

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.04.011

PE-UHMW 异型材挤出成型有限元模拟与实验制备^{*}秦升学¹, 庄利超¹, 刘杰¹, 王庆昭²

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东青岛 266590; 2. 山东科技大学化学与环境工程学院, 山东青岛 266590)

摘要: 根据生产需求, 设计了3字形超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)异型材挤出成型流道, 并建立了该异型材挤出成型有限元模型, 应用有限元软件 Polyflow 对挤出流道内的熔体流动情况进行了有限元模拟, 分析了不同壁面滑移系数、压缩比、压缩角对成型过程的影响, 预测了在成型过程中不同参数可能导致的缺陷。结果表明, 当模具压缩比与压缩角分别为 2.5 和 25°、壁面滑移系数为 5×10^6 情况下, 可获得较好的压力与速度分布, 应用优化后的挤出模具制备了合格的 PE-UHMW 异型材。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 异型材; 壁面滑移; 有限元模拟

中图分类号: TQ320.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)04-0050-05

Finite Element Simulation of PE-UHMW Profiles Extrusion Process and Experimental Production

Qin Shengxue¹, Zhuang Lichao¹, Liu Jie¹, Wang Qingzhao²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: An extrusion channel of ultra-high molecular weight polyethylene(PE-UHMW) profiles that shape likes 3 was designed, and the finite element model of melting flow for PE-UHMW profiles extrusion processing was established. The commercial computer fluid dynamics program Polyflow was used to calculate the influences of the wall slip coefficient, compression ratio, compression angle on the extrusion process, and the defects in the product induced by different parameters were also predicted. The results show that better fluid velocity and pressure distribution could be obtained when the compression ratio and compression angle are 2.5 and 25° with the condition of wall slip coefficient is 5×10^6 , and qualified PE-UHMW profiles samples are produced.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene; profile; wall slip; finite element simulation

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)是一种分子量大于 150 万的聚乙烯。由于极高的分子量, 使其具有普通聚乙烯所不具备的优异性能, 如力学强度高、耐磨性能优异、吸水率低等。PE-UHMW 的摩擦系数低, 是非常理想的自润滑材料^[1]。目前, PE-UHMW 已被广泛应用于纺织、食品机械、造纸、运输、冶金、煤炭等领域^[2]。

由于 PE-UHMW 加热到熔点时呈现高黏弹态, 熔体黏度很高, 临界剪切速率低, 易造成熔体破裂, 使其成型加工困难^[3]。异型材挤出模具结构复杂, 流道内容易出现熔体压力分布不均、流动不稳定、挤出速度不均匀、内应力过大等问题, 对模具的设计提出了更高的要求。笔者采用有限元软件 Polyflow 对不同壁面滑移系数、压缩比、压缩角的 PE-UHMW 异型材挤出成型过程进行了数值模拟, 分析了不同参数对挤出过程的影响, 选取了合适的参数设计 PE-UHMW 异型材模具。

1 几何模型

异型材挤出模具有 3 种类型: 孔板式挤出模、多级式挤出模和流线型挤出模。由于 PE-UHMW 黏度大、流动性差、挤出速度低, 易出现滞留, 笔者采用流线型挤出模。相比于其它两种挤出模, 流线型挤出模流道具有不易出现“死点”、截面持续逐渐减小、直至成型区达到恒截面的特点^[4]。选择流线型挤出模挤出 PE-UHMW 异型材, 熔体不易出现滞留点, 且流速梯度变化小, 能获得最佳型材质量。

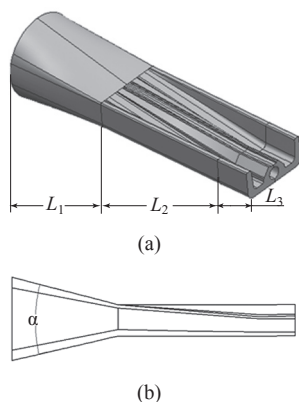
笔者设计了 3 字形结构的 PE-UHMW 异型材, 其模具流道结构如图 1 所示, 其中 L_1 为压缩段, L_2 为成型段, L_3 为平直段, α 为压缩角。该异型材壁厚较大且壁厚分布不均, 最厚处达 27 mm, 最薄处

^{*} 山东省高等学校科技计划项目(J12LB03), 山东科技大学人才引进科研启动基金项目(0104060510507)

联系人: 刘杰, 讲师, 主要从事材料激光加工与数值模拟研究

收稿日期: 2015-01-20

为 7.5 mm,在挤出过程中容易出现挤出速度不均的现象。3 字形结构异型材两侧壁处无支撑,在挤出过程中容易出现侧壁翘曲。制品为中间带孔、上下非对称结构,其芯棒同样分为压缩段、成型段、平直段且各段不同轴,这使得流道的复杂程度大大增加,芯棒上下面易出现压力差,从而对芯棒的稳定造成影响,导致制品圆孔偏心。



a—流道实体模型; b—流道侧视图

图1 模具流道结构

本实验的 3 字形异型材模型为左右对称,可取模型一半作为研究对象建立有限元模型,采用 Polyflow 的前处理软件 Gambit 作为有限元网格划分软件。异型材挤出流动过程非常复杂,选用六面体单元能保证计算精度,运用 Map 划分工具,生成六面体单元数目为 131 944。

2 数学模型

2.1 控制方程

对挤出口模内聚合物熔体成型过程作如下假设: (1) 熔体不可压缩; (2) 忽略重力和惯性力; (3) 等温层流; (4) 忽略入口效应^[5]。熔体为等温流动,忽略能量方程,且流动行为服从三大守恒定律,即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。

熔体的黏度模型直接影响模具内流场的分布情况。Cross 模型作为一种可以同时描述高剪切速率时的幂律流变行为和零剪切速率附近的牛顿流变行为的经验模型,具有物理概念明确、形式简单的特点^[6],在高分子材料成型加工数值模拟中得到了广泛的应用^[7]。因此本实验采用 Cross 模型描述熔体黏度。

2.2 壁面滑移模型

PE-UHMW 熔体在挤出成型过程中呈高黏弹态,不同的壁面滑移对其挤出过程影响较大,用广义流体的 Navier 滑移模型进行模拟,模型为:

$$f_s = F(\nu_w - \nu_s) |\nu_w - \nu_s|^{e-1} \quad (1)$$

式中: f_s ——熔体在壁面处的剪切应力;

F ——壁面滑移系数;

ν_s ——熔体在壁面的切向速度;

ν_w ——流道壁面的切向速度,通常为 0;

e ——熔体幂律指数,是与材料相关的系数。

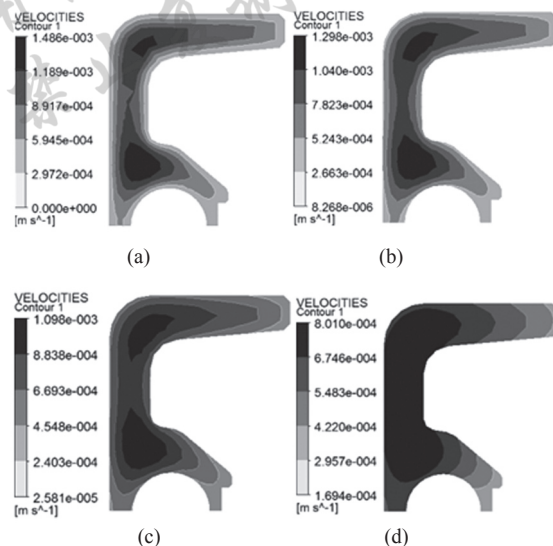
本文采用的 PE-UHMW 流变学参数分别为: 零剪切黏度 $\eta_0 = 3.5 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 松弛时间 $\lambda = 1 \text{ s}$, 幂律指数 $e = 0.4$ 。假定熔体在入口处流动充分发展, 聚合物熔体体积流量 $Q = 2.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3 模拟结果与分析

3.1 壁面滑移系数对成型的影响

壁面滑移系数越大,表示壁面滑移程度越小,当壁面滑移系数为无穷大时,表示无滑移;当壁面滑移系数为 0 时,表示全滑移。

图 2 为平直段不同壁面滑移系数下流道出口截面的速度分布图。



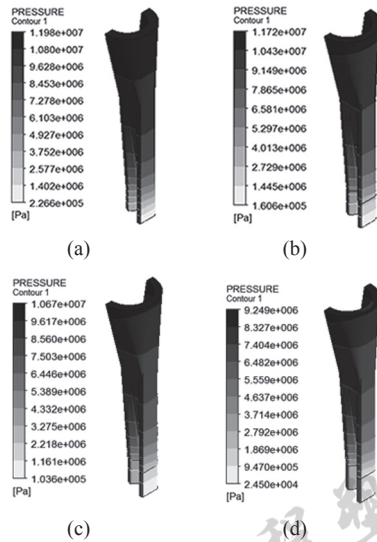
壁面滑移系数: a—无穷大; b— 1×10^7 ; c— 5×10^6 ; d— 1×10^6

图2 平直段不同壁面滑移系数下流道出口截面速度分布图

由图 2 可知,当壁面滑移系数为无穷大、 1×10^7 及 5×10^6 时,熔体在出口截面壁厚最大的两个区域形成了两个数值不等的速度高峰区,并且随着壁面滑移系数的减小,两个区域的速度差变小。当壁面滑移系数为 1×10^6 时,两个区域相连形成一个速度高峰区。随着壁面滑移系数的减小,出口截面的速度梯度减小,速度分布变得更均匀。当无滑移时,紧靠壁面的分子粘附在流道壁上,壁面速度为零,速度向熔体中心递增;随着壁面滑移系数的减小,壁面速度增大。熔体出口截面中心的最大速度随着壁面

滑移系数减小而减小,出口截面的速度梯度减小,速度分布更均匀。这是因为随着壁面滑移系数的减小,壁面与熔体的摩擦力减小,熔体流动的阻力减小,使得熔体在流道壁面的剪切应力减小,壁面速度增大,熔体表层速度更接近于中心速度,速度梯度减小,熔体截面速度趋于均匀。

图 3 为平直段不同壁面滑移系数下的流道内的压力分布图。



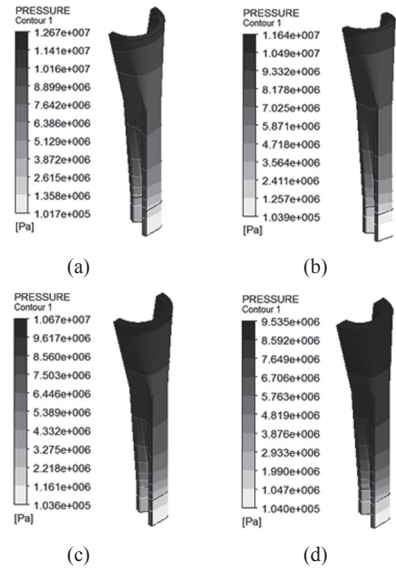
壁面滑移系数: a—无穷大; b— 1×10^7 ; c— 5×10^6 ; d— 1×10^6

图 3 平直段不同壁面滑移系数下的流道内的压力分布图

由图 3 可以看出,随着壁面滑移系数的减小,熔体入口压力由 11.98 MPa 变为 9.249 MPa,出口压力由 0.2266 MPa 变为 0.0245 MPa,则压力降由 11.7534 MPa 减小为 9.2245 MPa。表明熔体在流道流动过程中所受的压力损失减小,整个流场的压力梯度减小,压力分布变得均匀,不易产生不稳定的区域,有利于熔体充模流动稳定。当壁面滑移系数为 1×10^7 时,熔体前端入口处压力分布不均匀,并随着壁面滑移系数的降低而加剧,虽对于熔体整个压力梯度的分布影响不大,但对于芯棒的稳定会有不利的影响,并影响制品尺寸的稳定。因此,结合壁面滑移系数对出口速度影响,壁面滑移系数为 5×10^6 时较合理。

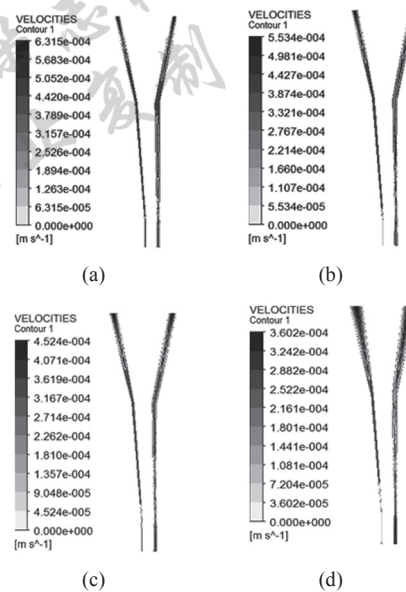
3.2 压缩比对接出的影响

分流器支架出口处的口模截面积及管芯之间的环形截面积之比为机头压缩比,反映了粘流态塑料被压缩的程度。本实验在平直段壁面滑移系数为 5×10^6 条件下,建立了压缩比分别为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 时的模型,模拟获得了流道内的压力分布和速度分布,如图 4 和图 5 所示。



压缩比: a—1.5; b—2.0; c—2.5; d—3.0

图 4 不同压缩比下的流道内的压力分布图



压缩比: a—1.5; b—2.0; c—2.5; d—3.0

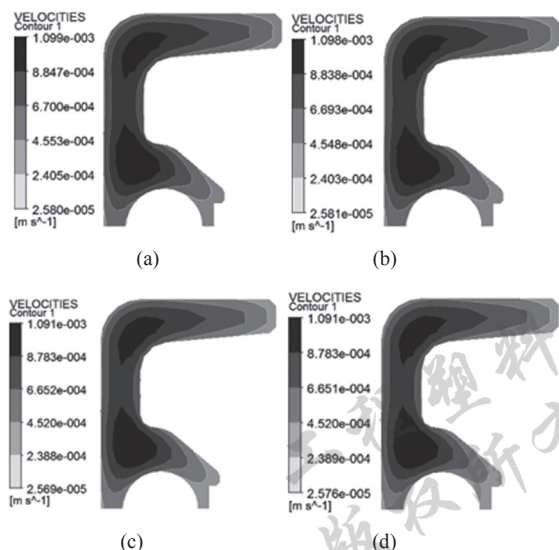
图 5 不同压缩比下熔体对称面速度分布图

由图 4 可知,改变压缩比后, PE-UHMW 熔体在流道内的压力分布发生变化。当压缩比为 3.0 时,压力梯度分布最均匀,随着压缩比的减小,压力在入口处出现压力梯度分布不均的现象,在芯棒的上下产生压力差,这会对芯棒的稳定造成影响并最终对产品的尺寸精度产生影响。随着压缩比由 1.5 增加到 3.0,熔体的压力降分别为 12.5683, 11.5361, 10.5664, 9.431 MPa, 熔体的压力降越来越小。这是因为在压缩角 (见图 1b) 一定的情况下,增大压缩比,相当于增加了流道的横截面积,减小了流道的阻力。

由图 5 可以看出,随着压缩比的增大,熔体的最大速度减小,这是由于增大压缩比,相当于增大了流道的横截面积,在流量一定的情况下,致使速度降低。从图 5 还可以看出,随着压缩比的增大,平直段芯棒(周向)两侧的对称截面上速度差越来越大,这将会由于内应力释放导致型材弯曲和圆孔不圆等现象。综合考虑压力和速度的影响,压缩比选取 2.5 最为合理。

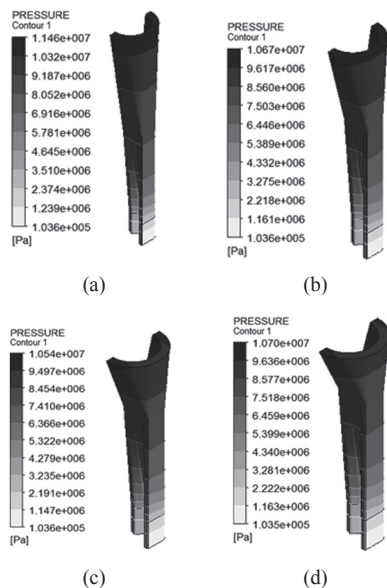
3.3 压缩角对挤出的影响

图 6、图 7 分别为不同压缩角下熔体出口截面的速度和压力分布图。



压缩角: a—15°; b—25°; c—35°; d—45°

图 6 不同压缩角下熔体出口截面的速度分布图



压缩角: a—15°; b—25°; c—35°; d—45°

图 7 不同压缩角下熔体的压力分布图

由图 6 可知,不同压缩角下,熔体出口截面的速

度分布趋势基本一致,说明压缩角对熔体出口截面速度的分布影响不大。

由图 7 可知,当压缩角为 15° 时,压力分布均匀且变化趋势平缓;当压缩角增大时,挤出流道截面变化剧烈程度增加,压力分布不均匀性增加。当压缩角为 35° 时,压力降为 10.4364 MPa;当压缩角增大到 45° 时,熔体流动受阻,压力降升高到 10.5965 MPa。当压缩角分别为 25° 和 15° 时,压力降分别为 10.5664 MPa 和 11.3546 MPa。这是因为当压缩比一定时,减小压缩角,压缩段长度增加,阻力增大,造成压力降升高。当压缩角过大时,流道变化过大,造成压力分布不均,不利于型材的平稳挤出。当压力角过小时,虽然挤出平稳,但模具长度增加,与熔体接触面积增大,增大了流动阻力,同时熔体在模具流道内的停留时间增加,使聚合物分解的可能性增加,如果聚合物分解则会降低挤出制品的力学与物理性能。因此综合考虑加工平稳性与效率,压缩角为 25° 时最为合理。

4 异型材挤出加工

在设计异型材模具中,型腔流道对接处应光滑并且注意对称布置,不得有明显的扩张和压缩,并保证有足够的定型段长度。另外口模处横截面各处的流体流速应基本一致。根据上述设计原则初步设计了 3 字形 PE-UHMW 异型材挤出模具(见图 1),并进行了挤出成型有限元模拟。根据数值模拟结果,获得优化的 3 字形 PE-UHMW 异型材挤出模具的压缩比与压缩角分别为 2.5 与 25°,平直段壁面滑移系数为 5×10^6 ,最终确定了挤出模具结构参数。图 8 为优化设计后模具挤出的 PE-UHMW 异型材照片。

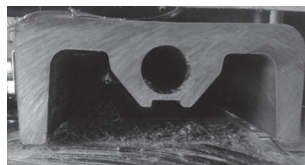


图 8 PE-UHMW 异型材挤出产品照片

从图 8 的最终产品照片可以看出,侧壁与中间圆孔均未出现明显翘曲与弯曲缺陷,因此基于有限元模拟优化设计的 3 字形 PE-UHMW 异型材模具满足设计要求。

5 结论

建立了 PE-UHMW 异型材挤出模拟的有限元模型,模拟了异型材挤出成型过程,获得了不同壁面滑移系数、压缩比和压缩角对挤出的影响,根据模拟

结果设计了模具,并试制了制品。结论如下:

(1) 壁面滑移系数对于模具内熔体的压力、速度影响显著。随着壁面滑移系数的降低,熔体压力降低,压力损失减小,出口截面速度分布趋于均匀,但入口压力不均,不利于挤出的稳定。综合考虑速度与压力因素,挤出合理的壁面滑移系数为 5×10^6 。

(2) 在压缩角一定的情况下,增大压缩比,压力降低,压力损失减小,在满足机头许可的压力下可以增加产量。增大压缩比,熔体压力梯度分布均匀,使熔体流动过程平稳,但过大的压缩比会导致异型材不同壁厚部位的速度差增大,影响制品质量。根据模拟结果,选择压缩比为 2.5。

(3) 在压缩比一定的情况下,改变压缩角大小对熔体的速度分布影响不大,但对熔体压力的分布影响显著。减小压缩角,挤出平稳,压力分布均匀,但同时模具流道的长度增加,增大了流动阻力。综合考虑加工平稳性与效率,选择压缩角为 25° 。

(4) 根据模拟结果设计加工了 3 字形异型材挤出模具,压缩比与压缩角分别为 2.5 与 25° ,在壁面滑移系数为 5×10^6 时,获得了合格的 PE-UHMW 异型材制品。

参考文献

- [1] El-Domiaty A, El-Fadaly M, Nassef A E. Wear characteristics of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE)[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(5):577-583.
- [2] 李志,王艳玲,刘持政,等. 超高分子量聚乙烯成型技术研究进展[J]. 塑料, 2014, 43(2):30-43.
Li Zhi, Wang Yanling, Liu Chizheng, et al. Development of processing technology of ultra high molecular weight polyethylene composite[J]. Plastics, 2014, 43(2):30-43.
- [3] 柳和生,张小霞. 超高分子量聚乙烯气辅挤出影响因素的数值模拟及分析[J]. 塑料, 2012, 41(1):94-97.
Liu Hesheng, Zhang Xiaoxia. Numerical simulation and analysis of the effect of some materials and processing parameters on the gas assisted extrusion of ultra-high molecular weight polyethylene[J]. Plastics, 2012, 41(1):94-97.
- [4] 李志刚,夏巨湛,李德群,等. 中国模具设计大典:第 2 卷:轻工模具设计[M]. 江西:江西科学技术出版社, 2003.
Li Zhigang, Xia Juzhan, Li Dequn, et al. China die and mould design canon: Vol.2: Design of moulds for light industry[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 2003.
- [5] 庄俭,王敏杰,于同敏. 微注塑成形中壁面滑移对熔体充模流动影响的研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(16):1995-1999.
Zhuang Jian, Wang Minjie, Yu Tongmin. Study on the effects of wall slip on melt filling flow in micro injection molding[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(16):1995-1999.
- [6] Pantani R. Validation of a model to predict birefringence in injection molding[J]. Eur Polym J, 2005, 41(7):1484-1492.
- [7] 杨晓东,刘保臣,刘春太,等. 高分子聚合物熔体 Cross 黏度模型的改进[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(11):172-174.
Yang Xiaodong, Liu Baochen, Liu Chuntai, et al. Modified Cross viscosity model for polymer melt[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2010, 26(11):172-174.

山东英科掘金快餐盒等废弃白色塑料

白色泡沫垃圾是指包括快餐盒以及各种家用电器、商品防压外包装等使用的、以发泡聚苯乙烯塑料为材料的废旧垃圾。随着人们对产品外包装重视度的提高,白色泡沫的使用量急剧上升,但这些白色泡沫对环境造成了严重的污染。

近日,全国 7 家科研院所及多位业内权威专家来到山东省淄博市齐鲁化学工业园,参加由工信部组织、在山东英科环保再生资源股份有限公司(简称英科环保)举行的“废弃泡沫塑料增密、再生、制作仿木线材技术与装备”科技成果国家级鉴定会。鉴定委员会评估结果显示,“废弃泡沫塑料减容增密技术及装备”、“废弃聚苯乙烯泡沫再生关键技术”和“再生聚苯乙烯微发泡制备仿木线材技术”3 项科技成果已达到国际先进水平,可有效解决废弃泡沫塑料综合利用问题,促进废塑料规模化回收,提高废塑料再生利用产品附加值,对废弃泡沫塑料资源化利用具有重要的促进作用。

不久前,英科环保还被《美国塑料新闻》杂志评为“再生塑料领域最具创意企业”。其产品年总销售额 8 亿元人民币,销往美英法等欧洲国家及全球 86 个国家及地区,受到海内外众多客户的好评。(工程塑料网)

巴斯夫联合 SGL 圆满完成碳纤维轻量化研究

巴斯夫(BASF)与德国碳处理公司 SGL 集团日前宣布其对新型复合材料的研究已圆满结束,本次研究将碳纤维与尼龙结合,旨在提高热塑性碳纤维复合材料生产的成本效益。

巴斯夫在 3 月 9 日的新闻发布会上表示,为矩阵系统特别设计的碳纤维表面结合定制的热塑性反应系统能使汽车等领域的轻量化结构部件轻松快速地生产。该研究的重点是热塑性树脂传递模塑以及反应注塑模塑的加工工艺。

巴斯夫发言人表示,不公开项目投资,但两家公司将联合使材料的研究方向转变成汽车领域的客户提供专门的应用。

此外,两者还采用了巴斯夫的 Ultrasim 仿真软件来辅助部件设计及优化。SGL 研发主管认为,所有部件的交互是反应性聚酰胺创新复合材料的中心价值所在。凭借广泛的材料技术, SGL 集团为此合作项目中的定型以及纤维处理定制了一系列解决方案。

本次研发是 2012 年 SGL 与巴斯夫正式合作后的一个里程碑。(慧聪网)