http://pmse.scu.edu.cn

油酸钾浓度及玄武岩纤维取向对天然橡胶/玄武岩纤维复合材料性能的影响

任建彬[1,2,3]，周博文[1,2,3]，李伟帅[1,2,3]，张德伟[1,2,3]，汪传生[1,2,3]

（1.青岛科技大学 机电工程学院，山东 青岛 266061；2. 山东省高分子材料先进制造技术重点实验室，山东 青岛 266061；3. 轮胎先进装备与关键材料国家工程研究中心，山东 青岛 266061）

摘要：通过油酸钾溶液对玄武岩纤维进行表面改性处理，研究了不同浓度的油酸钾溶液对玄武岩纤维表面处理及玄武岩纤维取向对天然橡胶（NR）/玄武岩纤维（BF）复合材料综合性能的影响。结果表明，随着油酸浓度的增大，复合材料的拉伸强度、撕裂强度及断裂伸长率均表现为先增大后减小，且在油酸钾溶液的质量分数为7%时取得最大值，拉伸强度提高了15.6%，撕裂强度提高了12.1%；BF经定向排列后，复合材料的Payne效应减弱，采用径向取向制备的复合材料，其拉伸强度提高了2.3%，断裂伸长率降低了17.8%，但磨耗增加了8.3%。扫描电镜缝隙表明，7%浓度的油酸钾可以均匀地包覆在BF表面，纤维在橡胶中分散性较好。

关键词：玄武岩纤维；油酸钾；复合材料；纤维取向；天然橡胶

中图分类号：TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2024)04-0040-10

玄武岩是一种廉价、可生物降解的天然纤维原料，分布广泛、开采成本较低、开采效率较高，从而有力地推动了玄武岩纤维（BF）的应用[1,2]。BF在一些物理和力学性能上与玻璃纤维相当，其力学性能优于大多数纤维[3,4]，是世界高技术纤维行业中可持续发展的有竞争力的新材料，也是纤维增强聚合物复合材料的一种强有力的候选材料[5]。BF作为骨架增强体用于橡胶材料时，因其较低的表面能、较小的比表面积和较高的化学惰性，使其与橡胶基体的结合受到限制，产生的界面作用较弱，甚至引起界面失效[6]，因此，需要对BF进行表面改性，以提高其与橡胶的结合程度[7~9]。

橡胶由于其优良的可塑性、耐化学性和耐疲劳性，是用途较为广泛的高分子材料之一[10,11]。将短纤维加入到橡胶中能很好地改善复合材料的物理性能，而短纤维的适当取向可以显著提高复合材料的某些物理性能，同时也赋予了其物理性能的各向异性[12]。近年来，天然橡胶（NR）/BF作为一种新型复合材料已成为科学研究的热点[13]。陶玉虎等[14]使用多种改性方式处理BF，并用改性后的BF与NR物理混合，测试了不同用量的BF在复合材料中的性能，未改性的NR/BF复合材料的性能有小幅度的下降，而经过改性处理后的NR/BF复合材料综合性能得到了明显的提高。武卫莉等[15]采用将玄武岩纤维部分替代玻璃纤维的方法，发现将二者以45°交叉摆放2层增强天然橡胶时，能够获得力学性能优异的复合橡胶材料。

此外，取向是指在橡胶基体中，短纤维或某些填料经过充分分散后，沿特定方向排列的现象[16]。通常情况下，具有较高刚性的纤维，如芳纶纤维，更容易发生取向现象，而柔性纤维，如纤维素纤维，则相对不易取向。纤维取向方向的补强效果最好，在胶

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0056
收稿日期：2023-05-29
基金项目：国家自然科学基金资助项目（50775116）；山东省重点研发计划（2019JMRH00205）；山东省自然科学基金资助项目（ZR2016XJ003）；山东省自主创新及成果转化专项（2014CGZH0405）
通讯联系人：张德伟，主要从事高分子材料制备技术与装备研究，E-mail: zhangdewei1421@163.com

料成型之后,可以在橡胶基体中实现3个方向。

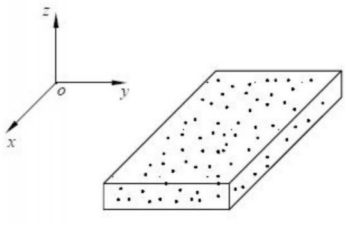


Fig. 1 Definition of fiber orientation direction

Fig.1为成型胶片的示意图。在复合材料中,*X*方向指的是沿着胶料挤出或下片的方向,也就是纤维或填料的轴向取向方向;*Y*,*Z*方向是与轴向垂直的方向,其中,*Y*方向指纤维或填料在胶料中横向排列,称为周向取向方向,*Z*方向指纤维或填料在胶料中竖直排列,称为径向取向方向[17]。

本文采用油酸钾溶液对BF进行表面改性处理,由于油酸钾具有表面活性作用,可以在纤维表面形成一层薄膜。这层薄膜有助于提高纤维表面的亲水性,改变其界面性质,使其更容易与橡胶等相互作用。文中制备了一系列油酸钾浓度不同的溶液,系统研究油酸钾浓度对NR/BF复合材料性能的影响,通过扫描电镜观察复合材料表面结构的变化,揭示油酸钾与纤维之间的相互作用。通过不同的加工方法或工艺条件来控制玄武岩纤维的取向,研究在不同取向下,纤维与橡胶基质之间的相互作用,以及取向对NR/BF复合材料的硫化性能、物理力学性能、动态力学性能等性能的影响,为制备高性能绿色橡胶复合材料提供参考。

1　实验部分

1.1　原料与配方

天然橡胶:牌号RSS3,泰国产品;炭黑N330:武汉市丰腾商贸有限公司;3 mm玄武岩纤维:嘉兴安利得科技有限公司;油酸钾、冰醋酸:上海麦克林股份有限公司;氧化锌等小料:均为市售级产品。

基本配方:天然橡胶NR,100 phr;炭黑N330,30 phr;氧化锌ZnO,5 phr;硬脂酸SAD,2 phr;防老剂4020,2 phr;促进剂RD,2 phr;促进剂NS,1.8 phr;硫磺S,2 phr;3mm改性BF,5 phr。

1.2　实验仪器与设备

开炼机:X(S)K-160型,大连华日橡塑机械有限公司;密炼机:X(S)M-1.7L型,青岛科技大学;销钉挤出机:ZA3-W,内蒙古富特橡塑机械有限公司;磁力搅拌器:DF101S,上海力辰邦西公司;无转子硫化仪:MD-3000A型,中国台湾高铁检测仪器(东莞)有限公司;平板硫化机:OLB-D400x400x2,上海第一橡胶有限公司;万能材料试验机:中国台湾优肯科技股份有限公司;LXA橡胶硬度计:上海六菱仪器厂;橡胶加工分析仪(RPA):RPA2000型,美国Alpha科技有限公司;动态力学热分析仪(DMA):EPLEXOR-150N型,德国耐驰仪器制造有限公司;旋转辊筒式磨耗机:SS-5643-D型,中国台湾松恕检测仪器有限公司。

1.3　BF的表面处理

将适量的BF纤维加入事先准备好的冰醋酸溶液中(浓度为1 mol/L),用磁力搅拌器对溶液进行搅拌处理,时间为2 h。通过搅拌作用,BF纤维能够均匀地分散在冰醋酸中,并与其充分接触,致使纤维表面发生刻蚀并形成凹槽。随后,多次用去离子水冲洗和抽滤处理,将纤维洗净。最后,将洗净的纤维放入烘箱中干燥处理,设定温度为60 ℃,时间为12 h。将处理好的纤维分成4组,备用。

将冰醋酸处理后的BF分别放入到3%,5%,7%和10%的油酸钾溶液中,磁力搅拌2 h,水浴60 ℃,转速750 r/min,然后经过抽滤后放入烘箱(温度设定为60 ℃)中,烘干24 h,备用。油酸钾浓度分别为3%,5%,7%和10%,对应的试验配方编号分别为A,B,C和D。

1.4　试样制备

将NR放入开炼机中进行塑炼处理,持续时间为5 min,以增强其可塑性和流动性。将经过塑炼的NR与其他配合剂一起用密炼机进行混炼制备混炼胶,混炼时间为4 min。得到的混炼胶经过开炼机最小辊距的包辊后,加入硫磺,确保其均匀混合。当胶片无气泡且表面光滑时,调大开炼机的辊距,将胶料下片,得到混炼胶。待12 h后,使用无转子硫化仪对混炼胶的硫化性能进行测试,测试温度为150 ℃。将混炼胶放置在平板硫化机中进行硫化,硫化条件为150 ℃施加10 MPa的压力,硫化时间为正硫化时间的1.3倍。然后,将硫化后的样品置于室温24 h,制备试样。

Tab. 1 Vulcanization properties of the unmodified BF/NR composite

Mechanical property	3 mm unprocessed BF
t_{10}/min	2.72
t_{90}/min	7.31
M_L/(dN·m)	0.34
M_H/(dN·m)	14.26
M_H-M_L/(dN·m)	13.92

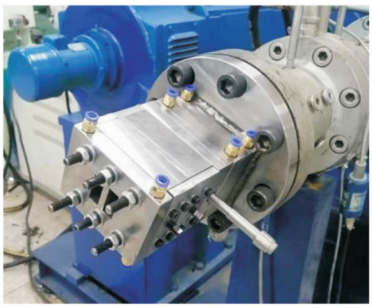


Fig. 2 Expansion-type head for dam obstruction

1.5 玄武岩纤维的取向

在此基础上，获得轴向、径向和混向3种不同取向的BF。为了实现BF的轴向取向，采用开炼机进行处理。在最小辊距下，多次将胶料沿着下片方向过辊，确保其下片方向保持不变，从而获得具有轴向取向的复合材料；同样地，混合取向也是在开炼机上实现，首先进行轴向取向，将经过轴向取向的胶料以最小辊距多次过辊，在下片时采用打三角包的方式，得到具有混合取向的橡胶复合材料。BF的径向取向采用特殊的挤出机机头实现（Fig.2），通过内部阻坝扩张式结构，增加流道内的压力，实现径向取向。为了便于表达，将BF中的轴向取向、径向取向、混合取向分别用=，⊥，X表示。

1.6 测试与表征

1.6.1 混炼胶硫化性能测试：按照国标GB/T16584-1996标准，使用无转子硫化仪，设定检测温度为150 ℃，时间60 min。

1.6.2 邵尔A型硬度测试：按照国标GB/T531.1-2008进行测试。

1.6.3 磨耗性能测试：按照国标GBT/1689-2014使用辊筒式磨耗机进行测试。

1.6.4 回弹性能测试：按照国标GBT/1681-2009使用橡胶回弹仪进行测试。

1.6.5 力学性能测试：按照国标GBT/528-2009和GBT/529-2009，使用万能试验机测试硫化胶的撕裂强度与拉伸强度，设定拉伸速率为500 mm/min。

1.6.6 混炼胶流变性能测试：使用橡胶加工分析仪进行测试。扫描温度为60 ℃，频率为1 Hz，扫描范围为0.1~50 Hz。

1.6.7 硫化胶的动态力学性能分析：使用动态力学

Tab. 2 Vulcanization properties of BF/NR composites treated with potassium oleate solution

Mechanical property	Potassium oleate concentration and BF orientation					
	A=	A⊥	AX	B=	B⊥	BX
t_{10}/min	2.67	2.78	2.9	2.92	2.93	2.4
t_{90}/min	6.82	6.93	7.08	7.05	6.95	7.01
M_L/(dN·m)	0.98	0.77	0.76	1.21	0.77	0.99
M_H/(dN·m)	13.47	12.78	13.26	13.88	13.94	13.57
(M_H−M_L)/(dN·m)	12.49	12.01	12.5	12.67	13.17	12.58
	C=	C⊥	CX	D=	D⊥	DX
t_{10}/min	2.28	2.37	2.32	1.98	2.23	2.12
t_{90}/min	6	6.15	6.22	5.6	6.22	6.57
M_L/(dN·m)	1.24	1.08	1.08	1.2	0.98	1.11
M_H/(dN·m)	13.74	13.71	13.48	13.59	13.11	13.2
(M_H−M_L)/(dN·m)	12.5	12.63	12.4	12.39	12.13	12.09

note: A~D: potassium oleate concentration is 3%, 5%, 7% and 10% respectively; =, ⊥, X: axial orientation, radial orientation, mixed orientation of BF

热分析仪(DMA)进行。采用拉伸模式对硫化胶料试样进行温度扫描,频率为10 Hz,温度区间为－65~65 ℃,升温速率为2 ℃/min。

1.6.8 *形貌分析*:对硫化胶拉伸试样断面进行切片,经喷金处理后,使用HITACHI SU8010型扫描电镜(日本日立公司)观察胶料微观形貌及BF在胶料中的取向方向,加速电压为10 kV。

2　结果与讨论

2.1　硫化性能

Tab.1列出未改性NR/BF复合材料的硫化性能。

Tab.2列出油酸钾溶液处理NR/BF复合材料的硫化性能。

复合材料中添加油酸钾后,焦烧时间(t_{10})和正硫化时间(t_{90})均缩短,说明油酸钾对BF进行了改性,能加速硫化反应,加快了硫化速率。同时,t_{10}的缩短也表明,当油酸钾浓度过高时,对橡胶的加工有不利影响,胶料会提前硫化,对其加工性能造成影响。

Tab. 3　Physical and mechanical properties of the unmodified BF / NR composite

Mechanical property	3 mm unprocessed BF
Shao A hardness/(°)	59
100% Fixed tensile stress/MPa	2.16
300% Fixed tensile stress/MPa	9.43
Tensile strength/MPa	23.96
Tear strength/(kN·m^{-1})	56.41
Elongation at break/%	490.34
DIN wear consumption/cm^3	0.179
Amount of rebound/%	70.8

研究发现,通过轴向取向制备的复合材料具有较长的正硫化时间,混合取向降幅最小,径向取向的复合材料位于两者之间。分析认为,通过轴向取向和径向取向,可以实现纤维在胶料中的一致排列,由于内部交联点的增多,有利于硫化过程中交联网络的形成;而混合取向胶料中BF则有“重叠”趋势,但

Tab. 4　Physical and mechanical properties of BF / NR composites treated with potassium oleate solution

Mechanical property	Potassium oleate concentration and BF orientation					
	A=	A⊥	AX	B=	B⊥	BX
Shao A hardness/(°)	65	65.5	64.5	64	65	66.5
100% Fixed tensile stress/MPa	2.32	2.21	2.23	2.43	2.56	2.41
300% Fixed tensile stress/MPa	11.09	12.82	10.07	10.42	14.92	11.66
Tensile strength/MPa	25.43	26.96	26.14	25.75	26.57	27.57
Tear strength/(kN·m^{-1})	61.03	60.59	60.72	63.31	60.29	61.17
Elongation at break /%	508.1	413.22	502.25	525.74	447.07	525.27
DIN wear consumption/cm^3	0.165	0.169	0.173	0.159	0.166	0.164
Amount of rebound/%	70.1	69.8	70.3	71.1	69.7	68.9
	C=	C⊥	CX	D=	D⊥	DX
Shao A hardness/(°)	67	67.5	66	68.5	68.5	67.5
100% Fixed tensile stress/MPa	2.49	2.42	2.39	2.26	2.34	2.27
300% Fixed tensile stress/MPa	10.63	13.6	10.47	10.56	14.79	10.98
Tensile strength/MPa	27.7	28.34	27.75	27.08	27.3	27.31
Tear strength/(kN·m^{-1})	63.24	61.07	61.59	60.29	59.91	61.21
Elongation at break/%	527.92	448.03	514.47	497.61	416.72	483.27
DIN wear consumption/cm^3	0.157	0.17	0.165	0.169	0.172	0.168
Amount of rebound/%	70.7	69.8	70.1	71.3	69.8	70.3

note: A~D: potassium oleate concentration is 3%, 5%, 7% and 10% respectively; =, ⊥, X: axial orientation, radial orientation, mixed orientation of BF

因其较高的模量，与橡胶基体的交联点未完全结合，胶料内部只有“交联”的趋势，因此其正硫化时间降幅最小。

2.2 物理力学性能

未改性NR/BF复合材料的物理力学性能如Tab.3所示。

油酸钾溶液处理NR/BF复合材料的物理力学性能如Tab.4所示。

研究发现，随着油酸钾使用量的增加，复合材料表现出更高的硬度以及100%和300%定伸应力。此外，胶料的硬度与其300%定伸应力呈正比关系。这意味着使用油酸钾处理的BF在增强橡胶方面具有显著效果。

随着油酸钾浓度逐渐增大，复合材料的力学性能得到了改善，表现出更高的强度和拉伸性能。然而，当浓度超过一定阈值后，增益效果开始减弱，导致性能下降。当油酸钾浓度为7%时达到最大值，与未改性的复合材料相比，拉伸强度和撕裂强度分别增加15.6%和12.1%。

使用油酸钾对BF进行表面改性时，油酸钾（$C_{18}H_{33}KO_2$）中的羧酸根离子（COO-）与纤维所含的偏硅酸钙离子发生化学反应可以显著增强纤维与橡胶基体之间的结合，并增加纤维与橡胶基体之间的搭接点。同时，在外部载荷作用下，纤维-纤维、纤维-橡胶间的物理化学键，能有效抑制橡胶大分子的滑动。当油酸钾浓度过高时，会形成厚度不均匀的涂层覆盖在纤维表面，从而削弱界面相的紧密性，导致纤维之间出现团聚，阻碍了BF与橡胶基体的有效结合，进而产生应力集中现象，当试样受到外力作用时，会加速裂纹的扩展速度，复合材料的拉伸撕裂强度和断裂伸长率下降。

随着油酸钾浓度的增加，复合材料的磨耗量经历了一个非线性的变化过程。随着油酸钾浓度的增加，磨耗量先减小后增加。当油酸钾浓度达到7%时，复合材料的磨耗量达到最小值，相比未处理的NR/BF复合材料减少了14.7%。值得注意的是，3种取向方式中，采用径向取向制备的复合材料相比轴向取向磨耗量增加了8.3%。

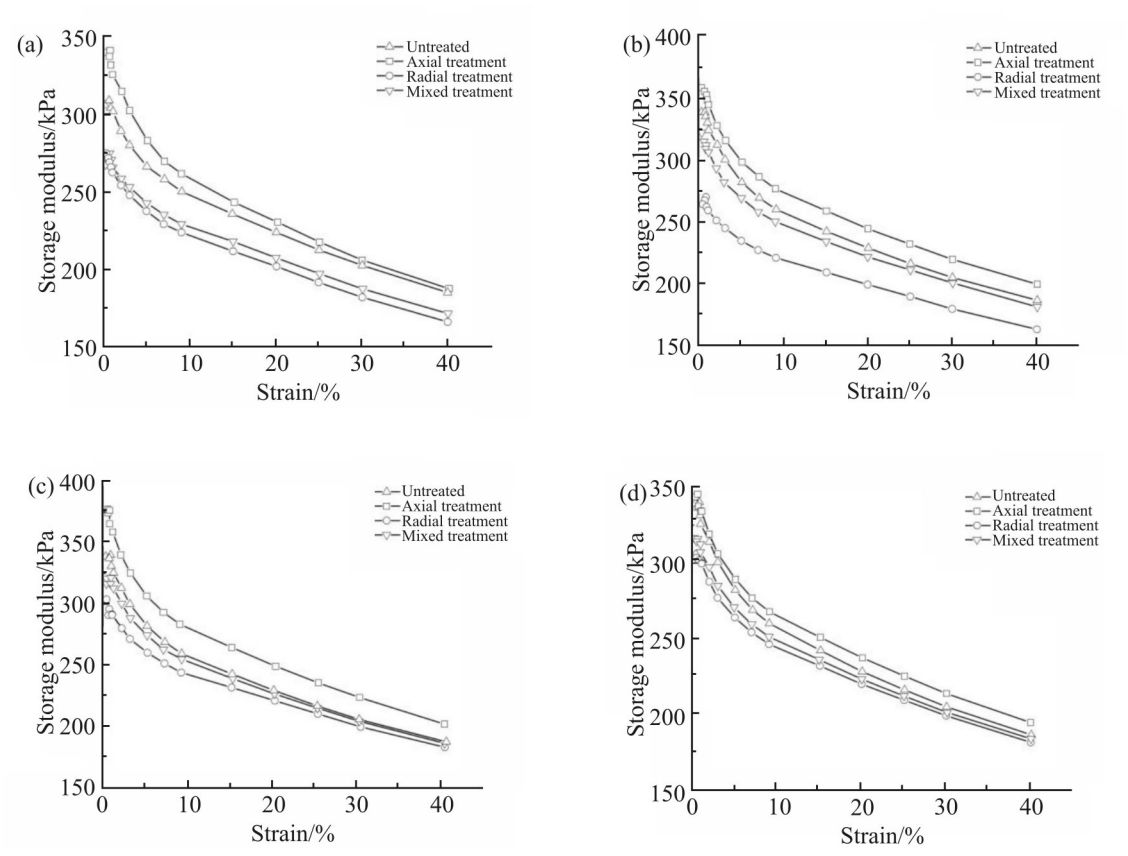


Fig. 3 RPA plots of the BF/NR composites at potassium oleate concentration of (a) 3%, (b) 5%, (c) 7%, (d) 10% and in the BF orientation direction

2.3　RPA分析

通过RPA测试,可以准确地测量并比较不同填料比例时的储能模量(G'),以评估填料对橡胶性能的影响程度。用损耗因子(tanδ)表示橡胶在受外力时的能量损耗程度,Fig.3为油酸钾不同浓度及BF取向方向的应变扫描曲线。

随着油酸钾浓度的增加,复合材料的储能模量呈上升趋势。这是因为油酸钾处理对BF表面产生了积极影响,增加了纤维与填料以及纤维与基体之间的结合强度。这种物理化学键合作用形成了一种有效的"桥梁",增强了界面相的效果。因此,当外力作用于复合材料时,纤维从基体中被拔出所需的能量增加。为了将纤维拔出,需要更大的能量输入,导致了储能模量的增加。

随着油酸钾浓度的增加,经过取向的复合材料的$\Delta G'$值总体上呈现降低的趋势,这表明纤维与基体之间的相互作用减弱。然而,当油酸钾浓度过高时,$\Delta G'$值略微增加,表明纤维在橡胶基体中的整体分散更加均匀,Payne效应明显减弱。

径向取向制备的复合材料具有纤维在橡胶基体中垂直于施加压力方向的排列。这种排列方式使得纤维在受到外部载荷时能够有效地承受冲击,减小G'的下降幅度。因此,经径向取向制备的复合材料表现出较小的$\Delta G'$值。相比之下,混合取向和轴向取向的复合材料在纤维排列方向上与施加压力的方向存在较小的夹角,导致在受到外部载荷时纤维成为应力集中点,G'下降幅度较大,从而导致较大的$\Delta G'$值。

2.4 DMA分析

不同浓度油酸钾溶液及BF取向方向NR/BF复合材料的DMA曲线如Fig.4所示,

从图中可以观察到,经过取向处理的胶料在tanδ方面表现出更高的峰值,不同取向处理的胶料的峰值温度非常接近。tanδ的峰值通常对应于橡胶材料的玻璃化转变温度(T_g)。玻璃化转变温度是橡胶分子链开始发生相对运动的最低温度。当温度超过玻璃化转变温度时,橡胶分子链具有相对运动的趋势,有助于减小摩擦。因此,tanδ随温度上升而下降。通过取向处理,能够调节胶料的玻璃化转变温度和损耗因子峰值,从而改善材料的动态性能。同时经过取向的复合材料在高温下具有更好的相对运动能力,并且BF的取向改善了复合材料对形变的限制能力,从侧面说明BF提高了复合材料的力学性能。

如Fig.4所示,随着油酸钾浓度的增加,胶料的损耗因子峰值先下降,然后再上升。分析认为,通过油酸钾改性的BF能够增强纤维与基体的结合和界面相的形成,并改善纤维的分散性。然而,当油酸钾浓度过高时,纤维表面形成的涂层过厚或厚薄不均以及新的团聚集团会降低分散程度并增加摩擦,导致损耗因子的升高。

根据40~60 ℃范围内的tanδ值,可以观察到经过取向处理的复合材料的滚动阻力显著降低,特别是径向取向制备的复合材料表现出更低的滚动阻力。混合取向制备的NR/BF复合材料中,纤维在基体中形成了交联网络结构,从而使得纤维之间的间距更接近。当外部力作用于复合材料时,纤维之间的距离进一步缩小,增加了纤维团聚的可能性,从而降低了纤维的分散性。与此同时,纤维与填料之间以及填料与填料之间形成了更强的交联网络,导致胶料的滞后性增加,进而增加了滚动阻力。

2.5 SEM分析

Fig.5(a~d)分别为3%浓度油酸钾BF径向、5%浓度油酸钾BF轴向、7%浓度油酸钾BF混向、10%浓度油酸钾BF径向。可以观察到经过油酸钾改性后纤维与橡胶基体之间的相互连接变得更加紧密,纤维难以从橡胶基体中被剥离出来。此外,橡胶基体上的孔洞数量减少,而纤维与橡胶结合处的孔隙逐渐减小。这说明经过界面相强化后,纤维大多在基体中断裂。通过增加油酸钾浓度,纤维与橡胶基体之间的结合变得更加紧密。不同浓度形成的油酸钾涂层对纤维的分散和与基体的结合产生了影响,7%浓度油酸钾(Fig.5(e))可以形成均匀的涂层,有利于纤维与基体的良好结合。而10%浓度油酸钾浓度(Fig.5(f))会导致不均匀的涂层形成,对纤维的分散和结合产生不利影响。此外,SEM分析发现,通过在开炼机上打三角包制备的纤维排列方向不均匀且纤维之间的距离不一致,取向度相对较差,如(Fig.5(c))所示;通过挤出机制得到的径向取向胶料的扫描电子显微镜图像可见纤维在径向上排列方向较为一致,如(Fig.5(d))所示。

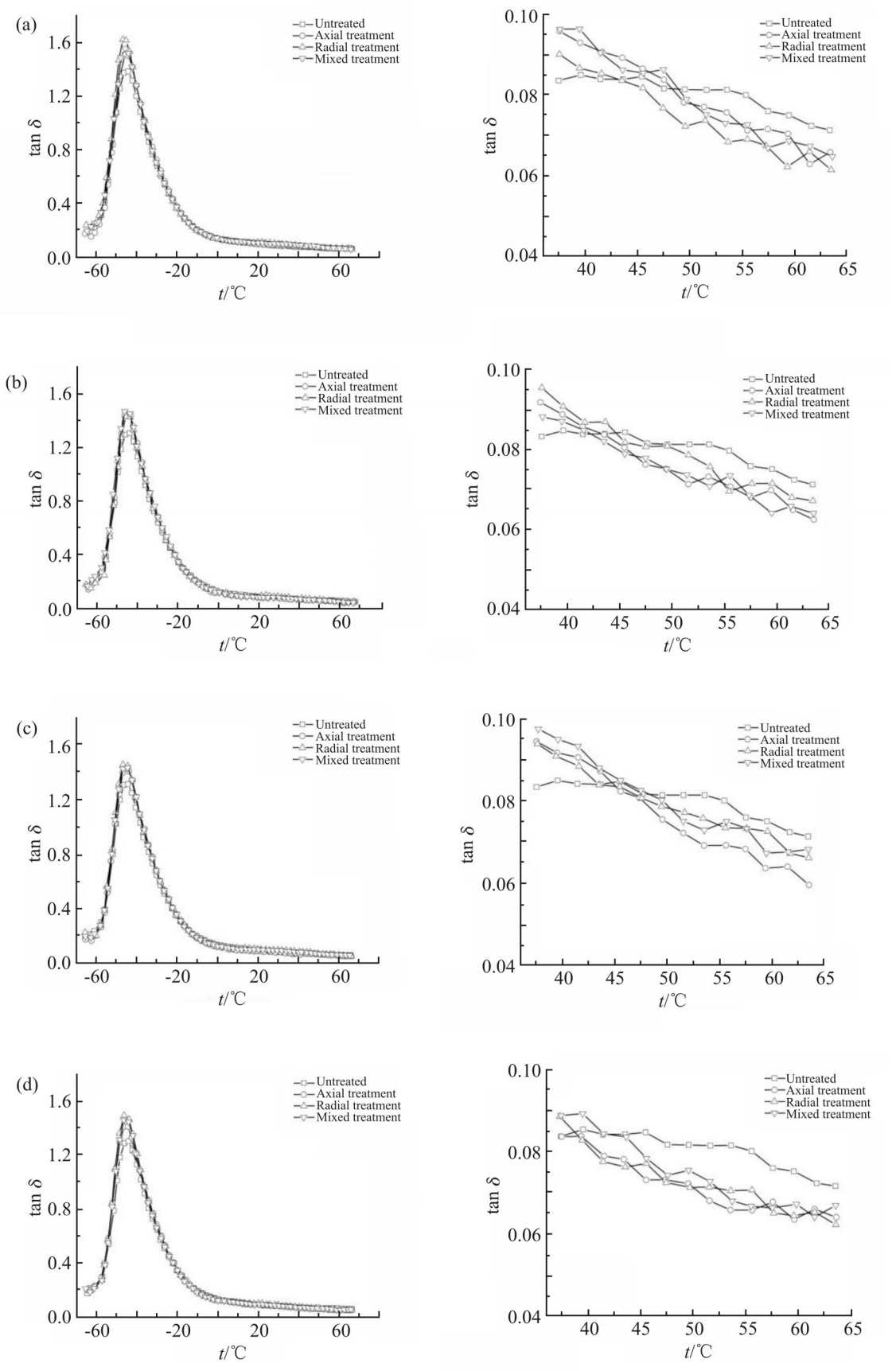


Fig. 4 DMA plots of BF / NR composites with potassium oleate concentration of (a) 3%, (b) 5%, (c) 7%, (d) 10% and in the BF orientation direction

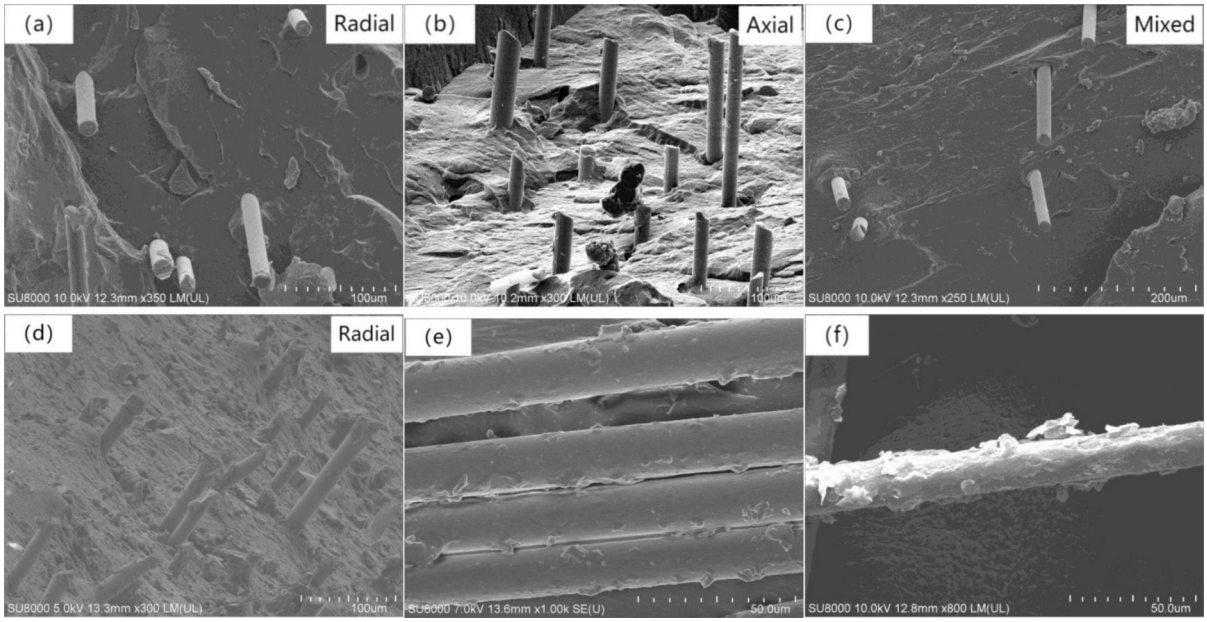


Fig. 5 SEM images of potassium oleate and BF orientation

(a): 3% potassium oleate BF radial; (b): 5% potassium oleate BF axial; (c): 7% potassium oleate BF mixed direction; (d): 10% potassium oleate BF radial; (e): 7% potassium oleate treated BF; (f): 10% potassium oleate treated BF

3　结论

（1）油酸钾浓度的优化可以在一定程度上提高NR/BF复合材料的表面改性效果，增强纤维与基质之间的相互作用，从而改善力学性能。当油酸钾浓度为7%时，复合材料的性能达到最佳状态。与未改性的复合材料相比，拉伸强度提高了15.6%，撕裂强度提高了12.1%，磨耗量减少了14.7%。

（2）通过合理控制玄武岩纤维的取向，可以提高复合材料的力学性能。经过径向取向制备的复合材料，纤维在排列方向上更加一致，相比轴向取向复合材料的拉伸强度提高了2.3%，断裂伸长率降低了17.8%。同时经过取向处理后，BF在橡胶基体中形成了更高的交联密度。动态力学性能测试结果表明，取向后的复合材料显示出较小的Payne效应，同时生热量和滚动阻力也减少。

（3）基于天然橡胶和玄武岩纤维的复合材料具有可持续发展的潜力。这项研究工作有助于优化复合材料性能，为可持续替代材料的开发提供科学依据。通过深入研究油酸钾浓度和纤维取向对性能的影响，可以为未来的复合材料研究提供参考。

参考文献:

[1] Wu W L, Yu B W. The mechanical and thermal properties of KH590- basalt fibre- reinforced silicone rubber/fluorine rubber composites[J]. Journal of Rubber Research, 2020, 23: 1-9.

[2] Saravanan S, Saravanan S, Parkunam N, *et al.* Development of basalt based nanoparticles reinforced composites[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2020, 923: 012052.

[3] Gandhir A, Hassan Y. RANS modeling for flow in nuclear fuel bundle in pressurized water reactors (PWR) [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241: 4404-4408.

[4] 谢奥林, 尹彩流, 王秀飞, 等.改性玄武岩纤维增强橡胶基摩擦材料的摩擦学性能[J].润滑与密封, 2020, 45(8):101-106.
Xie O L, Yin C L, Wang X F, *et al.* Tribographic properties of enhanced rubber- based friction materials with modified basalt fibers[J]. Lubrication and Sealing, 2020,45(8): 101-106.

[5] Liu C C, Ferng Y M, Shih C K. CFD evaluation of turbulence models for flow simulation of the fuel rod bundle with a spacer assembly[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 40: 389-396.

[6] Antonova M V, Krasina I V, Ilyushina S V, *et al*. Modification of basalt fibers by low- temperature plasma[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 10581: 012003.

[7] 李鹏, 罗筑, 钟金成, 等.芳纶短纤维的改性浸胶预处理对填充的三元乙丙橡胶材料性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程,

2019, 35(4): 40-46.

Li P, Luo Z, Zhong J C, *et al*. Effect of modified adhesive pretreatment of aramid staple fiber on the properties of filled EPDM material [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(4): 40-46.

[8] Li M, Pan B, Liu H, *et al*. Interfacial tailoring of basalt fiber/epoxy composites by metal- organic framework based oil containers for promoting its mechanical and tribological properties[J]. Polymer Composites, 2023, 44: 4757-4770.

[9] Wang J, Zhou S, Huang J, *et al*. Interfacial reform of basalt fiber filling composites with graphene oxide and polydopamine for enhanced mechanical and tribological properties[J]. RSC Advances, 2018, 8: 12222-12231.

[10] Bragaglia M, Paleari L, José Augusto B，*et al*. Towards sustainable rubber compounds: the use of waste raw materials[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140: e53750.

[11] 张晓光, 毛诗元, 李岩, 等. 碳纳米管/炭黑复配对天然橡胶湿法混炼共沉胶性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(7): 39-45.

Zhang X G, Mao S Y, Li Y, *et al.* Influence of complex of carbon nanotubes/carbon black on co- precipitated natural rubber compound by wet- mixing[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(7): 39-45.

[12] Kasham M R. Aramid-short-fiber reinforced rubber as a tire tread composite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113: 1355-1363.

[13] Poornima1 C, Mallik1 U S, Suresh R. Thermal and mechanical characterization of polypropylene/basalt fiber/ethylene propylene diene monomer rubber hybrid composite[J]. Materials Research Express, 2023, 10: 025302.

[14] 陶玉虎, 刘志同, 丁国新, 等. 改性玄武岩纤维/天然橡胶复合材料的制备及性能研究 [J]. 化工新型材料, 2018, 46(7): 60-63.

Tao Y H, Liu Z T, Ding G X, *et al.* Preparation and study on properties of modified basalt fiber / natural rubber composites[J]. New Chemical Materials, 2018,46(7): 60-63.

[15] 武卫莉,丛松岩. 玄武岩纤维/玻璃纤维/天然橡胶复合材料的制备及性能[J]. 合成橡胶工业, 2019, 42(2): 137-141.

Wu W L, Cong S Y. Preparation and properties of basalt fiber / glass fiber / natural rubber composites[J]. Synthetic Rubber Industry, 2019,42(2): 137-141.

[16] 于本会. 短纤维径向取向增强橡胶制品成型机理和方法的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.

Yu B H. Research on the forming mechanism and method of short fiber radial orientation reinforced rubber products [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016.

[17] 张德伟. 短纤维-橡胶复合材料混炼机理及实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009.

Zhang D W. Study on mixing mechanism of short fiber-rubber composite[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2009.

Effect of Potassium Oleate Concentration and Orientation of Basalt Fibers on Properties of Natural Rubber/Basalt Fiber Composites

Jianbin Ren[1,2,3], Bowen Zhou[1,2,3], Weishuai Li[1,2,3], Dewei Zhang[1,2,3], Chuansheng Wang[1,2,3]

(*1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Shandong Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Polymer Materials, Qingdao 266061, China; 3. National Engineering Research Center for Advanced Tire Equipment and Key Materials, Qingdao 266061, China*)

ABSTRACT: Surface modification of basalt fibers was carried out using potassium oleate solution, the effects of different concentrations of potassium oleate solution on the surface treatment of basalt fibers and the comprehensive properties of natural rubber (NR)/basalt fiber (BF) composites influenced by basalt fiber orientation were investigated. The results show that with the increasing oleic acid concentration, the tensile strength, tear strength, and elongation at break of the composites initially increase and then decrease, reaching the maximum values at a potassium oleate concentration of 7%. The tensile strength and tear strength are increased by 15.6% and 12.1%, respectively. After being oriented, the BF reduces the Payne effect of the composites. The composites prepared with radial orientation show a 2.3% increase in tensile strength, a 17.8% decrease in elongation at break, and an 8.3% increase in wear. Scanning electron microscopy (SEM) analysis reveal that 7% concentration of potassium oleate can be uniformly coated on the surface of BF, resulting in better dispersion of the fibers in the rubber.

Keywords: basalt fiber; potassium oleate; composite; fiber orientation; natural rubber