

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.05.017

模内层压产品层间结合强度研究

汪智勇,蔡考群,杨金表

[群达模具(深圳)有限公司,广东深圳 518112]

摘要:针对模内层压产品层压材料与塑料基材容易剥离脱落的问题,基于界面机械互锁理论和扩散理论,研究了模内层压产品层间界面的形成机理,分析了层间结合强度的主要影响因素。通过工艺实验和正交设计,分别研究了塑料基材和注射工艺参数对产品层间结合强度的影响规律。结果表明,塑料基材对产品层间结合强度有很大的影响,相对于聚碳酸酯(PC),PC/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料,聚丙烯作基材时与聚氯乙烯人造革的模内层压产品层间结合强度最高;注射工艺参数对产品层间结合强度影响程度的顺序为:料筒温度>注射压力>注射速度>模具温度,其中料筒温度和注射压力对层间结合强度的影响非常显著,注射速度和模具温度对层间结合强度的影响不明显。

关键词:汽车内饰件;模内层压;层间结合强度;注射成型

中图分类号: TQ320.66 ; TQ330.4 +1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)05-0089-06

Research on Bonding Strength Between Layers of In-mold Laminate Product

Wang Zhiyong, Cai Kaoqun, Yang Jinbiao

[Kunda Mould (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518112, China]

Abstract : In view of the problem that the laminate material and plastic substrate of the in-mold laminate are easy to peel off, based on the interface mechanical interlock theory and diffusion theory, the formation mechanism of the interlayer interface was studied, and the main influencing factors of the interlayer bonding strength were analyzed. Through the process experiment and orthogonal design, the effects of plastic substrate and injection process parameters on the bond strength between the layers were researched. The results showed that the plastic substrate has a great influence on the bond strength between the layers. When polypropylene was used as the substrate, the bonding strength between the layers of the in-mold laminated product of PVC artificial leather was the highest than PC and PC/acrylonitrile-butadiene-styrene plastic. And the injection process parameters also had different effects on the bond strength between the layers. The order of influence was : barrel temperature > injection pressure > injection speed > mold temperature, in which the influence of barrel temperature and injection pressure on interlayer bonding strength was very significant, but the influence of injection speed and mold temperature on interlayer bonding strength was not obvious.

Keywords : car interior part ; in-mold lamination ; interlayer bonding strength ; injection molding

为了改善汽车塑料内饰件的外观、提高质地和柔软触感,往往需要在塑料制品的外表面覆盖装饰薄层,如聚氯乙烯(PVC)人造革、织物、聚氨酯(PUR)合成革、布、毡层、真皮等,可以显著提高汽车尤其是中高档轿车的居室化设计、改善乘坐的舒适程度和提高汽车档次,在中高档轿车中已获得了广泛应用^[1-2]。

传统的添加外覆盖层的工艺是先通过注射模具成型塑料基材,并在其表面涂上化学粘合剂,同时对外覆盖层进行加热,最后将塑料基材和外覆盖层放在复合模具内粘结在一起。这种传统的工艺存在工序多、生产成本低、生产效率低及环境污染等问题。而采用模内层压成型新工艺是解决上述问题的有效途径,如图1所示。其原理是:先在模具型

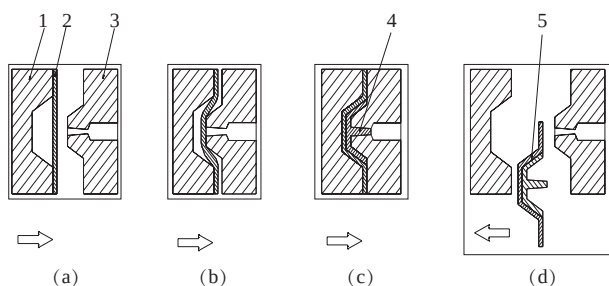
通讯作者: 汪智勇,高级工程师,主要研究方向为塑料成型工艺及模具技术 E-mail: wzyhust@qq.com

收稿日期: 2019-03-07

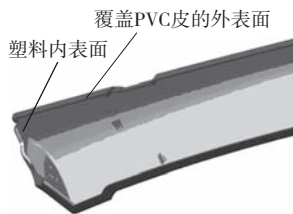
引用格式: 汪智勇,蔡考群,杨金表. 模内层压产品层间结合强度研究[J]. 工程塑料应用,2019,47(5):89-94.

Wang Zhiyong, Cai Kaoqun, Yang Jinbiao. Research on bonding strength between layers of in-mold laminate product[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):89-94.

腔内嵌入层压材料(外覆盖层),在模具合模的同时将层压材料逐渐拉深紧贴在模腔内部(称为层压过程),然后在层压材料的内表面进行注射,塑料熔体在流动充填过程中与层压材料接触、融合,并在冷却后与层压材料粘结在一起,可以生产出由层压材料做表面装饰的模内层压产品。图2为表面覆盖了PVC人造革的某轿车内门板上框架模内层压产品。



1—动模部分;2—层压材料;3—定模部分;
4—塑料熔体;5—模内层压产品
a—嵌入层压材料;b—模具合模;c—注射过程;d—取出产品
图1 模内层压成型工艺原理图



(a) CAD模型(局部);(b)实物照片
图2 汽车内门板上框架



1 层间界面机理及层间结合强度的影响因素分析

模内层压产品相对于常规塑料制品的主要区别在于塑料基材的外表面覆盖了层压材料,在实际使用过程中,容易出现层压材料与塑料基材剥离脱落,这已成为模内层压产品的主要缺陷之一,其主要在于层压材料与塑料基材层间界面的结合强度不够。图3为汽车内饰门板的层压材料剥离脱落实物照片,由于PVC人造革的层压材料与塑料基材的层



图3 汽车内饰门板的层压材料剥离脱落实物照片

间结合强度不够导致人造革剥离脱落,从而影响了该产品的正常使用。

由于模内层压产品的层间界面是在注射成型过程中,塑料熔体在层压材料内表面接触充填并熔合形成的,因此层间界面的形成本质上是层压材料与塑料熔体的粘结过程。层间界面的形成和层间结合强度主要受到界面机械互锁理论和扩散理论的综合作用和影响。

(1) 界面机械互锁理论及层间结合强度的影响因素分析。

层压材料的内表面往往十分粗糙,从微观角度看存在很多微小的凹穴和孔隙,塑料熔体在充填过程中能够排除层压材料内表面上吸附的空气层并渗入到这些凹穴和孔隙中,当塑料熔体冷却后“镶嵌”在孔隙之中,形成机械互锁^[3-4],如图4所示。



图4 界面机械互锁机理示意图

根据界面机械互锁机理,层压材料和塑料基材的层间界面有效接触面积和机械互锁界面质量将直接影响层间界面的粘合力,从而影响模内层压产品层间结合强度。模内层压产品的层间结合强度受到层压材料、塑料基材和注射工艺条件的综合影响。

(2) 扩散理论及层间结合强度的影响因素分析。

聚合物熔体的界面扩散是一个质量传递的过程,它涉及到聚合物表面化学与物理化学等方面。在注射成型过程中,塑料熔体处于黏流态在层压材料的内表面接触流动,随着分子链热运动,使塑料熔体和层压材料的层间界面逐渐融合、弥散,并随着塑料熔体的分子在层间界面上扩散迁移最终形成稳定的界面层^[5-8]。因此,模内层压产品的层间界面与塑料熔体的分子扩散运动紧密相关,层间界面的粘结过程是塑料熔体中的分子在层间界面上扩散迁移实现的,熔体温度、注射速度和注射压力等注射工艺参数,还会影响塑料熔体的分子扩散程度,从而影响最终产品的层间结合强度。

2 实验部分

2.1 实验方案

为了研究塑料基材和注射工艺参数对模内层

压产品层间结合强度的影响,通过选择不同的塑料基材和设置不同的注射工艺参数分别获得模内层压实验样品,参考 GB/T 2790-1995 胶粘剂 180° 剥离强度的标准进行剥离实验^[7-15]。

2.2 材料与设备

层压材料采用 PVC 人造革,平均厚度约为 1.25 mm;塑料基材采用聚丙烯(PP),聚碳酸酯(PC)和 PC/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS);胶带酯选择聚对苯二甲酸乙二酯(PET)高温胶带。采用平板形状模内层压产品为实验制品,如图 5 所示,外形尺寸为 140 mm×60 mm,其中塑料基材的厚度约为 2.0 mm,层压材料覆盖层的厚度约为 1.0 mm(层压材料在注射成型阶段受到压缩)。

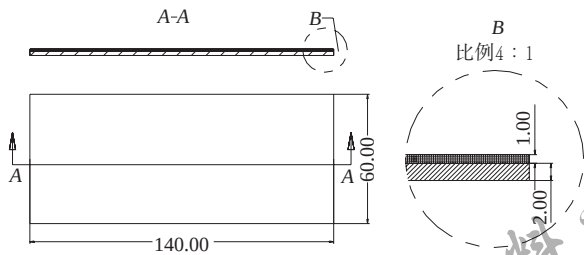


图5 制品二维图几何尺寸

先对塑料基材进行烘干处理,然后将底部粘上高温胶带的 PVC 人造革置入模具型腔内,合模后进行注射成型获得模内层压产品。由于高温胶带的粘性,在粘上高温胶带区域的 PVC 人造革在注射过程中无法和塑料熔体粘合在一起。对模内层压产品按照剥离强度实验的规定进行切割制备样品,样品的几何尺寸如图 6 所示,采用万能材料实验机进行剥离强度实验。

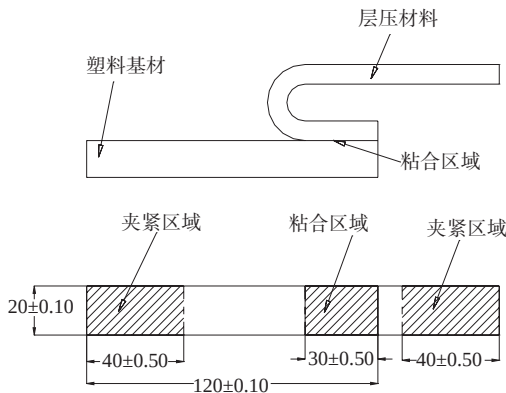


图6 剥离实验样品的几何尺寸

2.3 实验设计

(1) 参考表 1 工艺参数进行注射成型并制备样品,然后以 (20±10%) mm/min 的拉伸速率进行剥

表 1 三种塑料基材的主要注射工艺参数

项目	PP	PC	PC/ABS
料筒温度 / °C	240	285	260
注射速度 / (mm·s ⁻¹)	50	70	60
注射压力 / MPa	70	90	80
保压压力 / MPa	50	60	50
模具温度 / °C	20	20	20

离强度实验,通过计算获得不同塑料基材对应的样品层间结合强度,同时为了提高实验精度、减少实验误差,每种塑料基材样品进行 5 次重复性实验。

(2) 选择 PVC 人造革作为层压材料和 PP 作为塑料基材,通过设置不同的注射工艺参数分别获得实验样品,然后进行剥离强度实验,计算获得不同注射工艺参数下对应的层间结合强度。

采用正交实验分析方法,以产品层间结合强度为评价指标,优化注射工艺参数。实验选取注射速度(A)、注射压力(B)、料筒温度(C)和模具温度(D)四个影响因子,参考 PP 的注射工艺条件构建了如表 2 所示的四因素四水平实验方案 L₁₆(4⁴)。为了提高实验精度、减少实验误差,对每种水平搭配进行 5 次重复性实验,然后取平均值。同时,实验暂不考虑冷却系统所带来的影响,因此将冷却时间设为默认的 10 s,冷却水温度设为 20℃恒温。

表 2 正交实验方案

水平	A/(mm·s ⁻¹)	B/MPa	C/°C	D/°C
1	30	50	220	35
2	40	60	230	45
3	50	70	240	55
4	60	80	250	65

3 结果与讨论

3.1 塑料基材对层间结合强度的影响

图 7 为不同塑料基材对应样品剥离实验的载荷-位移曲线。由图 7 可看出,三种塑料基材样品的载荷-位移曲线具有几乎相似的变化趋势,在剥离开始阶段,载荷-位移曲线呈近似的线性状态,表明该阶段层压材料处于弹性变形阶段;之后的曲线表

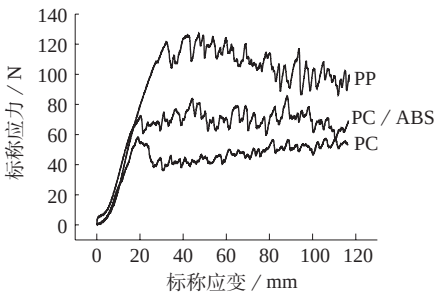


图7 不同塑料基材样品剥离实验的载荷-位移曲线

明层压材料开始颈缩,载荷处于稳定状态表明层压材料开始剥离,脱离塑料基材。PP 基材的样品剥离力最大,PC/ABS 基材的样品剥离力次之,PC 基材的样品剥离力最小。

图 8 为 5 次重复实验下不同塑料基材样品的层间结合强度。由图 8 可看出,PP 基材样品的平均层间结合强度最大,为 10.36 kN/m,远大于另外两种塑料基材样品的平均层间结合强度,约为 PC/ABS 基材样品的 1.54 倍、PC 基材样品的 1.95 倍。由此可见,塑料基材的选择对模内层压产品的层间结合强度具有较大的影响。

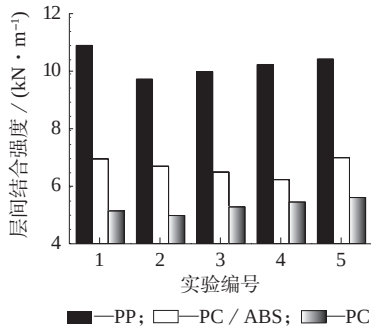


图 8 不同塑料基材样品 5 次重复实验的层间结合强度

3.2 注射工艺参数对层间结合强度的影响

表 3 为采用 PVC 人造革作为层压材料和 PP 作为基材样品的层间结合强度正交实验结果。

表 3 正交实验结果

实验号	A/ (mm·s ⁻¹)	B/ MPa	C/ ℃	D/ ℃	层间结合强度 / (kN·m ⁻¹)
1	30	50	220	35	9.03
2	30	60	230	45	9.40
3	30	70	240	55	10.85
4	30	80	250	65	11.09
5	40	50	230	55	9.25
6	40	60	220	65	9.14
7	40	70	250	35	10.96
8	40	80	240	45	10.68
9	50	50	240	65	10.02
10	50	60	250	55	10.47
11	50	70	220	45	9.78
12	50	80	230	35	10.37
13	60	50	250	45	10.33
14	60	60	240	35	10.28
15	60	70	230	65	10.44
16	60	80	220	55	9.79

(1) 极差分析。

表 4 为根据上述正交实验结果得出的极差分析结果,其中 k_i 为 i 水平下的均值, R 为极差。 R 值越大,说明该因素在水平发生变化时,对模内层压产品的层间结合强度影响也越大。由表 4 可看出, $R_C > R_B > R_A > R_D$,这说明各参数对层间结合强度的影响

程度顺序为:料筒温度 > 注射压力 > 注射速度 > 模具温度,且料筒温度和注射压力对层间结合强度的影响相对较大,注射速度和模具温度对层间结合强度的影响相对较小。

表 4 极差分析结果

项目	A	B	C	D
k_1	10.091	9.657	9.432	10.159
k_2	10.005	9.821	9.863	10.045
k_3	10.156	10.504	10.455	10.088
k_4	10.211	10.481	10.712	10.170
R	0.205	0.847	1.280	0.125

图 9 为各因素水平对层间结合强度影响的趋势曲线。图 9 表明,注射速度对层间结合强度的影响不明显,随着注射速度的增加,层间结合强度先稍微降低后略有增加;注射压力对层间结合强度的影响较为显著,随着注射压力的增大,层间结合强度先增加后略有降低;料筒温度对层间结合强度的影响显著,随着料筒温度的增加,层间结合强度呈现增加趋势;模具温度对层间结合强度的影响不明显,随着模具温度的升高,层间结合强度先稍微降低后略有增加。

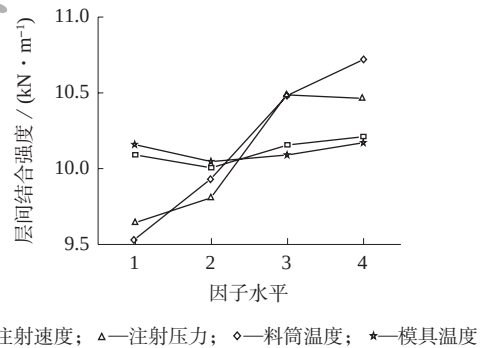


图 9 各因素水平对层间结合强度影响的趋势曲线

(2) 方差分析。

根据方差分析法必须留下至少一个因子作为空白列才能进行误差估算,根据极差分析可知模具温度 D 对层间结合强度的影响最小,因此可以将这个因子空留出来,仅对注射速度 A 、注射压力 B 和料筒温度 C 三个因子进行方差分析。表 5 为方差结果分析表, A, B, C 三个因素的影响度分别为 1.45%, 35.95%, 61.94%。设定显著性水平 α 为 0.01,根据统计分布临界值表可得 $F_{0.01}(3, 3) = 29.44$ 。如果某因素的 F 值 $> F_{0.01}(3, 3)$,则认为该因素对实验结果有显著性影响,反之则没有显著性影响。由此分析,料筒温度和注射压力对层间结合强度的影响非常显著,而注射速度对层间结合强度的影响一

般,这也进一步验证了极差分析的结果正确性。

表5 方差分析表

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	显著性	影响度/%
因子A	0.094	3	0.031	2.23	不显著	1.45
因子B	2.327	3	0.776	55.27	非常显著	35.95
因子C	4.009	3	1.336	95.23	非常显著	61.94
误差	0.042	3	0.014			
总和	6.472	12				

(3) 最优方案验证。

根据上述分析可以得出各因子最优化组合为 $A_4B_3C_4D_4$ 时层间结合强度最大,即注射速度为 60 mm/s 、注射压力为 70 MPa 、熔体温度为 260°C 和模具温度为 65°C 。按照该方案重新调整注射工艺条件进行5组重复实验,图10为最终的实验结果,通过计算可知平均层间结合强度为 11.24 kN/m ,优于上述16组正交实验结果,证明了优化结果的有效性和最优性。

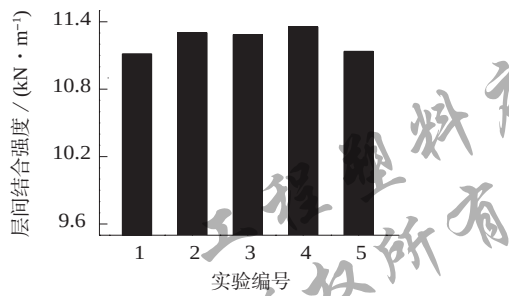


图10 最优方案5次重复实验的层间结合强度情况

4 结语

(1) 基于界面机械互锁理论和扩散理论,研究了模内层压产品层间界面的形成机理,分析出产品层间结合强度主要受到层压材料、塑料基材和注射工艺参数的综合影响。

(2) 通过工艺实验和正交设计,分别研究了塑料基材和注射工艺参数对产品层间结合强度的影响规律,结果表明,塑料基材对产品层间结合强度有很大的影响,相对于PC, PC/ABS, PP作基材时与PVC人造革的模内层压产品层间结合强度最高;注射工艺参数对产品层间结合强度影响程度的顺序为:料筒温度>注射压力>注射速度>模具温度,其中料筒温度和注射压力对层间结合强度的影响非常显著,注射速度和模具温度对层间结合强度的影响不明显。

参考文献

[1] 陈磊. 汽车内饰件模内层压成型技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

Chen Lei. Research on in-mold lamination technology of automotive interior parts[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.

- [2] 汪智勇,周华民,蔡考群,等. 模内层压技术在汽车工业中的应用[J]. 模具制造, 2010, 10(10):52-56.
- Wang Zhiyong, Zhou Huamin, Cai Kaoqun, et al. Application of in-mold lamination technology in the automotive industry[J]. Die & Mould Manufacture, 2010, 10(10):52-56.
- [3] 苏占伟,孟正华,王辉,等. 装饰薄膜对模内嵌膜产品力学性能的影响规律[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10):51-56.
- Su Zhanwei, Meng Zhenghua, Wang Hui, et al. Effect of decorative film on mechanical properties of in-mold film products[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):51-56.
- [4] 赵维,齐晔华. 硅丙树脂/丙烯酸柱撑LDH纳米复合材料界面研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(6):29-32.
- Zhao Wei, Qi Shuhua. Study on interface of organosilicon-acrylic resin / AA-LDHs nanocomposite[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(6):29-32.
- [5] 卢仁杰,韩冰,李锦春. GF增强PLA复合材料的界面设计及性能研究[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(4):25-30.
- Lu Renjie, Han Bing, Li Jinchun. Design and research on interface of PLA / GF comosite[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(4):25-30.
- [6] 程平,扈艳红,黄诚,等. 碳纤维不同表面处理及其对聚三嗪基复合材料界面性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(3):5-10.
- Cheng Ping, Hu Yanhong, Huang Cheng, et al. Different surface treatments of carbon fibers and their effects on interfacial performance of polytriazole composite[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(3):73-76.
- [7] 董超亮,王耀先,周洁鹏,等. 芳纶纤维增强树脂基复合材料的界面粘结性能研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(3):73-76.
- Dong Chaoliang, Wang Yaoxian, Zhou Jiepeng, et al. Interfacial bond property of aramid fibers reinforced polymer matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(3):73-76.
- [8] 张志坚,陈绮丽,张婧婧,等. 双物料注射成型试样界面粘接强度的测试[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(12):85-88.
- Zhang Zhijian, Chen Qili, Zhang Jingjing, et al. Interfacial bond strength test of two-material injection molding sample[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(12):85-88.
- [9] Xu L R, Sengupta S, Kuai H. An experimental and numerical investigation of adhesive bonding strengths of polymer materials[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2004, 24(6):455-460.
- [10] Needleman A, Rosakis A J. The effect of bond strength and loading rate on the conditions governing the attainment of intersonic crack growth along interfaces[J]. Journal of the

- Mechanics & Physics of Solids, 1999, 47(12):2 411–2 449.
- [11] Xu L R, Rosakis A J. Impact failure characteristics in sandwich structures. Part II: Effects of impact speed and interfacial strength[J]. International Journal of Solids & Structures, 2002, 39(16):4 237–4 248.
- [12] Green L W, Ottoson J M, García C, et al. Diffusion theory and knowledge dissemination, utilization, and integration in public health[J]. Annual Review of Public Health, 2014, 30(30):151.
- [13] Yamaguchi S, Leong Y W, Tsujii T, et al. Effect of crystallization and interface formation mechanism on mechanical properties of film-insert injection-molded poly(propylene)(PP) film / PP substrate[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 98(1):294–301.
- [14] Jin Y K, Kim S Y, Song Y S, et al. Relationship between the crystallization behavior and the warpage of film-insert-molded parts[M] / The origin and development of the differences between the leaderships of CPSU and ourselves. Beijing: Foreign Languages Press, 2011:1 539–1 546.
- [15] Wang Z Y, Yue C Y, Roy S. Strength development and diffusion in symmetric and asymmetric pairs of amorphous COCs in the vicinity of T_g : A new modified temperature–pressure dependent model[J]. Polymer, 2012, 53(9):1 932–1 938.

关于召开“2019年中国工程塑料复合材料技术研讨会”并征集论文的通知

各会员及相关单位:

为进一步搭建行业技术交流合作平台,推动行业转型创新持续发展,中国合成树脂供销协会加工与应用分会、《工程塑料应用》杂志社决定于2019年8月12–15日在辽宁省大连市举办“2019年中国工程塑料复合材料技术研讨会”。

本次大会是加工与应用分会承办的第20届会议,将主要专注于改性塑料产业,邀请国内外塑料行业的著名专家学者出席,探讨塑料产业的发展趋势、前沿技术,对塑料材料在实际加工制造过程中的核心技术和遇到的问题进行专业解答。大会同期进行新技术、产品发布。大会组委会热诚邀请各位学者、同仁、科研院所和上下游企业参加会议,进行技术交流。具体会议安排见第二轮会议通知、微信公众号(epa1973)或登陆杂志社网站(www.epa1973.net)关注会议动态。

主办单位:中国合成树脂供销协会

中国兵器工业集团第五三研究所

承办单位:中国合成树脂供销协会加工与应用分会

《工程塑料应用》杂志社

协办单位:大连环球矿产股份有限公司……………

(邀请中)

一、会议主题及内容

会议主题:改性塑料产业技术发展。

技术交流及讲座内容:

(1) 改性塑料产业现状及发展趋势;(2) 汽车、家电等行业对改性塑料的需求与机遇;(3) 非金属矿物在改性塑料中的应用;(4) 纤维增强塑料改性技术;(5) 塑料合金化与复合改性技术;(6) 塑料阻燃、相容改性技术;(7) 先进成型技术及装备;(8) 行业热点难点问题,新技术、新产品发布。

二、参会对象

国内外塑料原材料、改性、助剂、制品、设备及其他相关厂家的高管和工程师;汽车及配件、家电、轨道交通等行业用户企业的高管和工程师;大专院校及科研院所的专家、技术人员与在校学生。

三、会议论文征集

会议将出版一本行业技术信息的《论文集》。特向国内外从事塑料改性的专家和技术人员征集论文,征集科研成果。论文征集截止日期:2019年7月15日。

投稿要求:论文只接受电子版投稿,请登陆 www.epa1973.net 在线投稿(投稿方向请注明“年会会议”),论文格式请参照《工程塑料应用》杂志要求。应作者要求,将选出

本次会议优秀论文,以中文核心期刊《工程塑料应用》2019年增刊形式发表。

四、会议安排

1. 会议地点:中安金元大酒店(四星级)

地址:大连市金州区经济技术开发区金马路143号

电话:0411-87618888。

2. 接站服务:8月12日13:00–19:00在大连周水子机场和大连北站安排接站,需要接站的代表务必在回执中填写详细到达信息。

五、收费标准

会务费为人民币2700元/人(食宿自理)。7月31日前报名,会员单位2300元/人,非会员单位2500元/人。

会议优惠房价:标间、大床房均368元/间/天,费用自理,可刷卡。

会务费:可现场缴纳(现金、微信或支付宝方式),也可提前汇至指定帐号,不可刷卡。

六、宣传方案

大会提供报告、新技术产品发布、展台展示、广告等多种宣传及赞助方案。

七、联系方式

联系单位:《工程塑料应用》杂志社

电话:0531—85878223, 85878057, 85878278

传真:0531—85947355

E-mail: epa@epa1973.com

网址: www.epa1973.net