

# 磁流变液组分选择原则及其机理探讨\*

关新春<sup>a\*\*</sup>, 欧进萍<sup>b</sup>, 李金海<sup>b</sup>

(a. 哈尔滨工业大学材料科学与工程博士后流动站 哈尔滨 150090;

b. 哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨 150090)

摘要: 从磁流变液的流变机理及其性能指标出发,探讨了磁流变液组分母液、磁性颗粒、表面活性剂的选择原则及其对磁流变液性能的影响;及磁流变液的分散工艺;并在此基础上,研制成功了一种性能优良的磁流变液,其沉降稳定性较好,长时间(一个月左右)存放基本不沉降。

关键词: 磁流变液;可控流体;研制机理

中图分类号: P315.966 文献标识码: A

## 1 引言

虽然,自从1995年第五届国际电磁流变学术会议以来,磁流变液及其相关器件的优良性能受到了国内学者的广泛关注,并相继有许多科研院所、不同学科领域的学者投入了这方面的研究,且取得了一定的成果,但是目前国内磁流变液及其相关技术的发展状况并不是非常乐观<sup>[1-4]</sup>。产生以上现象的主要原因是目前国内非常缺乏性能较为优良的,可以大量投入实际工程应用的磁流变液。本文在探讨磁流变液各组分的选择原则和磁流变液分散工艺的基础上,研制成功了一种性能优良的磁流变液。

## 2 磁流变液的流变机理

众所周知,磁流变液是由高磁导率、低磁滞性的微米级软磁性颗粒和非导磁性液体组合而成的悬浮体,它具有在零磁场作用下为牛顿流体,而在强磁场作用下为 Bingham 体的特性。由于磁流变液的强流变效应来源于磁化后的颗粒形成的磁偶极子的相互作用,因此磁性颗粒的物理性能是影响磁流变液剪切屈服强度的主要因素之一。虽然,建立在不同假设基础之上所得到的磁流变液理论剪切屈服强度在表达式的形式上略有差异,但所有的研究均表明,磁性颗粒的饱和磁化强度、直径大小、体积掺量以及外加磁场的大小是决定磁流变液剪切屈服强度的主要因素。Jolly 等的研究表明<sup>[5]</sup>,在假设颗粒的磁偶极矩相同,相互吸引的颗粒沿磁场方向成直线分布,且只有平行于磁场的相临颗粒之间才存在磁相互吸引作用的条件下,磁流变液的剪切屈服强度可以表示为

$$\sigma = \frac{9\phi\epsilon(4 - \epsilon^2)|m|^2}{2\pi\mu_1\mu_0d^3r_0(1 + \epsilon^2)^{3/2}} \quad (1)$$

式中, $\phi$  为颗粒的体积含量; $d$  为颗粒的直径; $r_0$  为颗粒中心的间距; $\epsilon$  为颗粒间的剪切应

\* 国家自然科学基金资助项目(50038010)。

\*\* 通讯联系人, Email: guanxch@263.net

收稿日期: 2001 - 08 - 14; 修回日期: 2001 - 08 - 25。

变;  $m$  为颗粒的磁偶极矩。假设单位颗粒体积的平均磁偶极距为  $J_p$ , 则  $|m| = J_p V_i$ , 其中  $V_i$  为颗粒的体积, 而颗粒的平均磁偶极矩  $J_p$  可近似表式为

$$J_p = \frac{3/2\alpha^3 B + (1 - \alpha^3)J_s}{1 + 3/2\phi\alpha^3} \quad (2)$$

其中,  $J_s$  为颗粒的饱和磁化强度;  $B$  为磁感应强度;  $\alpha$  是为表征材料磁化程度的标量。当颗粒达到磁化饱和后,

$$J_p = J_s \quad (3)$$

由以上公式可以看出, 高剪切屈服强度的磁流变液的磁性颗粒除了应该具有高体积掺量和高饱和磁化强度的特征之外, 还应该具有较大的直径。

### 3 磁流变液组分的选择原则及其性能的影响

#### 3.1 优质磁流变液的评价指标

已有的研究表明, 根据工程应用的需要, 性能优良的磁流变液应该具有如下主要特征: (1) 零磁场粘度低, 以便使其在磁场作用下, 具有同等剪切屈服强度增长时, 具有更宽的调节范围; (2) 强磁场下剪切屈服强度高, 至少应达到 2030 kPa, 这是衡量磁流变液性能的主要指标之一; (3) 抗沉降稳定性好, 长时间存放应基本不分层, 或即使略有分层, 也可以在轻微外扰动情况下, 迅速恢复均匀分散的状态。此外, 磁流变液还应该具有能耗低、无毒、不挥发、无异味、杂质干扰小、温度使用范围宽以及响应速度快等特征。

#### 3.2 磁性颗粒

式(1)~(3)已经表明, 高剪切屈服强度的磁流变液的磁性颗粒应该具有高饱和磁化强度和较大直径的特征。但磁流变液的性能指标并不仅仅是剪切屈服强度一项, 为了满足磁流变液的综合评价指标, 磁性颗粒还应该具有如下的特征: (1) 高磁导率。这可以使颗粒在较小的磁场作用下, 便可产生较大磁偶极矩, 从而使磁流变液具有较高的剪切屈服强度; (2) 低磁矫顽力, 即在零磁场作用下, 颗粒基本不存在剩磁。这是磁流变液可以恢复零磁场状态的要求; (3) 磁滞回线狭窄、内聚力小, 这是磁流变液流变低能耗的要求; (4) 体积适当。式(4)为悬浮在流体中的球体在重力作用下的沉降速度计算公式

$$V = \frac{2\alpha^2(\rho - \rho_0)g}{9\eta} \quad (4)$$

式中,  $V$  是沉降的速度;  $\alpha$  是球体的直径;  $\rho$  是球体的密度;  $\rho_0$  是母液的密度;  $g$  是重力加速度;  $\eta$  是母液的表现粘度。式(4)表明, 在同等条件下, 颗粒的体积越大, 其沉降稳定性越差, 但公式(2)表明, 颗粒的体积越大, 磁流变液所具有的理论剪切屈服强度越高, 因此为了得到剪切强度高、沉降稳定性好的磁流变液, 必须恰当选择磁性颗粒的体积。纳米级的胶体磁性液体, 虽然沉降稳定性很好, 但其也基本不具备剪切屈服强度。

#### 3.3 母液

母液是磁流变液的主要成分, 其性能对磁流变液具有直接的影响, 一般来说, 磁流变液的母液应具有如下的特点: (1) 高沸点、低凝固点。这可以确保磁流变液具有较宽的工作温度范围; (2) 适宜的粘度。磁流变液的零磁场条件下应具有较低的粘度, 要求母液的粘度越低越好, 但公式(4)表明, 粘度越低, 沉降稳定性越差; 此外, 母液还应该具有化学稳定性好、耐腐蚀、无毒、无异味、价格低廉等特点。

以上只是母液性能的一般性要求, 根据磁流变液不同应用领域的特点, 母液也可以有不同

的要求。

### 3.4 表面活性剂

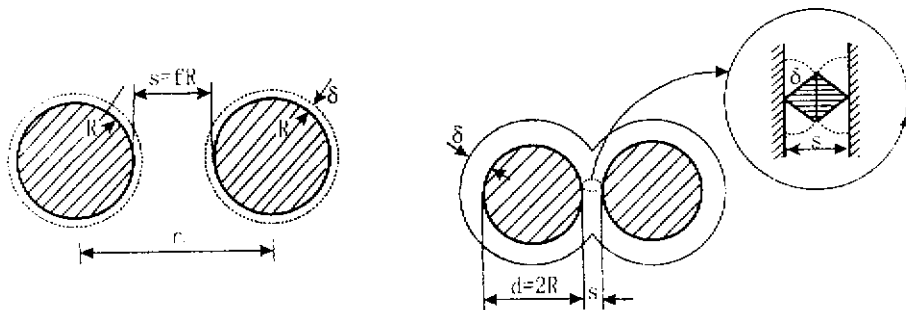
磁流变液母液的比重一般为 1 左右,而悬浮颗粒的比重为 7.8,因此,由于磁性颗粒的比重远远大于母液的比重而造成的磁性颗粒的沉降一直是无法很好解决的问题之一。此外,悬浮颗粒的直径一般仅为几个微米,比表面积很大,所以也很容易结团而后发生沉降。而目前,解决此类沉降最为有效的方法就是添加不同类型、一定剂量的表面活性剂。

表面活性剂是仅需很小浓度就可大大改变溶剂(或悬浮颗粒)表面性质的物质,它经常用来降低不相容两相间的界面能。表面活性剂一般是亲油基和亲水基这两种性质不同的结构组成的低聚物,它的亲水基可以吸附在磁性颗粒的表面,而亲油基象“鞭梢”一样扩散在母液当中。磁性颗粒吸附表面活性剂以后,由于亲油基的“鞭梢”相互缠绕及排斥,一方面会增加颗粒的体积,减少它们相互吸引碰撞的机会,另一方面会在母液内部形成一个相互作用的三维骨架,从而降低由于颗粒与母液的比重差而造成的颗粒沉降。

图 1 是在表面活性剂作用下颗粒之间作用能的计算简图。对于图 1 所示的两个直径相等的球形颗粒,由范德华引力所产生的吸引势能  $U_v$  为<sup>[6]</sup>

$$U_v = -\frac{A}{6} \left[ \frac{2}{f(f+4)} + \frac{2}{(f+2)^2} + \ln \frac{f(f+4)}{(f+2)^2} \right] \quad (5)$$

式中,  $A$  为 Hamaker 常数,其值大约为  $10^{-19} \text{ N}\cdot\text{m}$  数量级;  $f = (r_c/R) - 2$ ,  $r_c$  为颗粒中心的间距,  $R$  为颗粒的半径。式(5)表明,颗粒间范德华引力作用随颗粒间距减小,迅速增大。



(a) Mutual effect of magnetic particles

(b) Repulsive force engendered by surfactant

图 1 悬浮颗粒相互作用计算简图

Fig. 1 Calculating diagram of mutual effect of magnetic particles

而当以上两颗粒相互靠近时,由表面活性剂所产生的排斥势能  $U_r$  为

$$U_r = 2\pi R^2 N_\delta kT \left( 2 - \frac{f}{t} - \frac{f+2}{t} \ln \frac{1+t}{1+f/2} \right) \quad (6)$$

式中,  $N_\delta$  为单位颗粒表面所吸附的表面活性分子数;  $k$  为波尔兹曼常数;  $T$  为温度;  $t$  为表面活性剂的厚度。计算表明,当表面活性剂的厚度达到一定程度后,其产生的排斥力就可以与范德华引力相平衡,可以有效地避免颗粒的接触结团,从而可以提高悬浮液的稳定性。

工业表面活性有上千种,从类型上可以分为阴离子型、阳离子型、两性离子型、非离子型,另外还有复配型,而从功用上又可以分为分散剂、增容剂等,另外,不同的活性剂还可以复用,协同作用,因此选择何种类型的表面活性剂是磁流变液配制的一项关键技术。活性剂复配适当可以起到协同作用,获得分散悬浮、抗大气腐蚀等综合作用。但如果复配不当,将相互干扰,

适得其反。虽然表面活性剂的选择主要依据经验和实验,但其基本原则是“相似相溶”,即尽量选择亲水基与颗粒的结构相近,而亲油基与母液的结构相近。目前,磁流变液常用的表面活性剂有油酸、OP 乳化剂、酯类以及聚醚基等,而其掺量和复合作用主要依据试验。

此外,为了促进磁流变液的稳定,改善磁性颗粒的界面性能,磁流变液中还可以添加一些纳米级的硅胶或铁磁性颗粒<sup>[7]</sup>。

### 4 磁流变液的分散工艺

磁流变液是固液悬浮液体,由于颗粒的体积小、比表面积大、表面能大,因此颗粒的分散均匀非常的困难。为了有效的分散颗粒,目前磁流变液的分散工艺一般选用强力搅拌或研磨工艺<sup>[8]</sup>。强力的搅拌和研磨不但有利于颗粒的分散,还可以促进表面活性剂与颗粒的粘接。搅拌时间以及剪切速度的选择主要以试验为主,一般来说剪切速度越大、搅拌时间越长越有利于分散。

### 5 磁流变液的性能

本文根据前面所讨论的磁流变液各组分的选择原则,以表 1 所示性能的羧基铁为悬浮颗粒、以硅油为母液、以油酸和 OP 乳化剂等为表面活性剂,采用强制搅拌工艺,研制成功了母液粘度不同而掺量基本相同的具有如图 2 所示性能的磁流变液,其沉降稳定性较好,长时间(一个月左右)存放基本不沉降。

表 1 羧基铁的主要性能

Table 1 Properties of magnetosoft powder carboxy iron

Average diameter/ $\mu\text{m}$	Apparent density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Iron% (Min)	Oxygen% (Max)	Carbon% (Max)	Nitrogen% (Max)
3.67	1.43	96	1.5	1.5	0.3

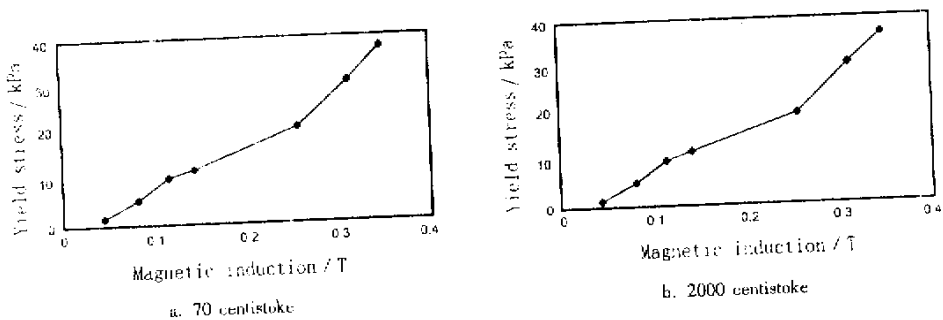


图 2 母液粘度的磁流变液剪切屈服强度与磁场强度的关系

Fig.2 The stress versus induction of the MR fluid

### 6 结 论

磁流变液的配制一直是磁流变技术发展的关键科学技术,本文从磁流变液的流变机理及性能指标出发,探讨了母液、磁性颗粒、表面活性剂的选择原则及其分散工艺,并在此基础上,

研制成功了一种性能优良的磁流变液。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Carlson J D , Weiss K D. *Machine Design* , 1994 , 8 : 61
- [ 2 ] Wang Lizhong ( 王立忠 ) , Li Yunrui ( 李云南 ) , Wang Feng ( 王锋 ) . *Manufacturing Engineering of Aviation* ( 航空工程与维修 ) , 1997 , 7 : 9
- [ 3 ] Guan Xinchun ( 关新春 ) . Ph D Dissertation of Harbin Inst. of Technology ( 哈尔滨工业大学博士论文 ) , 2000
- [ 4 ] Ou Jinping , Guan Xinchun. *World Information on Earthquake Engineering* , 1998 , 14 ( 4 ) : 30
- [ 5 ] Jolly M R , Carlson J D , Munoz B C. *Smart Mater. Struct.* , 1996 , 3 : 607
- [ 6 ] Long Yi , Zhang Zhengyi , Li Shouwei. The New Functional Material and its Application. Engineering Industry Press , 1997
- [ 7 ] Kordonsky W I , Demchuk S A. Proc. Fifth Int. Conf. on ER Fluids , MR Fluids and Associated Technol. , Univ. of Sheffield , Sheffield , U.K. , 1995 , 613
- [ 8 ] Ashour O , Kinder D , Giurgiutin V. *SPIE* , 1997 , 3040 : 174

## The Research on the Principles of Component of Magnetorheological Fluid Selecting and Its Mechanism<sup>\*</sup>

Guan Xinchun<sup>a\*\*</sup> , Ou Jinping<sup>b</sup> , Li Jinhai<sup>b</sup>

( a . The Research Station on Material Science and Engineering for

Postdoctoral Fellows , Harbin Institute of Technology , Harbin 150090 ;

b . Department of Civil Engineering , Harbin Institute of Technology , Harbin 150090 )

**Abstract** Because of its extensive applying prospect , magnetorheological fluid and its device have been concerned by many domain , but the lack of good magnetorheological fluid that can be used in real engineering is hindering the developing of this technology. Firstly , from the direction of the mechanism of rheologic and its performance objective , the principles of components of magnetorheological fluid selecting and their affects on fluid 's performance are studied. Secondly , the technology of disperse is researched. At last , the performance of a kind of magnetorheological fluid that made by the above principles is introduced.

**Key words** Magnetorheological fluid , Controllable fluid , Mechanism of manufacture

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( 50038010 ).

\*\* To whom correspondence should be addressed , Email : guanxch@263.net