

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.011

表面处理对聚乙烯粘接性能的影响

赵辉¹, 王静², 谢梅竹², 耿树江²

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北唐山 063035; 2. 东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

摘要: 为了提高聚乙烯板材的粘接性能, 分别用火焰和空气等离子体处理方法对聚乙烯板材试样表面进行处理, 根据拉伸剪切强度确定最佳处理工艺。采用傅立叶变换红外光谱、X 射线光电子能谱、扫描电子显微镜、能谱仪、接触角检测等手段分析试样表面处理前后的化学组成、形貌、润湿性。结果表明, 火焰处理最佳工艺条件: 试样未打磨, 处理距离 1 cm, 处理速率 0.625 cm/s; 空气等离子体处理最佳工艺条件: 试样未打磨, 放电功率 500 W, 气体压力 0.06 MPa, 放电气体为空气, 处理距离 1.5 cm, 处理时间 4 s。表面处理能够去除试样表面的弱边界层, 引入含氧极性基团羟基和羧基, 提高表面化学活性。经过火焰或空气等离子体处理的试样表面接触角分别降低为 91.04° 和 22.43°, 润湿性能得到改善。两种表面处理方法都能够明显提高试样的粘接性能。其中天山 1956 胶粘剂粘接火焰处理的未打磨试样, 其拉伸剪切强度最大可达到 4.063 MPa, 破坏方式为粘附破坏。

关键词: 聚乙烯; 火焰处理; 空气等离子体处理; 粘接性能; 胶粘剂

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)01-0060-07

Effects of Surface Treatment on Adhesive Properties of Polyethylene

Zhao Hui¹, Wang Jing², Xie Meizhu², Geng Shujiang²

(1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063035, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to enhance the bonding properties of polyethylene sheets, flame and air plasma treatment were conducted, the optimum treatment process was determined by tensile shear strength. The results are correlated with the surface composition, morphology and wettability, which are detected by FTIR, SEM, EDS, XPS and contact angle. Optimum processing conditions for flame treatment: unpolished sample, treatment distance 1 cm, treatment rate 0.625 cm/s. Optimum processing conditions for air plasma treatment: unpolished sample, discharge power 500 W, gas pressure 0.06 MPa, discharge gas air, treatment distance 1.5 cm, treatment time 4 s. The results show that the surface treatment can remove the weak interface layer and introduces polar groups such as hydroxyl and carbonyl group, which can obviously improve the surface chemical activity. After flame or air plasma treatment, the surface contact angle of the sample decreased to 91.04° and 22.43° respectively. The wettability and the bonding properties of sample can be improved obviously by these surface treatment methods. The maximum tensile shearing strength of sample that bonded with Tianshan 1956 after flame treatment is 4.063 MPa, the destructive mode is adhesion destruction.

Keywords: polyethylene sheet; flame treatment; air plasma treatment; adhesion property; adhesive

聚乙烯 (PE) 质轻、无毒, 与金属材料相比具有优良的绝缘性、耐腐蚀性及成型加工性。在高速列车中主要用于钢轨扣件、制震材料、内部装饰和电气部件等, 能够有效降低机车运行过程中的噪音与振动, 减轻车身自重, 提高乘坐舒适性^[1-2]。随着轨道列车向高速化、轻量化、重载化方向发展, 对塑料高分子材料提出了更多要求。在安装过程中, 粘接代

替传统的焊接工艺将材料固定, 有利于形成良好的防水密封接头, 提高列车的连接密封质量^[3]。在使用过程中, 不可避免地会遇到与自身或者其它塑料、金属等材料粘接的问题。然而 PE 结晶度高、表面能低, 分子链中不含极性基团, 难以与胶粘剂形成良好的接触, 粘接性能很差。除结构原因外, PE 表面还存在内聚强度低的弱边界层, 进一步影响了粘接

通讯作者: 耿树江, 教授, 主要从事材料的表面处理工作 E-mail: gengsj@smm.neu.edu.cn

收稿日期: 2018-10-12

引用格式: 赵辉, 王静, 谢梅竹, 等. 表面处理对聚乙烯粘接性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1): 60-66.

Zhao Hui, Wang Jing, Xie Meizhu, et al. Effects of surface treatment on adhesive properties of polyethylene[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1): 60-66.

性能^[4-5]。因此需要对 PE 进行表面改性处理,提高粘接强度,以适合在高速列车上应用。

传统的化学处理方法对环境污染很大,真空等离子体法对设备要求严格,且多用于膜的表面处理。笔者采用火焰和空气等离子体法对 PE 板进行处理,属于干式-固相处理法,对环境友好,适用于工业连续生产^[6-7],并研究了表面处理对 PE 粘接性能的影响,对胶粘剂进行筛选,进一步提升粘接能力。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE 板:工业级,上海戴涛橡塑制品有限公司;

异丙醇:分析纯,天津市春宝禄商贸有限公司;

胶粘剂: SikaFast-5215, Sikaflex-265, 西卡(中国)建筑材料有限公司;

胶粘剂: H-100, 英力士管理(上海)有限公司;

胶粘剂: 天山 1956, 北京天山可赛新胶业股份有限公司;

胶粘剂: MA832, 普莱克斯(中国)投资有限公司。

1.2 主要仪器与设备

傅立叶衰减全反射变换红外光谱(FTIR)仪: Nicolet 380 型, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM)-能谱仪(EDS): Inspect F50 型, 美国 FEI 公司;

能谱仪(EDS): X-MaxN 型, 牛津仪器科技(上海)有限公司;

电子万能试验机: C43 型, MTS 工业系统(中国)有限公司;

接触角测量仪: JC2000DM 型, 上海中晨数字技术设备有限公司;

多功能表面分析系统: ESCALAB250 型, 美国 Thermo VG 公司;

常压等离子表面处理机: JYS-B 型, 烟台金鹰科技有限公司;

酒精灯: 市售。

1.3 试样制备

试样按 GB/T 7124-2008 裁剪成规定的形状与尺寸: 长 (100 ± 0.25) mm, 宽 (25 ± 0.25) mm, 高 (1.6 ± 0.1) mm。试样按打磨与未打磨分为两类, 分别进行只清洗未处理、火焰处理、空气等离子体处理。其中需打磨的部分用锉刀进行打磨, 将试样的光滑表面完全去除, 并打磨均匀。所有试样用水充分冲洗, 干燥, 再用异丙醇清洗, 干燥, 备用。

1.4 PE 表面处理方法

(1) 火焰处理。

火焰处理装置为酒精灯, 有效覆盖面积为 1 cm^2 。将试样固定在距酒精灯火焰外焰 1 cm 处, 以不同的速率通过火焰上方进行氧化, 速率分别为 $0.625, 1.25, 2.5, 5 \text{ cm/s}$ 。

(2) 空气等离子体处理。

将试样固定在可移动木板上, 匀速通过等离子喷头, 有效覆盖面积 1 cm^2 , 放电功率 500 W , 气体压力 0.06 MPa , 放电气体为空气, 处理距离 1.5 cm 。等离子处理时间为变量, 分别为 $2, 4, 6, 10 \text{ s}$ 。

1.5 性能测试与表征

表面形貌与元素组成: 对试样进行喷金处理, 用附带 EDS 的 SEM (SEM-EDS) 进行观察。

试样的化学组成: 用 FTIR 仪进行衰减全反射红外光谱分析; 用多功能表面分析系统进行 X 射线光电子能谱(XPS)分析, 射线源 Al-K α , 射线功率 150 W 。

粘接试样的拉伸剪切强度按 GB/T 7124-2008 测试。

粘接试样破坏类型按 GB/T 16997-1997 测试。

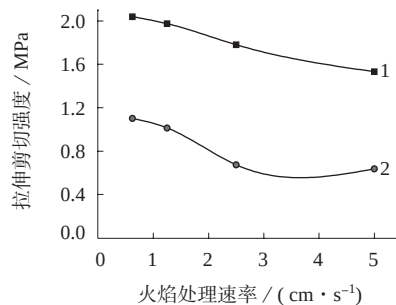
将 $2 \mu\text{L}$ 水滴于试样表面, 用接触角测量仪测试水与试样的接触角。

2 结果与讨论

2.1 粘接性能分析

(1) 火焰处理速率对粘接性能的影响。

选择 Sikaflex 265 作为胶粘剂, 不同火焰处理速率下的拉伸剪切强度如图 1 所示。



1—未打磨 + 火焰处理; 2—打磨 + 火焰处理

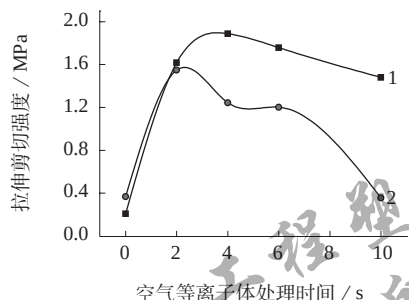
图 1 不同火焰处理速率下的拉伸剪切强度

随着火焰处理速率的降低, 试样与火焰的接触时间延长, 氧化程度增加, 拉伸剪切强度总体呈上升趋势。原因是火焰中含有处于激发态的 O, NO, OH 和 NH 等, 以自由基机理进行表面氧化, 将极性基团引入表面, 同时使表面低分子量碎片脱落, 消除

弱边界层,从而提高基材的粘接性能。但是处理速率过低,火焰作用使基材熔化变形,而且粘接只与材料表面1~2层分子膜有关,进一步处理只会增加氧化深度,对粘接效果没有影响^[8-9]。由图1可知,对于打磨+火焰处理试样,当速率为0.625 cm/s时粘接效果最好,其拉伸剪切强度为1.101 MPa,破坏方式为粘附破坏。对于未打磨+火焰处理试样,当速率为0.625 cm/s时,能获得最佳粘接效果,最大剪切强度为2.040 MPa,破坏方式为粘附破坏。未打磨的试样拉伸剪切强度高于打磨后的试样。综上所述,火焰处理试样的最佳条件是未打磨+火焰处理,速率为0.625 cm/s。

(2) 空气等离子体处理时间对粘接性能的影响。

选择 Sikaflex 265 作为胶粘剂,不同空气等离子体处理时间下的拉伸剪切强度如图2所示。



1—未打磨+空气等离子体处理;2—打磨+空气等离子体处理

图2 不同空气等离子体处理时间下的拉伸剪切强度

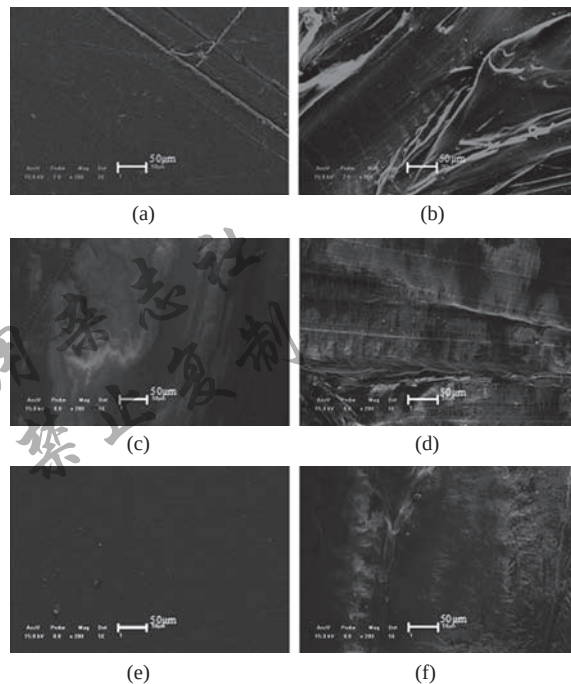
由图2可以看出,短时间的空气等离子体处理即能使试样的拉伸剪切强度有大幅度提高。这是由于:(1) 等离子体的交联、刻蚀和氧化作用去除了弱边界层;(2) 提高了基体表面粗糙度;(3) 引起试样表面高分子链的断裂,在表面产生大量自由基,进而与等离子体中的氧自由基发生反应引入含氧极性基团,提高了基体的表面能与表面活性。值得注意的是,随着处理时间的继续增加,拉伸剪切强度呈现下降趋势。过度的等离子体处理使试样表面的极性基团达到饱和,交联作用在基材表面形成类金刚石的碳膜,阻止了等离子体的继续刻蚀^[7];同时等离子体的刻蚀作用引起大量分子链断裂脱落,塑料本体破坏比较严重,材料强度下降,导致拉伸剪切强度下降^[10-12]。由图2可以看出,对于打磨后的试样,空气等离子体处理时间为2 s时粘接效果最好,拉伸剪切强度为1.548 MPa,破坏方式为粘附破坏。对于未经打磨的试样,空气等离子体处理时间为4 s时,能够获得最佳的粘接效果,拉伸剪切强度为1.889 MPa,破坏方式为粘附破坏。未打磨试样

的拉伸剪切强度高于打磨后的试样。综上所述,空气等离子体处理试样的最佳条件是:未打磨+空气等离子体处理,时间为4 s。

由于两种表面处理的改性机理不同,所以改性效果存在差异。在最佳处理条件下,火焰处理较空气等离子体处理能够获得更高的拉伸剪切强度。未打磨试样的拉伸剪切强度高于打磨后的试样。

2.2 SEM-EDS 分析

不同表面处理后的试样的SEM照片如图3所示。



a—未打磨+未处理;b—打磨+未处理;c—未打磨+火焰处理;
d—打磨+火焰处理;e—未打磨+空气等离子体处理;
f—打磨+空气等离子体处理

图3 不同表面处理后的试样的SEM照片

由图3可看出,未打磨+未处理试样的表面比较光滑,试样表面的微小划痕是加工过程中的模具缺陷或运输过程摩擦造成的(见图3a)。打磨+未处理试样的表面粗糙度明显增加,但是本体边缘比较尖锐(见图3b)。对于未打磨的试样,由于火焰的氧化作用,未打磨+火焰处理试样的表面有大面积的凹穴出现(见图3c);由于等离子体的刻蚀作用,未打磨+空气等离子体处理试样表面原本的缺陷被去除,有微小的凹凸起伏和泡状凸起出现(见图3e)。对于打磨后的试样,因为火焰和空气等离子体处理对基材凸起部分刻蚀作用更加强烈,以及高温引起的熔化重结晶过程^[13],经过打磨+火焰或空气等离子体处理后,试样表面存在凹凸不平的刻痕(见图3d和图3f)。试样表面存在的凹凸不平的刻痕将

使所涂胶层出现均匀性差异,导致胶层固化缺陷,所以打磨后试样的粘接性能低于未打磨试样。

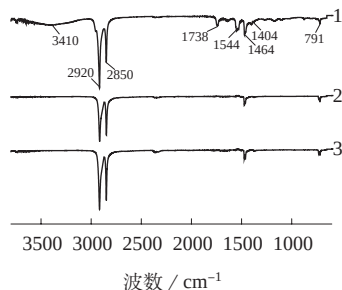
通过 EDS 分析试样表面处理前后元素的含量,结果列于表 1。由表 1 可以看出,试样表面主要由 C 元素组成,少量的 N, O 元素来源于加工过程中的添加剂与杂质,与 PE 主链的碳结构一致。未打磨试样经过火焰或空气等离子体处理后,其相对氧含量增加, C/O 比降低到 8.613 和 9.799,说明表面处理引入了含氧基团,提高了试样的表面极性,而且火焰处理的氧化效果稍好于空气等离子体处理。打磨后的试样经过火焰或空气等离子体处理后,其相对氧含量降低, C/O 比升高到 24.470 和 17.890。可以看出,打磨导致试样表面处理的氧化程度降低,不利于形成润湿性良好的极性表面。需要注意的是, EDS 分析只能粗略地看出元素含量的变化,至于引入含氧官能团的类型还需要使用 FTIR 和 XPS 测试来精确地表征。

表 1 试样表面处理前后试样表面的元素含量

试样	原子百分比 / %			C/O 比
	C	N	O	
未打磨 + 未处理	73.639	19.138	7.169	10.272
打磨 + 未处理	71.495	21.930	6.611	10.815
未打磨 + 火焰处理	63.802	28.790	7.408	8.613
打磨 + 火焰处理	72.211	24.838	2.951	24.470
未打磨 + 空气等离子体处理	63.701	29.798	6.501	9.799
打磨 + 空气等离子体处理	58.250	38.494	3.256	17.890

2.3 FTIR 表征

为了解表面处理前后试样表面基团的变化情况,对处理前后的试样进行 FTIR 分析。由 EDS 分析可知,打磨不利于表面处理的氧化作用发生,因此选择未打磨的试样进行 FTIR 分析,结果如图 4 所示。对比可知, 2920 cm^{-1} 和 2850 cm^{-1} 处是亚甲基伸缩振动吸收峰; 1464 cm^{-1} 处是亚甲基弯曲振动吸收峰; 791 cm^{-1} 处是亚甲基扭曲变形振动吸收峰,对应 PE 的大分子链结构,在处理前后没有明显差异。



1—未打磨 + 未处理; 2—未打磨 + 火焰处理;
3—未打磨 + 等离子体处理

图 4 不同表面处理试样的 FTIR 谱图

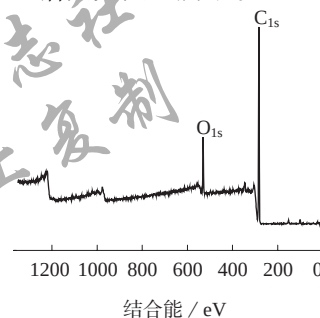
由图 4 可以看出,对于未打磨 + 未处理的试样, 3410 cm^{-1} 处的宽峰是羟基伸缩振动吸收峰,

1738 cm^{-1} 处是羰基伸缩振动吸收峰, 1544 cm^{-1} 处是羧基的反对称变形振动吸收峰。说明试样表面的含氧小分子添加剂是组成弱边界层的一部分。经火焰和空气等离子体处理,小分子添加剂吸收峰消失,表明弱边界层被去除,胶粘剂直接与塑料基材接触,有利于物理吸附与化学键合作用,形成牢固的粘接。

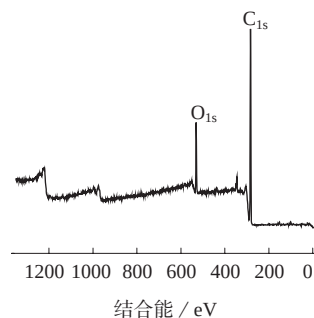
但是表面处理只会引入少量的极性基团,这些基团产生的吸收峰太小,很容易被其它主要结构吸收峰所掩盖。因此没有观察到含氧基团的吸收峰。

2.4 XPS 分析

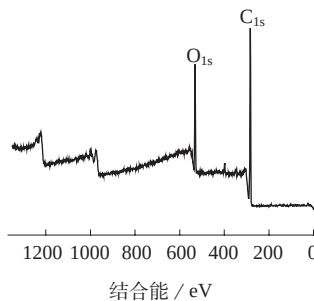
考虑到 FTIR 检测深度和灵敏度,使用灵敏度更高的 XPS 对试样表面有机官能团进一步检测。由于打磨不利于试样表面处理过程中的氧化行为,所以只对未打磨的试样进行分析,不同表面处理前后试样的 XPS 谱图如图 5 所示。



(a)



(b)



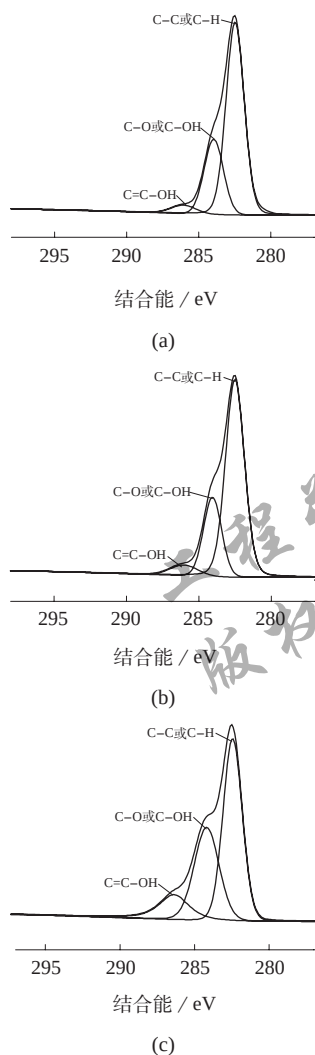
(c)

a—未打磨 + 未处理; b—未打磨 + 火焰处理;
c—未打磨 + 空气等离子体处理

图 5 不同表面处理前后试样表面的 XPS 谱图

由图5可以看出,283.5 eV和530.5 eV分别对应 C_{1s} 和 O_{1s} 。未处理试样表面含有微量的氧,源于添加剂的残留以及贮存过程中的表面氧化。经过表面处理, O_{1s} 的峰强度增大,说明表面处理能够引入含氧极性基团。

为了探究表面处理在试样表面引入活性官能团的类型,对 C_{1s} 峰进行高分辨扫描,结果如图6所示。



a—未打磨+未处理;b—未打磨+火焰处理;
c—未打磨+空气等离子体处理

图6 不同表面处理前后试样表面XPS的 C_{1s} 拟合谱图

由图6可知,未打磨+未处理试样可以拟合为三个峰,282.5 eV处最强峰对应C—C或C—H,284.0 eV处较弱的峰对应C—O或C—OH,286.1 eV处的峰对应C=O—OH,与全谱扫描结果一致^[10]。未打磨+火焰处理试样和未打磨+空气等离子体处理试样的 C_{1s} 拟合峰位置与未打磨+未处理试样一致,但峰强度不同。出现这种差异的根

本原因是两种表面处理方式的反应机理不同,引入极性基团的方式不同。

试样表面官能团含量与分峰拟合曲线、基线之间的面积呈正相关,即面积越大,该官能团的相对含量越大。通过峰面积进行换算,确定各基团的相对含量,结果见表2。

表2 试样表面处理前后 C_{1s} 分峰拟合结果

试样	峰面积 / %		
	C—C或C—H	C—O或C—OH	C=O—OH
未打磨+未处理	72.93	23.60	3.48
未打磨+火焰处理	69.59	25.30	5.10
未打磨+空气等离子体处理	54.56	32.29	13.15

由表2可知,经过表面处理,C—C或C—H含量降低,含氧基团相对含量增加。未打磨+火焰处理后试样羟基的含量明显增至25.30%,羧基的含量也增加到5.10%。而未打磨+空气等离子处理试样的氧化程度更高,处理后羟基的含量为32.29%,羧基的含量为13.15%。含氧基团含量的增加,有利于基材与胶粘剂之间产生化学键结合,形成牢固粘接。

2.5 接触角测定

试样表面处理前后的接触角列于表3。

表3 试样表面处理前后PE接触角

试样	接触角 / (°)
未打磨+未处理	105.25
未打磨+火焰处理	91.04
未打磨+空气等离子体处理	22.43

由于打磨后基材表面粗糙不平,固液气三相界面不再分明,因此只对未打磨的试样进行接触角检测。由XPS分析结果可知,表面处理引入了含氧极性基团羟基和羧基,使得基材表面极性增加,表面润湿性得到增强。由表3可以看出,未打磨+未处理的试样表面的接触角为105.25°,属于疏水表面。未打磨+火焰处理试样表面的接触角降低为91.04°,润湿性能得到改善。未打磨+空气等离子体处理试样表面的接触角为22.43°,是未打磨+未处理试样的21.3%,属于亲水表面。润湿性能的改善,有利于胶粘剂在基材表面的润湿、铺展,形成接触良好的粘接界面。

2.6 实际工况下不同胶粘剂的粘接效果对比

为了适合实际工况,选择轨道列车常用的五种胶粘剂,包括两种双组分丙烯酸结构胶(SikaFast-5215, MA832)、两种单组分聚氨酯弹性胶(Sikaflex-265, 天山1956)和一种中性混合高分子密封胶(H-100),对打磨前后的未处理试样及火焰处理(速

率为 0.625 cm/s) 试样,以及未打磨 + 空气等离子体处理 (时间为 4 s) 试样和打磨 + 空气等离子体处理 (时间为 2 s) 试样进行粘接实验,以选取最佳的胶粘剂。使用不同胶粘剂的拉伸剪切强度测试结果列于表 4。

表 4 使用不同胶粘剂时试样的拉伸剪切强度 MPa

胶粘剂	未处理		火焰处理		空气等离子体处理	
	未打磨	打磨	未打磨	打磨	未打磨	打磨
天山 1956	0	0.119	4.063	3.113	2.576 ¹⁾	2.576
Sikaflex-265	0.206	0.373	2.044	1.066	1.889	1.548
H-100	0.585	0.264	1.920	1.828	1.614a	1.815
MA832	0.347	0	1.851	1.491	1.688	1.648
SikaFast-5215	0.128	0	1.334	1.179	1.099	2.519

注: 1) 表示破坏方式为混合破坏,其它为粘附破坏。

由于 PE 的结晶度高、表面能低,未处理试样的拉伸剪切强度较低。出乎意料的是,对于火焰和空气等离子体处理后的试样,未打磨试样的拉伸剪切强度高于打磨后的试样。虽然打磨可以提高基材的表面粗糙度,有利于提高粘接性能,但是,打磨得到形状不规则的粗糙表面,形成很多凹凸不平的刻痕。而胶粘剂通常具有一定的黏度,不能渗入打磨造成的粗糙结构内,完全润湿存在困难,胶层中的无效接触增多。由于胶层固化缺陷,形成很多应力集中点,导致拉伸剪切强度降低^[14-15]。

表面处理,试样的拉伸剪切强度较未处理试样得到明显提高。火焰与空气等离子体处理引入的羟基、羧基能够与聚氨酯型胶粘剂中的异氰酸酯基或氨基基之间形成牢固的化学键结合^[16]。丙烯酸型胶粘剂中的碳氧键可以与表面处理引入的含氧基团形成氢键。这些都有利于粘接性能的提高。但是化学键结合的强度大于氢键的作用强度,所以聚氨酯型胶粘剂天山 1965 在火焰或空气等离子体处理后对于打磨与未打磨的试样,都能获得最大的剪切强度。其中使用火焰处理未打磨的样品,天山 1956 粘接,剪切强度最大为 4.063 MPa,破坏方式为粘附破坏。

3 结论

(1) 火焰或空气等离子体表面处理方法都可以明显改善 PE 的粘接性能。通过拉伸剪切强度测试确定了各处理方法的最佳工艺条件。火焰处理试样的最佳工艺条件: 试样未打磨,处理距离 1 cm,处理速率 0.625 cm/s; 空气等离子体处理试样的最佳工艺条件: 试样未打磨,放电功率 500 W,气体压力 0.06 MPa,放电气体为空气,处理距离 1.5 cm,处理时间 4 s。

(2) 火焰和空气等离子体处理通过氧化作用引入极性基团羟基和羧基,并且表面处理的刻蚀作用可以去除弱边界层,提高表面粗糙度。未打磨 + 火焰处理试样表面的接触角降低为 91.04°,未打磨 + 空气等离子体处理试样表面的接触角为 22.43°,润湿性能得到改善。

(3) 未处理试样的粘接效果不够理想,表面处理试样的粘接效果得到明显提高。由于打磨造成基材边缘锐化,胶层固化缺陷增多,所以表面处理后,未打磨试样的拉伸剪切强度稍高于打磨后的试样。由于聚氨酯型胶粘剂与表面处理引入的活性基团之间可以形成化学键结合,所以能获得最好的粘接效果。其中火焰处理最佳条件下,使用天山 1956 胶粘剂可以获得最高的拉伸剪切强度,为 4.063 MPa,破坏方式为粘附破坏。

参考文献

- [1] 王鹏,张均,姜志国,等. 高铁轨道板系统用高分子材料[J]. 化学推进剂与高分子材料,2016,14(4):32-38.
Wang Peng, Zhang Jun, Jiang Zhiguo, et al. Polymer materials for high-speed railway track plate system[J]. Chemical Propellant and Polymer Materials, 2016, 14(4):32-38.
- [2] 李世涛,赵长龙. 复合材料在高速列车上的应用[J]. 中国战略新兴产业,2014,8(15):88-91.
Li Shitao, Zhao Changlong. The application of composite materials on high-speed trains[J]. China Strategic Emerging Industry, 2014, 8(15):88-91.
- [3] 杜慧勇,吴鹤翔,杨晓芳,等. 粘接技术在机车车辆行业的应用[J]. 时代汽车,2018(3):33-34
Du Huiyong, Wu Hexiang, Yang Xiaofang, et al. Application of adhesion technology in locomotive and vehicle industry[J]. Auto Time, 2018(3):33-34.
- [4] 张翼,齐暑华,段国晨,等. 聚烯烃粘接的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(9):77-80.
Zhang Yi, Qi Shuhua, Duan Guochen, et al. The development of polyolefin in adhesion[J]. Material Review, 2011, 25(9):77-80.
- [5] 马晓星,刘会雪. 聚烯烃材料表面改性研究[J]. 现代工业经济和 信息化,2017,7(13):22-23,25.
Ma Xiaoxing, Liu Huixue. Study on surface modification of polyolefin[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2017, 7(13), 22-23, 25.
- [6] 董怀斌. 等离子体表面处理在有机高分子材料中的应用研究[J]. 橡塑技术与装备,2016,42(14):60-61.
Dong Huaibin. Application of plasma surface treatment in organic polymer materials[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(14):60-61.

- [7] Song Jing, Gunst U, Arlinghaus H F, et al. Flame treatment of low-density polyethylene: Surface chemistry across the length scales[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(24):9 489–9 499.
- [8] Strobel M, Sullivan N, Branch M C, et al. Gas-phase modeling of impinging flames used for the flame surface modification of polypropylene film[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001, 15(1):1–21.
- [9] Sheng Enshan, Sutherland I, Brewis D M, et al. Surface studies of polyethylene modified by flame treatment[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 1994, 4(3):487–490.
- [10] 孙洁. 常压等离子体处理高分子材料诱导自由基及其引发表面改性反应的研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- Sun Jie. The Mechanism of free radical reactions induced by atmospheric pressure plasma treatment on polymer surfaces[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.
- [11] Penkov O V, Khadem M, Lim W S, et al. A review of recent applications of atmospheric pressure plasma jets for materials processing[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2015, 12(2):225–235.
- [12] Moritzer E, Budde C, Leister C. Effect of atmospheric pressure plasma pre-treatment and aging conditions on the surface of thermoplastics[J]. *Welding in the World*, 2015, 59(1):23–32.
- [13] 颜婧, 王玥, 冯建明, 等. 空气等离子体处理时间对聚丙烯微孔膜微观结构与亲水性的影响[J]. *塑料工业*, 2015, 43(11):43–46, 64.
- Yan Jing, Wang Yue, Feng Jianming, et al. The effect of air plasma treated time on microstructure and hydrophilicity of polypropylene microporous membranes[J]. *China Plastics Industry*, 2015, 43(11):43–46, 64.
- [14] 杨晓娜. 表面粗糙度对厌氧平面密封胶初固时间和粘接强度的影响[J]. *粘接*, 2018, 39(5):17–20, 16.
- Yang Xiaona. Effect of surface roughness on initial fixing time and adhesive strength of anaerobic flat sealant[J]. *Cohesion*, 2018, 39(5):17–20, 16.
- [15] Packham D E. Surface energy, surface topography and adhesion[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2003, 23(6):437–448.
- [16] 陈森, 尹业琳, 刘亚琼, 等. 双组分聚氨酯密封胶的制备与性能研究[J]. *中国胶粘剂*, 2016, 25(10):32–35.
- Chen Miao, Yin Yelin, Liu Yaqiong, et al. Study on preparation and properties of two-component polyurethane sealant[J]. *China Adhesives*, 2016, 25(10):32–35.
-
- (上接第 48 页)
- PVC / ABS blends. Effect of previous degradation[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2010, 47(6):789–796.
- [10] 汪东清. 废旧 PVC 电线电缆料的再利用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- Wang Dongqing. Research on the reuse of recycled PVC wire and cable[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [11] 吴波震. 软质 ABS / PVC 共混改性的研究分析[J]. *塑料工业*, 2007, 35(S1):147–149.
- Wu Bozhen. Study of blending modification of soft ABS / PVC[J]. *China Plastics Industry*, 2007, 35(S1):147–149.
- [12] Liu Baijun, Wang Yinglin, Gao Yuan, et al. Effect of the matrix plasticization behavior on mechanical properties of PVC / ABS blends[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2017, 37(3):239–245.
- [13] Hippel U, Korhonen M, Paavola S, et al. Compatibilization of poly(propylene) / polyamide 6 blends with functionalized poly(propylene)s prepared with metallocene catalyst[J]. *Macromolecular Materials & Engineering*, 2004, 289(8):714–721.
- [14] Liu Hongzhi, Xie Tingxiu, Zhang Ying, et al. Phase morphology development in PP / PA6 blends induced by a maleated thermoplastic elastomer[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2010, 44(7):1 050–1 061.
- [15] 浦鸿汀, 曹民干, 刘明. PVC / ABS / CPE 共混体系的相容性与性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2001(3):294–298.
- Pu hongting, Cao mingan, Liu Ming. Study on the compatibility and properties of PVC / ABS / CPE blends[J]. *Journal of Building Materials*, 2001(3):294–298.
- [16] 王硕, 刘哲, 张明耀, 等. SAN 共聚物组成对 PVC / ABS 共混物相容性的影响[J]. *高分子学报*, 2007(1):31–37.
- Wang Shuo, Liu Zhe, Zhang Mingyao, et al. Effect of composition of SAN copolymer on the miscibility of PVC / ABS blends[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2007(1):31–37.
- [17] 周丽玲, 王新, 蔺玉胜, 等. PVC / ABS 和 PVC / CPE 两种共混体系的结构和性能[J]. *青岛科技大学学报: 自然科学版*, 2003, 24(1):48–52.
- Zhou Liling, Wang Xin, Lin Yusheng, et al. Microstructures and properties of PVC / CPE and PVC / ABS blends[J]. *Journal of Qingdao University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2003, 24(1):48–52.
- [18] Zhou Liling, Wang Xin, Lin Yusheng, et al. Comparison of the toughening mechanisms of poly(vinyl chloride) / chlorinated polyethylene and poly(vinyl chloride) / acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer blends[J]. *J Appl Polym Sci*, 2003, 90(4):916–924.