

# 铁质纳米粉体对甲基乙烯基硅橡胶表面性质的影响\*★

吴幸<sup>1</sup>, 田鸿钧<sup>2</sup>, 尹诗衡<sup>3</sup>, 陈俭云<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 王正文<sup>1</sup>

## Effect of ferric nanoparticles on surface properties of methyl vinyl silicone rubber

Wu Xing<sup>1</sup>, Tian Hong-jun<sup>2</sup>, Yin Shi-heng<sup>3</sup>, Chen Jian-yun<sup>1</sup>, Li Jun<sup>1</sup>, Wang Zheng-wen<sup>1</sup>

### Abstract

**BACKGROUND:** X-ray image visible new composites can be harvested after ferric nanoparticles being mixed with methyl vinyl silicone rubber (MVSR), however, surface properties of the composites still unclear.

**OBJECTIVE:** To explore the effects of ferric nanoparticles on surface properties of MVSR.

**METHODS:** Both previously prepared iron nanoparticle enhanced silicone rubber (INESR) and carbon-coated ferric nanoparticle enhanced silicone rubber (Fe/CESR) were chosen to be experimental group, MVSR as a control group. The surface roughness, topography, chemical components, water and diiodomethane contact angles as well as free energy of above-mentioned groups were tested respectively.

**RESULTS AND CONCLUSION:** Compared with MVSR, the changes of surface property in the experimental groups including the increase of both Ra and Ry values of roughness, the rise of Ry values was more apparent by adding into iron nanoparticles, more nanoparticles existed among molecular chains of base rubber, atomic percentages of C, O and Si in the surfaces had been altered with a big increase in carbon-based groups caused by carbon-coated ferric nanoparticles, small decreases of water contact angles and surface free energy by adding nanoparticles and a small increase of that by adding carbon-coated ferric nanoparticles, the polar components of free energy were promoted. MVSR added with iron nanoparticles or carbon-coated nanoparticles resulted in changes of its surface property, but the changes caused by the two metal nanoparticles were not completely similar, those attributed to the structure and chemical component differences existing between the nanoparticles.

Wu X, Tian HJ, Yin SH, Chen JY, Li J, Wang ZW. Effect of ferric nanoparticles on surface properties of methyl vinyl silicone rubber. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2012;16(3): 489-494.  
[http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

### 摘要

**背景:** 铁质纳米粉体填入甲基乙烯基硅橡胶可构建出X射线平片可视的新型复合材料,但复合材料的表面性质尚不清楚。

**目的:** 探讨铁质纳米粉体对甲基乙烯基硅橡胶表面性质的影响。

**方法:** 将前期制备出的纳米铁粉增强硅橡胶和碳包铁粉增强硅橡胶复合材料作为实验组,甲基乙烯基硅橡胶为对照组比较观察。

**结果与结论:** 与对照组的表面性质相比,实验组材料的表面变化包括表面粗糙度的Ra值和Ry值升高,纳米铁粉升高Ry值的效果更为明显;基胶分子链之间的纳米颗粒增多;表面C、O、Si等元素的原子百分比发生变化,碳包铁粉升高表面含碳基团的幅度较大;添加纳米铁粉的表面水接触角小幅减小,表面能却降低;添加碳包铁粉的表面水接触角小幅升高,表面能增加;表面自由能的极性分量增加。说明纳米铁或碳包铁均导致甲基乙烯基硅橡胶表面性质的改变,但变化的结果不全相似,这与纳米铁和碳包铁的结构、化学组成不同有关。

**关键词:** 硅橡胶;铁质纳米微粒;碳包铁粉;甲基乙烯;表面性质

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2012.03.024

吴幸,田鸿钧,尹诗衡,陈俭云,李军,王正文.铁质纳米粉体对甲基乙烯基硅橡胶表面性质的影响[J].中国组织工程研究,2012,16(3):489-494. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

<sup>1</sup>Department of General Surgery, Affiliated Hospital of Hainan Medical College, Haikou 570102, Hainan Province, China; <sup>2</sup>Department of General Surgery, China-Japan Union Hospital of Jilin University, Changchun 130033, Jilin Province, China; <sup>3</sup>Analytical and Testing Centre of South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China

Wu Xing★, Master, Department of General Surgery, Affiliated Hospital of Hainan Medical College, Haikou 570102, Hainan Province, China  
wohsien@yahoo.com.cn

Supported by: the National Natural Science Foundation of China, No. 30860077\*

Received: 2011-07-27  
Accepted: 2011-09-17

## 0 引言

医用硅橡胶由于优异的生理惰性、与人体组织、体液及血液接触无毒性反应、植入人体内不易老化降解,各种灭菌消毒方法对其性能影响甚微,易加工成型,在医疗卫生和生物医学工程领域广泛应用<sup>[1]</sup>。但硅橡胶自身的X射线阻射性能不佳以及表面的疏水性、低表面能、缺乏活性基团等均不利于细胞的黏附生长,因而限制了它更广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。

添加纳米粉体可以提高硅橡胶的理化性能<sup>[4]</sup>,这为硅橡胶的生物相容性改良提供了广阔的空

间。硅橡胶的表面粗糙度、微观形貌、表面自由能是近年来学者研究的热点<sup>[5-6]</sup>。有人通过机械混炼法成功制备了硅橡胶/纳米铜复合材料,研究表明,纳米铜在基体中的分布较均匀。随着纳米铜含量的增加,复合材料的硬度增大,热稳定性提高,结晶能力提高,吸水性能增强<sup>[7]</sup>。铁质纳米粉体包括纳米铁粉和碳包铁粉,具有良好的X射线阻射性能、与甲基乙烯基硅橡胶(methyl vinyl silicone rubber, MVSR)共混后,可分别制备出纳米铁增强硅橡胶(iron nanoparticle enhanced silicone rubber, INESR)和碳包铁增强硅橡胶(ferric nanoparticle enhanced silicone rubber, Fe/

<sup>1</sup>海南医学院附属医院普通外科, 海南省海口市 570102; <sup>2</sup>吉林大学中日联谊医院基本外科, 吉林省长春市 130033; <sup>3</sup>华南理工大学分析测试中心, 广东省广州市 510640

吴幸★, 男, 1962年生, 广东省汕头市人, 汉族, 2002年吉林大学毕业, 硕士, 主要从事普通外科临床研究和胆道相容性材料研究。  
wohsien@yahoo.com.cn

中图分类号: R318  
文献标识码: B  
文章编号: 1673-8225 (2012)03-00489-06

收稿日期: 2011-07-27  
修回日期: 2011-09-17  
(20110427021/D · C)

CESR)复合材料, 从而增进硅橡胶的X射线阻射能力, 实现影像可视的功效<sup>[8]</sup>。铁质纳米粉体的分散与硅橡胶表面性能的关系尚不清楚。本实验旨在通过对铁质纳米粉体甲基乙烯基硅橡胶复合材料表面性质研究, 初步探讨纳米铁和碳包铁的分散对硅橡胶表面粗糙度、化学元素组成、微观形貌和自由能影响的异同, 为其表面进一步的生物相容性研究提供理论依据。

## 1 材料和方法

**设计:** 材料学对照观察。

**时间及地点:** 于2010-10/2011-03在华南理工大学分析测试中心完成。

**材料:** 纳米金属粉体填料为铁粉、碳包铁粉, 均购于深圳市尊成纳米材料有限公司, 铁质纳米粉体改性硅橡胶的制备参见文献<sup>[6]</sup>。选择配方比为95:10, 90:10, 85:15的复合材料作为实验组; 第1组为INESR, 第2组为Fe/CESR; 对照组为MVSR, 材料尺寸均为20 cm×15 cm。甲基乙烯基硅橡胶购于中油公司吉林石化研究院有机硅研究所。

**仪器:**

主要仪器	来源
Expert 型 3D 表面形貌仪	德国 BMT 公司
Leo-1530Vp 热场发射扫描电镜	TFE-SEM, 德国 ZEISS 公司
Axis Ultra DLD X-射线光电子能谱仪	XPS, 英国 Kratos 公司
OCA 40 Micro 型表面接触角分析仪	德国 Dataphysics 公司

**方法:**

**Expert型3D表面形貌仪测量:** 对3组试件表面进行线扫描, 扫描长度为5 mm, 每个试样扫描3个不同位置, 根据扫描结果计算轮廓算术平均偏差(Ra)和轮廓最大高度(Ry)。

**Leo-1530Vp热场发射扫描电镜摄片:** 受试样条表面喷金后观察表面形貌, 每个试样拍摄6张图片。加速电压: 5 kV, 探测电流4 pA~10 nA。

**Axis Ultra DLD X-射线光电子能谱仪测量:** 对各组试件表面元素组成进行定量分析。测试条件: 激发源A1Ka, 能量1 486.6 eV, 光电子出射角为90°, 宽谱扫描分析器能量步长为1 eV, 窄谱分析为0.1 eV。

**OCA 40 Micro型表面接触角分析仪分析:** Owens二液法测量实验组和对照组样品表面的去离子水和二碘甲烷的接触角<sup>[9]</sup>。测定时,

接触角测量范围: 0~180°, 测量温度 20 °C, 湿度40%RH, 系统自动分别将去离子水、二碘甲烷测试液滴于试材表面, 每个试件表面滴3个不同的位置, 每个液滴左右两侧角度的平均值作为1次接触角的测量值, 记录接触角测量值和液滴形状, 根据Young-Dupre方程计算其表面自由能、极性分量和色散分量<sup>[10]</sup>, 公式为 $\sigma L(1+\cos\theta)=2(\sigma_{sd}\sigma_{Ld})^{1/2}+2(\sigma_{sp}\sigma_{Lp})^{1/2}$ , 其中 $\theta$ 为接触角,  $\sigma L$ 、 $\sigma_{Lp}$ 和 $\sigma_{Ld}$ 是液体的表面自由能及其极性和色散分量, 已知: 去离子水 $\sigma L=72.8$  mN/m,  $\sigma_{Lp}=50.7$  mN/m,  $\sigma_{Ld}=22.1$  mN/m; 二碘甲烷 $\sigma L=50.8$  mN/m,  $\sigma_{Lp}=6.7$  mN/m,  $\sigma_{Ld}=44.1$  mN/m,  $\sigma_s$ 、 $\sigma_{sd}$ 和 $\sigma_{Lp}$ 是受试材料的表面能及其极性和色散分量。

**主要观察指标:** 受试材料表面粗糙度、形貌状态以及材料表面化学元素等。

**统计学分析:** 使用SPSS 13.0统计软件包进行统计学处理, 采用方差分析检验实验组和对照组试件接触角测定值均数的差异性; 采用配对t检验观察两实验组之间接触角测定值均数的差异性,  $P < 0.05$  认为差异有显著性意义。

## 2 结果

**2.1 表面粗糙度观察** 受试材料的表面粗糙度Ra值和Ry值的曲线分别见图1, 2。

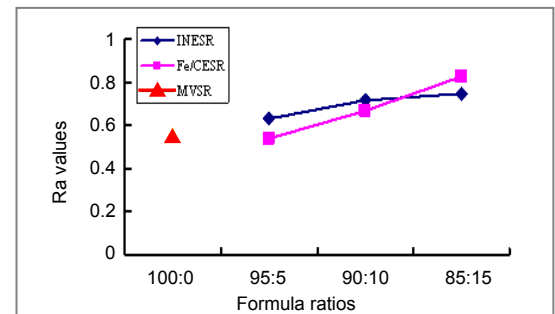


Figure 1 Arithmetic mean deviation of profiles of tested composites

图1 受试材料的轮廓算术平均偏差

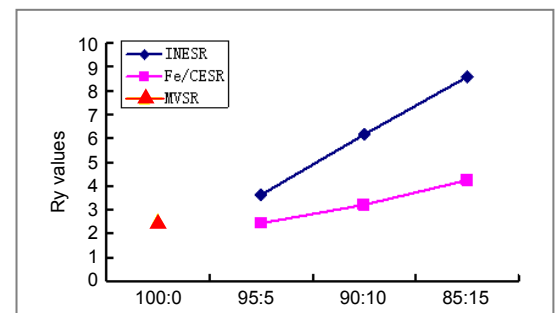
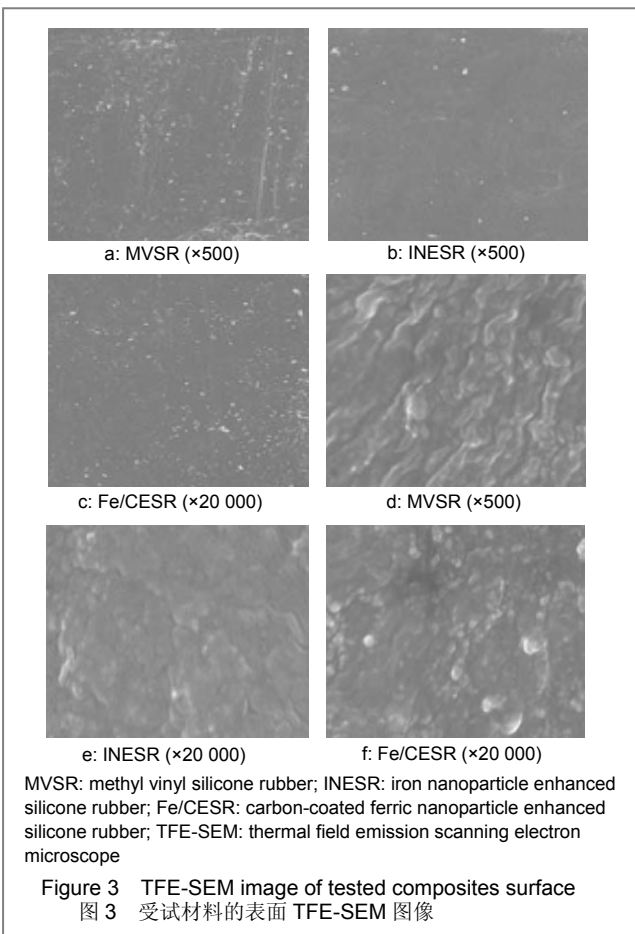


Figure 2 Maximum heights of profiles of tested composites

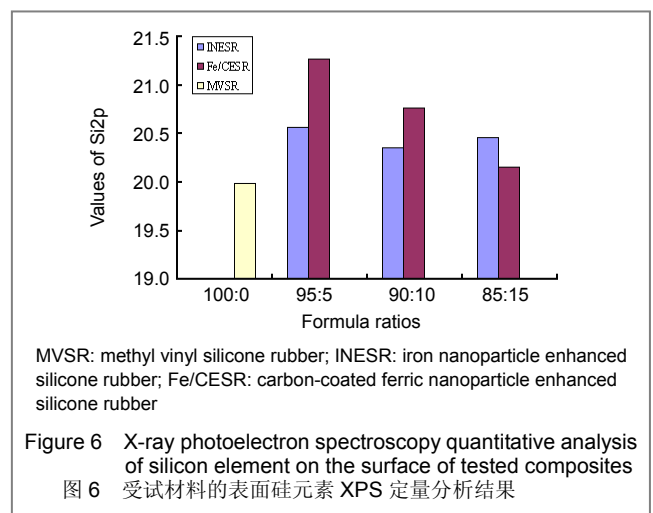
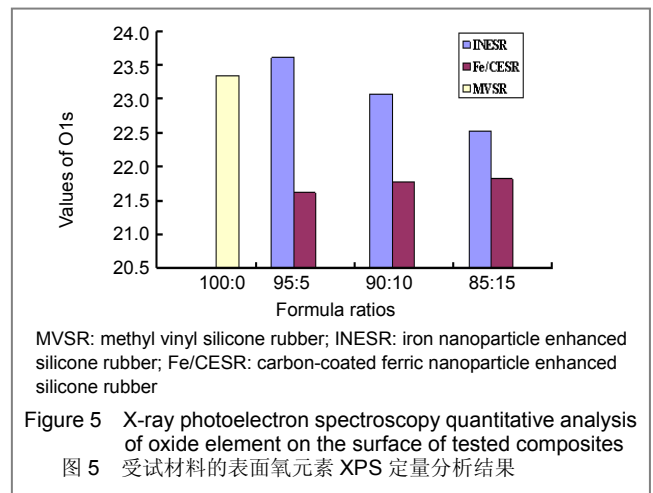
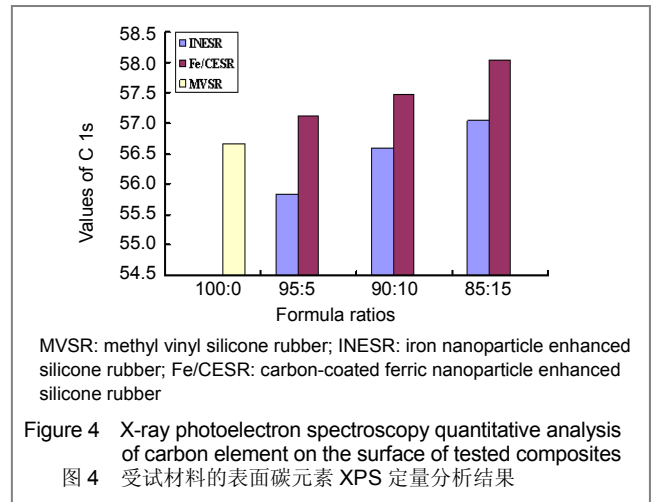
图2 受试材料的轮廓最大高度

图1显示MVSR的Ra值为0.56  $\mu\text{m}$ , INESR的Ra值分别为0.63, 0.72, 0.75  $\mu\text{m}$ , 随着纳米铁份数的增加而增加, 升高的幅度为12.50%, 28.57%, 33.93%; 配方比为95:5时, Fe/CESR的Ra值低于MVSR的, 但差异没有显著性意义( $P=0.1963$ ,  $> 0.05$ ), 在配方比为90:10, 85:15时, Fe/CESR的Ra值分别为0.67, 0.83  $\mu\text{m}$ , 比MVSR的Ra值提高了19.64%和48.21%; 相同配方比的INESR和Fe/CESR的Ra值比较, 仅在配方比为95:5时, INESR的Ra值高于Fe/CESR( $P=0.0238$ ,  $< 0.05$ )。INESR和Fe/CESR的Ry值均随着铁质纳米粉体在复合材料中的份数增加而升高。在配方比为90:10和85:15时, Fe/CESR的Ry值要高于对照组, 在配方比为95:5时则低于对照组, 但差异无显著性意义( $P=0.4418$ ,  $> 0.05$ ); 相同配方比的INESR和Fe/CESR的Ry值不同, 配方比为85:15时, 两者差异存在显著性意义( $P=0.0138$ ,  $< 0.05$ )。从图2看出, 纳米铁粉体在提高甲基乙烯基硅橡胶表面粗糙度Ry值方面要优于碳包铁粉体。

2.2 材料的表面形貌 MVSR、INESR和Fe/CESR的表面光滑平整, 见图3a~c, 未见裂隙和空泡。MVSR的表面显示出典型的硅橡胶分子链的骨架样结构, 分子链之间的颗粒稀少, 见图3d; MVSR添加纳米铁后, 硅橡胶的分子链之间的颗粒增多, 典型的骨架样结构改变, 见图3e; MVSR添加碳包铁后, 表面可见半裸露的纳米微粒, 如图3f中的白色颗粒。

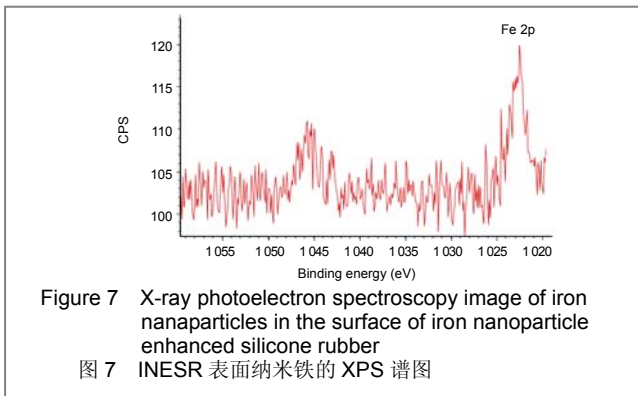


2.3 表面化学元素组成 受试材料表面化学元素的XPS分析结果分别见图4~6, 从图中获知MVSR、INESR、Fe/CESR试件的表面主要有C、O、Si 3种元素所组成。



从图4看出, 配方比为95:5的INESR表面的C1s低于对照组的, 随着添加纳米铁的份数的增加, INESR表面的C1s小幅增加, 当配方比为85:15时, 与MVSR相比, C1s的值增加了0.67%; Fe/CESR与MVSR相比, 表面的C1s均小幅升高, 且随着碳包铁粉体份数的增加

而增加, 配方比为85 : 15时, C1s的值增加了2.4%。图5显示配方比为95 : 5的INESR表面的O1s值略高于对照组的, 其它实验组试件表面的O1s值均比对照组的为低, 说明两种纳米粉体对MVSR表面的主要作用是含氧基团数量的减少。从图6获知, 实验组试件表面的Si2p值均较MVSR的提高, 在配方比为95 : 5时, INESR和Fe/CESR与MVSR比较, Si2p值分别增加了2.95%和6.41%, 表明MVSR添加铁质纳米粉体后其表面的含硅基团小幅增加。配方比为85 : 15的INESR表面出现了Fe 2p的特征峰, 证实了硅橡胶表面出现铁质元素, 说明前期试验中, 纳米铁粉已被成功填入硅橡胶中, 见图7。



2.4 表面接触角和自由能 受试材料的去离子水和二碘甲烷接触角测量值的曲线分别见图8, 9。

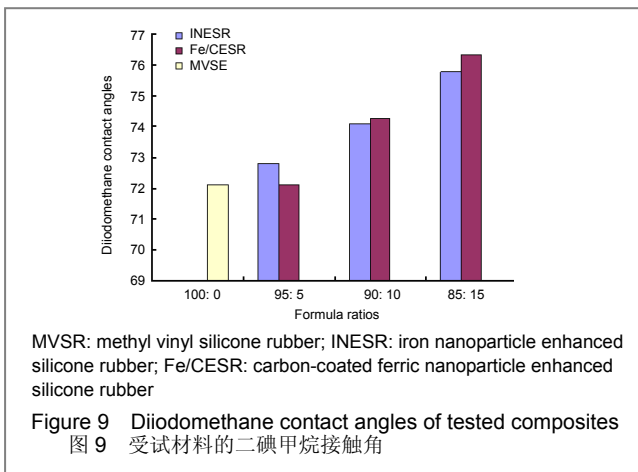
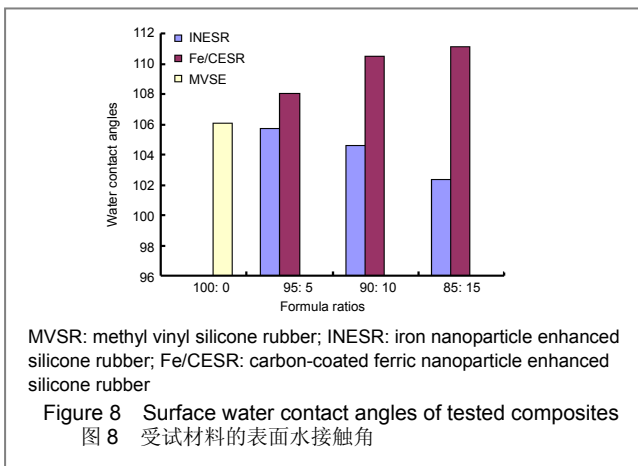
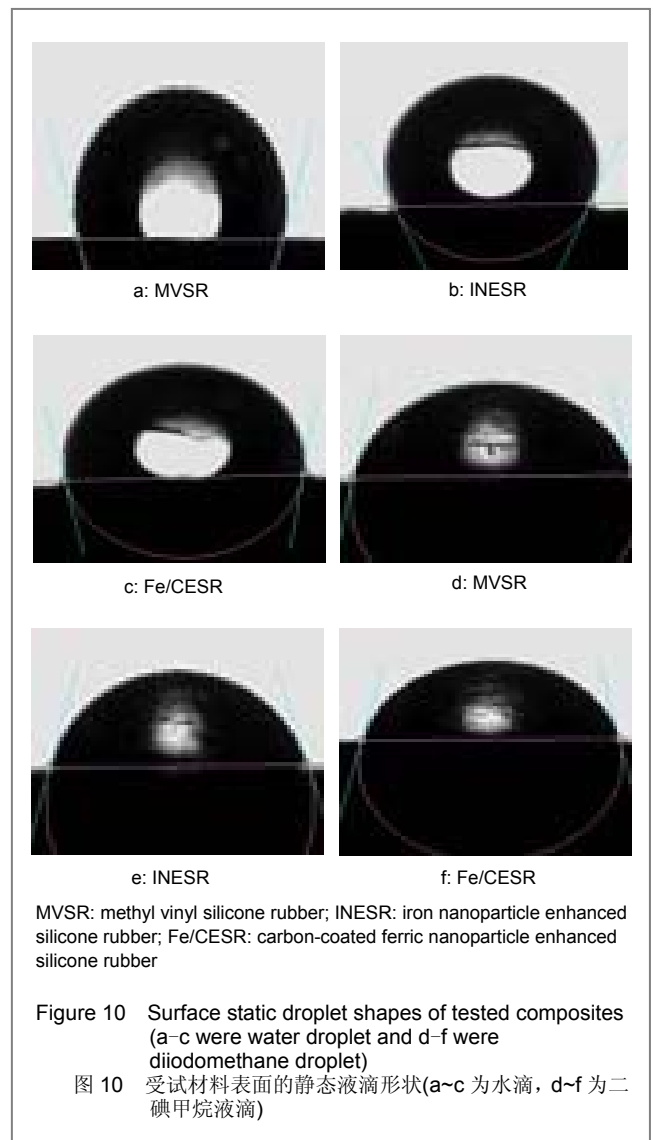


图8显示, MVSR的水接触角为106.13°, 大于90°, 表面为疏水性; INESR的水接触角随着纳米铁粉体份数的增加呈下降趋势, 在配方比为85 : 15时, INESR与MVSR相比, 水接触角由106.13°下降为102.37°, 降幅为3.54%。Fe/CESR的水接触角值随着碳包铁粉体的增加而升高, 配方比为85 : 15时, 与MVSR相比, 水接触角测量值升高到111.13°, 增幅为4.71%, 两者差异有显著性意义( $P=0.0220, < 0.05$ ), 表明添加碳包铁粉体后MVSR的接触角增加。实验组试样表面的二碘甲烷接触角值随着铁质纳米粉体份数的增加而增加, 见图9; MVSR和配方比为85 : 15的实验组材料的表面静态液滴形状, 见图10。

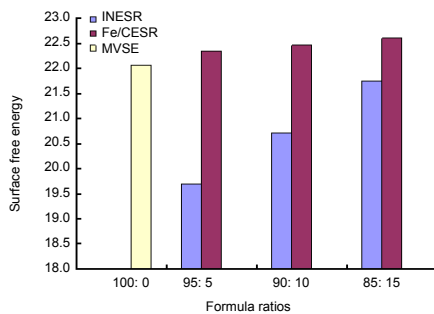


从表1中看出, INESR的表面能均值较MVSR的为低, 分别下降了10.74%, 6.16%, 1.45%, 下降幅度随着纳米铁份数的增加而减少; Fe/CESR的表面能均值较MVSR的升高, 增高幅度随着碳包铁粉份数增加而增加, 分别增加了1.27%, 1.81%, 2.45%, 相应的曲线, 见图11。

表 1 受试材料的表面自由能均值  
Table 1 Mean values of surface free energy of tested composites (mJ/m<sup>2</sup>)

Prescription rate	Surface energy			Polar components			Dispersion components		
	INESR	Fe/CESR	MVSR	INESR	Fe/CESR	MVSR	INESR	Fe/CESR	MVSR
100:0			22.07			0			22.07
95:5	19.70	22.35		0.57	0.03		19.13	22.38	
90:10	20.71	22.47		0.18	0.01		20.53	22.46	
90:15	21.75	22.61		0.01	0.06		21.74	22.55	

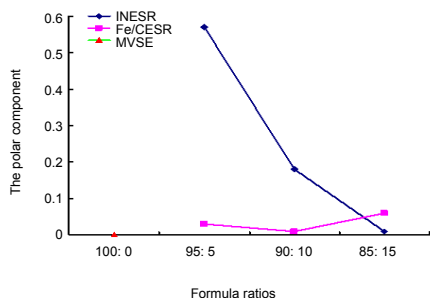
MVSR: methyl vinyl silicone rubber; INESR: iron nanoparticle enhanced silicone rubber; Fe/CESR: carbon-coated ferric nanoparticle enhanced silicone rubber; Dispersion component mean value was increased than that of MVSR, and increase with the polar component decrease



MVSR: methyl vinyl silicone rubber; INESR: iron nanoparticle enhanced silicone rubber; Fe/CESR: carbon-coated ferric nanoparticle enhanced silicone rubber

Figure 11 Surface free energy of tested composites  
图 11 受试材料的表面自由能

MVSR表面能的极性分量为零, 添加铁质纳米粉体后极性分量分别增加, 其中增幅最高的是配方比为95:5的INESR, 其极性分量增加了57%, 见图12。INESR表面能的色散分量数值较MVSR为低, Fe/CESR的表面能的。



MVSR: methyl vinyl silicone rubber; INESR: iron nanoparticle enhanced silicone rubber; Fe/CESR: carbon-coated ferric nanoparticle enhanced silicone rubber

Figure 12 Polar components of surface energy of tested composites  
图 12 受试材料表面能的极性分量

### 3 讨论

材料的表面性质包括表面形貌特征(粗糙度、致密度、覆层等)、表面成分与结构、表面电荷及其分布和表面能量。根据生物材料学原理, 材料的表面结构决定其表面性能, 表面结构如粗糙度等对细胞的黏附、增殖、分化、功能表达具有重大的意义。因此, 提高表面粗糙度是改良生物材料相容性的重要途径和研究内容。许多表面处理技术可以实现材料粗糙度改变。Matsuoka等<sup>[11]</sup>在硅橡胶表面使用碳纳米管涂层以提高粗糙度, 随着硅橡胶表面碳纳米管致密的网络结构的形成, Ra的值和蛋白质的吸附能力增强, 细胞的黏附增加。Prasad等<sup>[6]</sup>证实: 硅弹性体表面粗糙度的Ra亚克隆尺寸更有利于T3细胞的生长繁殖。聚合物与硅橡胶共混改性或无机纳米粉体对硅橡胶的填充改性主要增强硅橡胶的机械性能, 或赋予硅橡胶新的功能<sup>[8, 12]</sup>, 但填入铁质纳米粉体如何影响硅橡胶表面粗糙度, 粒径相仿, 结构不同的纳米铁粉体和碳包铁粉体是否功效相似, 尚不清楚。本实验表明, 铁质纳米粉体在硅橡胶的分散可使硅橡胶表面的粗糙度发生改变, Ra、Ry的值随着纳米铁粉体份数的增加而增加, 碳包铁粉体亦然, 但纳米铁比碳包铁具有更强的增加Ry值的能力。INESR和Fe/CESR表面粗糙度的改变导致表面形貌的变化, 表面微观形貌改变的特征是基胶分子链之间的颗粒增多。甲基乙烯基硅橡胶的表面粗糙度在添加铁质纳米粉体后获得提高, 从而为组织细胞的黏附、定殖奠定了拓扑结构基础。

MVSR表面的化学元素主要由碳、氧、硅组成, 分别占元素含量的56.66%, 23.35%和19.98%。XPS分析表明: INESR和Fe/CESR与MVSR比较, 上述表面元素的原子百分比发生了明显的变化。配方中纳米铁的份数小于5份时, INESR表面的含碳基团的数量减少, 随着添加纳米铁的份数的增加, INESR表面的C1s小幅增加; Fe/CESR表面的C1s与MVSR相比均升高, 且随着碳包铁粉体份数的增加而增加, 猜想这与碳包铁本身含碳元素有关; 铁质纳米粉体还使得甲基乙烯基硅橡胶表面的含氧基团的数量减少, 含硅基团小幅增加。就这些表面化学基团的改变而言, 含碳基团的增加更具意义。材料表面碳相成分对蛋白质、细胞、和组织的影响包括使纤维蛋白原结合紧密, 导致血小板聚集; 比其它表面功能基团更具结合免疫球蛋白IgG的能力; 增加白细胞的黏附和肥大细胞的迁徙; 组织包裹的包裹厚度增加等<sup>[13]</sup>。因此, INESR和Fe/CESR比MVSR的表面碳相成分提高, 从理论上讲其亦被赋予相应的生物学效应, 但有待证实。配方比为85:15的INESR表面出现Fe 2p的特征峰, 说明表面铁元素的存在, 这是纳米铁填料在表面分散的证据。

水接触角显示固体材料表面的可湿度。INESR与MVSR相比,水接触角变小,说明添加纳米铁粉体在一定程度上可提高MVSR表面的可湿度(亲水性);Fe/CESR与MVSR相比,表面水接触角增大,可湿度降低,疏水性增强。纳米铁粉体和碳包铁粉体对MVSR表面水接触角改变的作用相异,可能的解释是两者结构、元素组成和表面电荷差异的结果。材料的生物相容性并不简单取决于其是疏水性的还是亲水性的,无论是疏水性还是亲水性聚合物,都具有一定的功效。亲水表面有利于蛋白质、细胞、细菌黏附;疏水表面,尤其是超疏水性的表面显示出较好的抗凝血性。INESR和Fe/CESR表面湿润性的生物相容性功效是值得探讨的新课题。

MVSR的表面自由能为 $22.07 \text{ mL/m}^2$ ,极性分量为0,色散分量的值即为表面能的值,故其表面能完全取决于色散分量。一个有价值的发现是MVSR添加铁质纳米粉体后其表面能的极性分量获得较大的提高。表面能的极性分量与表面湿润性、各向异性、细胞或细菌黏附等生物学效应密切相关<sup>[10-14]</sup>。值得注意的现象是,纳米铁使得甲基乙烯基硅橡胶表面的水接触角变小,理论上表面能应该增高,但研究结果是纳米铁使得MVSR的表面能降低,且下降幅度随着纳米铁份数的增加而减少,暗示表面能不单取决于水接触角,还与极性分量的增加、二碘甲烷接触角未明显降低有关。碳包铁使得MVSR的表面能增加,且增高幅度随着碳包铁份数增加而增加,这与纳米铁的功效相异,研究中使用的这两种纳米粉体的粒径相仿,结构不同<sup>[9]</sup>,故推测铁质纳米粉体的结构特点对MVSR表面能的改变也起到一定的作用。

铁质纳米粉体对甲基乙烯基硅橡胶表面性质的影响是粗糙度的Ra和Ry升高;微观形貌中基胶分子链之间的颗粒增多;表面C、O、Si等元素的原子百分比发生变化;MVSR填充纳米铁粉体后表面水接触角小幅减小,填充碳包铁粉体后表面水接触角小幅升高;表面自由能的极性分量增加较大。纳米铁和碳包铁均导致甲基乙烯基硅橡胶表面性质的改变,但引起变化的功效不全相似,这与纳米铁和碳包铁的结构、化学成分不同有关。

#### 4 参考文献

[1] Merrett K, Griffith CM, Deslandes Y, et al. Interactions of corneal cells with transforming growth factor beta 2-modified poly dimethyl siloxane surfaces. *J Biomed Mater Res A*. 2003;67(3):981-993.  
 [2] Wu X. *Guoji Shengwu Yixue Gongcheng Zazhi*. 2008;31(12):358-361.  
 吴幸.医用硅橡胶的生物相容性缺点及现代改良[J].*国际生物医学工程杂志*,2008,31(12):358-361.

[3] Wang L, Chen H, Song W, et al. *Gaofenxi Tongbao*. 2007;10:21-25.  
 王亮,陈红,宋巍,等.有机硅弹性体表面生物相容性的研究进展[J].*高分子通报*,2007;10:21-25.  
 [4] Cai DK,Lan L. *Jueyuan Cailiao*. 2003;36(2):20-22.  
 蔡登科,蓝磊.纳米材料在硅橡胶改性中的应用[J].*绝缘材料*,2003,36(2):20-22.  
 [5] Zhou R, Jin HY, Gao NK, et al. *Zhongguo Biaomian Gongcheng*. 2009;22(6):30-35.  
 周蕊,金海云,高乃奎,等.表面粗糙度对硅橡胶材料表面超疏水性的影响[J].*中国表面工程*,2009,22(6):30-35.  
 [6] Prasad BR, Brook MA, Smith T, et al. Controlling cellular activity by manipulating silicone surface roughness. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2010;78(2):237-242.  
 [7] Chen J, Chen YJ, Wang J, et al. *Tanxingti*. 2008;18(5):6-10.  
 陈娟,陈勇军,王珏,等.硅橡胶/纳米铜复合材料的结构与性能研究[J].*弹性体*,2008,18(5):6-10.  
 [8] Wu X, Bai YZ, Qin JY, et al. *Guoji Shengwu Yixue Gongcheng Zazhi*. 2010;23(5):257-261.  
 吴幸,白远忠,秦将均,等.纳米铁显影增强硅橡胶的制备及影像可视性评价[J].*国际生物医学工程杂志*,2010,23(5):257-261.  
 [9] Wang H, Gu GH, Qiu GZ. *Zhongnan Daxue Xuebao:Ziran Kexueban*. 2006;37(5):942-947.  
 王晖,顾帼华,邱冠周.接触角法测量高分子材料的表面能[J].*中南大学学报:自然科学版*,2006,37(5):942-947.  
 [10] Hallab NJ, Bundy KJ, O'Connor K, et al. Evaluation of metallic and polymeric biomaterial surface energy and surface roughness characteristics for directed cell adhesion. *Tissue Eng*. 2001;7(1):55-71.  
 [11] Matsuoka M, Akasaka T, Hashimoto T, et al. Improvement in cell proliferation on silicone rubber by carbon nanotube coating. *Biomed Mater Eng*. 2009;19(2-3):155-162.  
 [12] Tu T, Qian L, Chen FL, et al. *Tanxingti*. 2010;20(2):77-82.  
 涂婷,岑兰,陈福林,等.硅橡胶物理改性研究进展[J].*弹性体*,2010,20(2):77-82.  
 [13] Thevenot P, Hu W, Tang L. Surface chemistry influences implant biocompatibility. *Curr Top Med Chem*. 2008;8(4):270-280.  
 [14] Pereni CI, Zhao Q, Liu Y, et al. Surface free energy effect on bacterial retention. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2006;48(2):143-147.

#### 来自本文课题的更多信息一

**基金资助:** 课题受国家自然科学基金(30860077)资助。

**作者贡献:** 吴幸、田鸿钧负责实验设计,吴幸、尹诗衡进行实验实施,尹诗衡负责收集数据、图像资料,陈俭云、李军、王正文负责数据统计处理,吴幸、陈俭云撰写文稿。

**利益冲突:** 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

**伦理批准:** 实验过程未涉及人和其它动物,无伦理学上的冲突。

**本文创新性:** 铁质纳米微粒作为显影标记物本体改性硅橡胶,可使其X-线阻射性能提高,影像可视。铁质纳米微粒在基胶中的分散对硅橡胶表面性质的影响,国内外均未见报道。通过表面分析技术证明:铁质纳米粉体填充甲基乙烯基硅橡胶改性后其表面粗糙度的Ra和Ry升高,表面微观形貌改变,表面C、O、Si等元素的原子百分比发生变化,含硅基团小幅增加;填充纳米铁粉体后表面水接触角小幅减小,填充碳包铁粉体后表面水接触角小幅升高;表面自由能的极性分量增加较大。本研究为硅橡胶/铁质纳米粉体复合材料的生物相容性研究提供了表面特征的参数和微观结构基础。