，从料仓出料时容易产生搭桥，出现纤维原料堵塞或断料情况，成团地落在输送带上，既不易于计量也不易于混合。路健、张伟等[2]在中密度稻草板生产纤维计量设备的研制中提出可以配置电震动给料机，通过震荡电机在落料处产生较大的激振力，使纤维呈微抛运动，均匀落料。并可以采用自动检测技术[3]，利用PLC以及相应的工业传感器对纤维料进行实时监测。国内大多采用的螺旋送料方式[2]，虽然可以匀速输送，但纤维被压实，以至于在液体量较少的混合条件下无法均匀浸润，国外Hauptil等[3]提出了重力加料系统，并用实验的方法验证了给料精度，Shimakura等[4]用流体分析的方法论证了纤维给料通道对给料效果的影响，Thodsaratpreeyakul等[5]详细分析了螺杆喂料效果，发现纤维量增多会导致纤维聚团而影响增强材料性能。然而这些研究均没有提出纤维匀速性与松散性统一的喂料方式与验证方法。

1.3.2混合理论

与一般的固液混合不同，混合物中多组分料是固体纤维料，因此为了有效优化双螺杆挤出的螺杆构型，必须先了解一定对混合理论。D.G.Baird，D.I.Collians[4]阐述了混合机理和混合分类，即混合机理引起各组分的物理运动（在此过程中可能会伴有不同程度的化学过程）。按照Brodkey的混合理论，混合涉及的扩散可以分为三种基本形式：分子扩散、涡旋扩散和体积扩散。

混合是为了将两种或以上组份物质尽可能均匀化，是通过物理作用进行组分细化和均匀化的分布的过程，可以分为分散混合（dispersive mixing）和分布混合（distributive mixing）两种形式[5]。分散混合是通过螺杆的剪切、拉伸、挤压等物理作用将少组分聚合物在多组分聚合物中细化，对于此混合工况，就是将纤维打散，防止纤维团聚，即图3中，（a）组分与（b）组分通过外界的作用变成（d）状态的过程。而分布混合则是通过对少组分重新排列，使其在整个体系内均匀分布的过程，这个过程仅存在粒子迁移，没有粒子尺寸的变化，即图中（a）组分与（b）组分通过外界的作用变成（c）的过程。

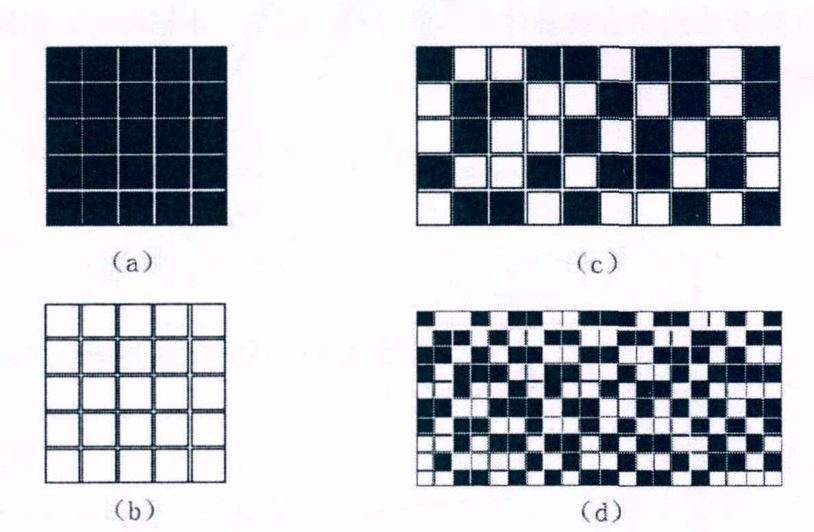


图3 分散混合与分布混合

补充…

实际上在聚合物实际混合加工中，上述的剪切流场和拉伸流场是共存的，因而很难分离研究。而传统的双螺杆挤出设备中，聚合物的剪切混合占主导，这是因为相比较于获得高拉伸速率，高剪切速率获得的方法要简单的多，比如提高螺杆转速、改变螺杆长径比、压缩比等【王大中 纤维增强尼龙体系。。】。然而以剪切流为主导的混合流场并不适合本课题的纤维增强混合工艺，原因在于强剪切流在非熔融状态下只能使纤维断裂无法保障液体料的均匀浸润，从而无法保障物料混合的均匀性。对于拉伸流场，Tadmor【王大中 69】对其的研究中阐释了当变形速率相当时，拉伸流场对刚性粒子的作用力是剪切流场的一倍。因此毫无疑问拉伸流场有更好的分散混合作用，能够有效地打散纤维团聚体，从而有更高的的分散混合效果。

1.3.3纤维混合加工技术

近年来，纤维增强加工主要以熔融状态下的剪切流场混合为主，典型的加工设备包括传统的螺杆挤出机、螺杆注塑机等，也有华南理工大学翟金平教授发明的电磁加工设备【拉伸立场支配作用下。。。】，即电磁振动挤出机、电磁振动输送机等。在纤维料为浓相的混合工况下，拉伸流场比剪切流场更能降低加工能耗，增强混合效果。也因为这点，越来越多的化工工艺机械偏重于拉伸流场的实现，如翟金平教授发明的基于拉伸力场的塑化工艺设备【126 拉伸立场支配作用下】、Chirs Rauwendaal【71 玻纤增强尼龙体系】发明的可产生强拉伸的螺棱结构、Utracki【72 73 玻纤增强尼龙系】等人发明的拉伸流场混合器等。然而限于实际工艺的局限性，以剪切流场为主的双螺杆挤出机成为了目前生产工艺的最佳的选择，因此本文的重点也就落在了寻找或设计可产生拉伸流场的双螺杆挤出机混合元件上。

1.3.3挤出机混合元件

在双螺杆挤出机的应用中，为满足不同体系的成型，各大公司纷纷开发出适合自己配方体系的新型螺杆元件，美国的Farrel设计研发出FTX Polygon、FAMME；德国的W&P研发出RGS、Schaufel、LGS元件；国内的六棱柱元件、S型元件等等均具备自己的特点[6]

双螺杆挤出机最常用的捏合元件是普通捏合盘元件，刘廷华、朱复华[7]详细介绍了这种捏合盘元件的结构参数以及工作原理，朱常委[8]在研究三螺杆挤出机时通过具体实验阐明了普通捏合盘元件的工作特性，证明此种捏合盘元件不适用于此项目工况。

拧揉捏合块（Twist Kneading Disk, TKD）结合了捏合块的强剪切混合性能和螺纹元件的输送性能，可以看作一个大螺距、小导程的螺纹元件，高健[9]在同向双螺杆剪切元件的混合性能研究中提出这种TKD元件具有良好的输送性能，王远、马秀清[10]模拟了不同构型下TKD元件的混合性能，得出其可同时具备良好的分布混合性能和输送性能，符合本项目工作条件要求。

开槽螺纹元件（简称SME元件）是在普通螺纹元件上进行开槽而获得的。在极大地保留原有输送能力的基础上，增大了其混合能力，特别是轴向回流能力有所增强[11]。

综合而言，TKD元件和SME元件理论上来说是目前最适合的混合元件，但因为模拟的混合工况依旧是以液体料为多组分料，所以这两种元件是否可以应用有待实验考证。除了上述两种混合元件外，还有尹燕玲用Ansys分析的六棱柱元件[12]，梁畅应用FEM模拟计算分析的TSE的S型元件[13]，以及黄凤春[14]研究的锯齿形元件等都有较高的参考价值。

此处用Ansys CFX作为仿真模拟，CFX作为流体分析模块CFD的一种，对旋转机械有着强大的仿真能力[15]。如李星峰[16]等基于ANSYS-CFX对离心压缩机叶轮进行流固耦合方针，IZHAR Abubakar等[17]人对气缸涡流进行分析。在作仿真之前，首先需要建立流体力学模型。在计算流体力学中，基本假设和控制方程[18,19]是必不可少的，基本假设根据实际物料流动特性决定，控制方程需要满足三大守恒定律：质量守恒、动量守恒和能量守恒。

建立基本力学模型后，用UG建立混合元件的三维模型，导入ANSYS建立流道模型，可参照M. A. Barrera和J. F. Vega[20]提出的双螺杆流道建模法，再根据不同的构型参数分别作模拟以求得最好的模拟结果，Goffartt[21]等人对不同错列角的捏合块中的三维牛顿等温流动进行了数值分析，得出了熔体流场的横向和纵向速度场、压力场的分布情况。Yasuya Nakayama和EijiTekada等[22]模拟了由新型捏合盘元件ptKD组合的不同捏合块构型下流道的三维流动，并对部分流场进行了混合性能分析。姜李龙[23]在研究新型混炼元件时也对TKD和SME作了对比仿真分析。而在流固耦合方面，Munch等[24]、Gao等[25]运用双向流固耦合方法模拟了人体主动脉内血液流动情况；Young等[26]采用面元法和有限元法建立了复合材料螺旋桨流固耦合方程。

选定螺杆构型之后，需选择双螺杆挤出机的型号，为了减少整套设备的尺寸，双螺杆挤出机在满足作业能力条件下选择外形尺寸最小的，这就需要大致估算机械功率，可参考王天鹏[27]在其硕士论文中的双螺杆挤出机的功率参数计算方法以及选型方案。

参考文献

[1] 佚名. 碳复合材料为“神七”结构质量减轻30%以上[J]. 军民两用技术与产品, 2008.