

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.01.009

玻璃纤维毡增强聚丙烯复合薄板的热冲压成形^{*}

王健,张亮亮,秦浩,肖宏,朱伟

(燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心,河北秦皇岛 066004)

摘要:通过 ABAQUS 有限元模拟及热冲压成形实验,研究了不同温度下玻璃纤维毡增强聚丙烯复合材料 (GMT-PP) 的冲压成形性。结果表明,在可成形范围内,温度越高,可成形的深度越大,所需要的冲压力越小,越有利于材料成形,在测试的范围内,GMT-PP 的适宜成形温度为 160,200℃;结合冲压成形实验的结果与模拟结果可得出,冲压成形时最容易出现损伤和断裂的部分为冲压件底部;冲压成形实验的曲线与模拟曲线的变化趋势基本吻合,实验中冲压压力的大小与模拟值的大小在误差允许范围内保持一致,验证了所选黏弹性本构模型的合理性,为类似材料的成形研究提供参考。

关键词:玻璃纤维毡增强热塑性复合材料;成形性;冲压实验;有限元模拟;黏弹性

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)01-0043-06

Study on Forming of Glass Mat Reinforced PP Composite Sheets with Hot Stamping

Wang Jian, Zhang Liangliang, Qin Hao, Xiao Hong, Zhu Wei

(National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Rolling Strip, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract : The stamping forming property of glass mat reinforced PP composites (GMT-PP) under different temperatures were studied by finite element simulation with ABAQUS and the hot stamping experiment. The results indicate that in the formable range, the higher the temperature is, the larger the forming depth is and the less the needing stamping pressure is, which is beneficial to the forming of GMT-PP and the optimum formation temperature range for the GMT-PP is 160,200℃ in the range of the experiment. The part most easily damaged or fractured in the process of stamping is the bottom of the stamping part according to the results of the experiment and the simulation. The curve of the stamping experiment agrees well with the trend of the simulation curve, and the values of stamping pressure in the experiment are consistent with the simulation values with the allowable range of errors, the rationality of the selected viscoelastic constitutive model is verified, which provides a reference for the similar material on formability.

Keywords : glass mat reinforced thermoplastic composite ; formability ; stamping experiment ; finite element simulation ; viscoelasticity

玻璃纤维毡增强热塑性复合材料 (GMT) 是以可回收再利用的热塑性树脂为基体,以短切玻璃纤维或连续玻璃纤维毡为增强体的板片结构材料。具有强度高,密度小 (仅为金属的 1/5~1/7),耐热性均衡,刚性和耐冲击性良好,且易于加工等优点,是目前国际上极为活跃的复合材料开发品种之一^[1-2]。

在竞争日益激烈的汽车行业,汽车产能过剩利润降低,加之严峻的环境保护要求,企业不得不加大研发创新。由于 GMT 成型简单成本低,可回收利用且无二次污染,利于专业化、大批量生产,利用热冲压成形工艺使 GMT 材料发生塑性变形来加工制成产品,可以顺应未来汽车制造业的发展趋势,研究其成形性具有重要意义。

GMT 通常厚度为 1~4 mm,便于运输、储存和

成型,其中 70%~80% 被应用在汽车工业中^[3]。谢德钰等^[4]通过研究证明了轻质聚丙烯 (PP) 基 GMT 在汽车轻量化和环境友好性方面比 PP 基本粉板复合材料更有优势。近年来,针对 GMT 在汽车结构方面的成型性有着大量的研究。吴维新^[5]对汽车座椅骨架专用复合材料的制备进行了研究,分析了成型压力、纤维毡、模具压力等对 GMT 性能的影响。邵长明^[6]对 GMT 用于轿车后背门板的模压工艺进行了研究,主要研究其代替钢制件的可行

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51304171),留学人员科技活动择优项目 (CG2016003001)

联系人:王健,博士,副教授,主要研究方向为金属热塑性变形行为研究,FRP 薄板制备及成形性研究

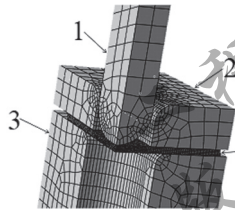
收稿日期:2016-11-02

性。叶鼎铨^[7]对 GMT 的成型工艺进行了详细的研究。但是在 GMT 薄板材冲压成形方面的研究并不多。基于此,笔者在前人研究的基础上,通过有限元软件 ABAQUS 对玻璃纤维毡增强 PP 复合材料 (GMT-PP) 进行了冲压成形模拟,分析了温度对材料成形性的影响,然后利用冲压成形实验,研究了不同温度下冲压力与冲压行程的关系,以求从关系复杂的工艺参数中找到适宜 GMT-PP 的成形条件,最后将实验曲线与有限元模拟得到的关系曲线相对比,验证所选黏弹性本构模型的合理性,为类似材料的冲压成形研究提供参考。

1 有限元模拟

1.1 模型建立

GMT-PP 为典型的黏弹性材料,在外力作用下的应力、应变、位移等响应与时间和温度有关^[8]。基于大型商用有限元软件 ABAQUS,建立冲压成形的三维模型来研究不同温度下 GMT-PP 的成形性。考虑到几何、材料和边界条件的对称性,建立了图 1 所示的三维模型。



1—冲头; 2—压边圈; 3—模具; 4—试样

图 1 冲压成形的三维模型

模型中模具单元类型为刚体单元 R3D4,试样的单元类型为实体单元 C3D8R,并采用缩减积分,表 1 给出了网格划分数据。建模时将模具设为刚体,试样设为黏弹性体,模型中主要采用面对面接触,摩擦系数取 0.3,表 2 给出了纤维质量分数为 30% 的 GMT-PP 基本物理力学性能参数。确定模型中材料的参数值,根据松弛实验^[9]得到不同温度下的松弛模量,模拟时温度取室温 (RT) 及 55,80,160,200℃,再由温布尔方程时温等效原理得到松弛主曲线与时间的关系,利用 Matlab 最小二乘法的曲线拟合得到计算所需的 Prony 系列数据,输入到有限元软件的材料属性中,相关数据见表 3。

表 1 模型中的单元类型及网格尺寸

部件	单元类型	平均网格尺寸 /mm	网格数量
冲头	R3D4	1.00	560
压边圈	R3D4	1.00	798
模具	R3D4	1.00	1 426
试样	C3D8R	0.15	11 341

表 2 GMT-PP 的物理力学性能参数

性能	数值
密度 / (g · cm ⁻³)	1.13
拉伸弹性模量 / GPa	5.6
剪切弹性模量 / GPa	4.4
泊松比	0.33

表 3 归一化的剪切弹性模量和松弛时间

温度 /℃	归一剪切弹性模量	松弛时间 /s
RT	0.051	100
	0.116	1 000
	0.661	10 000
	0.08	10
55	0.67	1 000
	0.21	10 000
	0.080	1
	0.300	100
80	0.564	1 000
	0.066	1
	0.682	100
	0.194	1 000
160	0.130	0.1
	0.060	10
	0.752	100

1.2 模拟分析结果

模拟过程中不考虑材料损伤,只研究材料损伤前不同温度下材料的成形规律。模拟时冲压速度取 1 mm/s,冲压深度取 5,8,10,12 mm,假设在模拟过程中最大应力超过材料在该温度下所允许的最大应力值时,材料发生失效。在此基础上对 GMT-PP 的冲压成形过程进行了有限元模拟,结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,试样在冲压成形过程中等效应力比较大的区域主要分布在凸模顶部和凹模倒角处与试样接触的部位,且冲压相同深度时的等效应力随着温度的增加而减小。温度对 GMT-PP 的成形性影响较大。在室温下只有冲压深度 5 mm 时成形性良好,当冲压深度为 8 mm 时最大等效应力超过了许用应力。随着温度升高,材料所能成形的冲压深度增大,说明温度升高有利于材料成形。由应力分析可知,在冲压过程中最大应力出现在冲压件圆弧接触的拐角以及成形时材料发生弯曲的部分,所以推测最容易出现损伤和断裂的位置为冲压件的底部。根据上述获得的温度对 GMT-PP 成形性的影响,可以在实验中通过研究不同温度下冲压压力与冲压深度的关系来获得 GMT-PP 在不同工艺参数下适宜的成形条件并验证所选本构模型的准确性。

2 实际冲压成形实验

2.1 主要原材料及设备

实验选用的 GMT-PP 板材 (客户定制) 规格大

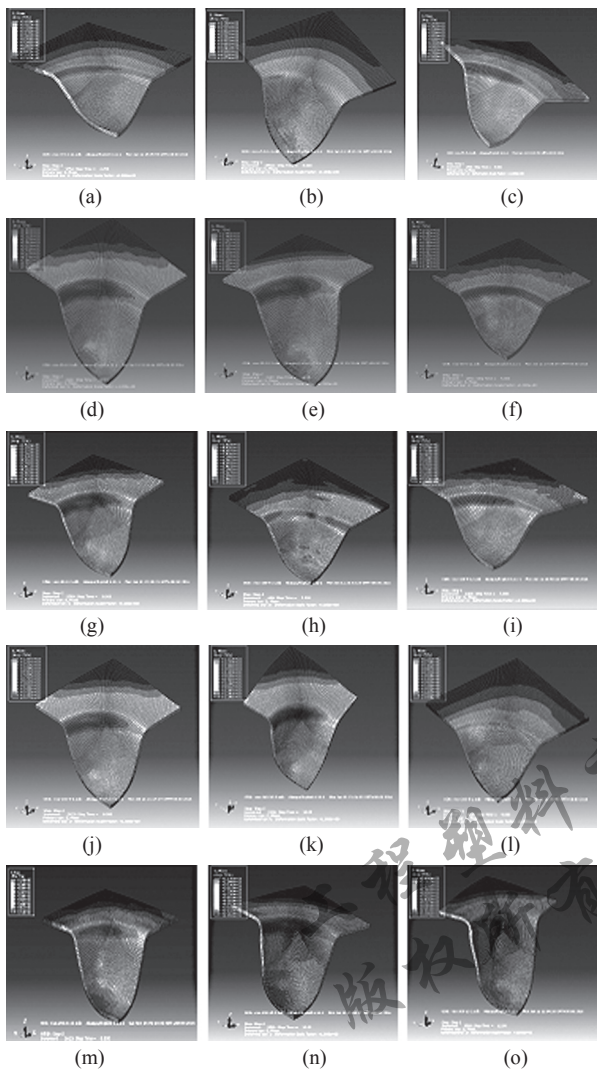


图2 不同温度下 GMT-PP 的冲压成形模拟结果

温度, 冲压深度: a—RT, 5 mm; b—RT, 8 mm; c—55℃, 5 mm; d—55℃, 8 mm; e—55℃, 10 mm; f—80℃, 5 mm; g—80℃, 8 mm; h—80℃, 10 mm; i—160℃, 5 mm; j—160℃, 8 mm; k—160℃, 10 mm; l—200℃, 5 mm; m—200℃, 8 mm; n—200℃, 10 mm; o—200℃, 12 mm

小为 300 mm×300 mm, 纤维分布方式为随机分布, 生产方法为模压成型 (温度 180℃, 压力 1 MPa, 时间 10 min), 板材的性质参数如表 4 所示。采用的成形设备是日本东京大学的 50 kN Thermecmastor-z 热模拟试验机。

表 4 选用的 GMT-PP 板材的性质参数

项 目	数 值
面密度 / (g · m ⁻²)	450
纤维质量分数 / %	30
玻璃化转变温度 / ℃	-10 ~ 0
熔融温度 / ℃	150 ~ 180
厚度 / mm	0.8

2.2 试样制备

将板材剪裁为 30 mm×30 mm 的试样, 铺层

结构如图 3 所示, 图中单层 PP 厚 0.03 mm。由于生产工艺条件制约, 该试样中玻璃纤维毡主要分布在表面, 在后续研究中可以通过改变铺层结构将玻璃纤维毡置于中心位置以满足不同需求。

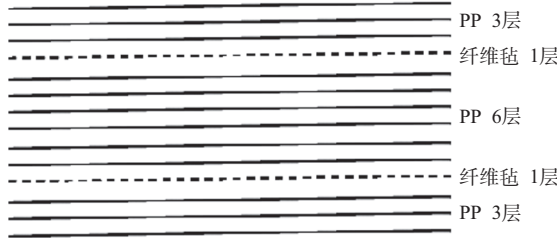


图 3 GMT-PP 的铺层结构图

2.3 冲压成形实验研究

考虑到 GMT 材料主要应用于汽车工业中, 如汽车的前端部件、座椅壳体、保险杠等, 且实际生产中 GMT 成品多为圆弧状, 同时又为确保与模拟中的模型相符合, 所以将模具设计为双半球形, 模具及其关键尺寸如图 4 所示。

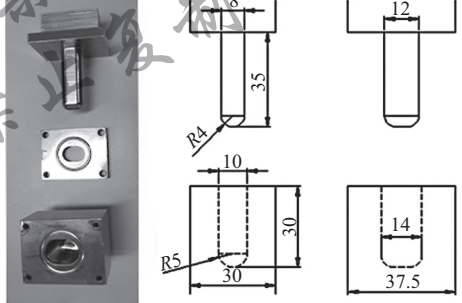


图 4 模具实体图及其关键尺寸

冲压速度取 1 mm/s, 冲压完成后无停留并以相同速率回程, 冲压深度分别为 5, 8, 10, 12 mm, 冲压温度分别为 RT 及 55, 80, 160, 200℃, 试样达到目标温度后均保温 30 s, 以确保温度均衡。试样夹于大小为 30 mm×30 mm、厚度为 0.2 mm 的铝板中间, 金属铝板可以准确反馈 GMT-PP 板材的实时温度, 对 GMT-PP 板材成形过程中的表面破坏起保护作用, 利于 GMT-PP 板材均匀受热^[10]。

2.4 实验结果与分析

GMT-PP 板材的冲压成形情况如图 5 所示。由图 5 可以看到, 温度较低时, 试样均有不同程度的破坏, 且在冲压深度较大时破坏非常严重。随着温度升高, 试样所能成形的冲压深度增大, 160℃和 200℃均能满足 12 mm 的冲压深度而不破坏, 在此温度范围内试样成形性良好。冲压成形时破坏主要发生在冲压件的底部和侧壁部分, 而且随温度升高试样冲压部分的表面光洁度变好, 说明温度升高有利于材料成形, 总体上符合由模拟分析得到的结果。

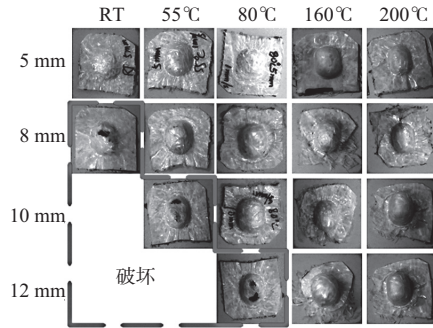
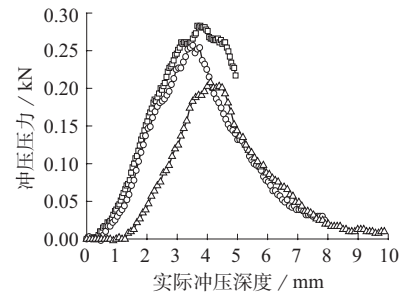


图5 GMT-PP 板材冲压后的成形情况

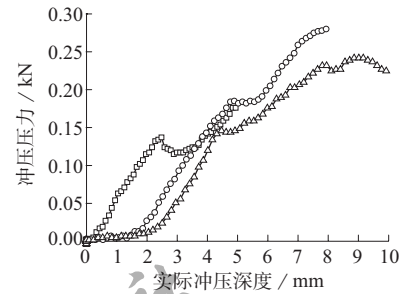
考虑到理论冲压深度为 12 mm 时,温度为 160℃ 和 200℃ 才能获得较好的成形效果,为了全面比较不同温度下 GMT-PP 的冲压效果,因此根据实验结果,分别对不同温度下理论冲压深度分别为 5, 8, 10 mm 的 GMT-PP 在实际冲压过程中的深度与冲压力变化数据进行提取,绘制出不同温度下的冲压力与实际冲压深度的关系曲线,如图 6 所示。观察发现,由于试样表面有铝板的保护且试样材料具有黏弹性,主要表现为明显的蠕变和松弛特性^[11-12],冲头与试样接触时并没有立即产生大的冲击力,只是随冲压深度的增加,冲压力逐渐增大。金属铝板对试样冲压时的受力状态有一定影响^[10],但笔者主要研究试样在温热条件下的成形规律且铝板很薄主要起保护和传热、温度测试的作用,相对于试样承受载荷较小,其影响可忽略不计。

在冲压过程中,随冲压力增加部分纤维开始断裂,材料发生损伤引起冲压力产生波动,但由于纤维与基体良好的结合,材料并未失效,仍然能够继续承载载荷,直至破坏。但从图 6a 可以看出,冲压深度为 8, 10 mm 时材料均提前破裂失效,从而导致冲压压力最后下降至趋于零。

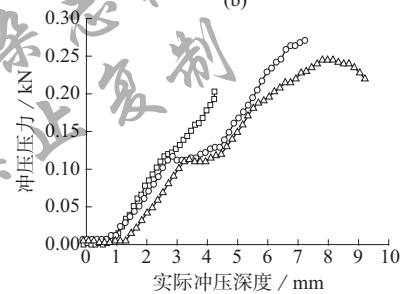
对比不同温度下 GMT-PP 冲压过程中的冲压力,当温度达到树脂的熔融温度附近时, GMT-PP 的最大冲压力明显降低。可以看出在可成形范围内,温度越高,越有利于 GMT-PP 冲压过程的进行,所需冲压力越小,这与材料的黏弹性特性有关^[13]。复合材料的黏弹性本构关系具有与常规材料的本构关系类似的形式,但一般复合材料的热应力松弛规律与常规材料不同,其热膨胀不能瞬时完成,而具有明显的时变性质,表现出一定的滞后性^[14]。因此在同一温度下,随着冲压深度不同,冲压力大小也不同。对于 GMT-PP 而言,温度较低时理论冲压深度越大材料滞后越明显,如图 6a,图 6b 和图 6c 所示;温度较高时,这种滞后的现象几乎消失,如图 6d 和图 6e



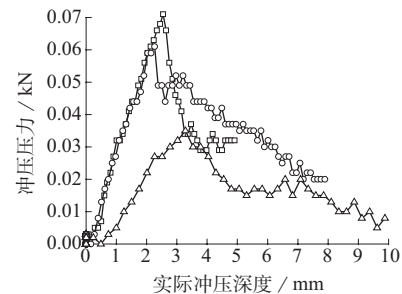
(a)



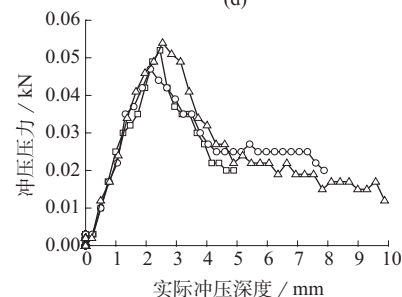
(b)



(c)



(d)



(e)

理论冲压深度: □—5 mm; ○—8 mm; △—10 mm

温度: a—RT; b—55℃; c—80℃; d—160℃; e—200℃

图6 不同温度下理论冲压深度分别为 5, 8, 10 mm 的 GMT-PP 的冲压力与实际冲压深度的关系曲线

所示。

在实验过程中,提取了55,80,160℃时断裂失效前的冲压压力与实际冲压深度的关系曲线并与模拟所得曲线进行对比,结果如图7、图8和图9所示。经对比可知,不同温度下实验过程中的曲线与冲压成形模拟的曲线变化趋势基本吻合,其冲压压力的大小与模拟值的大小在误差允许范围内基本保持一致,证明所选取的黏弹性本构模型适合 GMT-PP 的成形。

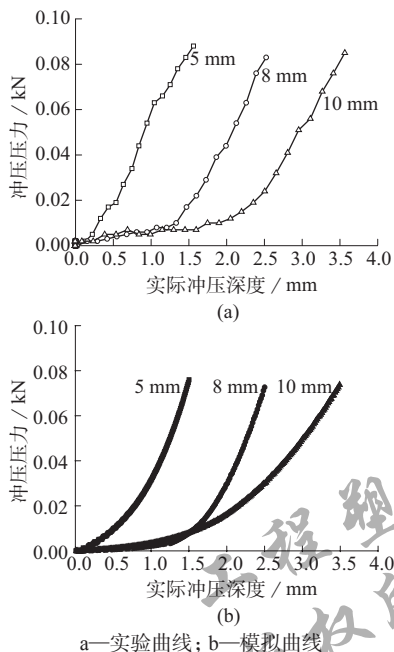


图7 温度为55℃时不同理论冲压深度下 GMT-PP 冲压压力与实际冲压深度的实验与模拟关系曲线

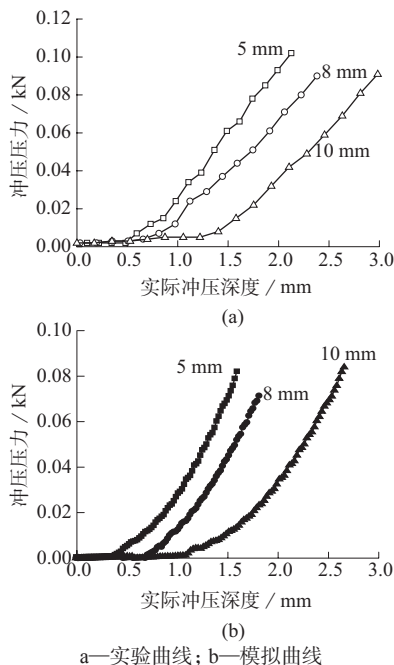


图8 温度为80℃时不同理论冲压深度下 GMT-PP 冲压压力与实际冲压深度的实验与模拟关系曲线

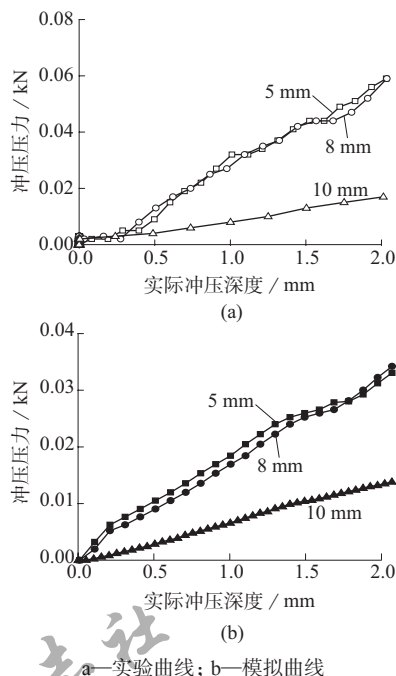


图9 温度为160℃时不同理论冲压深度下 GMT-PP 冲压压力与实际冲压深度的实验与模拟关系曲线

4 结论

(1) 在可成形范围内,温度越高,可成形的冲压深度越大,所需要的冲压压力越小,从而有利于 GMT-PP 材料的冲压成形,在测试的范围内, GMT-PP 的适宜成形温度为 160,200℃。

(2) 结合 GMT-PP 冲压成形的实验结果与模拟结果得出,冲压成形时最容易出现损伤和断裂的部分为冲压件底部。

(3) GMT-PP 冲压成形实验的曲线与模拟曲线的变化趋势基本吻合,实验中冲压压力的大小与模拟值的大小在误差允许范围内基本保持一致,验证了所选黏弹性本构模型的合理性,为类似材料的成形研究提供参考。

参考文献

- [1] 邢丽英,包建文,礼嵩明,等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报,2016,33(7):1 327-1 338.
Xing Liying, Bao Jianwen, Li Songming, et al. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7):1 327-1 338.
- [2] Rajabi A, Kadkhodayan M. An investigation into the deep drawing of fiber-metal laminates based on glass fiber reinforced polypropylene[J]. International Journal of Engineering, 2014, 27(3):349-358.
- [3] 吴宏博,孙立娜. 汽车用聚合物基复合材料的新进展[J]. 纤维复合材料,2012(1):7-12.
Wu Hongbo, Sun Lina. New advances in polymer-based composites

- for automotive applications[J]. Fiber Composites, 2012(1):7-12.
- [4] 谢德钰, 黄江玲, 付丹, 等. 轻质 GMT 复合材料在汽车后隔板上应用[J]. 纤维复合材料, 2016(1):29-32.
- Xie Deyu, Huang Jiangling, Fu Dan, et al. The application of lightweight GMT in car rear bulkhead[J]. Fiber Composites, 2016(1):29-32.
- [5] 吴维新. 汽车座椅骨架专用复合材料的制备及其应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- Wu Weixin. Preparation and application of composite material for automobile seat frame[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [6] 邵长明. GMT 用于轿车后背门板的模压工艺研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- Shao Changming. Research on molding technology of GMT for car back door[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [7] 叶鼎铨. GMT 片材发展概况[J]. 纤维复合材料, 2007(4):18-20.
- Ye Dingquan. The development of GMT sheet[J]. Fiber Composites, 2007(4):18-20.
- [8] Luca P D, Lefebure P, Pickett A K. Numerical and experimental investigation of some press forming parameters of two fibre reinforced thermoplastics: APC2-AS4 and PEI-CETEX[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 1998, 29(1-2):101-110.
- [9] 王锦燕. 聚合物流变参数拟合及主曲线的生成[D]. 郑州: 郑州大学, 2003.
- Wang Jinyan. The fitting of rheological parameters of polymer and the generation of the master curve[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2003.
- [10] Yu U, Ikeuchi K, Yanagimoto J. Enhanced formability of thin carbon fiber reinforced plastic sheets in cold / warm embossing with ductile dummy sheets of different thicknesses[J]. International Journal of Material Forming, 2015, 8(3):1-7.
- [11] 梁军, 杜善义. 粘弹性复合材料力学性能的细观研究[J]. 复合材料学报, 2001, 18(1):97-100.
- Liang Jun, Du Shanyi. Study of mechanical properties of viscoelastic matrix composite by micromechanics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(1):97-100.
- [12] Gong Youkun, Peng Xiongqi, Yao Yuan, et al. An anisotropic hyperelastic constitutive model for thermoplastic woven composite prepregs[J]. Composites Science & Technology, 2016, 128:17-24.
- [13] Rajabi A, Kadlkhodayan M, Manoochehri M, et al. Deep-drawing of thermoplastic metal-composite structures: Experimental investigations, statistical analyses and finite element modeling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215:159-170.
- [14] 刘书田, 马宁. 复合材料粘弹性本构关系与热应力松弛规律研究 I: 理论分析[J]. 复合材料学报, 2005, 22(1):152-157.
- Liu Shuitian, Ma Ning. Study on the thermal stress relaxation and constitutive equations of viscoelastic composite materials, part I: General theory[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(1):152-157.

鑫达签约 30 万 t 生物复合材料及增材制造项目

鑫达二期 30 万 t 生物复合材料项目及增材制造(3D 打印)用复合材料项目签约入驻四川省南充市顺庆区, 预计将在 2017 年 3 月开工, 2018 年 10 月建成。

据报道, 该项目总投资 25 亿元, 固定资产投资不低于 20 亿元, 建成达产后将年产 30 万 t 生物复合材料和 3D 打印材料, 年销售收入将达 50 亿元。

鑫达二期项目包括两部分。其中, 生物复合材料项目投资 22 亿元, 将建设生物高分子复合材料生产线 50 条, 形成年产 30 万 t 的规模, 产品主要用于食品包装、特种工程、装备轻量化等领域。

此外, 增材制造用复合材料项目投资 3 亿元, 将建设熔融沉积式增材制造丝材材料生产线 4 条、选择性激光烧结式增材制造粉末材料生产线 1 条, 产品主要用于 3D 打印、医疗器械、生命科学等领域。

届时, 连同一期项目, 鑫达四川南充生产研发基地将形成占地 650 亩、总投资 53 亿元、年销售收入过百亿元的新材料生产基地。

鑫达一期项目总投资 28 亿元, 建成 70 条生产线, 年产 30 万 t 高分子复合材料。产品主要用于汽车内外饰件和航空、高铁、船舶复合型材等。该一期项目在 2016 年 7 月成功试生产。

该公司还将推出面向汽车行业的 XDPPSTR-03LQ19005 创新生物轻量化材料解决方案, 并通过不断设计、开发力学、环保及减重性能优异的产品, 为汽车行业的客户创造更大价值。

鑫达的 XDPPSTR-03LQ19005 生物填充材料, 采用了含量为 10%~50% 的秸秆填充聚丙烯, 不仅可以有效降低生产过程中的碳足迹, 而且与传统石油基产品相比, 所制成的部件密度更小、简支梁缺口冲击强度更高、弯曲强度和拉伸强度相当, 并体现出更优秀的流动性和加工性能, 明显缩短了生产周期。在材料混合均匀的情况下, 制成的产品阻燃性更高, 同时可将部件质量减轻 20% 左右。另外, 在零部件达到使用寿命后, 可完全降解, 从而最大限度地降低了对环境的影响。

目前, 鑫达 XDPPSTR-03LQ19005 生物材料已经被国内多家汽车 OEM 制造商、零部件生产企业用于不同车型的立柱护板、门板试制。

(塑新网)

鲁西化工将投建聚碳酸酯二期工程

鲁西化工 2016 年 12 月公告, 公司聚碳酸酯一期项目已达到设计产能, 且工艺运行稳定。

公司将继续加大化工新材料领域投入, 投建聚碳酸酯项目二期工程两条生产线。据悉, 建设聚碳酸酯项目的总投资为 36 亿元。

(中化新网)