

· 综述 ·

石墨烯/聚合物纳米复合电流变材料*

尹剑波** 赵晓鹏

(西北工业大学应用物理系 智能材料实验室 西安 710129)

摘 要 电流变智能流体在外电场刺激下能快速可逆地改变自身流变性能,具有重要技术应用价值. 传统的基于微米颗粒的电流变流体易于沉降并且电致屈服强度不高限制了技术应用,最近基于纳米颗粒的非传统电流变材料研究受到重视,特别是具有各向异性形貌的纳米颗粒悬浮液被发现具有明显增强的电/磁流变效应. 本文介绍了最近基于石墨烯的二维纳米复合电流变材料的研究进展,主要包括石墨烯/半导聚合物、石墨烯/极性聚合物、石墨烯/碳等几种典型的电流变材料的制备、结构和电流变行为. 研究表明利用石墨烯独特的二维纳米结构、优异的电学和热学性质可能为制备新颖的高性能纳米电流变材料提供途径.

关键词 电流变, 石墨烯, 纳米复合材料

智能流体能在外场刺激下做出主动连续的流变行为变化,这一特性使其具有重要技术应用价值. 电流变流体 (electrorheological fluids) 和磁流变悬浮液 (magnetorheological suspensions) 是最被广泛研究的智能流体,它们的流变行为能分别通过外加电场和磁场做出快速可逆的调控,被认为是实现电力转换效率最高的控制媒介之一,在机电系统、智能结构系统、微机械系统中具有广泛应用前景^[1]. 磁流变流体通常由微尺度的软磁颗粒与非磁液体混合而成,在外磁场作用下,软磁颗粒排列成链使磁流变流体的黏度迅速提高并发生液固相变,固化后的流体能抵御几十 kPa 以上的剪切强度,磁流变流体已成功用于许多大型机构如汽车、建筑、桥梁等的减震和阻尼装置中^[2]. 电流变流体则由介电颗粒与绝缘液体混合而成,在电场作用下,电流变流体的黏度也会陡增并出现液固转变,但是固化后的电流变流体能抵抗的剪切强度却远不如磁流变流体,一般要低近一个数量级,这一性能上的不足制约了电流变技术的发展. 然而,相比于磁流变流体,电流变流体有其独特优势,即驱动其工作的电场仅通过两个薄片电极便可施加,因此基于电流变流体的驱动组元和器件不仅易于设计,而且尺寸更小,这一优势使电流变

流体在医疗与生物医学器械、微流体器件中独具应用潜力^[3].

传统电流变流体主要以微米颗粒作为分散相,无法满足医疗与生物医学器械、微流体器件中的狭窄通道要求. 此外,传统电流变流体易发生相分离,电致剪切强度也较低^[4~6]. 2003 年,纳米电流变流体的发明为电流变技术研究带来了新突破,这种非传统的纳米电流变体系在 5 kV/mm 电场下的屈服应力可达 140 kPa,完全突破理论预测上限^[7]. Wen 等提出表面饱和极化模型,将纳米电流变效应归因于颗粒的尺寸效应和颗粒表面大电偶极矩分子产生的强的表面饱和极化. Lu 等则认为纳米颗粒体系中包含或吸附的极性分子不可或缺,将此类材料命名为“极性分子型电流变材料”^[8]. 而后,研究者从材料制备、结构分析和性能表征等方面对纳米电流变材料又进行了系统研究,促进了纳米电流变材料的制备及转变机理的理解^[9~13]. 相比于传统的微米电流变流体,纳米电流变流体在某些性能如屈服强度、悬浮稳定性等方面非常优异,给电流变技术的应用带来希望. 然而,随着研究的不断深入,人们发现纳米电流变流体也存在零场黏度大、电场调节的流变学行为变化并不高、温度稳定性差等突出问题^[14].

* 高分子加工与流变学专题报道; 2012-07-11 收稿, 2012-08-28 修稿; 西北工业大学基础研究基金(基金号 20120247)资助项目.

** 通讯联系人, E-mail: jbyin@nwpu.edu.cn

doi:10.3724/SP.J.1105.2012.12213

颗粒形貌对流体在电磁场作用下的流动行为影响很早就被认识到,但是相关的理论和实验工作仍然较少,特别在纳米电流变流体体系中^[15~20]. 2006 年我们报道一种具有正电流变效应的钛酸盐纳米纤维流体,而后基于各向异性结构的一维纳米纤维流体的电磁流变效应研究受到明显重视^[21]. 研究表明,与球形粒子比较,纳米纤维流体在保持良好悬浮稳定性的同时,具有增强的电/磁流变行为. 如 2007 年, Lin 等发现碳纳米管/异丙醇流体具有比球形碳流体更强的电流变效应^[22]; 2008 年, 我们研制了一种新颖的聚苯胺纳米纤维基电流变液,它具有比聚苯胺纳米颗粒流体更低的零场剪切黏度,但电致剪切应力却比聚苯胺纳米颗粒流体和传统的聚苯胺微米颗粒流体更高^[23]; 2008 年, Bell 等报道了基于羰基铁纳米线磁流变液,发现具有比传统球形羰基铁磁流变液更好的悬浮稳定性和磁流变性能^[24]; 2010 年, 我们还开发了一种含碳纳米纤维电流变液,它也展现了比球形碳更好电流变行为^[25]; 2010 年, Cheng 等制备了含极性分子的草酸钛纳米纤维,发现比相应的草酸钛纳米颗粒具有更强的电流变性能^[26]. 纳米纤维流体的电磁流变性能提高被认为与分散相颗粒的高长径比结构有关,因为在电磁场作用下,相比于球形颗粒体系,纳米纤维流体表现出如下特点: (1) 强的长轴极化导致外场诱导的纤维间吸引力更强; (2) 垂直于纤维长轴的流场会遭遇比球形颗粒更大的流阻; (3) 纤维状颗粒在外场作用下易形成交互重叠接触的网状结构,纤维间摩擦力比球形颗粒更大^[27~34].

除一维结构纳米材料外,二维结构纳米片材料是另一大类被广泛研究的强各向异性纳米体系,其中石墨烯最具代表性,它具有独特的单原子层厚度,优异的电、热、力性质,并且制备简便低廉,在许多领域具有潜在应用价值,是当今材料、物理、化学、生物等学科的研究前沿^[35,36]. 近年有学者开始将它运用于纳米流体的设计与制备中,如 Dae 等将石墨烯分散在水中,发现它的导热行为可获得明显提升^[37]. Gao 等则研究了氧化石墨烯水悬浮液在流动过程中的液晶行为^[38]. 此外, Eswaraiah 等研究了石墨烯/工程油纳米流体的摩擦行为^[39]. 这些研究表明由于石墨烯的二维纳米片结构所导致强各向异性以及其优异的电、热等物理性质会使石墨烯流体表现出比传统流体明显增强的物理行为. 本文侧重介绍了最近基于石墨

烯及其纳米复合材料在电流变智能流体中的应用研究进展,综述了包括石墨烯/半导体聚合物、石墨烯/极性聚合物、石墨烯/碳电流变材料的制备、结构和电流变行为.

1 石墨烯/半导体聚合物复合电流变材料

聚合物半导体是重要的无水电流变材料,包括蒽、菲、萘、三苯化合物、二茂铁、氧化聚丙烯腈以及以苊等为基础物的稠环芳醌类自由基聚合物. 未掺杂或未改性的聚合物导体通常具有大 π 键共轭型的电子结构,导电能力很强不适合做电流变颗粒,可以通过控制掺杂和后处理有效控制分子结构,从而调节电导性质和电流变效应. 聚合物半导体所具有的强的电流变活性可能与来自于电子或空穴的局域迁徙引起的界面极化有关. 聚苯胺是研究最广的聚合物半导体电流变材料,其制备简单、成本较低、热稳定性良好,同时电导率和介电常数可通过简单的酸碱掺杂进行控制^[40].

我们通过将苯胺与氧化石墨烯(GO)复合制备了新颖石墨烯为芯/聚苯胺为壳的三明治型复合介电薄片,发现相比于纯聚苯胺(PANI),其电流变活性可以获得明显提高^[41]. 首先在含有苯胺单体的氧化石墨烯的酸溶液中,通过氧化聚合反应制备氧化石墨烯/导电聚苯胺(PAGO)薄片,而后通过肼溶液还原获得还原的氧化石墨烯芯,而同时实现对导电聚苯胺的去质子化,获得了还原的氧化石墨烯/半导体聚苯胺(PAG)薄片. 图 1 是制备的 PAG 薄片的透射电镜和扫描电镜照片,可以看出单纯的 GO 易于再次堆栈成团聚体,而 PAGO 薄片形成独立的片状分散体系,经过肼溶液还原获得的 PAG 薄片仍保持了较好的独立分散状态. 电流变性能测试表明该 PAG 薄片与硅油的分散体系显示出强电流变行为,如图 2 显示了纯 PANI 及 PAG 悬浮液在不同电场下的流变性能,可以清晰发现 PAG 具有明显更强的电流变效应,在 3 kV/mm 电场下, PAG 悬浮液的屈服应力为 1220 Pa,是纯 PANI 悬浮液(650 Pa)的 2 倍. 同时,二者的流动行为也显示出明显差异,电场作用下 PANI 悬浮液的流动特性基本上服从 Bingham 流体流动行为,而 PAG 悬浮液明显偏离的 Bingham 流体流动行为. 改变 GO 和苯胺单体的含量,可以控制 PAG 复合薄片的壳层厚度,而悬浮液的电流变性能和漏电流密度对壳层厚度有明显依赖性,在适

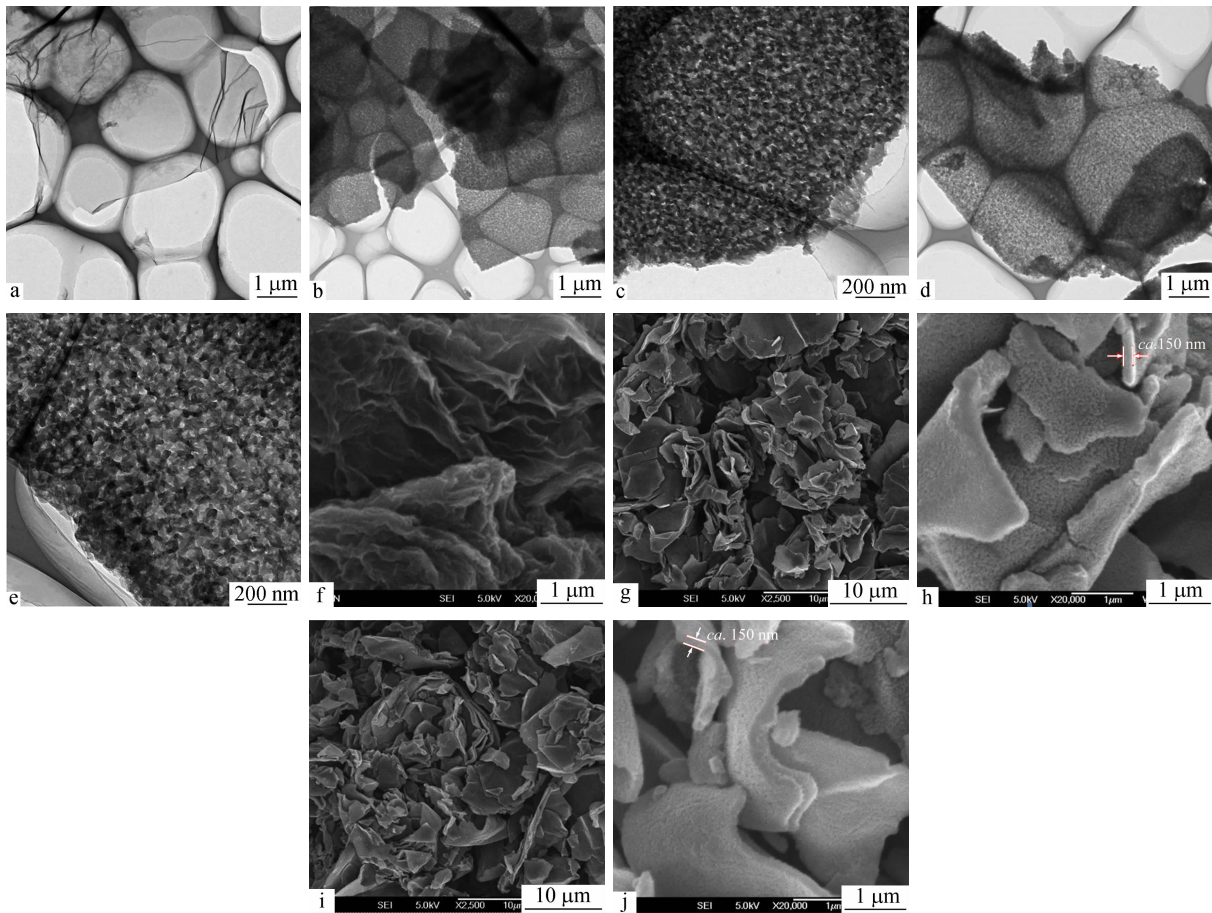


Fig. 1 TEM images of bare GO (a) , PAGO (b, c) , PAG (d,e) sheets and SEM images of bare GO (f) , PAGO (g, h) , PAG (i, j) sheets^[41] (Adapted by permission of Royal Society of Chemistry)

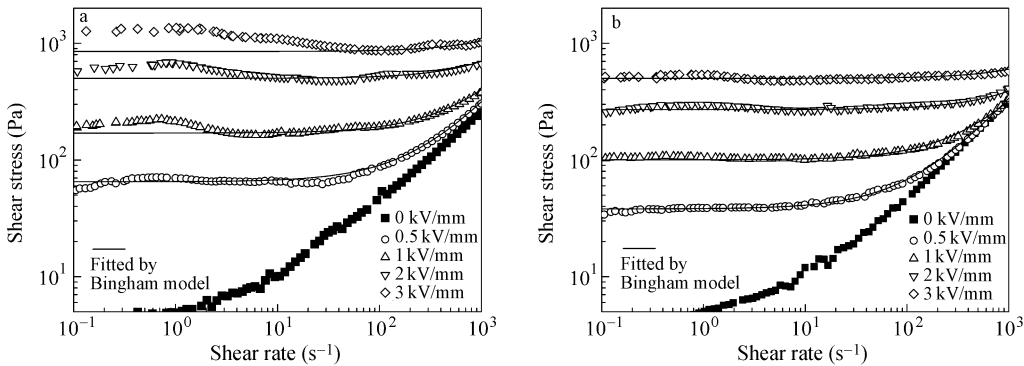


Fig. 2 Steady flow curves of shear stress vs. shear rate for PAG suspension (a) and pure PANI suspension (b) at various electric fields^[41] ($T = 23^{\circ}\text{C}$, particle volume fraction = 10 vol%) (Adapted by permission of Royal Society of Chemistry)

当厚度的 PANI 壳层条件下,悬浮液的屈服应力最高,而漏电流保持较小(如图 3 所示)。

Choi 课题组通过 GO 与苯胺单体反应制备了氧化石墨烯/导电聚合物 (GO/PANI) 复合材料^[42,43]。该复合材料 PANI 的用量较少,GO 占主要比例,这样形成了 GO 包裹 PANI 的效果(如图 4 所示),该材料不用进行碱处理即保持了绝缘

性,因此该复合材料可直接用作电流变测量。图 5 显示了 GO/PANI 悬浮液的电流变性能,比较上述 PAG 悬浮液,该 GO/PANI 复合材料的流变性能偏低。另外,该材料的缺点是复合颗粒仍处于堆栈状态,颗粒尺寸大,悬浮液的抗沉降性不能获得改善。

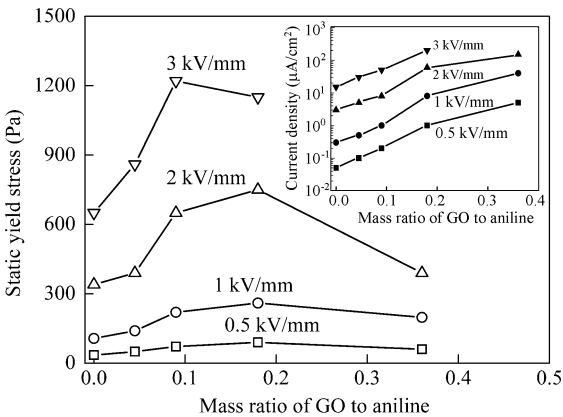


Fig. 3 Static yield stresses of suspensions of PAG sheets synthesized by different mass ratios of GO to aniline under various electric field strengths

The inset is corresponding current density of suspensions of PAG sheets synthesized by different mass ratios of GO to aniline under various electric field strengths. ($T = 23^{\circ}\text{C}$, particle volume fraction = 10 vol%)^[41] (Adapted by permission of Royal Society of Chemistry)

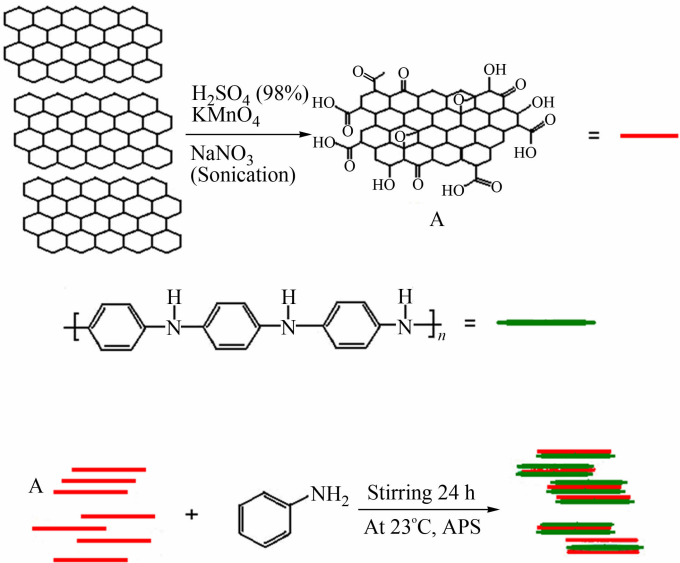


Fig. 4 The reaction process of colloidal graphene oxide/polyaniline nanocomposites^[42] (Adapted by permission of Royal Society of Chemistry)

上的氨基发生反应生成复合产物,进一步通过水合肼还原便可得到 GNS-CS 复合材料. 图 7 显示了该复合材料的透射电镜照片,可以看到不同于纯石墨烯,GNS-CS 上有清晰的壳聚糖颗粒存在. 将该复合材料分散在硅油中,在电场作用下颗粒可形成沿电场方向取向的链状结构(如图 8 (b)),表明复合颗粒具有良好的电场响应能力,但作者并未给出悬浮液的流变性能. 此外,应该说明的是比较上述的聚合物半导体,聚合物电解质

2 石墨烯/极性聚合物复合电流变材料

除了聚合物半导体外,聚合物电解质是另一大类有机电流变材料. 聚合物电解质的大分子长链上含有极易被极化或解离的极性基团,比如氨基(NH₂)、羟基(OH)、氰基(NHCN)等,其电流变效应的产生源于极性基团或吸附离子而诱导的高极化率,典型的聚合物电解质有:天然的极性高分子化合物如藻酸、明胶、动物胶、葡萄糖、淀粉、壳聚糖等,合成的极性高分子化合物如各种纤维素的衍生物,聚苯乙烯磺酸盐、聚丙烯酸、聚甲基丙烯酸等^[44].

最近, Hu 等在 *N,N*-二甲基甲酰胺介质中利用微波辐照合成了壳聚糖/还原的氧化石墨烯(GNS-CS)复合材料^[45]. 图 6 给出了 GNS-CS 的制备示意图,在微波辐照下 GO 上的羧基与壳聚糖

容易吸收水分,作为电流变材料其温度稳定性是需解决的重要问题. 石墨烯具有好的热学性质,因此将极性聚合物电解质与石墨烯复合有望改善聚合物电解质电流变液的温度稳定性.

除了形成二维片层状复合颗粒外,Zhang 等通过分散聚合技术制备了带正电的聚苯乙烯(PS)微球,而后与荷负电的 GO 胶体作用制备了一种 GO 包裹 PS 三维复合微球(PS/GO)^[46]. 图 9 显示了该微球的制备示意图. 从图 10 可以看出,

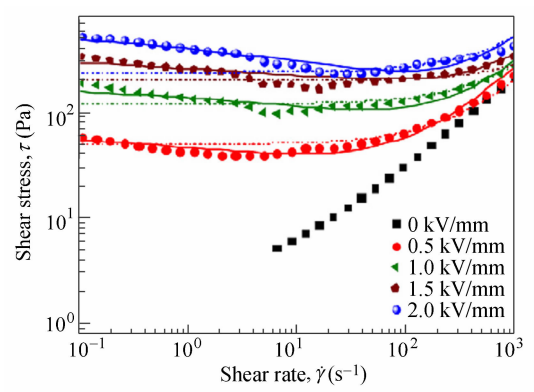


Fig. 5 Shear stress versus shear rate for GO/PANI composite particles (10 vol% particle concentration) based ER fluid under different electric field strengths Solid, dotted lines are from CCJ model and Bingham model^[43] (Adapted by permission of Royal Society of Chemistry)

包覆 GO 后,形成的 PS/GO 微球的表面变得粗糙.流变性能测试表明 PS/GO 微球与硅油形成的悬浮液在电场作用下剪切应力升高,具有电流变活性,但相比于上述的 GO/PANI 体系,这种 GO 包裹的 PS 复合微球悬浮液的电流变性能仍偏低,这可能与 PS 基本不具有电流变活性有关.然而,这种通过 GO 包裹改变颗粒表面性质对电流变性能的影响值得进一步研究.

3 石墨烯/碳复合电流变材料

碳材料是另一个典型的电流变材料,它们大部分也是通过不同有机物碳源受热处理获得,这些碳源包括煤炭、液化煤、焦煤、石油、树脂、炭黑、石蜡、沥青、焦油、多环芳烃化合物(萘、联苯、萘磺酸、磺酸萘、菲磺酸等)和聚合物(聚乙烯、聚甲

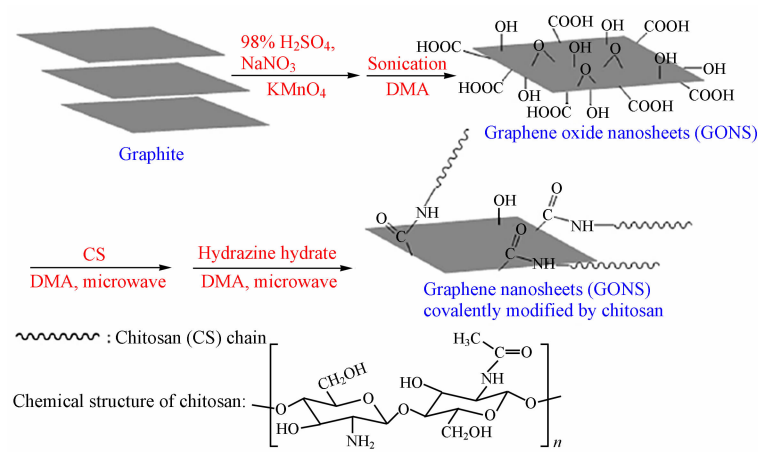


Fig. 6 Schematic of the formation procedure for the CS chains grafting onto the surface of graphene nanosheets^[45] (Adapted by permission of Elsevier)

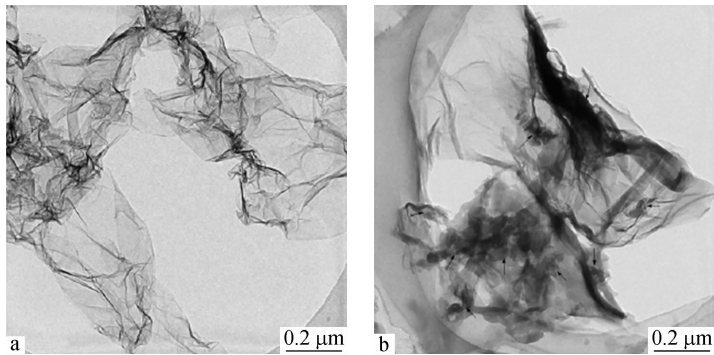


Fig. 7 TEM images of GNS and GNS-CS nanocomposites The black arrows indicate the existence of chitosan on the surface of GNS^[45] (Adapted by permission of Elsevier)

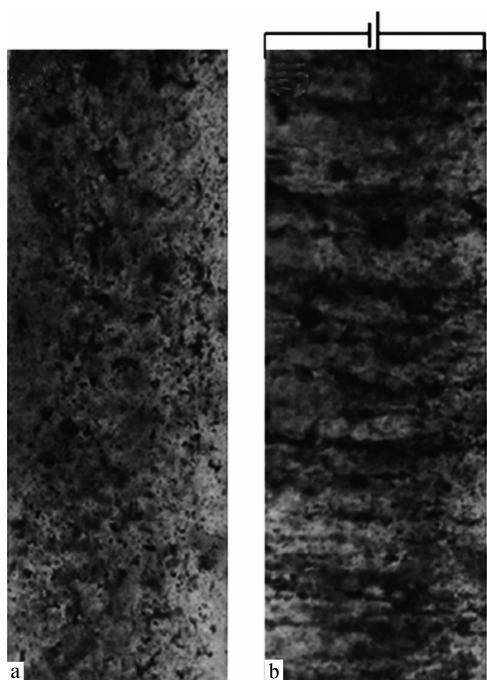


Fig. 8 ER behaviors of GNS-CS nanocomposites dispersed in silicon oil (0.33 wt%) between two electrodes under an applied electric field of (a) 0 kV/cm and (b) 1.2 kV/cm^[45] (Adapted by permission of Elsevier)

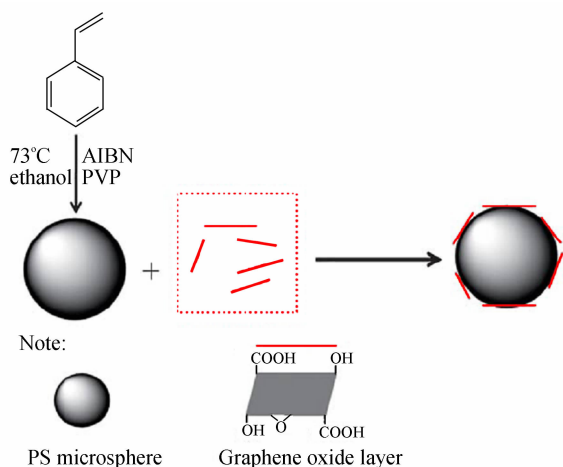


Fig. 9 Synthesis schematic of polystyrene-graphene-oxide core-shell structured nanocomposite^[46] (Adapted by permission of Royal Society of Chemistry)

基丙烯酸酯、聚氯乙烯、酚醛树脂和聚丙烯腈等)。碳材料的结构通常非常复杂,有些类似于聚合物半导体,其电流变效应的产生可能源于电子或空穴电导而引起的界面极化^[3]。同时,最近发现一些具有特殊纳米结构的碳质材料具有明显更强的电流变性能,如多孔碳、含碳纳米管等^[25,47]。

最近,我们通过将氧化石墨烯/导电聚苯胺

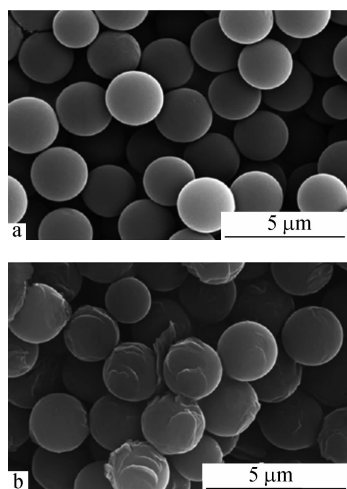


Fig. 10 SEM images of (a) PS and (b) PS/GO nanocomposite^[46] (Adapted by permission of Royal Society of Chemistry)

(PAGO)薄片在真空中碳化获得了一种石墨烯为芯/无定型碳为壳的三明治型二维纳米全碳复合介电薄片^[48]。扫描电镜显示经过真空碳化后复合薄片的形貌未发生明显变化,透射电镜(如图11(a,b))显示薄片表面覆盖的碳具有无定型碳结构,但电子衍射出现弱的与单层石墨烯相同的六重对称衍射花样,表明薄片内部确实具有石墨烯芯。该全碳复合薄片具有比单纯的由PANI在相同条件下转化的含碳颗粒(如图11(c,d))具有更强的电流变活性,如图12可以看出在同等电场强度作用下,薄片悬浮液的静态屈服应力约为纯碳颗粒的3倍以上。同时,薄片悬浮液的静态屈服应力(τ_s)与电场强度(E)的依赖关系 $\tau_s \propto E^\alpha$ 中指数 $\alpha = 1.29 \pm 0.02$,明显低于颗粒体系的 $\alpha = 1.44 \pm 0.02$ 。这一特征被认为主要来自于颗粒形貌的影响,因为研究发现在电磁场作用下,含有各向异性形貌的颗粒流体的屈服应力经常具有比球形颗粒流体更小的指数 α 。更小的指数 α 表明了具有高长径比的颗粒可以在低电场下具有更强的电场可调节能力。此外,介电分析表明利用石墨烯/碳复合薄片具有比单纯的碳颗粒更强的极化强度和更快的极化速率,这主要被归因于石墨烯的高导电率。虽然利用片状石墨也可提高颗粒的极化性质,但研究发现颗粒的尺寸太大,流体的悬浮稳定性差。因此,利用石墨烯特殊形貌和优异的电学性质,与含碳材料复合制备新颖的全碳复合电流变材料可明显改善当前含碳材料的电流变行为。

另外,与由 PAGO 薄片经水合肼还原处理制得的 PAG 薄片比较,真空热处理 PAGO 薄片转化成的石墨烯/无定型碳复合薄片的电流变活性有

一定提高,特别由于碳的热稳定性优于聚苯胺,因此比较 PAG 薄片,希望这种石墨烯/无定型碳复合薄片的电流变效应具有更好的温度稳定性.

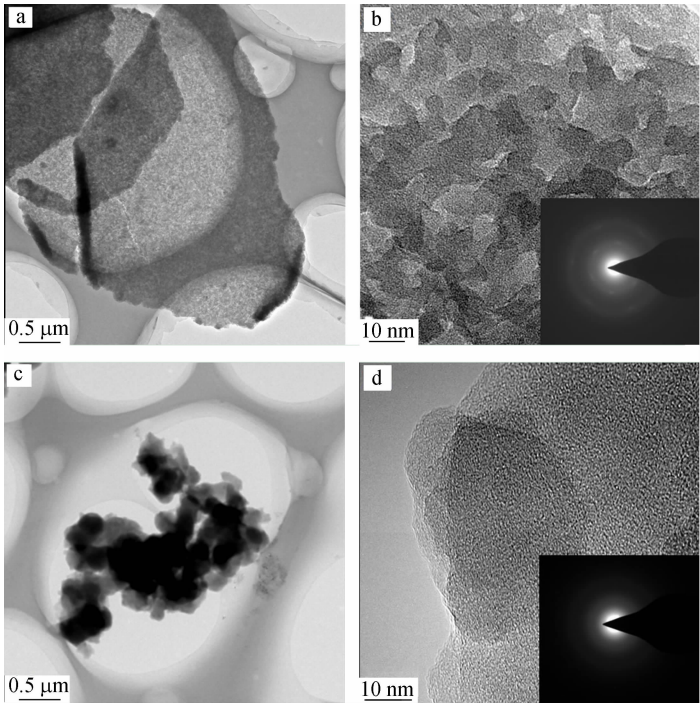


Fig. 11 SEM and TEM images and corresponding SAED patterns of graphene-supported carbonaceous sheets (a, b) and pure carbonaceous particles (c, d) ^[48] (Adapted by permission of Elsevier)

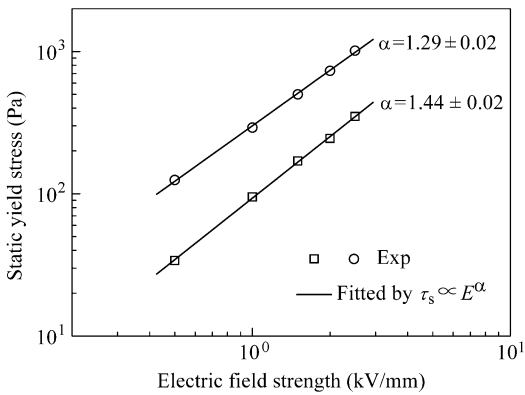


Fig. 12 Static yield stress as a function of electric field strength for the suspension of graphene-supported carbonaceous sheets (open points) and the suspension of pure carbonaceous particles (solid points) ($T = 20^\circ\text{C}$, 10 vol%) ^[48] (Adapted by permission of Elsevier)

4 总结

基于纳米颗粒的非传统电流变材料已成为当前电流变学领域的研究热点,特别是具有各向异性形貌的纳米颗粒电流变流体被发现具有明显增

强的电流变效应. 本文简要介绍了最近基于石墨烯的二维纳米复合电流变材料的研究进展,包括石墨烯/半导体聚合物、石墨烯/极性聚合物、石墨烯/碳等几种典型的电流变材料的制备、结构和电流变行为. 结果表明相比于纳米纤维,二维纳米片材料除具有同样强的长轴极化外,还具有更大的垂直于长轴方向的截面积,这样在外电场作用下由于纳米片的取向排列,对垂直于外电场方向的流场而言会产生比纳米纤维更大的流阻. 同时由于截面积更大,纳米片互相接触时颗粒间摩擦力也会变得更强,这样将会更大的提升流体的场致剪切能力. 而利用石墨烯作为支撑材料,除了可以制备出具有二维纳米片结构的复合电流变颗粒外,石墨烯还具有优异的电学性质和热学性质,这对提高复合颗粒的电场极化强度,并改善颗粒的热稳定性有促进作用. 当前基于石墨烯制备新颖的复合电流变材料仍处于初探阶段,进一步深入研究基于石墨烯的二维纳米复合电流变材料值得关注.

REFERENCES

- 1 Halsey T C. Science, 1992, 258: 761 ~ 766
- 2 Couter S P, Weiss K D, Carlson J D. J Intelligent Mater Syst Struct, 1993, 4: 248 ~ 287
- 3 Hao T. Adv Mater, 2001, 13: 1847 ~ 1857
- 4 Zhao X P, Yin J B. J Ind Eng Chem, 2006, 12: 184 ~ 198
- 5 Zhao X P, Yin J B. Chem Mater, 2002, 14: 2258 ~ 2263
- 6 Yin J B, Zhao X P. Chem Mater, 2004, 16: 321 ~ 328
- 7 Wen W J, Huang X X, Yang S H, Lu K Q, Sheng P. Nat Mater, 2003, 2: 727 ~ 730
- 8 Lu K Q, Shen R, Wang X Z, Sun G, Wen W J, Liu J X. Chin Phys, 2006, 15: 2476 ~ 2480
- 9 Yin J B, Zhao X P. Chem Phys Lett, 2004, 398: 393 ~ 399
- 10 Cao G J, Shen M, Zhou L W. J Solid State Chem, 2006, 179: 1565 ~ 1568
- 11 Qiao Y P, Yin J B, Zhao X P. Smart Mater Struct, 2007, 16: 332 ~ 339
- 12 Wang B X, Zhao Y, Zhao X P. Colloids Surf A, 2007, 295: 27 ~ 33
- 13 Liu X H, Guo J J, Cheng Y C, Xu G J, Li Y, Cui P. Rheol Acta, 2010, 49: 837 ~ 841
- 14 Wen W J, Huang X X, Sheng P. Appl Phys Lett, 2004, 85: 299 ~ 301
- 15 Yatsuzuka K, Miura K, Kuramoto N, Asano K. IEEE Trans IAS, 1995, 31: 457 ~ 460
- 16 Asano K, Suto H, Yatsuzuka K. J Electrostat, 1997, 40-41: 573 ~ 578
- 17 Kanu R C, Shaw M T. J Rheol, 1998, 42: 657 ~ 663
- 18 Otsubo Y. Colloids Surf A, 1999, 153: 459 ~ 466
- 19 Tsuda K, Takeda Y, Ogura H, Otsubo Y. Colloids Surf A, 2007, 299: 262 ~ 267
- 20 Qi Y B, Wen W J. J Phys D Appl Phys, 2002, 35: 2231 ~ 2235
- 21 Yin J B, Zhao X P. Nanotechnology, 2006, 17: 192 ~ 196
- 22 Lin C, Shan J W. Phys Fluids, 2007, 19: 121702-1 ~ 4
- 23 Yin J B, Zhao X P, Xia X, Xiang L Q, Qiao Y P. Polymer, 2008, 49: 4413 ~ 4419
- 24 Bell R C, Karli J O, Vavreck A N, Zimmerman D T, Ngatu G T, Wereley N M. Smart Mater Struct, 2008, 17: 015028 (6pp)
- 25 Yin J B, Xia X, Xiang L Q, Zhao X P. Carbon, 2010, 48: 2958 ~ 2967
- 26 Cheng Y C, Wu K H, Liu F H, Guo J J, Liu X H, Xu G J, Cui P. ACS Appl Mater Interf, 2010, 2: 621 ~ 624
- 27 Yin J B, Xia X, Xiang L Q, Qiao Y P, Zhao X P. Smart Mater Struct, 2009, 18: 095007 (11pp)
- 28 Xia X, Yin J B, Qiang P F, Zhao X P. Polymer, 2011, 52: 786 ~ 792
- 29 Ramos-Tejada M M, Espin M J, Perea R, Delgado A V. J Non-Newtonian Fluid Mech, 2009, 159: 34 ~ 40
- 30 Yin J B, Xia X, Xiang L Q, Zhao X P. J Mater Chem, 2010, 20: 7096 ~ 7099
- 31 Zimmerman D T, Bell R C, Filer J A, Karli J O, Wereley N M. Appl Phys Lett, 2009, 95: 014102 (3pp)
- 32 López-López M T, Kuzhir P, Bossis G. J Rheol, 2009, 53: 115 ~ 126
- 33 Kuzhir P, López-López M T, Bossis G. J Rheol, 2009, 53: 127 ~ 151
- 34 de Vicente J, Vereda F, Segovia-Gutiérrez J P. J Rheol, 2010, 54: 1337 ~ 1362
- 35 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A. Science, 2004, 306: 666 ~ 669
- 36 Allen M J, Tung V C, Kaner R B. Chem Rev, 2010, 110: 132 ~ 145
- 37 Park S D, Lee S W, Kang S, Bang I C, Kim J H, Shin H S, Lee D W, Lee D W. Appl Phys Lett, 2010, 97: 023103 (3pp)
- 38 Xu Z, Gao C. ACS Nano, 2011, 5: 2908 ~ 2915
- 39 Eswaraiah V, Sankaranarayanan V, Ramaprabhu S. ACS Appl Mater Interf, 2012, 3: 4221 ~ 4227
- 40 Gow C J, Zukoski C F. J Colloid Interface Sci, 1990, 136: 175 ~ 188
- 41 Yin J B, Wang X X, Chang R T, Zhao X P. Soft Matter, 2012, 8: 294 ~ 297
- 42 Zhang W L, Park B J, Choi H J. Chem Commun, 2010, 46: 5596 ~ 5598
- 43 Zhang W L, Liu J D, Choi H J. Carbon, 2012, 50: 290 ~ 296
- 44 Block H, Kelly J P. J Phys D Appl Phys, 1988, 21: 1661 ~ 1677
- 45 Hu H, Wang X, Wang J, Liu F, Zhang M, Xu C. Appl Surf Sci, 2011, 257: 2637 ~ 2642
- 46 Zhang W L, Liu Y D, Choi H J. J Mater Chem, 2011, 21: 6916 ~ 6921
- 47 Qiao Y P, Zhao X P. Colloids Surf A, 2009, 340: 33 ~ 39
- 48 Yin J B, Shui Y J, Chang R T, Zhao X P. Carbon, 2012, 50: 5247 ~ 5255

ELECTRORHEOLOGICAL MATERIALS BASED ON
GRAPHENE/POLYMER NANOCOMPOSITES

Jian-bo Yin, Xiao-peng Zhao

(Smart Materials Lab, Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129)

Abstract Electrorheological (ER) smart fluids can rapidly and reversibly response to an external electric field by transmitting rheological properties, which have many potential technical applications. However, conventional ER fluids based on microparticles are subjected to challenges in practical applications due to the problems including large particle sedimentation and low electric-field-induced yield strength. Recent researches of using nanoparticles as the dispersal phase have led to new interest in the development of non-conventional ER fluids with improved electrorheology. In this brief review, we especially focus on the recent researches on preparation, structure and electrorheology of two-dimensional graphene-based composites including graphene/semiconducting polymer, graphene/polar polymer and graphene/carbonaceous composites. The results have showed that using graphene as host to prepare novel two-dimensional ER materials possibly provide a potential approach to develop high-performance ER fluids due to the advantages of the atomically thick two-dimensional structure, excellently electric and thermal properties.

Keywords Electrorheology, Graphene, Nanocomposites