复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第25卷 第4期 8月 2008年
Vol. 25 No. 4 August 2008

文章编号：1000-3851(2008)04-0062-06

芳纶纤维/浆粕表面能及其复合纸性能

何 方，张美云*，张素风

（陕西科技大学 造纸工程学院 陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室，西安 710021）

摘 要： 测定了几种间位芳纶短纤维、芳纶纯浆粕及其复合纸的表面接触角，结合倒数平均调和方程计算了芳纶纤维及复合纸的表面能。通过芳纶纸中纤维与浆粕界面张力及粘附功的计算，分析芳纶纤维及浆粕的表面能与其复合纸性能的关系。结果表明：采用水和乙二醇作为接触角测试液体时，芳纶纤维及浆粕的表面能为35～45 mJ·m^{-2}。其中，芳纶短纤维表面能稍高于芳纶浆粕，芳纶短纤维及浆粕的极性分量大于色散分量，表面能越高越利于增强表面可润湿性，粘附功越大。热压导致芳纶复合纸表面能下降，相对于Nomex纸，自制芳纶复合纸的表面能降低得更明显。芳纶短纤维与浆粕的色散分量和极性分量越匹配，表面能之差及界面张力越小，则芳纶复合纸中纤维之间的粘接力越强，抗张指数也越高。

关键词： 芳纶纤维；芳纶纸；接触角；表面；界面；粘附

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Surface energy of aramid fiber/pulp and their sheets properties

HE Fang, ZHANG Meiyun*, ZHANG Sufeng

(Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper Development of Shaanxi Province, College of Pulp and Papermaking Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: The surface contact angles of several meta-aramid fibers and meta-aramid pulps as well as their sheets were measured, and the surface energy of aramid fiber, aramid pulp and sheet was determined according to the harmonic mean-based Wu equation. The relationship between the surface energy and sheet properties in sheet processing was discussed according to the surface energy as well as the interfacial tension and work of adhesion of aramid fibers and pulps. The results show that the surface energy of aramid fibers and pulps is in the range of 35～45 mJ·m^{-2}, the surface energy of fibers is slightly higher than that of pulps, the polar component of surface energy is larger than the dispersion one, and the wettability and work of adhesion are enhanced with increase of the surface energy of aramid fibers and pulps, when water and glycol are employed as the testing liquids. The surface energy of aramid sheet decreases during hot-press process, and compared to Nomex sheet, the surface energy of self-made aramid sheet decreases sharply after hot-press process. The better the matching of polar component with dispersion component, the smaller the difference of surface energy and the smaller the interfacial tension, the stronger the adhesion between fibers and pulp with the improved strength of aramid sheet.

Keywords: aramid fiber; aramid sheet; contact angle; surface; interface; adhesion

芳纶复合纸是将芳纶短纤维与芳纶纯浆粕通过造纸湿法抄造，经热压而形成具有良好的强度、耐热和绝缘性能的片状复合材料。研究认为热压促使芳纶短纤维与浆粕表面发生部分软化，使芳纶浆粕熔融而将短纤维粘接在一起[1-2]。为了解释此过程中表面及界面现象，可用表面能反映其表面润湿、界面粘接以及吸附等能力。纤维表面能越大、两相表面能越接近，纤维表面极性组分含量也越多，可润湿性越强，对增强界面粘接效果越有利[3-4]。很多研究中通过纤维物理化学改性[5-6]可以增加其表面活性基团从而增强复合材料性能，也有研究认为碳纤维表面能及极性分量与其复合材料力学性能有着相关性[7]。然而对于复合纸用芳纶纤维及浆粕的表面能以及热压机制的研究报道不足。本文中通过

收稿日期： 2007-10-08；**收修改稿日期：** 2008-02-16
基金项目： 陕西省自然科学基金(2006B26)；陕西省教育厅产业化项目(05JC09)
通讯作者： 张美云，博士，博士生导师，主要从事特种与加工纸的研究与开发 E-mail：myzhang@sust.edu.cn

几种芳纶纤维成膜后的表面能间接反映芳纶纤维的表面能，结合界面张力和粘附功以及热压对复合纸表面能的影响规律分析了芳纶纤维和浆粕的表面能及其之间的粘接与复合纸性能之间的关系。

1　实验部分

1.1　原　料

国内间位芳纶短纤维及芳纶纯浆粕由两家主要生产商提供，依据来源不同分别以 F1-纤和 F1-浆、F2-纤和 F2-浆表示；国外 Nomex 纸由 DuPont 公司提供，并以代号 F3 纸表示，其芳纶短纤维与纯浆粕分别以 F3-纤和 F3-浆表示；所有芳纶短纤维平均长度为 5～6 mm，直径约 12 μm，芳纶纯浆粕平均长度为 2～4 mm。

1.2　实验方法

1.2.1　芳纶纤维接触角的测定

采用瑞典 FIBRO 公司 DAT1100 动态接触角测定仪，根据液滴在试样平面上的形状来测量接触角。当液滴的体积小于 6 μL 时，可忽略地球引力对其形状的影响，认为液滴呈标准圆的一部分[8-9]，从而简化接触角计算过程。实验过程是将芳纶纤维在聚乙烯塑料片(Polyethylene，简称 PE)上制成膜(自制机械式成膜器中 10%铸膜液纤维浓度、水相中膜置换时间 30 min，放于 4 MPa 带压夹具中低温真空干燥，成膜厚度约为 150 μm)，剪裁成一定尺寸，粘贴在系统专用进样器表面一并进入系统进行测定，然后调整监视图像上的水平基线对齐膜表面，将一已知表面能的微量液体滴在试样表面，仪器程序将根据试样表面上的液滴高度 h 和接触面宽度 D 计算出接触角 θ。计算公式为

$$\theta = 2\arctan(2h/d) \tag{1}$$

测量过程中，系统将以 0.02 s 时间间隔自动记录动态变化的接触角值及相关尺寸。测试条件为：测量时间 0.2 min，测试液滴体积为 4 μL，每个试样均取 10 个不同测定点，并取其算术平均值。

1.2.2　芳纶纤维表面能的计算

根据 S. Wu 对经典的几何平均方程进一步发展而提出的倒数调和方法，利用测定的接触角计算芳纶纤维表面能，该理论公式[10]为

$$(b_i + c_i - a_i)\gamma_s^d\gamma_s^p + c_i(b_i - a_i)\gamma_s^d + b_i(c_i - a_i)\gamma_s^p - a_ib_ic_i = 0 \tag{2}$$

其中：$a_i = \gamma_i(1+\cos\theta)/4$；$b_i = \gamma_i^d$；$c_i = \gamma_i^p$；$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p$。

式中：a_i、b_i、c_i 代表测试液常数，i 为所选用的测试液，本研究中选用水和乙二醇；γ_s^d、γ_s^p 分别是试样表面色散分量和极性分量。计算表面能和色散、极性分量时，将水和乙二醇两种测试液表面能和色散、极性分量(见表 1)，及其对芳纶纤维表面所测得的接触角分别代入式(2)联立方程组并求解而得。

表 1　测试液的表面能[10](20℃)

Table 1　Surface energy of the testing liquids[10](20℃)

No.	Surface energy γ_i/(mJ·m^{-2})	Dispersion component γ_i^d/(mJ·m^{-2})	Polar component γ_i^p/(mJ·m^{-2})
Water	72.8	21.8	51.0
Glycol	48.3	29.3	19.0

1.2.3　芳纶纸的抄造与定型

采用德国 Ernsthaage 公司 BBS-3 纸页成形器，将芳纶 F1-纤与 F1-浆、F2-纤与 F2-浆、F1-纤与 F2-浆、F2-纤与 F1-浆按照一定比例，经过疏解、脱水、烘干的湿法抄造工艺制成芳纶复合纸，再经过芬兰 DT-Science 公司 Dp2002 高温三辊软压光机进行热压成型。将前二者成型的复合纸分别以 F1 纸、F2 纸表示。纸定量均约为 116 g·m^{-2}，热压工艺为：压力 9～16 MPa，温度 250℃。

2　结果与讨论

2.1　芳纶纤维表面接触角的确定

Jenkins[11]等人利用显微镜方法来直接测定单根纤维的接触角，该方法固然可以直接有效地测量单根纤维的接触角。但是对于尺寸细小的短纤维以及外形不规则的芳纶浆粕接触角的测定存在一定困难。因此，实验中将芳纶纤维在 PE 上成膜并测定其表面能，间接反映其纤维表面性能。

当芳纶纤维制成膜状后，微观上仍然存在细小孔隙。在接触角测定过程中，初始接触角(0.02 s 时)数值因其液滴在试样表面的形状不太规则，不可取。随着时间的推移，滴在试样表面的微量液滴将会慢慢被吸收而消失。因此，表面接触角数值应该取液滴在试样表面开始稳定下降时的接触角。而且不同测试液的表面能不同，所测得的接触角与试样表面的接触角变化快慢也不同。如图 1(a)所示，水在聚乙烯片及 6 种芳纶纤维上的接触角在 0.06 s 之前下降得迅速，而在 0.06 s 之后变化均趋于平缓。因此，取 0.06 s 时刻的值作为水在芳纶纤维表面的接触角。同理，如图 1(b)所示，当乙二醇做测

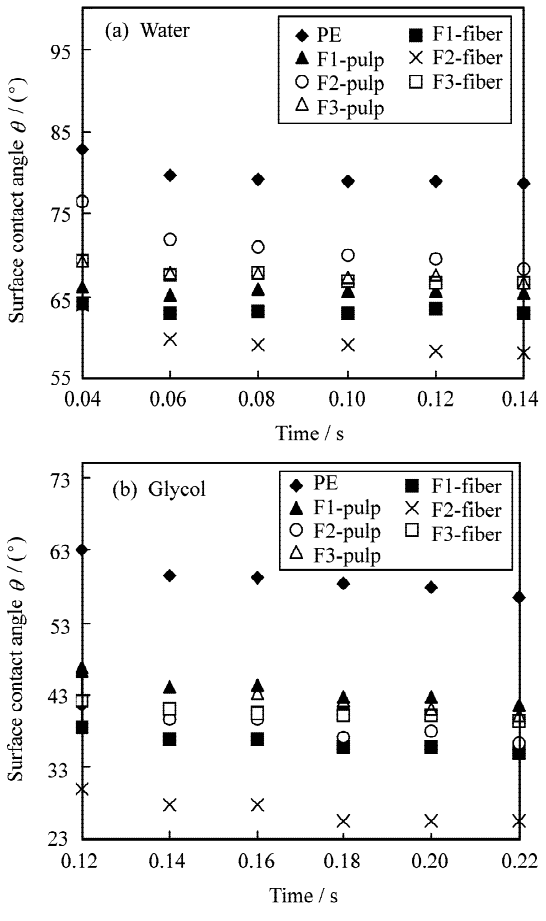

图 1　不同测试液在芳纶纤维表面的接触角随时间的变化

Fig. 1　The changes of surface contact angles with time to different testing liquids

试液时，取 0.14 s 时刻的接触角值为准。芳纶纤维的接触角如表 2 所示，水在芳纶纤维上所测得接触角的范围为 60～70°，由乙二醇所测得范围为 25～45°，可见芳纶纤维在水中的疏水性比较高。

2.2　芳纶纤维的表面能分析

目前，固体表面能多以接触角为基础进行间接测定和计算，主要方法有状态方程测求法、几何平均方程求解法和 Wu 方程求解法等[10,12]，它们分别依照不同理论对接触角数据进行相应处理而得到。其中，利用状态方程法计算高聚物表面能时，需要将多种不同测试液的表面能对高聚物表面能作图，取其图中曲线的极大值而得到高聚物表面能。该方法较为复杂，而几何平均方程是 Fowkes 等人利用几何平均理论，将固体表面能定义为色散分量和极性分量之和，其中色散分量由分子内的瞬时偶极间变化而产生，它的大小与分子的变形性、分子质量大小等因素有关，反映的是固体分子结构，而极性分量为诱导力、偶极力与氢键总和[13-14]。通过测试液和固体试样的表面能、色散分量、极性分量以及测试液体测得试样表面的接触角所建立的理论方程求解得之。Wu 方程求解法与几何平均法的理论出发点相同，只是在计算过程中利用了倒数平均调和方法。

根据式(2)计算出芳纶纤维的表面能如表 2 所示。6 种芳纶纤维的表面能均不相同，这可能是源于芳纶纤维表面原子数目对其表面能的贡献不同，因为不同制造工艺下的芳纶纤维，其表面超分子结构排列的紧密性相异[15-16]。F1-纤、F2-纤及 F3-纤的表面能分别大于 F1-浆、F2-浆及 F3-浆，F1-浆与 F2-浆的表面能相近，F3-浆的表面能最低。实验所得聚乙烯 PE 基片的表面能为 30.9 $mJ\cdot m^{-2}$，与文献值[10]33.2 $mJ\cdot m^{-2}$ 较为接近。与聚乙烯塑料相比，芳纶纤维表面能平均高出约 10 个单位，表明芳纶纤维对于同一液体的可润湿性强于聚乙烯塑

表 2　芳纶纤维与浆粕的表面能(20℃)

Table 2　Surface energy of the aramid fiber and pulp(20℃)

No.	Contact angle θ/(°)		Dispersion component	Polar component	γ_s^p/γ_s^d	Surface energy
	Water	Glycol	$\gamma_s^d/(mJ\cdot m^{-2})$	$\gamma_s^p/(mJ\cdot m^{-2})$		$\gamma_s/(mJ\cdot m^{-2})$
PE	79.5	60.5	12.1	18.8	1.6	30.9
F1-fiber	63.0	36.7	17.6	24.9	1.4	42.5
F1-pulp	65.3	44.0	15.0	25.4	1.7	40.3
F2-fiber	61.9	29.9	20.1	24.0	1.2	44.1
F2-pulp	66.2	39.7	17.6	22.9	1.3	40.5
F3-fiber	67.7	41.3	17.4	22.1	1.3	39.5
F3-pulp	68.5	43.7	16.5	22.3	1.4	38.8

料片。这可能是因为高分子聚合物中引入了杂原子，其增进高分子润湿性能力的原子次序为：F＜H＜Cl＜Br＜I＜O＜N[17]。相对于碳氢化合物，芳纶分子链中含有杂原子 N，其表面容易与亲电原子结合而形成强烈的氢键，致使表面能较高。

此外，芳纶短纤维表面能均大于浆粕，表明芳纶短纤维相对于浆粕更易被同一液体所润湿。在芳纶复合纸热压过程中，浆粕由于形态及结构与短纤维不同而使分子链段运动快，先于短纤维熔融，包覆在短纤维周围。在这短时热压过程中，短纤维将有可能被浆粕熔融体所润湿而形成良好的粘接。

另外，根据表 2 数据可以看出，几种芳纶纤维中，表面能越高者，表面接触角越小，纤维的可润湿性及吸附能力相应越强(如图 2 所示)。其中，F2-纤的可润湿性最强，F3-浆最弱。而且短纤维被浆粕润湿的可能性越大，其与浆粕所形成的界面被破坏时所做的功，即粘附功也将越高[3]。值得注意的是，短纤维表面能并不是越大越好，因为较高表面能使其被润湿变得更容易的同时，也会吸引更多水分子，当微量水积累到一定程度，就可能会替代芳纶纤维复合纸中短纤维与浆粕的界面层中一部分氢键及其它次价键，使原有键断裂，这势必影响到短纤维与浆粕之间的粘接。

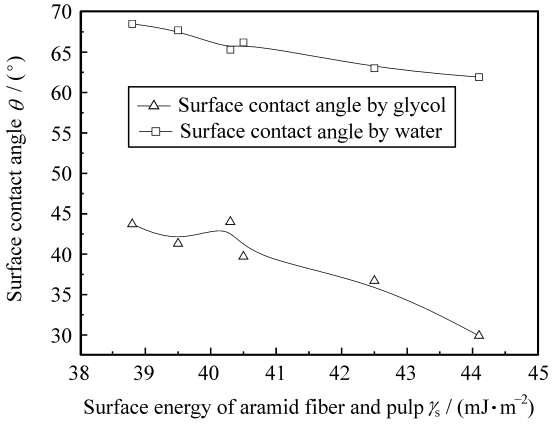

图 2　芳纶短纤维及浆粕的表面接触角与表面能的关系

Fig. 2　Relationship between surface contact angle and surface energy of aramid fiber and pulp

从表 2 还看出，芳纶纤维中，F2-纤的色散分量 γ_s^d 和极性分量 γ_s^p 较大，按照 S. Wu 理论，表面能大小受 γ_s^p 和 γ_s^d 共同制约，γ_s^d 与芳纶纤维分子质量相关，而 γ_s^p 与其极性基团等组分含量有关。故可推知，表面能较高的芳纶纤维，相对分子质量较大，表面极性基团组分也较多。若两种纤维 γ_s^p/γ_s^d 很接近(差值小)，则称纤维间的极性分量和色散分量比较匹配。芳纶纤维的 $\gamma_s^p/\gamma_s^d>1$，这可能是因为芳纶纤维极性分子具有强大的分子间氢键缔合能力，其表面由于大量的 C═O 及 N—H 基团形成的氢键而使纤维表面的 $\gamma_s^p>\gamma_s^d$。短纤维的 γ_s^p/γ_s^d 明显低于浆粕，这可能是由于芳纶短纤维与浆粕的形态和结构不同所致。相对于短纤维，浆粕为絮状物，比表面大，表面极性分量较多。

2.3　芳纶纤维的界面张力及粘附功分析

Chen[3]等人认为，表面能越大，纤维与基体的界面粘接强度越高，但表面能增大并不是其表面被润湿的必要条件，决定其润湿铺展的主要因素是界面张力，以及表面极性分量与色散分量的匹配程度[18]。本文中根据界面张力的极性成分理论得到调和平均方程[10]：

$$\gamma_{12}=\gamma_1+\gamma_2-\frac{4\gamma_1^d\gamma_2^d}{\gamma_1^d+\gamma_2^d}-\frac{4\gamma_1^p\gamma_2^p}{\gamma_1^p+\gamma_2^p} \quad (3)$$

将芳纶短纤维与浆粕的表面能、色散和极性参量代入式(3)，便可计算出短纤维与浆粕之间的界面张力大小。界面张力越小，表明两相之间粘接更容易，一相在另一相上更易润湿铺展。再通过两者的表面能 γ_1、γ_2 以及界面张力关系计算出粘附功 W_a[10]：

$$W_a=\gamma_1+\gamma_2-\gamma_{12} \quad (4)$$

它表示将相界面可逆分开所需的能量，计算结果见表 3。

如表 3 所示，6 种短纤维与浆粕按照相同比例复合抄取的芳纶热压纸中，表面能差值较小以及界面张力较小的，复合纸的抗张指数相应高。这与 Sell-Neumann[10]理论所述的，当粘接与被粘接体表面能相等时有最大粘结强度(此时的界面张力达到极小)的结论是一致的。从宏观角度，纸的抗张指数表征纤维之间的结合力，而界面张力则反映微观粘接力大小。结果表明，界面张力对纤维之间结合力的影响与其复合纸抗张指数所反映的趋势相同。结合表 2 和表 3 得知，F2-纤的表面能最高，复合纸的粘附功也最大(84.4 mJ·m^{-2})，而 F3-纤最低，复合纸的粘附功也最小(78.3 mJ·m^{-2})。这表明，粘附功与芳纶纤维表面能大小也存在一定相关性。

另外，根据表 2 和表 3 数据可知，F3-纤与 F3-浆、F2-纤与 F1-浆的 γ_s^p/γ_s^d 差值分别最小和最大，

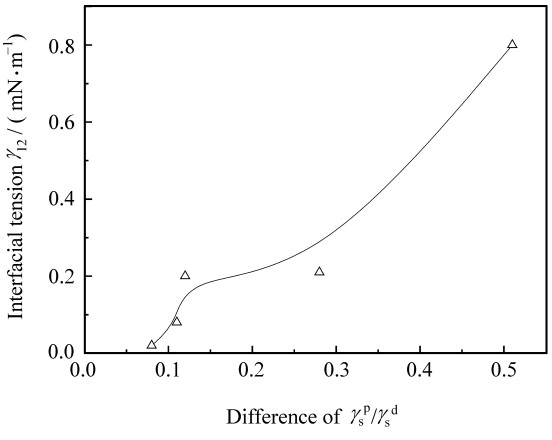

图 3　短纤维与浆粕的 γ_s^p/γ_s^d 差值与界面张力的关系

Fig. 3　Relationship between the difference of γ_s^p/γ_s^d and the interfacial tension of fiber/pulp

其界面张力也分别最小和最大(如图 3 所示)，复合纸的抗张指数分别为最大和最小。而且差值越小(即短纤维与浆粕的 γ_s^p/γ_s^d 匹配程度越高)，界面张力越小，复合纸抗张指数也越高。这表明，芳纶短纤维与浆粕之间极性和色散分量的匹配程度与其界面张力大小乃至复合纸性能密切相关。

热压(16 MPa)前后芳纶复合纸表面能的变化如表 4 所示，热压前后 3 种芳纶纸的表面能变化明显，热压后纸的表面能均明显下降。显然，自制 F1 纸表面能下降得比 F2 快，但由于初始表面能数值最高，热压后 F1 纸的表面能仍然高出 F2 纸许多，热压后的芳纶纸表面能大小依次为：F3 纸＞F1 纸＞F2 纸。表面能降低意味着热压后的芳纶复合纸表面结构更加致密，不易被液体渗透吸收。这显著降低了水等极性分子对其表面的破坏，促使纤维分子间的键合趋于完善，从而使芳纶热压纸具有比未热压纸更优的力学性能和抗湿能力。另外，表面能降低，也将导致纤维间的润湿性变差，进而影响热压过程中短纤维与浆粕的粘接效果，对粘附功产生不利影响。

在自制 F1 纸及 F2 纸研制中，提高热压温度及压力才可使其具有与 F3 纸相似的抗张指数等力学性能。从纸张外观上看，F1 纸与 F2 纸表面光滑且有过分熔融粘接的现象，F3 纸表面却不明显，且 F3 纸的表面能降低幅度最小，抗张指数却最大(由表 3 和表 4 所示)；此外，随着热压力增加，复合纸表面能持续降低，抗湿能力逐渐增强，而表面能下降幅度也趋于平缓，这表明复合纸表面结构趋于稳定，受到外界应力的影响减弱(如图 4 所示)。因此，联系表 4 与图 4 可知，自制 F1 纸和 F2 纸的变

表 3　芳纶的界面张力和粘附功及其复合纸性能

Table 3　The interfacial tension and work of adhesion of aramid and its sheet property

No.	Surface energy difference $\Delta\gamma_s$/(mJ·m^{-2})	Interfacial tension γ_{12}/(mN·m^{-1})	Work of adhesion W_a/(mJ·m^{-2})	Tensile index/(N·m·g^{-1})
F1-fiber/F1-pulp	2.2	0.20	82.6	51.6
F2-fiber/F2-pulp	3.6	0.21	84.4	49.4
F1-fiber/F2-pulp	2.0	0.08	82.9	53.0
F2-fiber/F1-pulp	3.8	0.80	83.7	46.7
F3-fiber/F3-pulp	0.7	0.02	78.3	59.9

表 4　热压前后芳纶复合纸的表面能

Table 4　Surface energy of the aramid sheets before and after hot-press process

No.	Surface contact angle θ/(°)				Surface energy γ_s/(mJ·m^{-2})		Drop scope/%
	Before hot-press process		After hot-press process		Before hot-press process	After hot-press process	
	Water	Glycol	Water	Glycol			
F1-sheet	66.9	29.7	80.1	65.7	42.7	30.2	29.3
F2-sheet	84.0	46.4	87.9	68.1	36.5	26.2	28.4
F3-sheet	76.6	52.9	79.1	72.7	33.5	31.5	5.9

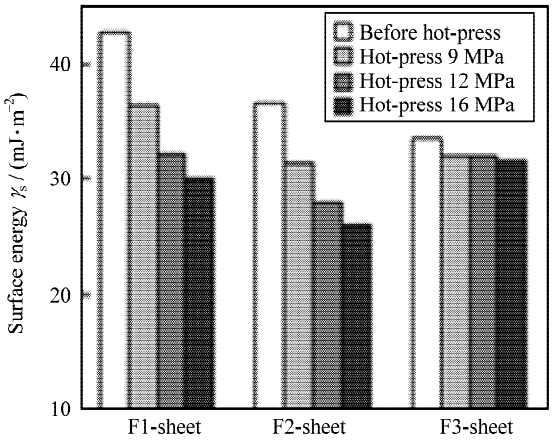

图 4　热压力对芳纶复合纸表面能的影响

Fig. 4　Effect of the hot-press pressure on the surface energy of aramid sheet

化幅度均偏大，热压力条件相对 F3 纸较高，在不同热压工艺下，芳纶纸表面能下降的幅度越大，对粘接过程乃至复合纸的力学性能的不良影响也越明显。自制 F1 和 F2 芳纶纸与商品 F3 纸在热压工艺上存有一定差异，有待于进一步改善。

3　结　论

(1) 芳纶短纤维表面能稍高于芳纶浆粕，芳纶纤维及浆粕的极性分量大于色散分量，且芳纶短纤维与浆粕之间的色散分量和极性分量越匹配，表面能之差及界面张力越小，而复合纸抗张指数越高。

(2) 芳纶复合纸热压前后，自制 F1 纸下降幅度最大，商品 F3 纸最小，热压后因其表面能的下降而具备优良的抗湿性能，但表面能下降过快对纤维间热压粘接过程及复合纸性能不利。

(3) 芳纶纤维表面能越高越有利于表面可润湿性、粘附功及粘接强度的增大。

参考文献：

[1] 衡沛之，陶世毅，王丽萍. 聚芳酰胺纤维合成纸的研制 [J]. 纸和造纸，2004，23(6)：69-73.
Heng Peizhi，Tao Shiyi，Wang Liping. The development of polyaramid fiber paper [J]. Paper and Paper Making，2004，23(6)：69-73.

[2] 胡　健，黄一磊，郑炽嵩，等. Nomex 纸基复合材料 [J]. 造纸科学与技术，2003，22(4)：29-31.
Hu Jian，Huang Yilei，Zheng Chisong，et al. Review of Nomex paper composite [J]. Paper Science & Technology，2003，22(4)：29-31.

[3] Chen Ping，Lu Chun，Yu Qi. Influence of fiber wettability on the interfacial adhesion of continuous fiber-reinforced PPESK composite [J]. Journal of Applied Polymer Science，2006，102(3)：2544-2551.

[4] 刘耀鹏. 粘接最佳条件的分析讨论 [J]. 粘接，2007，28(2)：29-30.
Liu Yaopeng. Analysis and discussion on optimum condition for bonding [J]. Adhesion in China，2007，28(2)：29-30.

[5] 刘　丽，张　翔，黄玉东，等. 超声作用对芳纶纤维表面性质的影响 [J]. 复合材料学报，2003，20(2)：35-40.
Liu Li，Zhang Xiang，Huang Yudong，et al. Effect of ultrasonic treatment on surface characteristics of aramid [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2003，20(2)：35-40.

[6] 王　杨，李　鹏，于运花，等. 芳纶纤维的磷酸表面处理及其树脂基复合材料界面性能 [J]. 复合材料学报，2007，24(3)：7-12.
Wang Yang，Li Peng，Yu Yunhua，et al. Interfacial properties of phosphorous acid modified Kevlar fiber reinforced epoxy resin composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(3)：7-12.

[7] Hoecker F，Karger-Kocsis J. Surface energetic of carbon fibers and its effects on the mechanical performance of CF/EP composites [J]. Journal of Applied Polymer Science，1996，59(1)：139-153.

[8] 狄剑锋. 织物表面能的计算方法及其比较 [J]. 纺织导报，2005，24(9)：77-79.
Di Jianfeng. Comparison of fabric surface energy calculation methods [J]. China Textile Leader，2005，24(9)：77-79.

[9] Banerji B K. Physical significance of contact angles [J]. Colloid & Polymer Science，1981，259(3)：391-394.

[10] 吴人洁. 高聚物的表面与界面 [M]. 北京：科学出版社，1998：1-63.
Wu Renjie. The surface and interface of polymer [M]. Beijing：Science Press，1998：1-63.

[11] Jenkins L M，Donald A M. Contact angle measurements on fibers in the environmental scanning electron microscope [J]. Langmuir，1999，15(22)：7829-7835.

[12] Owens D K，Wendt R C. Estimation of the surface free energy of polymers [J]. Journal of Applied Polymer Science，1969，13(8)：1741-1747.

[13] 宋华杰，董海山，郝　莹. 计算固体表面能的 Young-Good-Girifalco-Fowkes 方程的理论基础 [J]. 粘接，2000，21(5)：1-5.
Song Huajie，Dong Haishan，Hao Ying. Theoretic foundation of Young-Good-Girifalco-Fowkes equation use for solid surface energy calculation [J]. Adhesion in China，2000，21(5)：1-5.

[14] Sharma Prashant K. Surface studies relevant to microbial adhesion and bioflotation of sulphide minerals [D]. Sweden：Luleal University of Technology，2001.

[15] 郑志清，钱咸或，吴小红，等. 芳纶 1313 的结构与性能 [J]. 合成纤维工业，1993，16(6)：18-21.
Zheng Zhiqing，Qian Xianhuo，Wu Xiaohong，et al. The structure and properties of poly-*m*-phenyleneisophthalamide (PMIA) fiber [J]. Synthetic Fiber Industry，1993，16(6)：18-21.

[16] 高　明，孙奉仲，王妮妮，等. 换热表面的表面能对换热性能影响的理论分析 [J]. 能源工程，2006，27(2)：12-14.
Gao Ming，Sun Fengzhong，Wang Nini，et al. Theoretical analysis on the effect of surface energy upon heat exchanger performance [J]. Energy Engineering，2006，27(2)：12-14.

[17] 赵国玺. 表面活性剂物理化学 [M]. 北京：北京大学出版社，1984：340-380.
Zhao Guoxi. Superficial active substance physical chemistry [M]. Beijing：Peking University Press，1984：340-380.

[18] Wu Souheng. Surface and interfacial tensions of polymer melts Ⅱ：Poly(methyl-methacrylate)，poly(*n*-butylmethacrylate) and polystyrene [J]. The Journal of Physical Chemistry，1970，74(3)：632-638.