# 磁流变液组分对其沉降性影响的研究进展

宋世崇 罗一平\* 方启波 王世成

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院 上海 201620)

摘 要 磁流变液是一种形态和性能受外加磁场控制的新型智能材料。在汽车、建筑、医疗、航空航天 多种领域具有重要的应用价值,但磁流变液沉降性问题一直是影响其广泛应用的难题。因此,首先从载液、 磁性颗粒和添加剂三方面出发,简要回顾了近几年在磁流变液沉降性方面的研究,指出了影响磁流变液沉降 性的因素主要有:载液的粘度、磁性颗粒的形状和尺寸、磁性颗粒与载液之间的密度差、添加剂的种类与添加 量等。并给出了有效提高磁流变液沉降性的可行策略,最后从磁流变液的沉降现象与应用方面对沉降性研 究进行了展望。

关键词 磁流变液 沉降性 载液 磁性颗粒 添加剂

### Research Advances in Effect of Magnetorheological Fluid Components on Sedimentation

Song Shichong, Luo Yiping<sup>\*</sup>, Fang Qibo, Wang Shicheng (School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, 201620)

Abstract Magnetorheological fluid (MRF) is a new type of smart material whose morphology and properties are controlled by an external magnetic field. It has important application value in the fields of automobile, construction, medical treatment and aerospace. But the sedimentation of magnetorheological fluid has always been a difficult problem affecting its wide application. Therefore, starting from the three aspects of carrier liquid, magnetic particles and additives, the research on the sedimentation of magnetorheological fluids in recent years is briefly reviewed, and it is pointed out that the main factors affecting the sedimentation of magnetorheological fluids are: the viscosity of the carrier fluid, the shape and size of the magnetic particles, the density difference between the magnetic particles and the carrier liquid, the types and amounts of additives, etc. The feasible strategies to effectively improve the sedimentation of magnetorheological fluids are given. Finally, the sedimentation of magnetorheological fluids is prospected from the perspective of sedimentation phenomena and applications.

Keywords Magnetorheological fluid, Sedimentation, Carrier fluid, Magnetic particles, Additives

磁流变液(Magnetorheological fluid, MRF)是 由磁性颗粒(1~10μm)、载液及添加剂混合制备 而成的悬浮液,在无磁场施加时,磁性颗粒均匀分 散在载液中,当施加磁场后,磁性颗粒能够迅速 (毫秒级)沿磁场方向成链状排列,并具有一定的 剪切屈服应力。因此, MRF 在机械设备上具有很 高的应用价值,根据对 MRF 微观力学性能的研究 以及其反应迅速的特点<sup>[1,2]</sup>, MRF 已经在阻尼 器<sup>[3,4]</sup>、离合器<sup>[5,6]</sup>、抛光<sup>[7,8]</sup>、密封<sup>[9,10]</sup>等设备领 域得到广泛应用;根据 MRF 的亲油疏水性, MRF 可以用来分离水表面浮油<sup>[11]</sup>;根据 MRF 在剪切 和挤压模式下的运动方式, MRF 可以用于触觉元 件中,并在医疗设备中有广阔的应用前景<sup>[12]</sup>;根 据 MRF 磁场易于控制这一特性, MRF 可以被用 于单向传声<sup>[13]</sup>。这都体现了 MRF 在未来将会具 有更广阔的应用前景。

但 MRF 在静置过程中,磁性颗粒会出现沉降 或板结现象,严重影响了 MRF 的力学性能,这将成 为制约 MRF 在机械设备应用上的一大难题。分散 相(磁性颗粒)、连续相(载液)和添加剂作为 MRF

<sup>\*</sup>联系人,罗一平 E-mail:lyp777@sina.com

上海市地方能力建设基金项目(19030501100)资助

<sup>2022-04-14</sup> 收稿, 2022-06-30 接受

的重要组成成分,对 MRF 沉降性具有重大影响。因此,研究人员从这三方面对 MRF 开展研究,在探 索提高 MRF 的沉降性方法的同时,尽可能不影响 MRF 的其他性能(如剪切屈服应力等)。本文回顾 了近几年在 MRF 沉降性方面的研究,从载液、磁性 颗粒、添加剂三个方面出发分析影响 MRF 沉降性 的因素,提出了合理的建议和改进措施,并指出未 来改善沉降性研究的重点方向。

## 1 磁流变液沉降理论及评价方法

#### 1.1 磁流变液沉降理论

在无磁场施加时,MRF 表现为良好的牛顿流体,此时由于载液与磁性颗粒之间存在一定的密度差,且磁性颗粒的密度要大于载液的密度,因此磁性颗粒在重力的作用下会发生沉降。假设磁性颗粒为圆球状,且在下降过程中无相对碰撞,则磁性颗粒在下降过程中受到重力、浮力以及粘度阻力的作用,即:

$$G = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \rho g = \frac{\pi}{6}g\rho d^3 \tag{1}$$

$$F_{\#} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \rho_0 g = \frac{\pi}{6} g \rho_0 d^3$$
(2)

$$f = 3\pi d\eta u \tag{3}$$

其中,d为磁性颗粒的平均粒径, $\rho$ 为磁性颗粒密度, $\rho_0$ 为载液密度, $\eta$ 为载液粘度,u为磁性颗粒沉降速度。

磁性颗粒在载液中先加速后匀速沉降,当匀 速沉降时,可知:

$$G = F_{\mathscr{F}} + f \tag{4}$$

化简可得此时沉降速度为:

$$=\frac{gd^2(\rho-\rho_0)}{18\eta}\tag{5}$$

### 1.2 磁流变液沉降性评价方法

u

评价 MRF 沉降性的方法主要有:观察法、电 感法、电容法、沉降电势法、化学分析法、透光率脉 动检测法。由于 MRF 在静置一段时间后,磁性颗 粒会出现沉降,造成 MRF 出现分层现象,上层为 清液,下层为粘稠液<sup>[14]</sup>。因此观察法常作为研究 MRF 沉降性的一种手段,如图 1 所示,其中沉降 率计算公式为:

$$\lambda = \frac{l_2}{l_1 + l_2} \times 100\%$$
 (6)

式(6)中,*l*<sub>1</sub>为上方清液高度,*l*<sub>2</sub>为下方粘稠液 高度。



图 1 磁流变液沉降率图 Fig. 1 Magnetorheological fluid sedimentation rate diagram

# 2 磁流变液沉降性影响因素分析

影响 MRF 沉降性的因素主要包括两种:(1) 由于磁性颗粒与载液之间存在较大的密度差,从 而导致磁性颗粒出现沉降;(2)在长时间的静置 过程中,由于磁性颗粒所带的电荷以及范德华力 等表面能相互作用的原因,使磁性颗粒产生聚集 并造成的沉降。因此,为了降低磁性颗粒的沉降, 需要对磁性颗粒的形状进行优化设计以及使用合 理的添加剂。

表1列举了近几年具有显著特征的 MRF 的 组成及沉降率,("\"表示无或文章作者没给出, 添加剂用量无特别注释均为占 MRF 总量的比重, "wt"表示质量比,"vol"表示体积比)。下面分别 从载液、磁性材料、添加剂三个方面对 MRF 沉降 性进行具体分析。

### 2.1 载液

目前,载液主要分为油基和水基两大类,在磁 性颗粒和添加剂相同的情况下, Maurya 等<sup>[26]</sup>利用 水基制备的 MRF 沉降率只有 40%,沉降性远小于 Liu 等<sup>[41]</sup>以油基制备的 MRF, 所以对 MRF 载液种 类的研究主要集中在油基方面。目前载液主要以 二甲基硅油为主,这是因为二甲基硅油具有闪点 高、凝固点低、热稳定好、疏水无毒等优点,但也有 研究者以合成油作为载液配制 MRF,并取得一定 进展。Jinaga 等<sup>[25]</sup>尝试以 50(wt)%有机油(棉籽 油和葵花籽油)、25(wt)%硅油和 25(wt)%蜂蜜 为基液、电解铁粉为磁性颗粒、瓜尔胶作为涂覆 层、油酸作为添加剂制备得 MRF,与基于硅油的 MRF相比,沉降率提升了10%左右,静置300h后 的最终沉降率为75%;但棉籽油的稳定性没有硅 油好,且在其熔点在 4℃左右,不能满足 MRF 设 备在低温条件下的应用需求。Cheng 等<sup>[28]</sup>以矿

#### 表1 磁流变液的组分及沉降率

Tab. 1 Stability and composition of MRF

载液	磁性颗粒	添加剂	添加剂用量	时间	沉降率	参考文献
硅油	(carbonyl iron,CI)	二聚酸	2(wt)%	30d	95%	[15]
硅油	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /石墨烯复合粒子	1	١	50h	67%	[16]
硅油	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /石墨烯复合粒子	١	١	15d	84%	[17]
硅油	$CaFe_2O_4$	1	١	15d	78%	[18]
硅油	CI	二氧化硅	١	15d	88%	[19]
液压油	CI	二氧化硅,铝	10(vol)%	14d	91.4%	[20]
硅油	CI	油酸	与 CI 摩尔比为 2:1	20h	97%	[21]
硅油	花状钴粒子	1	١	300min	25%	[ 22 ]
硅油	$\rm MgFe_2O_4$	1	١	15d	81%	[23]
硅油	CI/棒状纳米铁复合粒子	1	١	20h	48%	[24]
棉籽油混合液	电解铁粉	油酸	0.25(wt)%	300h	75%	[ 25 ]
水基	CI	纳米 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	١	20min	40%	[26]
硅油	CI	磁铁矿/海泡石复合材料	0.1(wt)%	48h	60.2%	[ 27 ]
矿物油	CI	二氧化硅	5.05(wt)%	58d	92.4%	[28]
硅油	CI	油酸	2(wt)%	144h	57%	[ 29 ]
液压油	脂肪酸包覆铁颗粒	氧化铁纳米粒子,聚丙烯酸	12(wt)%	115d	80%	[ 30 ]
硅油	CI	十二烷基硫酸钠,硬脂酸	4.5(wt)%	2000h	100%	[31]
硅油	CI	二氧化硅	6.5(wt)%	7 d	98.39%	[ 32 ]
发动机油	CI	硬脂酸	3.2(wt)%	1000h	95%	[33]
硅油	CI	正硅酸四乙酯	6(wt)%	600h	90%	[34]
聚α-烯烃油	CI	粘土岩	2(wt)%	168h	82%	[35]
硅油	铁粉	高真空硅脂	6(wt)%	12h	58%	[36]
合成油	CI	二硫化钼等	3 ( vol ) %	140min	58%	[37]
硅油	CI	硬脂酸	3(wt)%	2000h	90%	[38]
硅油	CI	二氧化硅	3(wt)%	2000h	100%	[ 39 ]
硅油	CI	硬脂酸	3(wt)%	600h	92%	[ 40 ]
硅油	CI	纳米 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	8(wt)%	100h	84%	[41]

物油为载液制备 MRF,静置 58d 后最终沉降率为 92.4%,与 Zhang 等<sup>[19]</sup>的硅油基 MRF 相比沉降率 有一定的提高。Tong 等<sup>[42]</sup>分别以相同粘度、不 同表面张力的离子液体和硅油为载液制备 MRF, 研究表明在较高的磁场强度下,离子液体基 MRF 表现出比硅油基 MRF 更高的剪切屈服强度和更 显著的磁流变效应,这为合成油基 MRF 的制备提 供了新思路。

由式(5)可知,若想提高 MRF 的沉降性,则 应使载液与磁性颗粒具有较小密度差,且应提高 载液的粘度;但由式(3)可得,当粘度增大会导致 磁性颗粒成链时受到的阻力增大,进而会使 MRF 的屈服应力降低,这两者之间是矛盾的。因此,在 选择载液时应具备:(1)载液应具有低的凝固点、 高的沸点以及良好的化学和物理稳定性,以满足 MRF 能够应用到工程设备上;(2)载液与磁性颗 粒的密度差应尽可能的小,以减少颗粒的沉淀; (3)不能一味地提高粘度以追求减少磁性颗粒沉 淀而忽视 MRF 屈服应力的变化。

### 2.2 磁性颗粒

由表1所示,针对磁性颗粒的研究主要集中

在磁性颗粒的种类和形状方面。在种类方面,羰 基铁粉因具有较高的磁饱和强度、较低的磁矫顽 力以及适中的价格,常常被用作制备 MRF 的磁性 材料,但 Wang 等<sup>[17]</sup> 通过化学合成法制备出 MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/石墨烯复合材料作为磁性颗粒,研究发 现该复合材料可有效提高 MRF 的沉降性。在形 状方面, Anupama 等<sup>[43]</sup>利用自制轻质珊瑚网络形 状的钇铁石榴石(图 2(a))作为磁性颗粒制备 MRF,与传统金属铁颗粒基 MRF 相比,其网状结 构有利于降低沉降,且其化学稳定性高,耐热氧化 性强。Maurya 等<sup>[26]</sup>通过在 CI 中加入 1(wt)%的 纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 作为磁性颗粒制备水基 MRF, 与纯 CI 水基 MRF 相比,其具有更高的剪切粘度、剪切应 力和屈服应力(图 2(b)为 CI 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 混合物的 SEM 照片)。Kumaran 等<sup>[44]</sup>采用燃烧合成法合成 软磁杆状锂锌铁氧体颗粒(图2(c))作为磁性颗 粒,以硅油为载液制备 MRF,探究不同磁性颗粒 浓度的 MRF 屈服强度的变化,发现屈服强度随着 外加场强和流体中颗粒浓度的增加而增加。

目前,在磁性颗粒方面,虽然采用磁性复合材



图 2 (a) 为 SEM 下的钇铁石榴石<sup>[43]</sup>; (b) 为 SEM 下的 CI 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 混合物<sup>[26]</sup>; (c) 为 SEM 下的软磁杆状锂锌铁氧体颗<sup>[44]</sup> Fig. 2 (a) Yttrium iron garnet under SEM<sup>[43]</sup>; (b) CI and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> mixture under SEM<sup>[26]</sup>; (c) Soft magnetic rod-shaped lithium zinc ferrite particles under SEM<sup>[44]</sup>

料作为磁性颗粒可以有效提高沉降性,但其制造 工艺复杂,并不适合大批量生产。因此,在选择磁 性颗粒时应注意:(1)具有较高的磁饱和强度以 及较低价格,以提高 MRF 的屈服应力和性价比; (2)选择合适的粒径尺寸以及合理的颗粒形状 (杆状),以提高 MRF 的沉降性;(3)磁性颗粒的 密度应尽可能地接近载液的密度,同时磁性颗粒 也应具备良好的化学和物理稳定性。

### 2.3 添加剂

添加剂分为纳米磁性添加剂和非磁性添加 剂,为了进一步提高 MRF 的力学性能,研究者对 纳米磁性添加剂进行研究。Liu 等<sup>[41]</sup>采用纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>颗粒作为添加剂制备 MRF,研究发现加入 一定量的纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 可以有效提高 MRF 的剪切 屈服应力,但对沉降性的提升不明显。

非磁性添加剂主要分为润滑剂、触变剂及表面活性剂,由于磁性颗粒具有粘附性强、摩擦系数高等特点,导致磁性颗粒呈现易沉降、团聚等现象,因此在 MRF 配制过程中加入润滑剂可以提高MRF 的性能,降低沉降速度。Manzoor 等<sup>[37]</sup>以还原氧化石墨烯(rGO)-MoS<sub>2</sub> 作为添加剂制备的MRF 具有较好的稳定性,并显著提高了 MRF 的屈服和剪切应力特性。

触变剂可在 MRF 内部形成触变网络结构 (如图 3 所示),可以有效阻碍磁性颗粒团聚下 沉,使 MRF 沉降性提升;另一方面,触变结构具有 一定屈服强度,可改变 MRF 流变特性,使 MRF 剪 切屈服应力及零场粘度得到提升。Ashtiani 等<sup>[39]</sup> 研究发现添加二氧化硅可以增加磁流变效应并使 悬浮液稳定超过 2000h。

表面活性剂可以对磁性颗粒表面进行改性, 并使磁性颗粒表面覆盖一层包覆层,从而降低了与 载液之间的密度差,提高 MRF 的沉降性。Yang 等<sup>[15]</sup>利用油酸和二聚脂肪酸作为表面活性剂,在 二聚脂肪酸覆盖的颗粒中观察到了絮凝,从而增强 结构的稳定性。但磁能性颗粒外面的包覆层在提



图 3 磁流变液微观触变结构示意图 Fig. 3 Diagram of microscopic thixotropic structure of MRF

高沉降性的同时,也降低了 MRF 的力学性能。因 此,为了保证能够提高 MRF 沉降性的同时又不降 低其力学性能,可以同时加入纳米磁性和非磁性添 加剂,在零磁场时,非磁性添加剂阻隔在纳米颗粒 与微米磁性颗粒之间,形成空间位阻效应,从而有 效提高了 MRF 的沉降性;在施加磁场后,纳米磁性 添加剂可以弥补微米磁性颗粒之间的缝隙,进而保 证 MRF 的力学性能。综上所述,在选择添加剂时 应注意:(1)选择适量的油酸和脂类物质作为磁性 颗粒的包覆层,虽然磁流变效应有所降低,但增大 的体积减小了 MRF 的沉降;(2)选择气相二氧化硅 等作为触变剂,能够在载液中形成三维网状结构, 以减少磁性颗粒的团聚,提高 MRF 的沉降性;(3) 选择合适的润滑剂,可以减少颗粒间的摩擦力,以 提高 MRF 的屈服应力:(4)选择合适纳米磁性材料 与非磁性材料作为共同添加剂,可以有效提升 MRF 的沉降性和力学性能:(5)添加剂的选取还应 该满足对人体和环境无害、性价比高的特点,以适 应其在装置设备上的广泛应用。

### 3 总结与展望

本文调查了近几年基于 MRF 组成成分以及 沉降率的研究,从载液、磁性颗粒和添加剂三方面 出发,分析了影响 MRF 沉降性的原因,并给出了 提高 MRF 沉降性的方法:(1)载液应具有良好的 化学和物理稳定性、适宜的粘度,载液应尽量选择 油基;(2)磁性颗粒除了应具有良好的磁饱和强度外,在密度方面,应该尽量减小与载液之间的密度差;在颗粒尺寸方面,应选择纳米和微米复合颗粒(微米颗粒占比大);在形状方面,应选择棒状和网状结构;(3)首先应对磁性颗粒改性,接着使用油酸等表面活性剂涂覆在颗粒表面,最后加入二氧化硅等触变剂及石墨等润滑剂,且添加剂总量占MRF的2(wt)%~6(wt)%为宜。

出于 MRF 沉降现象和应用方面的考虑,提出 未来的研究方向:(1)由于 MRF 的力学性能和沉 降性是评价其性能的两个关键指标,如何在提高 一个指标的同时而不降低另外一个指标成为制备 出优良性能 MRF 的关键;(2)出于对磁流变设备 在工程应用的考虑,对 MRF 进行疲劳性能测试也 将成为关键;(3)由于 MRF 的组分复杂且对沉降 性的影响大小不一,因此对沉降机理方面的研究 还需要进一步深入。

#### 参考文献

- [1] Wang N, Liu X, Sun S, et al. J. Magn. Magn. Mater., 2020, 501(5):166443.
- [2] Ji D, Luo Y, Ren H, et al. J. Nanomaterials, 2019, 2019 (3): 6312606.
- [3] Kobayashi N, Kawase K, Sato S, et al. IEEE Transac. Magn., 2017, 53(11):8204004.
- [4] Ruan X, Xuan S, Zhao J, et al. Smart Mater. Struct., 2020, 29(5): 055018.
- [ 5 ] Manuel F, Chang J, Huang C. IEEE Transac. Magn., 2018, 54(11): 4601105.
- [6] Lokhande S, Patil S. Measurement, 2021, 175(8):109150.
- [7] Kim B, Chung J, Cho M, et al. J. Mech. Sci. Technology, 2018, 32(7):3345~3350.
- [8] Gupta M, Dinakar D, Chhabra I, et al. Int. J. Light Elect. Optics, 2021, 226(2):165908.
- [9] Urreta H, Aguirre G, Kuzhir P, et al. Int. J. Precis. Eng. Man., 2018, 19(4):495~503.
- [10] Zheng J, Li Y, Chen C, et al. Smart Mater. Struct., 2020, 29(10): 105031.
- [11] Wu H, Hao L, Chen C, et al. ACS Omega, 2020, 5(42): 27425~27432.
- [12] Rizzo R, Musolino A, Jones L. IEEE Transac. Haptics, 2018, 11(2): 317~321.
- [13] Aditya N, Amin K. J. Acoust. Soc. Am., 2018, 144(1): 412~420.
- [14] 朱婉宁, 佟昱, 于秀丽等. 宇航总体技术, 2019(1): 56~61.
- [15] Yang J, Hua Y, Hu Z, et al. J. Magn. Magn. Mater., 2016, 417(11): 214~221.
- [16] Hong C, Kim M, Zhang W, et al. J. Colloid Interf. Sci., 2016, 481: 194~200.
- $\left[\,17\,\right]$   $\,$  Wang G, Ma Y, Tong Y, et al. J. Ind. Eng. Chem. , 2017,

48: 142~150.

- [18] Wang G, Zhao D, Ma Y, et al. Powder Technol., 2017, 322: 47~53.
- [19] Zhang H, Yan H, Yang J, et al. Arab. J. Sci. Eng., 2017, 42(11): 4713~4723.
- [20] Rahim M, Ismail I, Choi S, et al. Smart Mater. Struct., 2017, 26(11): 115009.
- [21] Yang X, Huang Y, Hou Y, et al. J. Mater. Sci. Mater. Electron., 2017, 28(11): 8130~8135.
- [22] Tong Y, Dong X, Qi M. Smart Mater. Struct., 2017, 26
  (2): 025023.
- [23] Wang G, Ma Y, Cui G, et al. Solid State Sci., 2017, 63: 70~75.
- [25] Jinaga R, Jagadeesha T, Kolekar S, et al. Int. J. Mol. Sci., 2019, 20(22): 5766.
- [26] Maurya C, Sarkar C. IEEE Transac. Magn., 2020, 56 (12): 4600608.
- [27] Dong Y, Wen J, Choi H. J. Ind. Eng. Chem., 2021, 93: 210~215.
- [28] Cheng J, Liu K, Zhang Z, et al. J. Superconduct. Novel Magn., 2021, 12: 1177~1183.
- [29] Zhang Y, Li D, Zhang Z. Mater. Res. Express, 2019, 6 (12): 126127.
- [30] Neiatpour M, Unal U, Acar H. J. Ind. Eng. Chem., 2020, 91: 110~120.
- [31] Zhang X, Liu X, Ruan X, et al. Front. Mater., 2021, 7: 631069.
- [32] Chen F, Li H, Han M, et al. Mater. Manuf. Proc., 2020, 35(10): 1077~1083.
- [33] Asiaban R, Khajehsaeid H, Ghobadi E, et al. Polym. Testing, 2020, 87: 106512.
- [34] Swaroop K, Aruna M, Kumar H, et al. Mater. Today, 2020, 39(11): 2214~7853.
- [35] Aruna M, Rahman M, Joladarashi S, et al. J. Brazil. Soc. Mech. Sci. Eng., 2020, 42(5): 228.
- [36] Pandian S, Mahendran M, Rajesh S, et al. Ind. J. Phys., 2022, 96(8): 2303~2311.
- [37] Manzoor M T, Kim J E, Jung J H, et al. Sci. Rep., 2018, 8(1):12672.
- [38] Ashtiani M, Hashemabadi S. Colloid. Surf. A, 2015, 469: 29~35.
- [39] Mahshid A, Seyed H. J. Intel. Mater. Syst. Struct., 2015, 26(14): 1887~1892.
- [40] Rabbani Y, Ashtiani M, Hashemabadi S. Soft Matter, 2015, 11(22): 4453~4460.
- [41] Liu X, Wang L, Lu H, et al. Mater. Manuf. Proc., 2015, 30: 204~209.
- [42] Tong Y, Li X, Z Hao P, et al. Front. Mater., 2021, 8: 65998.
- [43] Anupama A, Choudhary H, Kumar R, et al. Mater. Res. Bull., 2019, 113(5): 45~50.
- [44] Anupama A, Kumaran V, Sahoo B. Soft Matter, 2018, 14: 5407~5419.