

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.03.026

纳米二硫化钼制备及对 PA66 的改性

张青¹, 张雨溪², 张斌¹, 刘聪聪¹

(1. 淄博市产品质量检验研究院, 山东淄博 255063; 2. 青岛科技大学化学与分子工程学院, 山东青岛 266042)

摘要:以实验室合成的三氧化钼纳米带为前驱体,采用传统的溶剂热制备法,制备纳米二硫化钼(MoS₂)材料,并通过向反应溶剂中添加不同种类的修饰剂进行优化。分别以阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、非离子型表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为修饰剂在合成过程中对纳米 MoS₂ 进行优化,探究修饰剂类型对纳米 MoS₂ 材料形貌及结构的影响,最后将 PVP 修饰的纳米 MoS₂ (P-MoS₂) 材料作为塑料改性剂应用到尼龙(PA)66 上,研究其对 PA66 塑料耐磨及热力学性能的影响。采用 X 射线衍射、扫描电子显微镜、傅立叶变换红外光谱等手段对材料进行形貌及结构分析,以探究不同修饰剂及配比对产物结构形貌的影响。结果表明,纳米 P-MoS₂ 材料粒径均为 50 nm 左右,颗粒大小均匀,具有很好的分散性,而未添加修饰剂、添加 CTAB 和 SDBS 两种修饰剂形成的 MoS₂ 纳米粒子颗粒存在聚集现象。结果表明,其纳米 P-MoS₂ 改性 PA66 的耐磨性能随着纳米 P-MoS₂ 添加量增大而逐步提高,在纳米 P-MoS₂ 质量分数为 9% 时,PA66 的耐磨性能最佳。随着纳米 P-MoS₂ 含量的增加,PA66 的拉伸强度、弯曲强度、热变形温度逐步提高,同时断裂伸长率和缺口冲击强度逐步下降。

关键词: 纳米 MoS₂; 修饰剂; 分散度; 尼龙 66; 改性

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)03-0147-06

Preparation of Nano Molybdenum Disulfide Material and Its Modification to PA66

Zhang Qing¹, Zhang Yuxi², Zhang Bin¹, Liu Congcong¹

(1. Zibo Product Quality Inspection and Research Institute, Zibo 255063, China;

2. College of Chemistry and Molecular Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract : Using the molybdenum trioxide nanobelt synthesized in the laboratory as the precursor, the traditional solvothermal preparation method was used to prepare the nano-molybdenum disulfide (MoS₂) material, and it was optimized by adding different kinds of modifiers to the reaction solvent. The anionic surfactant sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS), the cationic surfactant cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), and the nonionic surfactant polyvinylpyrrolidone (PVP) were used as the modifier optimizes nano-molybdenum disulfide (nano-MoS₂) in the synthesis process, and explores the effect of modifier type on the morphology and structure of nano-MoS₂ materials. Finally, the optimized nano-MoS₂ material was applied to polyamide (PA) 66 as a plastic modifier to study its effect on the wear resistance and thermodynamic properties of PA 66. Using X-ray diffraction, scanning electron microscope, Fourier transform infrared and other methods to analyze the morphology and structure of the material to explore the influence of different modifiers and ratios on the structure and morphology of the product. The results show that the particle size of the PVP-modified nano-MoS₂ (P-MoS₂) material is 50 nm. The particle size is uniform and has good dispersibility, while the MoS₂ nanoparticles formed by adding two modifiers, CTAB and SDBS, without the addition of modifiers, have aggregation phenomenon, and the MoS₂ nanoparticles formed by PVP have uniform size and good dispersion. The nano P-MoS₂ particles were applied to PA 66 as a modifier. The test results show that, its wear resistance gradually improves with the increase of the addition amount of nano P-MoS₂. When nano P-MoS₂ addition amount is 9%, PA66 has the best wear resistance. As the amount of P-MoS₂ increases, the tensile strength, flexural strength, and thermal deformation temperature of PA 66 gradually increase, and at the same time it causes the elongation at break and the notched impact strength to decrease.

Keywords : nano MoS₂; modifier; dispersion degree; polyamide 66; modification

通信作者: 张斌,正高级工程师,主要从事化工及塑料产品技术研发及检验

收稿日期: 2022-01-15

引用格式: 张青,张雨溪,张斌,等. 纳米二硫化钼制备及对 PA66 的改性 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(3):147-152.

Zhang Qing, Zhang Yuxi, Zhang Bin, et al. Preparation of nano molybdenum disulfide material and its modification to PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):147-152.

二硫化钼 (MoS_2) 是一种典型的层状过渡金属硫化物材料, Tenne 等^[1-2]于1992年在Nature上首次发表具有类富勒烯和纳米管结构的 WS_2 , 随后一年又研究出无机类富勒烯 MoS_2 , 引起了研究者极大的研究兴趣, 成为材料领域的研究热点。由于纳米 MoS_2 材料的应用价值能满足诸多领域的使用要求, 因此国内外出现了多种纳米 MoS_2 材料的制备方法, Li 等^[3]发现 MoCl_5 与硫单质反应, 通过控制沉积位置、沉积温度和载气流量可以得到不同形貌的 MoS_2 , 但是产物纯度不高, 反应条件苛刻, 产物的形貌也较难实现控制。Phototransistors^[4]采用微机械剥离法制备出 MoS_2 薄层, 通过对 MoS_2 粉末进行反复的剥离来制备具有原子级厚度的材料, 此方法虽然可以剥离得到原子级厚度的材料, 但是由于制备效率不高且重复性不好, 因此难以实现大规模生产利用。Afanasiev 等^[5]采用 $(\text{NH}_4)_2\text{MoS}_4$ 和 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ 为原料, 添加阳离子型表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 优化获得分散性较好的纳米 MoS_2 材料, 更易实现工业化大规模制备。但是纳米 MoS_2 在空气中易发生氧化且在非极性介质中易团聚较难分散等问题仍未解决, 需要对其进行继续优化, 提高 MoS_2 材料稳定性及颗粒分散度, 并探索其应用。笔者分别以十二烷基苯磺酸钠 (SDBS)、CTAB、聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 为修饰剂对纳米 MoS_2 进行优化, 在此基础之上, 将用 PVP 修饰后的 MoS_2 纳米粒子作为塑料改性剂应用到 PA66 中, 探究合成的纳米 MoS_2 材料对 PA66 耐磨及热力学等性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SDBS: 分析纯, 天津博迪化工股份有限公司;

CTAB, PVP, 钼酸钠 ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 盐酸: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司;

丙酮、无水乙醇、硫氰酸钾: 分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司;

PA66: II 型, 无锡欣翔尼龙有限公司。

1.2 主要设备及仪器

磁力搅拌油浴锅: SHJ-2 型, 常州市江南实验仪器厂;

高速台式冷冻离心机: TGL-16M 型, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

真空干燥箱: DZF-6020 型, 上海一恒科学仪器有限公司;

控温电热套: KDM 型, 鄞城华鲁电热仪器有限公司;

电热鼓风干燥箱: 101 型, 北京市永光明医疗仪器厂;

超声清洗机: NRQX-10C 型, 淄博纳瑞仪器有限公司;

X 射线衍射 (XRD) 仪: XD-6 型, 北京普析通用仪器有限责任公司;

扫描电子显微镜 (SEM): Sirion200 型, 荷兰飞利浦公司;

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Nicolet iS5 型, 美国赛默飞尼高力仪器公司;

高速混合机: SHR-100A 型, 张家港白熊科美机械有限公司;

自动加料挤出系统: STS50 型, 科倍隆 (南京) 机械有限公司;

注塑机: HTF90W1 型, 宁波海天集团股份有限公司;

万能试验机: AGS-J 型, 日本岛津公司;

冲击试验机: XJJ-50 型, 承德金建检测仪器有限公司;

热变形维卡软化温度测定仪: HDT/V-3216 型, 承德市金建检测仪器有限公司;

摩擦磨损试验机: MME-2 型, 济南思达测试技术有限公司。

1.3 MoO_3 及纳米 MoS_2 的制备及改性方法

参考文献 [6] 制备 MoO_3 : 将一定量 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 于去离子水充分溶解, 向溶液滴加盐酸调节 $\text{pH} \leq 1$, 在 180°C 下, 于聚四氟乙烯内衬的反应釜中进行水热反应 24 h。反应后产物进行离心分离, 所得白色沉淀即得 MoO_3 , 经去离子水和无水乙醇洗涤至上层液体澄清。在真空干燥箱 80°C 下干燥 12 h, 备用。

纳米 MoS_2 材料的制备: 将三种修饰剂分别与上述合成的 MoO_3 按一定质量比用去离子水溶解搅拌均匀, 加入适量的硫氰酸钾搅拌均匀, 转移至聚四氟乙烯内衬的反应釜, 进行水热反应, 反应温度 200°C 、反应时间 24 h, 得到纳米 MoS_2 产物经离心分离, 沉淀用去离子水及丙酮进行洗涤, 经真空干燥箱干燥, 备用。不同类型的修饰剂对应反应产物如下: 不添加修饰剂 (记为 MoS_2), 添加 SDBS (记为 S- MoS_2), 添加 CTAB (记为 C- MoS_2), 添加 PVP (记为 P- MoS_2)。

1.4 纳米 MoS_2 在塑料中的应用

将 PVP 修饰后的 MoS_2 纳米粒子 (P-MoS_2) 作为塑料改性剂应用到 PA66 中,探究纳米 P-MoS_2 不同添加量对 PA66 性能的影响。纳米 P-MoS_2 材料与 PA66 分别按 3 : 97, 6 : 94, 9 : 91 和 12 : 88 的质量比在高速混合机中均匀搅拌,然后熔融共混,加工成型试样。

1.5 测试与表征

(1) XRD 分析。

采用 XRD 仪分析实验室制备的 MoO_3 纳米带的晶体结构。

(2) FTIR 分析。

采用 FTIR 仪对修饰后的纳米 MoS_2 材料中所含的官能团类型及含量进行测定。

(3) SEM 分析。

采用 SEM 对 MoO_3 纳米带以及未修饰和修饰后的纳米 MoS_2 材料的表观形貌进行测定,经 NanoMeasurer1.2 软件计算粒径分布。

(4) 摩擦、热性能及力学性能。

摩擦性能按 GB/T 3960-2016 测试;

拉伸性能按 GB/T 1040.2-2006 测定,拉伸速率 50 mm/min ;

弯曲性能按 GB/T 9341-2008 测试,试验速度 2 mm/min ;

冲击性能按 GB/T 1043.1-2008 测试,冲击能量 2.75 J,缺口 A 型;

热变形温度按 GB/T 1634.2-2019 测试。

2 结果与讨论

2.1 MoO_3 纳米带的表征分析

(1) XRD 表征。

实验室制备的 MoO_3 纳米带的 XRD 谱图如图 1 所示。由图 1 可见,产物在 2θ 为 12.8° , 25.7° , 39.6° 等处有 $\alpha\text{-MoO}_3$ 相的特征衍射峰,且未检测出其它化合物的特征峰,因此产物为纯度较高且晶型较好的 $\alpha\text{-MoO}_3$ 。其中在 12.8° , 25.7° , 39.6° 处对应

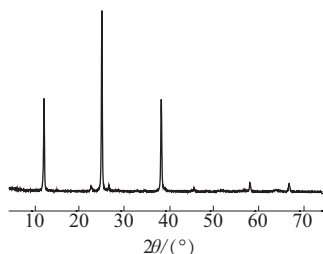
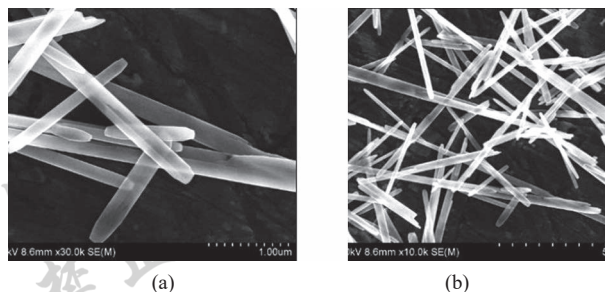


图 1 MoO_3 的 XRD 谱图

的 $\alpha\text{-MoO}_3$ 相的 (020)、(040)、(060) 晶面,这 3 个衍射峰强度比其它衍射峰的更强,说明制备的 $\alpha\text{-MoO}_3$ 沿着 (020)、(040)、(060) 晶面生长,表明 $\alpha\text{-MoO}_3$ 具有各向异性,晶体向纳米带结构的一维方向生长^[8]。

(2) SEM 表征。

制备 MoO_3 的 SEM 照片见图 2。由 SEM 照片可见, MoO_3 为纤长的纳米带,均具有形貌均一的棒状或带状结构,图 2a 中纳米带长度为 100 ~ 500 nm,宽度 1 ~ 10 nm,也证明了 MoO_3 沿着某一晶面生长的特性,这一结果与 XRD 表征结果相符,也直接证明了产物为 MoO_3 。由图 2b 可以看出,纳米带没有明显的重叠现象,而是相互交叉,分散较均匀,间接表明了生成的 MoO_3 具有各向异性的特征。



标尺长度: a—1 μm ; b—5 μm

图 2 MoO_3 纳米带的 SEM 照片

2.2 修饰剂类型对纳米 MoS_2 结构性质的影响

不同类型的官能团造成修饰剂与纳米 MoS_2 之间相互作用力大小有差别,为了探究不同种类修饰剂对纳米 MoS_2 结构性质的影响,分别采用 SDBS, CTAB, PVP 3 种表面活性剂作为合成纳米 MoS_2 的修饰剂,并采用 FTIR, SEM 等表征手段,对合成产物进行分析表征,从而选取最适合的修饰剂,用于纳米 MoS_2 的制备与改性。

(1) FTIR 分析。

将引入修饰剂后的反应产物同相应修饰剂的 FTIR 谱图进行对比,峰强度代表修饰剂在纳米 MoS_2 表面的含量大小,以探究修饰剂有多少能修饰在纳米 MoS_2 表面。

图 3 为产物 S- MoS_2 和修饰剂 SDBS 的 FTIR 谱图。对于 SDBS 的 FTIR 谱图,其中在 $2950 \sim 2850 \text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰,为 —C—H 的伸缩振动特征吸收峰,在 1450 cm^{-1} 处为苯环 C=C 骨架振动的特征峰,在 $1190 \sim 1068 \text{ cm}^{-1}$, $620 \sim 530 \text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰为磺酸基团特征峰, $1220 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 处的双峰是磺酸基团的特征峰。对于为 S- MoS_2 的 FTIR

谱图,发现仅在 $1200, 1060\text{ cm}^{-1}$ 处有两个弱峰,为修饰剂中苯磺酸基团特征吸收峰,吸收峰较弱,说明 SDBS 仅能少量修饰在 MoS_2 表面^[9]。

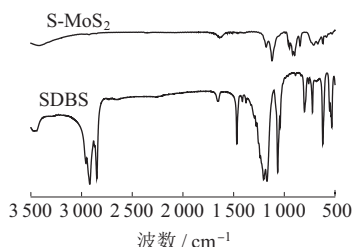


图3 S-MoS₂与SDBS的FTIR谱图

图4为CTAB改性后产物C-MoS₂与修饰剂CTAB的FTIR谱图。其中CTAB在 $2921, 2850\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为CTAB中 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2$ 的伸缩振动峰,在 1460 cm^{-1} 处的振动吸收峰,为铵基的特征峰。而C-MoS₂峰强度明显减弱接近消失,相应官能团数量减少,因此CTAB未成功包覆在MoS₂表面,不适合作为修饰MoS₂的修饰剂。

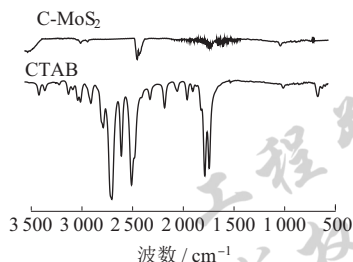


图4 C-MoS₂与CTAB的FTIR谱图

图5是PVP改性后产物P-MoS₂与修饰剂PVP的FTIR谱图。由图5可见,在 $1660, 1470, 1280\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰分别为 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}=\text{C}$ 、 $\text{C}-\text{N}$ 的伸缩振动特征峰,从二者的FTIR谱图中对比可以看出,均具有 $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}=\text{C}$ 、 $\text{C}-\text{N}$ 官能团,且修饰后产物P-MoS₂三个官能团的峰强度明显强于CTAB和SDBS修饰后产物表面的官能团,这表明PVP更加成功地修饰在MoS₂纳米粒子表面。此外,在 1110 cm^{-1} 处特征峰的强度P-MoS₂比PVP更强,其中 1110 cm^{-1} 是羟基官能团的特征衍射峰,表明PVP在MoS₂颗粒改性过程中不仅仅只存在物理吸

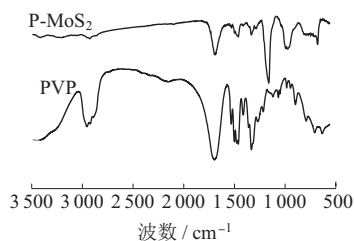
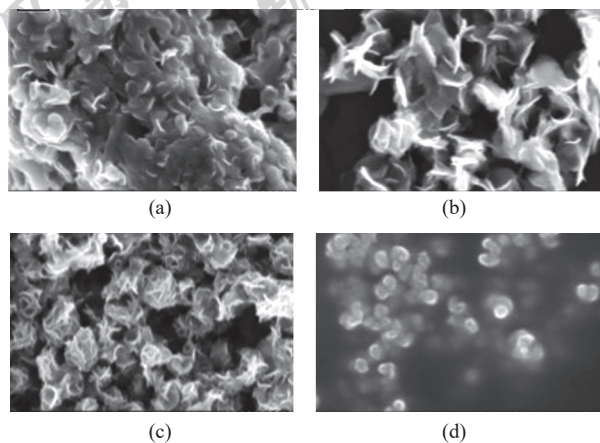


图5 P-MoS₂与PVP的FTIR谱图

附,还与MoS₂颗粒表面生成羟基官能团,结合的羟基官能团会增加PVP与MoS₂颗粒之间的吸附力,使PVP能更牢固更稳定地修饰在MoS₂颗粒表面。

(2) SEM分析。

图6为4种MoS₂材料的SEM照片。由图6a可见,未添加修饰剂的MoS₂表面具有鳞片结构,团聚严重。图6b,图6c分别为S-MoS₂、C-MoS₂两种材料,表面为层状、片状结构,存在片层堆叠现象,与图6a形貌相似程度高。这是因为MoS₂在生成的晶核表面定向生长,不断生成MoS₂片,相互堆叠挤压形成层状的MoS₂。而PVP能更牢固更稳定地修饰在MoS₂颗粒表面,阻隔了MoS₂的聚集堆叠,防止MoS₂纳米粒子进一步长大和团聚,因此由图6d可见,形成了粒径为50 nm左右,颗粒大小均一的MoS₂纳米粒子,结果表明,PVP为纳米MoS₂生成过程中最合适的修饰剂,改变了产物的形貌得到了粒径更小的产物。



a—MoS₂; b—S-MoS₂; c—C-MoS₂; d—P-MoS₂

图6 MoS₂的SEM照片

未添加修饰剂、添加SDBS、CTAB两种修饰剂均出现团聚现象,未能形成MoS₂纳米粒子,添加PVP修饰剂形成的P-MoS₂纳米颗粒大小均一、粒径为50 nm左右,具有较好的分散性,因此将P-MoS₂纳米粒子应用到PA66进行改性。

2.3 纳米P-MoS₂对PA66耐磨性的影响

塑料的耐摩擦性能可以通过摩擦系数和磨耗表现^[11]。表1为添加不同含量纳米P-MoS₂的PA66的摩擦性能。由表1可以看出,在添加P-MoS₂纳米粒子改性之前,PA66的静摩擦系数、动摩擦系数和磨耗数值较大,加入P-MoS₂纳米粒子后,PA66的静摩擦系数、动摩擦系数及磨耗数值降低趋势明显,在质量分数为9%时,PA66的静摩

擦系数、动摩擦系数及磨损数值最低,之后 PA66 的静摩擦系数、动摩擦系数及磨损略微升高。说明在一定添加量范围内,PA66 耐磨性能随着 P-MoS₂ 纳米粒子添加量的增加而明显提高,当 P-MoS₂ 质量分数为 9% 时耐磨性能最佳。纳米 P-MoS₂ 之所以能改善耐磨性能,认为纳米 P-MoS₂ 中 Mo 原子与 S 原子之间是以共价键结合,摩擦时产生的热量使接触面形成金属硫化物薄膜,薄膜使接触表面产生较好的润滑,耐磨性能因此有明显提高。纳米 P-MoS₂ 质量分数超过 9% 后,磨损值又开始增大,可能与形成的薄膜过厚,在摩擦过程中容易剥落有关^[12]。

表 1 添加不同含量纳米 P-MoS₂ 的 PA66 的摩擦性能

P-MoS ₂ /%	静摩擦系数	动摩擦系数	磨损 /g
0	0.71	0.64	0.098
3	0.41	0.32	0.061
6	0.36	0.26	0.053
9	0.32	0.22	0.048
12	0.33	0.24	0.051

2.4 纳米 P-MoS₂ 对 PA66 的力学及热性能的影响

图 7~图 11 分别为不同纳米 P-MoS₂ 含量的 PA66 的拉伸强度、弯曲强度、热变形温度、断裂伸长率以及缺口冲击强度。

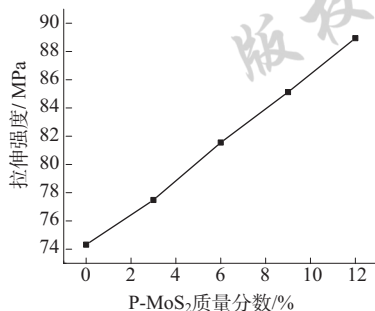


图 7 不同纳米 P-MoS₂ 添加量的 PA66 的拉伸强度

由图 7~图 9 可以看出,随着 P-MoS₂ 纳米粒子添加量增加,PA66 的拉伸强度、弯曲强度和热变形温度逐渐增加。由于 P-MoS₂ 是层状结构,PA66 分子链插入其片层间形成一种复合结构,随着纳米 P-MoS₂ 添加量增加,材料密度增大,PA66 的刚性、硬度和尺寸稳定性随之增强,但 PA66 的断裂伸长率和缺口冲击强度却逐渐下降,由图 10 和图 11 可见。这是由于 PA66 材料在受到冲击时,P-MoS₂ 自身稳定,与 PA66 结合力小,无法吸收更多的冲击能,导致 PA66 材料易断裂,因此断裂伸长率和缺口冲击强度逐渐下降。

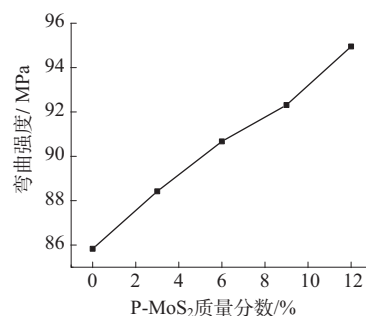


图 8 不同纳米 P-MoS₂ 添加量的 PA66 的弯曲强度

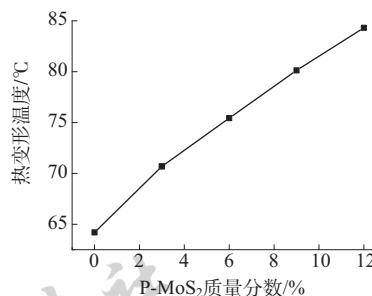


图 9 不同纳米 P-MoS₂ 添加量的 PA66 的热变形温度

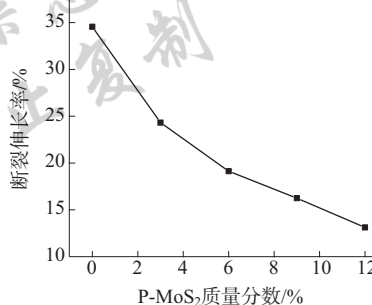


图 10 不同纳米 P-MoS₂ 添加量的 PA66 的断裂伸长率

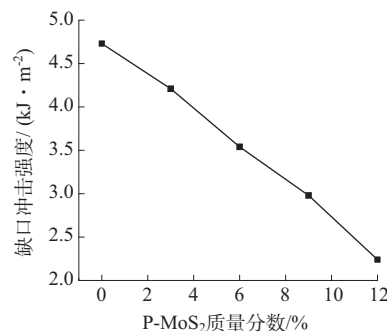


图 11 不同纳米 P-MoS₂ 添加量的 PA66 的缺口冲击强度

3 结论

(1) 修饰剂 PVP 由于与 MoS₂ 表面结合更牢固,可有效阻止 MoS₂ 纳米粒子的团聚,因此形成的 MoS₂ 纳米颗粒大小均一、粒径为 50 nm 左右,具有较好的分散性。未添加修饰剂、添加 SDBS、CTAB 两种修饰剂均出现团聚现象,未能形成 MoS₂ 纳米粒子。

(2) 添加 P-MoS₂ 纳米粒子改性后,在一定添加量范围内,PA66 的耐磨性能随着纳米 MoS₂ 添加

量的增加而逐步提高,在 MoS_2 质量分数为 9% 时, PA66 的耐磨性能最佳。

(3) 添加 P- MoS_2 纳米粒子改性后, MoS_2 的片层结构与 PA66 分子链形成一种复合结构。随着纳米 P- MoS_2 含量的增加, PA66 的拉伸强度、弯曲强度逐步提高,热变形温度逐步增加,同时断裂伸长率和缺口冲击强度逐步下降。

参考文献

- [1] Tenne R, Margulis L, Genut M, et al. Polyhedral and cylindrical structures of tungsten disulphide[J]. *Nature*, 1992, 360:444–447.
- [2] Margulis L, Salitra G, Tenne R, et al. Nested fullerene-like structures[J]. *Nature*, 1993, 365:113–114.
- [3] Li X L, Ge J P, Prof Y D L. Atmospheric pressure chemical vapor deposition: An alternative route to large-scale MoS_2 and WS_2 inorganic fullerene-like nanostructures and nanoflowers[J]. *Chemistry: A European Journal*, 2004, 10:6 163–6 171.
- [4] Phototransistors S M. Single-layer MoS_2 phototransistors[J]. *Acs Nano*, 2011, 6(1):74–80.
- [5] Afanasiev P, Xia G F, Berhault G, et al. Surfactant-assisted synthesis of highly dispersed molybdenum sulfide[J]. *Cheminform*, 1999, 11(11):3 216–3 219.
- [6] Lou X W, Zeng H C. Hydrothermal synthesis of α - MoO_3 nanorods via acidification of ammonium heptamolybdate tetrahydrate[J]. *Chemistry of Materials*, 2002, 14(11):4 781–4 789.
- [7] 刘通昊, 张明祖. 尼龙 66/二硫化钼改性研究[J]. *科技创新与应用*, 2019(2):113–115.
Liu Tonghao, Zhang Mingzu. Study on modification of nylon 66/molybdenum disulfide[J]. *Technology Innovation and Application*, 2019(2):113–115.
- [8] 高宾, 张晓军. 水热法合成 MoO_3 单晶纳米带及其形成机理[J]. *材料导报*, 2017, 31(2):112–116.
Gao Bin, Zhang Xiaojun. Hydrothermal synthesis of single crystal α - MoO_3 nanobelts and their formation mechanism[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(2):112–116.
- [9] 刘海峰, 曾晖, 杨智, 等. 二硫化钼粉体表面改性研究及其应用[J]. *润滑油*, 2015, 30(2):26–30.
Liu Haifeng, Zeng Hui, Yang Zhi, et al. Study on surface modification of molybdenum disulfide powder and its application[J]. *Lubricating Oil*, 2015, 30(2):26–30.
- [10] Zeng X, Qin W. Synthesis of MoS_2 nanoparticles using MoO_3 nanobelts as precursor via a PVP-assisted hydrothermal method[J]. *Materials Letters*, 2016, 182:347–350.
- [11] 孙大野. 聚芳醚砜系列聚合物摩擦学性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
Sun Daye. Study on tribological properties of polyarylethersulfone series polymers[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [12] 朱敏, 张招柱, 王坤, 等. 二硫化钼填充聚酰亚胺复合材料的摩擦学性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2005, 21(5):232–234.
Zhu Min, Zhang Zhaozhu, Wang Kun, et al. Study on the tribological properties of polyimide composites filled with molybdenum disulfide[J]. *Polymeric Materials Science and Engineering*, 2005, 21(5):232–234.
- [13] 何素芹, 吕励耘, 李晓辉, 等. 脱模剂对尼龙 66 的结构与性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2004, 32(7):22–25.
He Suqin, Lyu Liyun, Li Xiaohui, et al. Influence of demolding agent on the structure and properties of nylon 66[J]. *Engineering Plastics Application*, 2004, 32(7):22–25.
- [14] 张友强, 王宝生, 赵付宝, 等. 高流动性碳纤维增强尼龙 66 的制备与性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(8):43–46, 60.
Zhang Youqiang, Wang Baosheng, Zhao Fubao, et al. Preparation and properties of high fluidity carbon fiber reinforced nylon 66[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(8):43–46, 60.
- [15] 崔向红, 陈怀银, 杨涛. 纳米尺寸二硫化钼的制备与应用研究进展[J]. *化学学报*, 2016, 74(5):392–400.
Cui Xianghong, Chen Huaiyin, Yang Tao. Research progress on the preparation and application of nano-sized molybdenum disulfide[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2016, 74(5):392–400.
- [16] 王国栋, 蒋丽娟, 李来平, 等. 二硫化钼润滑剂应用研究进展[J]. *中国钼业*, 2013, 10(5):10–14.
Wang Guodong, Jiang Lijuan, Li Laiping, et al. Advances in research on molybdenum disulfide additive[J]. *China Molybdenum Industry*, 2013, 10(5):10–14.