摩擦起电的界面调控与应用研究

郑有斌^{1†}, 马韶晨^{1,2†}, 冯雁歌¹, 王道爱^{1*}, 周峰¹, 刘维民¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所, 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000

2. 中国海洋大学材料科学与工程学院, 青岛 266000

†同等贡献

*通讯作者, E-mail: wangda@licp.cas.cn

收稿日期: 2018-08-27; 接受日期: 2018-10-09; 网络版发表日期: 2018-12-04

国家自然科学基金(编号: 21603242)资助项目

摘要 摩擦起电是一种常见的物理现象, 两个不同的物体只要有摩擦或接触分离, 就会产生摩擦起电. 在固体与固体之间、固体与液体之间、甚至固体与气体之间, 都存在着摩擦起电. 由摩擦起电引起的静电效应一方面在机械、轻工等领域有着广泛的应用, 如选矿、除尘、植绒、喷涂等; 另一方面也给石油输运、工业生产等带来安全隐患, 对人们的生活及安全造成不利影响. 因此, 实现摩擦起电的界面调控对其实际应用具有重要的研究意义. 本文综述了材料表面摩擦起电的影响因素、调控方法及利用方面的新进展, 并对摩擦起电的界面调控发展趋势和应用前景进行了展望.

关键词 摩擦起电, 界面调控, 摩擦能利用, 静电防护

1 引言

两个相互接触的物体发生相对运动或有相对运动的趋势就会产生摩擦. 摩擦无处不在, 并在人们的生活和生产中起着举足轻重的作用. 例如, 冰鞋上锋利的冰刀能够降低摩擦, 使人能在冰面上快速滑行; 汽车轮胎上的花纹能够增大摩擦, 保证行驶安全. 在摩擦过程中, 除了传统的摩擦、磨损与润滑问题^[1~3], 还伴随有摩擦生热^[4]、摩擦发光^[5]、摩擦起电^[6~9]、摩擦噪声^[10]、摩擦化学反应^[11]等一系列物理化学过程, 它们对材料的摩擦学性能与服役寿命同样会产生重要影响. 如摩擦起电, 就是摩擦过程中伴生的一种常见的摩擦物理化学现象(图1(a~c))^[12a~12c], 小到日常生活, 大到

工业生产乃至航空航天领域, 都存在着摩擦起电现象, 并在材料的使用过程中起着不同的作用.

人们对电的认识最早就是从摩擦起电开始的. “电”(electricity)这个词来源于希腊语的“琥珀”(electron). 公元前7世纪, 古希腊的哲学家泰勒斯发现用毛织物摩擦过的琥珀能吸引某些轻小物体. 我国东汉时期王充在《论衡·乱龙篇》中也有关于摩擦起电的记载, “顿牟掇芥”, 顿牟就是琥珀, 当琥珀经摩擦后, 能吸引草芥一类的轻小物体. 用摩擦的方法使两个不同的物体带电的现象, 称为摩擦起电(图1(d)). 在日常生活中, 各类物体都可能由于接触或摩擦而产生静电^[13,14](图1(e,f))^[12d,12e]. 当静电荷积累到一定程度就有可能出现放电现象并造成经济损失或安全事故. 据统计, 美

引用格式: Zheng Y, Ma S, Feng Y, Wang D, Zhou F, Liu W. Investigation on the interface control and utilization of triboelectrification. *Sci Sin Chim*, 2018, 48: 1514–1530, doi: 10.1360/N032018-00200

图 1 (a) 云层间的摩擦产生雷电; (b) 气球摩擦起电后能够吸附头发; (c) 电子产品生产过程中的摩擦起电现象; (d) 摩擦起电过程示意图; (e) 油类运输过程油类与运油车摩擦起电, 需要通过静电带导走; (f) 身体与衣服产生摩擦起电(因此在加油前需要导走身体上的静电); (g) 静电放电引发爆炸^[12](网络版彩图)

Figure 1 (a) Lightning strikes generated from the friction of clouds; (b) creating static electricity by rubbing a balloon against the hair; (c) static electricity in manufacturing processes; (d) schematic illustration of triboelectric charging; (e) triboelectric charge generated from the friction of oil and tanker truck need to be released by anti-static belt; (f) discharge your static electricity before fueling by touching a metal surface away from the nozzle; (g) flash fire and explosions caused by electrostatic discharges ^[12] (color online).

国一年因静电问题在电子工业的损失就超过100多亿美元。近年来, 我国的石化企业也曾发生多起因静电造成的严重火灾爆炸事故, 并造成重大人员伤亡和经济损失^[15~17]。例如, 2009年10月浙江卫星丙烯酸有限公司丙烯酸储罐区1号罐发生爆炸并引起火灾(图1(g))^[12f], 经事故联合调查组调查, 发现引起爆炸的直接原因是在用泵向储罐内输送丙烯酸乙酯过程中产生静电并发生放电, 从而引起爆炸并形成火灾, 造成严重的经济损失。除此之外, 摩擦起电产生的瞬间高电压还有可能引发静电击穿^[18]、吸附^[19], 而飞机和航天器在飞行时静电放电产生的电磁干扰会影响飞行安全^[20~22]。当然, 摩擦起电也不全是有害的, 其在电力、机械、轻工、纺织、航空航天以及高技术领域也有着广泛的应用^[23~27], 如静电除尘、纺纱、植绒、复印、喷涂等。

另一方面, 摩擦起电也是产生电能的一种形式。摩擦无处不在, 摩擦电亦无处不在, 其中蕴含的总能量十分可观。如果能将其收集利用, 有可能会给当今的能源危机问题找到一个新的解决办法。但是这些能量的存

在形式多种多样, 分布广泛且频率波动大, 很难利用现有的技术进行收集利用。2012年佐治亚理工学院的王中林教授提出了一种能量收集转化的新方法, 摩擦纳米发电机(TENG)^[28], 它利用摩擦起电和静电感应原理的耦合, 能够将环境中多种形式的机械能/摩擦能收集转换为电能^[29~31]。摩擦纳米发电机的出现为收集摩擦过程中的摩擦能提供了一种可行的途径, 并在能源供给、传感等领域获得快速发展。

无论是减小摩擦起电的负面作用, 发展高效防静电材料, 还是增大摩擦起电效应, 设计摩擦电收集利用装置, 科研人员都将面临同一个核心科学问题, 即摩擦起电机理与界面调控。降低摩擦起电性能能够得到很好的防静电材料, 增强起电性能则在摩擦能收集中具有很好的应用。研究摩擦起电的界面调控, 实现摩擦起电的有效控制, 不仅可以为发展高效防静电材料提供理论依据和基础支持, 还能充分发挥摩擦起电的优势, 为实现摩擦电能的收集利用开辟新的途径。因此, 研究摩擦起电的机理与界面调控具有重要理论价值和现实指导意义。本文围绕材料摩擦起电性能调控, 简要归纳和评述了近期摩擦起电的界面调控与应用的研究进展, 主要包括摩擦起电的机制、摩擦起电的界面电荷调控、摩擦电的电能利用及防静电设计, 并对摩擦起电界面调控发展趋势和应用前景进行了展望。

2 摩擦起电的机制

摩擦起电(triboelectrification)是摩擦过程中电子由一个物体转移到另一个物体的结果, 它使两个物体带上了等量的异号电荷。得到电子的物体带负电, 失去电子的物体带正电。因此原来不带电的两个物体摩擦起电时, 它们所带的电量在数值上必然相等。但是, 目前国内外学者对于摩擦起电的微观机理与驱动机制还持有多种观点, 如材料的不均匀摩擦^[32]、金属间逸出功的差异^[33,34]、热电和压电效应^[35]等, 但目前比较认可的解释是由于电子流动、离子转移和机械化学反应与材料的转移而造成的电荷转移^[36]。绝缘聚合物接触和摩擦起电机理如图2所示^[37]。聚合物表面的突起部分, 在摩擦过程中被剪切破坏, 再加上接触区域的热效应, 形成一个热区域。在热区域, 聚合物会发生塑化和熔化, 导致聚合物链破坏和裂解; 在冷区域, 聚合物更倾向于脆性断裂。均裂会产生一些自由基, 聚合物

图2 绝缘聚合物摩擦起电机理图^[37] (网络版彩图)

Figure 2 Mechanism for contact triboelectrification of insulating polymers ^[37] (color online).

链段断裂形成的离子和自由基具有高能量、不稳定、短寿命, 这些活性粒子很快进行下一步反应. 在聚四氟乙烯(PTFE)与聚乙烯(PE)摩擦过程中, 聚合物链中低极性碳碳键均裂占主导, 生成碳氢链自由基和氟碳链自由基. 由于PTFE是电负性的, PE是电正性的, 电子将从碳氢链自由基转移到氟碳链自由基, 这样就形成带正电的碳氢链和带负电的氟碳链, 从而使PTFE总体上带负点, PE总体上正电.

当然这些过程并不是独立发生独立存在的, 而是互相关联的. 在接触区域, 表面化学分子在高剪切速率下被突然挤压和剪切, 再加上摩擦过程中热效应会触发一些摩擦化学. 在摩擦化学中的一些活性自由基又会转化摩擦电. 摩擦电荷在一定区域里积累到一定程度会以摩擦发光等形式把能量释放出去.

3 摩擦起电的影响因素与界面电荷调控

3.1 表面微结构的影响

摩擦表面的微观形貌结构在摩擦起电中起着重要作用. 摩擦电荷是由于界面处出现摩擦接触而产生的, 因此提高界面的有效接触面积可以直接增强摩擦起电性能. 例如, 与光滑表面相比, 通过表面织构化的方法, 将表面处理成微米或纳米结构, 可以增强界面摩擦起电性能, 并大大提高摩擦纳米发电机的输出电压和短

路电流^[38,39].

Feng等^[40]通过热压成型的方法使用多孔阳极氧化铝(AAO)模板在聚丙烯(PP)摩擦材料表面制备了不同长度和不同直径的PP纳米线阵列, 并研究了其摩擦起电性能. 通过调控阳极氧化的参数, 得到不同孔径、不同长度的AAO模板, 并利用热压成型制备出不同形貌的纳米线阵列. 这种简单的模板热压法具有很好的普适性, 能够制备多种热塑性聚合物纳米线阵列, 如聚酰胺11 (PA11)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚苯乙烯(PS)、聚偏氟乙烯(PVDF)等. 通过控制扩孔时间和氧化时间得到不同孔径及孔深的AAO模板, 进而得到不同直径和不同长度的PP纳米线阵列薄膜(图3(a-j)). 研究者将其与铝膜进行摩擦, 分别研究了纳米线直径与长度对摩擦电性能的影响. 随着纳米线直径的增加, 由不同直径PP纳米线阵列薄膜和铝膜组成的摩擦纳米发电机输出呈现出先增大后减小的趋势. 当纳米线直径为100 nm时, 短路电流和输出电压达到最大值(图3(k)). 随着纳米线长度的增加, 摩擦纳米发电机短路电流、输出电压、电流密度也呈现出先增大后减小的趋势, 并在纳米线长度为14 μm时, 摩擦纳米发电机的输出达到最大值(图3(l)). 该实验说明, 纳米线的直径与长度都会影响摩擦纳米发电机的输出及聚合物表面的摩擦起电电荷量, 适当的纳米线结构能够增加有效接触面积, 产生更多的摩擦电荷; 反之, 如果要减小两个界面的摩擦起电现象, 则可以通过摩擦副材料的表面结构设计, 减小有效摩擦面积, 进而减小摩擦起电, 达到防静电效果.

图 3 (a~d) 不同直径的PP纳米线的场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)图。(a) 80 nm; (b) 100 nm; (c) 120 nm; (d) 135 nm。(e~j) 不同长度的PP纳米线。(e) 纳米线顶视图; (f) 2.4 μm; (g) 4.0 μm; (h) 6.2 μm; (i) 14 μm; (j) 20 μm。(k) 纳米线直径对摩擦电输出的影响; (l) 纳米线长度对摩擦电输出的影响^[40] (网络版彩图)

Figure 3 FE-SEM images of PP nanowires with diameters of (a) 80 nm, (b) 100 nm, (c) 120 nm, (d) 135 nm; FESEM images of PP nanowires of (e) top view and cross-sectional with lengths of (f) 2.4 μm, (g) 4.0 μm, (h) 6.2 μm, (i) 14 μm, (j) 20 μm; (k) effect of nanowire diameter on the output performance; (l) effect of nanowire length on the output performance^[40] (color online).

摩擦副材料的表面结构对固-液摩擦起电同样具有重要影响。Zhang等^[41]根据运油车设计了固-液摩擦起电模型, 研究了液-固界面的摩擦起电特性。该工作利用聚四氟乙烯(PTFE)过滤膜与水作为摩擦材料, 将其组装成固液摩擦纳米发电机, 通过测试其输出研究固液界面摩擦起电的规律(图4(a, b))。研究表明, 与PTFE的光滑表面相比, 具有多孔和纤维结构的PTFE过滤膜组成的TENG固-液摩擦起电在液体填充30%、振动频率为3 Hz、运动达到共振时具有最大输出, 此时会在固-液界面得到最大摩擦起电电荷量, 这些因素显著影响水与PTFE过滤膜的摩擦接触面积, 从而影响摩擦起电性能。在此工作基础上, 我们对固-液界面摩擦起电性能进行了更细致的研究(图4(c))。我们分别制备了微米结构、纳米结构和微纳米复合结构的PP纳米线阵列, 并研究了不同结构的PP材料固-液界面的摩擦起电性能。发现由微米结构PP组装的固液摩擦纳米

图 4 (a) 固-液摩擦起电测试器件示意图; (b) 液体填充量对输出的影响^[41]; (c) 平滑、微米结构、纳米结构和微纳米复合结构PP表面的输出电压(网络版彩图)

Figure 4 (a) Schematic illustration of the liquid-solid triboelectric device; (b) short-circuit current versus various water-to-cylinder volume ratios^[41]; (c) electrical outputs generated from the triboelectric nanogenerator with different surface roughness (color online).

发电机的稳定输出电压最小, 这是因为具有微米结构的摩擦电极在与水的摩擦过程中, 其润湿状态发生变化, 随着不断地与水摩擦, 其表面微结构截留的部分空气逐渐逸出, 导致材料表面黏附一层水膜, 这种润湿性的转变严重降低了材料表面的摩擦起电能力, 该结果为安全储油和运油提供了理论指导和技术参考。

3.2 表面成分的影响

摩擦起电效应不仅受材料表面形貌和结构的影响, 还与材料的种类或表面成分有关。每一种材料的摩擦电极性是固定的, 按照不同材料接触时表面得失电子能力可将各种材料排列出相对应的顺序, 即摩擦静电序列。典型材料的摩擦静电序列如图5所示^[42-44], 含氟聚合物, 如聚四氟乙烯、聚偏氟乙烯、聚酰亚胺和聚二甲基硅氧烷等材料处于摩擦电负性一侧, 更容易因摩擦而带负电荷; 尼龙11、尼龙6、丝绸和铝箔等材料则处于摩擦正电性的一侧, 当与其他材料摩擦时更容易带正电荷。在摩擦静电序列中相隔越远的两种材料在摩擦过程中所得的电荷量就越大。因此在进行摩擦起电调控设计时选择合适的摩擦材料非常重要。

通过表面化学修饰可以改变材料的表面成分, 从而影响材料的摩擦起电性能。表面化学修饰是一种非常重要的改性手段, 经过表面化学修饰后, 材料表面

Positive ↑	Aniline-formol resin	Polyisobutylene	Negative ↓
	Polyformaldehyde 1.3-1.4	Polyurethane flexible sponge	
	Ethyl cellulose	Polyethylene terephthalate	
	Polyamide 6 (PA6)	Polyvinyl butyral	
	Wool, knitted	Polychlorobutadiene	
	Silk, woven	Butadiene-acrylonitrile copolymer	
	Polyethylene glycol succinate	Nature rubber	
	Cellulose	Polyacrylonitrile	
	Cellulose acetate	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Polyethylene glycol adipate	Polybisphenol carbonate	
	Polydiallyl phthalate	Polychloroether	
	Cotton, woven	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Polyurethane elastomer	Poly(2,6-dimethyl polyphenyleneoxide)	
	Styrene-acrylonitrile copolymer	Polystyrene	
	Styrene-butadiene copolymer	Polyethylene	
	Wood	Polypropylene	
	Hard rubber	Polydiphenyl carbonate	
	Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
	Polymethyl methacrylate	Polyethylene terephthalate	
	Polyvinyl alcohol	Polyvinyl Chloride (PVC)	
	Polyester (Dacron) (PET)	Polyvinylidene fluoride	
	Polyisobutylene	Polytrifluorochloroethylene	
	(Continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

图5 典型材料的摩擦静电序列^[42-44] (网络版彩图)

Figure 5 Triboelectric series for some common materials [42-44] (color online).

的组分会发生变化, 从而能够对材料摩擦起电性能进行控制。Feng等^[40]采用简单且低成本的表面化学修饰方法来调整摩擦副材料的表面成分, 成功实现了摩擦起电性能的调控(图6)。在该工作中使用多巴胺含氟共聚物Pdop-F (poly(2,2,3,4,4,4-hexafluorobutyl 5-((3,4-dihydroxyphenethyl)amino)-2,2,4,4-tetramethyl-5-oxopentanoate)fluoropolymer)和全氟辛基三氯硅烷(PFTS)来对PP薄膜进行表面修饰。这两种修饰剂可以调节PP纳米材料的极性以增加摩擦电荷量。将改性后的PP纳米线和没有改性的PP纳米线分别组装成摩擦纳米发电机并对其电输出进行对比, 结果表明, 氟含量高的PTFS改性PP纳米线的摩擦起电电压及电荷密度高于Pdop-F修饰的。这是因为含氟化合物的表面改性增加了摩擦表面电负性, 从而提高了材料摩擦起电能力。作为一种简单的后表面功能化技术, 表面改性方法能够使一些正常的非极性材料成为强力摩擦起电材料。此外, 化学改性和纳米结构对提高TENG的输出性能具有协同效应。

在固液摩擦体系中, 表面化学修饰对摩擦起电性能的影响也十分显著。Zhang等^[41]研究了多巴胺表面修饰对PTFE薄膜固液界面摩擦起电性能的影响(图7)。

图6 (a) Pdop-F的合成制备以及修饰过程; (b) PFTS在样品表面的修饰过程; (c) 摩擦起电电压信号; (d) 摩擦起电电荷密度^[40] (网络版彩图)

Figure 6 Schematic diagram of synthesis and assembly process of Pdop-F (a) and PFTS (b) on the surface of PP nanowire; (c) open circuit voltage; (d) charge density [40] (color online).

结果发现, 进行表面修饰后PTFE薄膜固液摩擦起电性能大幅降低, 这是因为多巴胺材料电负性远小于PTFE, 进行多巴胺表面修饰后降低了材料的得电子能力。另外, 修饰多巴胺后液体在PTFE表面的接触角减小, 从而严重影响固液界面分离效率及其摩擦起电性能。因此, 通过表面化学修饰的方法, 可以对固-液界面和固-固界面的摩擦起电行为进行适当调控。

3.3 摩擦运动条件的影响

除了表面结构及成分组成之外, 摩擦过程中的运动频率、载荷及摩擦方式对摩擦起电性能也会产生一定影响。Cui等^[45]通过电化学聚合方法以AAO为模板制备了聚吡咯纳米线(PPy NW), 然后与PVDF摩擦电极组装成不同驱动方式的摩擦起电装置。该工作研究了不同摩擦运动条件对摩擦起电的影响。对于周期性接触分离模式来说, 摩擦电信号随着频率的增加而增大(图8(a, b))。当频率高于8 Hz时, 摩擦电输出达到最大值。随后, 他们继续探究了风驱动条件下的摩擦电输出性能。引入具有良好柔性和透明性的聚乙烯(PE)薄膜作为摩擦层的基底材料, 并制得PVDF/PE/Ag摩擦

图7 (a) 多巴胺的修饰对表面润湿性的影响; (b) 多巴胺表面修饰对固液界面摩擦起电电压的影响^[41] (网络版彩图)
Figure 7 (a) Schematic diagram of the deposition of Pdp Im on PTFE and wettability of PTFE before and after modifying with dopamine; (b) output voltages of water-based TENG with PTFE filter as the electrodes before and after modified with dopamine ^[41] (color online).

图8 (a) 周期性接触分离模式器件结构示意图; (b) 不同频率下器件短路电流密度; (c) 风驱动摩擦起电器件示意图; (d) 不同风速下的短路电流^[45] (网络版彩图)
Figure 8 (a) Schematic illustration of PPy NWs based triboelectric device; (b) short circuit current density in the frequency range from 1 to 8 Hz; (c) device structure of the wind-driven device; (d) short circuit current under different wind speeds from 3 to 10 m/s ^[45] (color online).

层。在风吹的驱动下, 高度柔软的可PVDF/PE/Ag膜以非常高的频率振动。随着风速的升高, 短路电流峰值呈现明显的增加(图8(c, d)), 这是因为风速越大, PVDF/PE/Ag膜的振动频率也越高。除此之外, 还研究了载荷对

摩擦起电性能的影响(图9)。随着载荷的增加摩擦电信号增加, 在一定范围内, 载荷与摩擦起电信号呈现一定对应关系, 利用这一对应关系, 可实现利用摩擦电信号原位在线监测摩擦状态。由此可见, 通过控制运动频率、载荷及摩擦方式, 可以实现摩擦过程中摩擦起电的调控。

3.4 环境的影响

除了摩擦副材料和摩擦运动条件, 环境因素如湿度、温度、压力等对摩擦起电也有重要影响。Hiratsuka等^[46]利用双环摩擦试验机研究了摩擦类型和湿度对8种聚合物摩擦起电特性的影响(图10)。在不同湿度条件下, 测试了尼龙66 (PA66)、聚甲醛(POM)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、PP、聚氯乙烯(PVC)、PE和聚四氟乙烯(PTFE)聚合物之间的滑动或滚动摩擦起电特性。每种组合在不同湿度下具有最大摩擦电荷: PET与PTFE, 0%; ABS与PTFE, 10%; PA66与PTFE, 20%; PA66与ABS和PA66与PET, 30%。两个试样上的电荷在摩擦开始后立即增加, 然后逐渐降低到稳定的值。当湿度上升时, 摩擦带电荷量减少。这不是由于产生的电荷量变低, 而是由于摩擦电荷沿着表面向大气大量泄漏。该工作发现, 低于某个湿度时, 电荷会随着湿度的增加而增多。当摩擦材料是绝缘体时, 电子不能转移。在这种情况下, 摩擦电荷通过阳离子(H^+ 或 H_3O^+)和阴离子(OH^-)传递。在低于某个湿度时, 这些离子被吸引到摩擦材料表面, 从而造成摩擦起电电势增大。当湿度过大时, 会产生电荷泄漏通路, 这些离子重新复合, 导致摩擦电荷减少。

湿度对固体与水的摩擦起电影响较小。Zhang等^[47]分别研究了固-液界面与固-固界面在不同湿度下的摩擦起电性能(图11)。结果表明, 湿度变化对水-固界面摩擦起电性能几乎没有影响, 基于固液摩擦起电的摩擦纳米发电机在不同湿度下的输出都非常稳定; 而固-固界面摩擦起电性能则随着湿度的增大而降低。

除了湿度, 温度对材料的摩擦起电也有一定影响。Lu等^[48]研究了温度对摩擦起电的影响(图12(a))。当温度从 -20°C 升高到 150°C 时, 摩擦电压输出在整体上呈现出降低的趋势, 说明低温下摩擦起电性能比高温下要好。此外, 压力也对摩擦起电也有一定的影响(图12(b))。Nguyen等^[49]在研究湿度和大气压力对摩擦发电

图9 (a) 滑动摩擦起电器件结构; (b) 不同载荷下的短路电流(网络版彩图)

Figure 9 (a) Schematic illustration of sliding mode triboelectric device; (b) short circuit current under different applied load from 1 to 9 N (color online).

图10 湿度对不同摩擦副表面摩擦电荷的影响^[46] (网络版彩图)

Figure 10 Effects of humidity on total photon count and sum of saturation charges on both surfaces ^[46] (color online).

机输出的影响时发现, 当压力从标准大气压降低到真空度为 -80 kPa的过程中, 其输出出现了降低的趋势, 研究者认为在真空度升高的过程中, 会使材料表面的参与水分气化从而影响摩擦电荷的产生. 由于上述研究是在低真空模式下进行, 环境中的因素仍然有很多变量在影响摩擦发电机的输出. 我们研究了超高真空环境下($P \sim 10^{-4}$ Pa)摩擦发电机的摩擦电行为, 发现在超高真空中不会出现空气的击穿以及其他因素的影响, 可以获得高的摩擦电输出(图12(c, d)). 综上所述, 环境中存在的各种因素均可以对摩擦起电造成影响, 我们可以通过人为的调节环境因素对摩擦起电性能进行一定的控制.

图11 (a) 固液摩擦器件示意图; (b) 固固摩擦器件示意图; (c) 不同湿度下固-液界面摩擦起电电压和(d)固-固界面摩擦起电电压^[47] (网络版彩图)

Figure 11 Schematic diagrams of U-shaped liquid-solid TENG (a) and solid-solid TENG (b) working in varying humidity. The open-circuit voltage of the U-shaped liquid-solid TENG (c) and solid-solid TENG (d) as functions of the relative humidity from 10% to 90% ^[47] (color online).

图12 温度^[48] (a)、低真空^[49] (b)和高真空(c, d)对摩擦起电的影响(网络版彩图)

Figure 12 Effect of temperature ^[48] (a), pressure ^[49] (b) and high vacuum (c, d) on triboelectrification (color online).

3.5 摩擦副结构的影响

在摩擦起电过程中, 同时存在着摩擦电荷的界面复合现象. 如果能够控制摩擦电荷复合的速率, 那么就可以实现摩擦起电电荷量的调控. Feng等^[50]通过设计特殊的摩擦副结构, 在摩擦层材料底部加入中间层, 实现了摩擦起电性能的有效调控(图13). 以PVDF与Nylon摩擦为例, 与没有加入中间层相比, 在PVDF底部加入具有保存电荷能力的聚酰亚胺(PI)中间层后,

图 13 (a) 具有中间层的摩擦发电机示意图; (b) 具有PI中间层的摩擦发电机与空白组的电压输出对比; (c) 具有植物纤维中间层的摩擦发电机与空白组的电压输出对比; (d) 电荷衰减; (e) PVDF和Nylon接触前3 s的电荷积累测试^[50] (网络版彩图)

Figure 13 (a) Schematic illustration of transition layer in triboelectric device; (b) output voltage performance with and without PI as transition layer; (c) output voltage performance with and without paper as transition layer; (d) charge decay; (e) charge accumulation process of the first 3 s when PVDF and NY get into contact^[50] (color online).

摩擦电电压从110 V提高到1010 V, 摩擦电荷密度也由 $11.8 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 增加到 $105 \mu\text{C}/\text{m}^2$, 增加了大约9倍。而在PVDF底部加入电荷耗散的植物纤维中间层后, 摩擦电电压及摩擦电荷密度均出现了减小的现象。中间层的电荷衰减试验表明, 聚酰亚胺层具有很好的电荷保持能力, 因此将电荷耗散速率较快的PVDF与具有低电荷耗散率的电荷存储层相结合, 可以提高材料的摩擦起电性能; 反之, 加入能够加快电荷耗散的材料, 则可以减小摩擦起电。

4 摩擦电能的收集利用

人们对摩擦起电的认识由来已久, 但对摩擦电的收集利用却进展缓慢。这是因为通常由摩擦起电所产生的电压虽高, 但电量极小, 一般不会形成较大的持续电流。如我们所熟知的范德格拉夫起电机, 其摩擦输出电势可达 5×10^6 V, 但电流却极小, 一般仅几个微安, 至今仍用于电学演示实验。但是, 由于摩擦无处不在, 其中蕴含的摩擦电能亦十分可观。如果能够将这类

电能收集利用, 不仅可以将摩擦起电的不利影响转化为可以利用的资源, 还能给能源问题找到一个新的解决办法^[51~53]。但是这些能量的频率分布比较广, 存在形式多种多样, 受限于法拉第电磁感应定律, 传统的电磁发电机的输出功率与驱动频率的平方成正比, 想要获得稳定的输出必须保证电磁发电机工作在一个稳定且非常高的工作频率, 因此很难利用电磁发电机对这些能量进行有效的收集利用。相比之下, 基于摩擦起电和静电感应原理的摩擦纳米发电机能够在一个较宽的驱动频率范围内进行能量的收集转换^[54~56], 并且其输出电流与驱动频率成正比, 而输出电压则保持相对稳定。因此, 摩擦纳米发电机的出现为收集摩擦过程中的摩擦能提供了一种可行的途径。

摩擦纳米发电机的概念最早由王中林教授于2012年提出, 其工作原理如图14所示^[31]。两个聚合物薄膜摩擦起电使得一个聚合物的内表面带正电, 另一个聚合物的内表面带负电。当两个聚合物分离时, 带相反电荷的两个表面会分开, 并在两个面之间产生电场, 从而使两个电极之间形成电势差, 驱动电子在外电路从一个电极流到另一个电极, 直到两个电极的电势达到平衡状态。随后, 当聚合物再次由于压缩而接触时, 摩擦电荷诱导的电势差降低到零, 转移的电荷将通过外电路流回, 从而产生另一个方向相反的电流脉冲。当这种周期性的机械形变持续时, 就会在回路中产生持续不断的交流信号。基于这种原理, 摩擦纳米发电机能够将环境中的机械能/摩擦电能收集利用, 如风能^[57~59]、水波能量^[60~62]、声能^[63~65]、雨滴^[66~68]以及自然界中的振动能量^[69~71]等。到目前为止, 作为一种新的可持续电源, 摩擦纳米发电机被广泛研究并加以应用, 如驱动电子器件、自供电传感器、自供电防腐防污系统等。

4.1 小型器件供电

随着微型功能器件和微机电系统的不断发展, 很多微型器件逐步应用于人们的生活当中, 使用低功耗集成电路的微型器件在工作时所需的功率很小, 如心脏起搏器通常在毫瓦量级, 而蓝牙发射器则在微瓦量级。微型器件的低功耗使得收集环境中的能量转换为电能为其供电成为可能。作为机械能收集转换装置的摩擦纳米发电机在提出后就得到快速发展, 其所具有的良好输出性能和适用性, 可以收集转换各种形式的

图 14 摩擦纳米发电机的工作原理图^[31] (网络版彩图)
Figure 14 Working mechanism of the triboelectric nanogenerator^[31] (color online).

机械能为微型功能器件供电。

Cui等^[72]利用PANI纳米线作为摩擦层制备了高输出性能的风驱动摩擦纳米发电机, 并使用该器件同时点亮了1240个商业发光二极管(图15(a)). Chun等^[73]报道了一种三层结构的摩擦纳米发电机, 其具有很高的输出性能, 能够用其为手机和智能手表进行充电(图15(b)).

Li等^[74]采用具有高电压输出的摩擦纳米发电机驱动离子源, 成功实现了电喷雾离子化(图16). 利用TENG作为高压源, 能够有效控制离子脉冲的带电性、频率和持续时间, 并实现了最大化样品的利用率. 该研究为质谱分析提供了一个全新的可控参数, 有效提高了分析精度, 这也是纳米发电机在大型分析仪器中的首次应用。

Zheng等^[75]制作了一种可植入式摩擦纳米发电机, 成功收集了大鼠呼吸运动产生的能量, 将其转换为电能加以储存, 并驱动一个外接的心脏起搏器原型机工作, 产生与医用心脏起搏器一样的电脉冲(图17). 这种可植入的摩擦纳米发电机极大地改善了现有电池供电的弊端, 延长植入式医疗器件的使用寿命, 在植入式医疗领域中具有极大的应用前景。

4.2 自供电纳米传感器

由于具有成本低、制造简单、可持续性和高效率

图 15 (a) TENG点亮1240个LED灯^[72]; (b) TENG为手机及智能手表充电^[73] (网络版彩图)

Figure 15 (a) Photograph of 1240 LEDs powered by the TENG^[72]; (b) optical images of charging a battery of smart phone/watch^[73] (color online).

图 16 (a) TENG驱动离子化过程的示意图; (b) 电喷雾离子化过程的照片^[74] (网络版彩图)

Figure 16 (a) Schemes showing the mechanism of ionization by contact-separation mode TENGs; (b) dark-field images of a nanoelectrospray emitter showing an electrospray plume triggered by the TENG charge flow^[74] (color online).

的优点, 摩擦纳米发电机已被广泛用作自供电传感器, 可以通过电流和电压输出信号有效地检测外部变化,

图 17 (a) 植入式摩擦纳米发电机驱动心脏起搏器工作系统流程图; (b) 由植入式摩擦纳米发电机供电的心脏起搏器产生的电脉冲^[75] (网络版彩图)

Figure 17 (a) Scheme diagram of the self-powered pacemaker; (b) stimulating the heart of the rat by self-powered pacemaker^[75] (color online).

并应用于压力传感^[76]、运动检测^[77]、振动监测^[78]、化学和环境检测^[79,80]以及气体传感器^[81~84]。

Cui等^[85]利用聚苯胺纳米纤维(PANI NFs)作为 NH_3 传感材料,设计了自供电的 NH_3 纳米传感器(图18)。 NH_3 在导电的掺杂态聚苯胺(C-PANI)表面上吸附造成了C-PANI向不导电的未掺杂态聚苯胺(N-PANI)转变,聚苯胺电导率的变化会影响TENG的输出电压。因此通过检测TENG输出电压信号的变化可以监测不同浓度的 NH_3 。该自供电的 NH_3 纳米传感器将电源和气体传感集成到一个器件中,实现了传感供电一体化。作为自供电 NH_3 纳米传感器,此设计不仅可以探测 NH_3 浓度,而且还将环境中的机械能转换为电能而无需任何外部电源来为传感器检测 NH_3 提供电力,解决了实际应用中的能量供应问题。该自供电传感器检测 NH_3 的最低浓度为500 ppm,显示出良好的灵敏度。

近年来,基于液-固摩擦起电的自供电传感器引起了人们的关注。Zhang等^[41]利用商业PTFE滤膜和蒸馏水作为摩擦材料,制备了一种新型的全封装液固TENG,并将其用于多巴胺浓度检测(图19)。得益于液-固摩擦及全封装的特点,该器件能够避免外界环境的影响,并且液-固摩擦对器件微纳米结构不会产生破

图 18 (a) 自供电 NH_3 传感器的机理图; (b) 暴露在1000 ppm NH_3 气氛时实时连续的响应/恢复过程中的输出电压; (c) 传感器选择性测试结果; (d) 传感器在空气及 NH_3 浓度为500~20000 ppm时的输出电压^[85] (网络版彩图)

Figure 18 (a) Illustration of NH_3 sensing mechanism; (b) real-time continuous responding/recovering process of self-powered NH_3 nanosensor against 1000 ppm; (c) gas-sensing selectivity of self-powered NH_3 nanosensor; (d) the output voltage of the nanosensor at room temperature in air and various NH_3 concentrations (from 500 to 20000 ppm)^[85] (color online).

坏。不同浓度多巴胺改性后的PTFE过滤膜与液体摩擦时产生的摩擦电输出随多巴胺浓度的增大而减小,因此该器件可用作多巴胺浓度传感器,用于检测多巴胺的浓度。由于其固有的完全封装结构,该传感器具有抵抗环境干扰的能力。结果表明,与基于固体摩擦的自供电纳米传感器相比,这种新型设备具有更高的灵敏度和选择性。

Zhang等^[47]利用固-液滑动摩擦和静电感应原理设计了一种U形液固摩擦纳米发电机,并将其用作多功能传感器,可检测位移、压力、扭转、弯曲等(图20)。该U形液固摩擦纳米发电装置既可以用作能量收集器,也可以作为自供电多功能传感器,具有制造简单、低成本、便携和自供电特性的优点。

图 19 (a) 多巴胺的聚合过程; (b) 液固TENG在不同多巴胺浓度下的电流输出; (c) 在尿酸(UA)和抗坏血酸(AA)存在下对多巴胺检测的选择性测试结果^[41] (网络版彩图)

Figure 19 (a) Schematic illustration of the reaction mechanism of DA via oxidative self-polymerization; (b) short-circuit current of the polydopamine modified PTFE-based TENG with different concentrations of dopamine; (c) selectivity of the water-based TENG for dopamine (DA) with the interference factors (ascorbic acid (AA) and uric acid (UA)) ^[41] (color online).

4.3 自供电防腐防污系统

金属的腐蚀和防护一直以来都是科学研究的热点问题. 在实际应用中, 有机涂层和强制电流的阴极保护 (ICCP)方法相结合成为一种有效的方法用于保护埋设的管道或是海洋所用的构件. 一旦外部涂层被破坏, ICCP通过将金属的电位保持在其自腐蚀电位以下, 能够继续保护金属避免发生腐蚀. 对于ICCP, 需要外部电源来实现持续存在的电子消耗过程, 使得金属发生阴极极化. 然而, ICCP的方法造成了能源消耗和高昂的维护费用等问题. 因此, 发展一种具备可持续自供能型的新型ICCP方法具有重要的意义. Cui等^[72]制作了用于收集风能的风能PANI-TENG, 并用其构建了自供能阴极保护系统, 实现了自供电防腐(图21). 该设备在收集风能方面表现出良好的输出性能, 并利用来自自然的风能保护金属免受腐蚀. 研究表明, 连接TENG的碳钢在3.5 wt% NaCl溶液中浸泡2 h几乎没有腐蚀, 而没有连接TENG的碳钢表面则发生了严重的腐蚀, 有

图 20 (a) U-TENG的结构设计和工作方式; (b) 振动振幅与U-TENG转移电荷的关系; (c) 基于U-TENG自供能压力传感器的结构设计示意图; (d) 压力与U-TENG输出电压的关系; (e) 收集不同运动形式的能量的U-TENG结构设计示意图; U-TENG分别在不同运动形式(弯曲(f)和扭转(g))的输出电压^[47] (网络版彩图)

Figure 20 (a) The basic structure and brief operation process of U-shaped TENG; (b) transferred charge of the U-shaped TENG at different vibration amplitude from 3 to 23 mm at the resonance frequency of 2 Hz; (c) schematic diagram of U-shaped TENG based pressure sensor and its operation process; (d) the open-circuit voltage versus time with different pressure (0.16, 0.30 and 0.54 kPa); (e) the structural schematic of the U-shaped TENG in various motion monitoring; the open-circuit voltage of U-shaped TENG under bending (f) and twisting (g) ^[47] (color online).

图 21 (a) 自供能阴极保护体系装置示意图; 连接和不连接风驱动 TENG 碳钢的开路电位的变化(b)和 Tafel 曲线(c); (d) 连接和不连接风驱动 TENG 的碳钢在 3.5 wt% NaCl 溶液中浸泡 2 h 后的形貌照片^[72] (网络版彩图)

Figure 21 (a) Schematic diagram of the self-powered cathodic protection system; (b) OCP variation and (c) Tafel curves of the carbon steel coupled with and without the TENG, respectively; (d–f) photographs of the carbon steel coupled with and without the wind-driven TENG under a wind speed of 10 m/s in a 3.5 wt% NaCl solution for 2 h [72] (color online).

大量的铁锈出现。此外, 开路电位的降低和腐蚀电位的负移均能够证明连接 TENG 的碳钢处于有效的阴极保护中。TENG 供能的阴极保护系统利用自然界中存在的风能, 没有其他外部电能的输入, 因此它作为自供能的阴极保护体系在金属的腐蚀防护方面具有重要的研究意义。

海洋生物污损是由于微生物有机体, 如细菌、海藻、植物等在海水中与医学器械、船体、管道、薄膜等接触并富集在其表面导致的。海洋防污就是要通过一系列的手段来阻止或抑制有机生物体在物体表面的积累和生长。常用的防污手段有防污涂层、热处理、脉冲电能等。已有研究表明, 脉冲电场可以阻止生物污损附着在材料表面, 脉冲电流的大小可以是几伏到几千伏变化。与之相类似的是, 摩擦纳米发电机产生的电流恰好是交流的脉冲电流。因此, TENG 产生的脉冲电流应该可以对海洋污损物的黏附有一定的抑制作用。Feng 等^[86]利用聚多巴胺修饰的纸基摩擦纳米发电

机搭建了 TENG 动力外加电流防污保护系统(图 22)。由于电极的正负极均为脉冲电流, 两个电极部分可能都会有一定的防污效果, 因此实验中将两个电极均使用不锈钢片来进行相应的防污测试。将不锈钢片在杜氏藻和舟形藻的溶液中浸泡 8 h 后取出, 再在盐水 (3.5 wt%) 中浸泡 2 s 除去表面游离的海藻。研究发现, 不管是在正极还是负极, 摩擦纳米发电机产生的脉冲电流对舟形藻和杜氏藻的黏附均具有非常好的抑制作用。

5 防静电设计

随着现代科学技术及电子产业的飞速发展, 静电危害日益严重。静电放电产生的瞬时大电流对电子器件及其他静电敏感系统产生巨大危害, 静电放电的火花能引燃引爆易燃易爆气体、粉尘。因此, 研究防静电的有效方法, 控制静电的产生及累积, 消除由于材料摩擦起电引起的电荷的方法尤其重要。在摩擦起电过程中, 同时存在着摩擦电荷的产生及复合。减少摩擦电荷的产生、增大电荷消散速率或者人为地中和消除静电, 都能够有效抑制静电的积累, 降低静电造成的危害。

5.1 减少摩擦电荷的产生

减少摩擦起电电荷的产生或者降低摩擦起电速率, 能够从根本上抑制静电的产生。前文中提到了影响摩擦起电性能的多种因素, 在特定的环境中, 通过调整摩擦表面的形貌结构、成分组成、摩擦过程中的载荷、频率、摩擦方式以及摩擦副的结构, 减少摩擦起电电荷的产生, 就能够降低静电的累积, 防止静电放电的发生。在工业生产中, 绝大部分静电是因物体之间相互摩擦、碰撞引起的, 因此需要控制包装、装卸及输送等过程中物体之间的摩擦及接触。在液体运输过程中, 必须限制液体流速或降低液体晃动频率, 以减少摩擦起电电荷量。

Soh 等^[87]报道了一种制备不摩擦起电聚合物的通用方法, 将适当比例的具有得电子倾向的分子和具有失电子倾向的分子共聚合(图 23)。由此制备的共聚物在结构上均匀, 且不需要进一步改性或添加其他物质(如抗静电剂或掺杂剂), 就可以使材料在摩擦时不会起电。通常导静电材料在接触摩擦后先产生摩擦电荷,

图 22 (a) 自供电防污系统设计示意图; (b) 空白组和自供电防污系统电极表面舟形藻和杜氏藻黏附数目统计; (c) 空白组和自供电防污系统电极表面杜氏藻黏附荧光显微镜图像; (d) 空白组和自供电防污系统电极表面舟形藻黏附荧光显微镜图像(标尺=100 nm)^[86] (网络版彩图)

Figure 22 (a) Schematic illustration of self-powered antifouling system; (b) statistical results of the quantity of *Dunaliella* and *Navicula* after immersion in algae solution for 8 h; (c, d) fluorescence microscopy images of *Dunaliella* on blank (c1), cathode (c2), anode (c3), stainless steel substrate, and *Navicula* on blank (d1), cathode (d2), and anode (d3), stainless steel substrate after immersion in algae solution for 8 h [86]. The scale bar represents 100 μm (color online).

然后通过导电通路将其导走。而该方法不需要增加材料的电导率, 即可完全防止两个接触表面产生摩擦电荷。

5.2 增大电荷消散速率

除了减少摩擦电荷的产生, 增大电荷耗散速率, 让产生的摩擦电荷在材料表面快速耗散或迅速导走也能够达到良好的防静电效果。

静电接地是防静电措施中最有效、直接也是最常用的一种方法。通过导电, 防静电材料将物体与大地在电气上连接, 使物体与大地电位相同, 保证物体产生的摩擦电荷泄放到大地, 达到防静电的效果(图24)^[88]。这种方法适用于导体, 如防静电台垫、防静电手环、防静电服、防静电地板等。

在塑料、橡胶等静电非导体材料中掺入金属粉、碳纳米管、石墨烯、导电纤维和抗静电剂等导电材料, 能够增大材料的体积电导率, 加速摩擦电荷的消散, 从而达到静电防护的目的。

另外, 增大空气相对湿度也能够有效降低摩擦电

图 23 (A) 设计一种共聚物能够和摩擦对偶摩擦时不带电; (B) (a) 不同含量PVAc与ABS摩擦时的电荷密度以及(b) ABS电荷密度^[87]

Figure 23 (A) Designing a copolymer that resists charging against a reference material. (B) Charge density of the 100% PVAc, 50% PVAc, and 0% PVAc after contacting with the reference material ABS (a); (b) shows the charge of ABS after the contact [87].

图 24 (a) 防静电地垫; (b) 防静电手环; (c) 防静电服; (d) 防静电地板^[88](网络版彩图)

Figure 24 Photograph of anti-static mat (a), anti-static wrist strap (b), anti-static clothing (c) and anti-static flooring (d) [88] (color online).

荷, 这是因为增大湿度能够降低大多数材料的表面电阻率, 使物体由静电非导体性质转向类似于静电亚导

体或静电导体的表面特性, 提高物体的静电泄漏速率.

Baytekin等^[89]研究了电荷在聚合物表面累积时电场和磁场的分布情况. 他们发现, 电荷和自由基共定位到相同的纳米区域, 自由基的存在能使电荷稳定. 利用电荷和自由基之间的这种相互作用, 他们提出, 含有少量自由基清除剂的掺杂聚合物可去除自由基, 使电荷域不稳定, 导致材料的摩擦电荷快速耗散并抑制电荷积聚, 从而达到防静电效果(图25).

5.3 中和消除表面静电

中和消除静电是一种普遍适用的静电防护技术, 该方法可利用空气电离发生器将空气电离出正负离子对, 并将其吹在物体表面, 以中和带电物体上的电荷. 该方法具有使用方便、不影响产品质量等优点.

6 总结与展望

摩擦起电作为一种生活中极为常见又无法避免的摩擦物理现象, 在生活和工业生产中既存在许多负面影响, 又有着巨大的开发应用价值. 发展摩擦起电的界面调控方法及技术, 实现摩擦起电的有效控制, 对摩擦起电的最大化利用具有重要的价值和意义. 现有的研究已经证明, 通过调整摩擦材料的表面微观形貌、成分组成、摩擦副结构, 控制摩擦运动方式、摩擦环境, 可以对摩擦界面的起电性能进行调制. 在不同的应用环境中, 可通过合理的设计, 实现对摩擦起电性能的调控, 以满足不同的需求. 在摩擦电能收集方面, 充分利用摩擦起电的优势, 将环境中多种形式的能量收集利用, 变废为宝; 在防静电方面, 通过控制影响摩擦起电性能的各项因素, 降低摩擦起电能力、抑制摩擦电荷的产生、加速摩擦电荷的耗散, 以达到

图 25 (a) 自由基清除剂降低表面电荷并增加放电速率; (b) 当DPPH浓度增加时, DPPH-PDMS上积累的正电荷减少^[89] (网络版彩图)

Figure 25 (a) PDMS pieces contact-charged against PS and doped with α -tocopherol, HALS, or DPPH develop less charge than native/pure PDMS; (b) less positive charge accumulates on DPPH-PDMS when DPPH concentration increases ^[89] (color online).

防静电目的. 针对摩擦起电的基础理论以及计算分析研究需要进一步的加强, 这将有助于高效进行摩擦起电界面的调控设计. 而对摩擦电的调控的根本, 还依赖于对摩擦起电机理从微观角度更深入的研究, 这也是此领域未来研究的重点任务.

此外, 目前报道的摩擦起电界面调控方法都是在常温常压下进行的, 但是在一些特殊的工作环境下, 摩擦起电行为特性需要进一步关注. 随着科技的进步, 一些苛刻环境对静电防护提出了更高的要求, 如航天员太空行走、空中加油、火箭发射、太空舱返航等, 他们处于悬空或太空环境, 传统防静电方法已不再适用, 这就需要研究寻找新的防静电方法, 发展空间环境防静电理论及技术, 而这些需要我们对摩擦起电的机制进行更深入的研究. 而就摩擦电能的收集利用来讲, 作为一种新能源方式, 尽管已展现出美好的前景, 但实际应用仍然存在巨大挑战. 可发展需要依赖高效摩擦起电材料的设计与开发, 发电涂层材料的宏量制备技术, 以及简单有效的环境耗散能的收集装置设计等.

参考文献

- 1 Zhou F, Liang Y, Liu W. *Chem Soc Rev*, 2009, 38: 2590–2599
- 2 Fan M, Song Z, Liang Y, Zhou F, Liu W. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2014, 6: 3233–3241
- 3 Wang H, Lu Q, Ye C, Liu W, Cui Z. *Wear*, 2004, 256: 44–48
- 4 Bowden FP, Stone MA, Tudor GK. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 1947, 188: 329–349
- 5 Nakayama K, Hashimoto H. *Tribol Trans*, 1992, 35: 643–650
- 6 Diaz AF, Felix-Navarro RM. *J Electrostatics*, 2004, 62: 277–290
- 7 Lacks DJ, Levandovsky A. *J Electrostatics*, 2007, 65: 107–112
- 8 Matsusaka S, Maruyama H, Matsuyama T, Ghadiri M. *Chem Eng Sci*, 2010, 65: 5781–5807

- 9 Pan S, Yin N, Zhang Z. *Sci Rep*, 2018, 8: 2470
- 10 Akay A. *J Acoust Soc Am*, 2002, 111: 1525–1548
- 11 Wimmer MA, Sprecher C, Hauert R, Täger G, Fischer A. *Wear*, 2003, 255: 1007–1014
- 12 (a) <https://baike.baidu.com/item/%E9%9B%B7%E6%9A%B4%E6%97%A5>; (b) <https://www.science-sparks.com/a-hair-raising-experiment>; (c) <https://www.trueherald.com/global-esd-protection-diode-market-2018-key-players-vishay-on-semiconductor-toshiba-texas-instruments-littelfuse-infineon-nxp-stmicroelectronics/>; (d) http://www.17350.com/photo/youguanche/1806_28.html; (e) <https://www.jiemian.com/article/750309.html>; (f) <https://www.saowen.com/a/95039efa6e4dd838616f20b070ed1ff93c327962cf204ecf3f09f07d9120f5>
- 13 Gibson HW. *J Am Chem Soc*, 1975, 97: 3832–3833
- 14 Forward KM, Lacks DJ, Sankaran RM. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 028001
- 15 Li W, Guo X, Nan H. *Initiat Pyrot*, 2014: 54–56 (in Chinese) [李巍, 郭昕, 南海. 火工品. 2014: 54–56]
- 16 Liu M. *China Safety Science*, 2006, 16: 114–119 (in Chinese) [刘明翔. 中国安全科学学报, 2006: 16: 114–119]
- 17 Yu H, Yan N, Chen S, Wang H. *Chin J Energ Mater*, 2015, 23: 682–687 (in Chinese) [于鸿源, 严楠, 陈树肖, 王洪波. 含能材料, 2015, 23: 682–687]
- 18 Wallash AJ. *IEEE Trans Magn*, 2004, 40: 1751–1755
- 19 Hays DA, Sheflin JC. *J Electrostatics*, 2005, 63: 687–692
- 20 Lanzerotti LJ, Breglia C, Maurer DW, Johnson Iii GK, MacLennan CG. *Adv Space Res*, 1998, 22: 79–82
- 21 Violet MD, Frederickson AR. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1993, 40: 1512–1520
- 22 Lai ST. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2003, 31: 1118–1124
- 23 Krupa A, Jaworek A, Sobczyk AT, Marchewicz A, Szudyga M, Antes T. *J Electrostat*, 2013, 71: 260–264
- 24 Tavares RM, Cunha JP, Alves TC, Bueno MR, Silva SM, Zandonadi CH. *Pest Manag Sci*, 2017, 73: 1148–1153
- 25 Sun D, Zhou X, Liu X. *Paint Coat Ind*, 2004, 34: 24–26 (in Chinese) [孙道兴, 周晓东, 刘香兰. 涂料工业, 2004, 34: 24–26]
- 26 Shu C, Pan H, Zhou H, Zhan M, Mei A, Ru Y, Jia Z, Chen G. *Sci Silvae Sin*, 2012, 48: 75–80 (in Chinese) [舒朝然, 潘宏阳, 周宏平, 詹敏, 梅爱华, 茹煜, 贾志成, 陈国发. 林业科学, 2012, 48: 75–80]
- 27 Kirk IW, Hoffmann WC, J. B. Carlton. *Trans ASAE*, 2001, 44: 1089–1092
- 28 Fan FR, Tian ZQ, Lin Wang Z. *Nano Energy*, 2012, 1: 328–334
- 29 Yang Y, Sun N, Wen Z, Cheng P, Zheng H, Shao H, Xia Y, Chen C, Lan H, Xie X, Zhou C, Zhong J, Sun X, Lee ST. *ACS Nano*, 2018, 12: 2027–2034
- 30 Zheng Y, Cheng L, Yuan M, Wang Z, Zhang L, Qin Y, Jing T. *Nanoscale*, 2014, 6: 7842–7846
- 31 Zhu G, Pan C, Guo W, Chen CY, Zhou Y, Yu R, Wang ZL. *Nano Lett*, 2012, 12: 4960–4965
- 32 Latham J. *Br J Appl Phys*, 1963, 14: 488–490
- 33 Sikorski J. *Tex Inst Ind*, 1967, 5: 374
- 34 Pan S, Zhang Z. *J Appl Phys*, 2017, 122: 144302
- 35 Martin AJP. *Proc Phys Soc*, 1941, 53: 186–189
- 36 Beraldo da Silveira Balestrin L, Del Duque D, Soares da Silva D, Galembeck F. *Faraday Discuss*, 2014, 170: 369–383
- 37 Burgo TAL, Ducati TRD, Francisco KR, Clinckspoor KJ, Galembeck F, Galembeck SE. *Langmuir*, 2012, 28: 7407–7416
- 38 Zhang L, Zhang B, Chen J, Jin L, Deng W, Tang J, Zhang H, Pan H, Zhu M, Yang W, Wang ZL. *Adv Mater*, 2016, 28: 1650–1656
- 39 Fan FR, Lin L, Zhu G, Wu W, Zhang R, Wang ZL. *Nano Lett*, 2012, 12: 3109–3114
- 40 Feng Y, Zheng Y, Ma S, Wang D, Zhou F, Liu W. *Nano Energy*, 2016, 19: 48–57
- 41 Zhang X, Zheng Y, Wang D, Rahman ZU, Zhou F. *Nano Energy*, 2016, 30: 321–329
- 42 Wang ZL. *ACS Nano*, 2013, 7: 9533–9557
- 43 Zhang C, Tang W, Han C, Fan F, Wang ZL. *Adv Mater*, 2014, 26: 3580–3591
- 44 Davies DK. *J Phys D-Appl Phys*, 1969, 2: 1533–1537
- 45 Cui S, Zheng Y, Liang J, Wang D. *Chem Sci*, 2016, 7: 6477–6483
- 46 Hiratsuka K, Hosotani K. *Tribol Int*, 2012, 55: 87–99
- 47 Zhang X, Zheng Y, Wang D, Zhou F. *Nano Energy*, 2017, 40: 95–106
- 48 Lu CX, Han CB, Gu GQ, Chen J, Yang ZW, Jiang T, He C, Wang ZL. *Adv Eng Mater*, 2017, 19: 1700275

- 49 Nguyen V, Yang R. *Nano Energy*, 2013, 2: 604–608
- 50 Feng Y, Zheng Y, Zhang G, Wang D, Zhou F, Liu W. *Nano Energy*, 2017, 38: 467–476
- 51 Zhu G, Lin ZH, Jing Q, Bai P, Pan C, Yang Y, Zhou Y, Wang ZL. *Nano Lett*, 2013, 13: 847–853
- 52 Zi Y, Wang J, Wang S, Li S, Wen Z, Guo H, Wang ZL. *Nat Commun*, 2016, 7: 10987
- 53 Zhu G, Chen J, Zhang T, Jing Q, Wang ZL. *Nat Commun*, 2014, 5: 3426
- 54 Khan U, Kim SW. *ACS Nano*, 2016, 10: 6429–6432
- 55 Zi Y, Guo H, Wen Z, Yeh MH, Hu C, Wang ZL. *ACS Nano*, 2016, 10: 4797–4805
- 56 Yang Y, Zhu G, Zhang H, Chen J, Zhong X, Lin ZH, Su Y, Bai P, Wen X, Wang ZL. *ACS Nano*, 2013, 7: 9461–9468
- 57 Bae J, Lee J, Kim SM, Ha J, Lee BS, Park YJ, Choong C, Kim JB, Wang ZL, Kim HY, Park JJ, Chung UI. *Nat Commun*, 2014, 5: 4929
- 58 Yong H, Chung J, Choi D, Jung D, Cho M, Lee S. *Sci Rep*, 2016, 6: 33977
- 59 Chen B, Yang Y, Wang ZL. *Adv Energy Mater*, 2018, 8: 1702649
- 60 Xu L, Jiang T, Lin P, Shao JJ, He C, Zhong W, Chen XY, Wang ZL. *ACS Nano*, 2018, 12: 1849–1858
- 61 Jiang T, Zhang LM, Chen X, Han CB, Tang W, Zhang C, Xu L, Wang ZL. *ACS Nano*, 2015, 9: 12562–12572
- 62 Lin ZH, Cheng G, Lin L, Lee S, Wang ZL. *Angew Chem Int Ed*, 2013, 52: 12545–12549
- 63 Liu J, Cui N, Gu L, Chen X, Bai S, Zheng Y, Hu C, Qin Y. *Nanoscale*, 2016, 8: 4938–4944
- 64 Gu L, Cui N, Liu J, Zheng Y, Bai S, Qin Y. *Nanoscale*, 2015, 7: 18049–18053
- 65 Cui N, Gu L, Liu J, Bai S, Qiu J, Fu J, Kou X, Liu H, Qin Y, Wang ZL. *Nano Energy*, 2015, 15: 321–328
- 66 Lin ZH, Cheng G, Lee S, Pradel KC, Wang ZL. *Adv Mater*, 2014, 26: 4690–4696
- 67 Kil Yun B, Soo Kim H, Joon Ko Y, Murillo G, Hoon Jung J. *Nano Energy*, 2017, 36: 233–240
- 68 Lin ZH, Cheng G, Wu W, Pradel KC, Wang ZL. *ACS Nano*, 2014, 8: 6440–6448
- 69 Wang Z, Cheng L, Zheng Y, Qin Y, Wang ZL. *Nano Energy*, 2014, 10: 37–43
- 70 Zhang L, Cheng L, Bai S, Su C, Chen X, Qin Y. *Nanoscale*, 2015, 7: 1285–1289
- 71 Chen J, Zhu G, Yang W, Jing Q, Bai P, Yang Y, Hou TC, Wang ZL. *Adv Mater*, 2013, 25: 6094–6099
- 72 Cui S, Zheng Y, Liang J, Wang D. *Nano Res*, 2018, 11: 1873–1882
- 73 Chun J, Ye BU, Lee JW, Choi D, Kang CY, Kim SW, Wang ZL, Baik JM. *Nat Commun*, 2016, 7: 12985
- 74 Li A, Zi Y, Guo H, Wang ZL, Fernández FM. *Nat Nanotech*, 2017, 12: 481–487
- 75 Zheng Q, Shi B, Fan F, Wang X, Yan L, Yuan W, Wang S, Liu H, Li Z, Wang ZL. *Adv Mater*, 2014, 26: 5851–5856
- 76 Dhakar L, Gudla S, Shan X, Wang Z, Tay FEH, Heng CH, Lee C. *Sci Rep*, 2016, 6: 22253
- 77 Lim GH, Kwak SS, Kwon N, Kim T, Kim H, Kim SM, Kim SW, Lim B. *Nano Energy*, 2017, 42: 300–306
- 78 Wang S, Niu S, Yang J, Lin L, Wang ZL. *ACS Nano*, 2014, 8: 12004–12013
- 79 Li Z, Chen J, Yang J, Su Y, Fan X, Wu Y, Yu C, Wang ZL. *Energy Environ Sci*, 2015, 8: 887–896
- 80 Zhang H, Yang Y, Su Y, Chen J, Hu C, Wu Z, Liu Y, Ping Wong C, Bando Y, Wang ZL. *Nano Energy*, 2013, 2: 693–701
- 81 Uddin ASMI, Yaqoob U, Chung GS. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 30079–30089
- 82 Xue X, Fu Y, Wang Q, Xing L, Zhang Y. *Adv Funct Mater*, 2016, 26: 3128–3138
- 83 Wang S, Xie G, Tai H, Su Y, Yang B, Zhang Q, Du X, Jiang Y. *Nano Energy*, 2018, 51: 231–240
- 84 Wen Z, Chen J, Yeh MH, Guo H, Li Z, Fan X, Zhang T, Zhu L, Wang ZL. *Nano Energy*, 2015, 16: 38–46
- 85 Cui S, Zheng Y, Zhang T, Wang D, Zhou F, Liu W. *Nano Energy*, 2018, 49: 31–39
- 86 Feng Y, Zheng Y, Rahman ZU, Wang D, Zhou F, Liu W. *J Mater Chem A*, 2016, 4: 18022–18030
- 87 Zhang X, Huang X, Kwok SW, Soh S. *Adv Mater*, 2016, 28: 3024–3029
- 88 (a) http://www.szhwdh.cn/szhwdh_Product_2734666.html; (b) <https://www.jianshu.com/p/8c82c4a78aa8>; (c) https://s.taobao.com/search?q=&imgfile=&js=1&stats_click=search_radio_all%3A1&initiative_id=staobaoz_20181126&ie=utf8&tfsid=TB1yV2dXZ_vK1RkSmRyXXX-wupXa&app=imgsearch®ion=0%2C0%2C0%2C0; (d) <http://www.gsxxj.com>
- 89 Baytekin HT, Baytekin B, Hermans TM, Kowalczyk B, Grzybowski BA. *Science*, 2013, 341: 1368–1371

Investigation on the interface control and utilization of triboelectrification

Youbin Zheng^{1†}, Shaochen Ma^{1,2†}, Yan'ge Feng¹, Daoai Wang^{1*}, Feng Zhou¹, Weimin Liu¹

¹ State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

² Institute of Materials Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

†These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author (email: wangda@licp.cas.cn)

Abstract: Triboelectrification is one of the most common effects in our daily life. When two materials come into frictional contact, they become electrically charged through triboelectric charging. Static electricity generated by triboelectrification, which has proven useful in many areas such as xerography, electrostatic air cleaning and electrostatic painting, on the other hand, can generate electric discharge, which is a hidden danger for petroleum transport and industrial production and may result in heavy casualties and economic losses. It is very important to reveal the mechanism of triboelectric charge generation and realize effective control of triboelectric charge quantity at the interface. Here we summarize the recent progress in the studies of interface control and utilization of triboelectrification. The challenge and prospective investigation trends of interface control and utilization of triboelectrification are also proposed and discussed.

Keywords: triboelectrification, interface regulation, friction energy harvesting, electrostatic protection

doi: [10.1360/N032018-00200](https://doi.org/10.1360/N032018-00200)