

特约专栏

物质的触变性及触变材料的开发

刘 通, 张增志, 吴浩平, 武 斌

(中国矿业大学(北京)生态功能材料研究所, 北京 100083)

摘 要: 触变性是分散体系流变学中一种特殊的现象, 是指在搅动或其它机械力作用下, 这些体系的粘度或切力随时间发生变化的一种流变现象。研究开发触变性材料, 使其在“紧急”外力作用下, 通过材料在结构性能上的短时“响应”变化, 在紧急制动、减缓冲击、缓降逃生、防弹衣、泥浆固井等需要“瞬变响应”的工程场合加以应用, 具有十分重要的意义。对自然界和工程中的触变性物质进行了综合分析, 从正触变及负触变两方面介绍了触变材料的研究现状, 分析了触变材料的应用领域和应用前景。

关键词: 触变; 正触变; 负触变; 触变材料

中图分类号: O648. 23 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2018)10-0776-07

Thixotropy of Material and Exploitation of Thixotropic Material

LIU Tong, ZHANG Zengzhi, WU Haoping, WU Bin

(Research Institute of Ecological and Functional Material, China University of Mining & Technology, Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Thixotropy is a kind of special phenomenon in dispersion system rheology, which refers to a rheological phenomenon that the viscosity or shear force of these systems change with time under agitation or other mechanical forces. Under the action of “emergency” external force, thixotropic materials produce short-term “response” changes in structure and property, it is of great significance to research and develop thixotropic materials to be applied in engineering applications that require “transient response”, such as emergency braking, shock mitigation, slow-moving escape, body armor, and mud cementing, etc. In this paper, the thixotropic substances in nature and engineering are analyzed. The research status of thixotropic materials is introduced from positive thixotropy and negative thixotropy. At the same time, the application fields and application prospects of thixotropic materials are analyzed.

Key words: thixotropy; positive thixotropy; negative thixotropy; thixotropic material

1 物质的触变性

人们最早认识物质的触变性是从含羞草开始的, 含羞草是生长在南美洲热带地区的一种植物, 由于这些地区气候炎热, 风雨频繁, 在与恶劣的气候条件抗衡过程中, 为了保证其生存和种族的繁衍, 含羞草逐渐形成了小叶片开启、闭合及叶柄下垂的自运动方式。人们研究发现, 这种自运动方式归根于小叶片基部的一个称为叶褥的结构, 该结构为膨大的含有大量水分的薄壁细胞组

织, 正常状态下含羞草叶柄挺起, 小叶片舒张于叶柄的两侧; 当叶片受到触动时, 小叶片基部接收信号, 受力使叶褥上部薄壁细胞里的水分向细胞间隙中渗透, 细胞失水使叶褥上部膨压迅速降低, 而叶褥下部薄壁细胞仍然保持原有的膨压, 结果便导致复叶上的小叶成对合拢; 如果刺激强度继续增大, 由于叶柄基部叶褥上部的细胞壁较厚, 下部的细胞壁较薄, 且细胞之间的间隙比上部要大, 致使叶褥下部的细胞原生质的透性迅速增加, 使得下部细胞中的水分快速地向细胞间隙排放, 结果造成叶褥下部的细胞膨压迅速下降, 而上部细胞仍然保持原有的膨压, 这便导致叶柄在叶褥处下弯使叶柄产生下垂的运动(如图 1)。这种“膨压运动”形成了含羞草的这种感震运动^[1]。

触变性在自然界中广泛存在, 在陆地或河床上的泥

收稿日期: 2018-06-29

第一作者: 刘 通, 男, 1993 年生, 硕士研究生

通讯作者: 张增志, 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师,

Email: z. zengzhi@163.com

DOI: 10. 7502/j. issn. 1674-3962. 2018. 10. 04



图 1 含羞草叶片闭合、叶柄下垂图片

Fig. 1 Picture of Mimosa leaves closed and its petiole drooping

浆是触变性的^[2-4], 这个性质影响了泥石流和滑坡的发生。触变性还出现在血液^[5-9]等生物体液中, 红细胞可以聚集在圆柱形的堆积物上, 它可以同时粘在一起形成分支结构, 这些结构取决于血液流动性和粘度。

与自然界泥浆一样的是在采矿工业中使用和加工的各种矿物浆料有些具有一定的触变性^[10, 11]。如 Nguyen 和 Boger^[12]所讨论的铝土矿残渣具有触变性, 高岭土和各种粘土(膨润土、蒙脱石)等矿物有一定的触变性^[13, 14]。非极性聚合物/粘土纳米复合材料的悬浮液由于粘土结构的变化引起的粘度变化而产生触变^[15]。其他含有粘土的工业产品包括钻井泥浆^[16], 泥浆中的粘土能瞬间形成网络结构, 从而导致触变反应。

水泥的凝固过程是不可逆的, 但新的水泥基产品具有触变性^[17-19]。其他工业触变泥浆包括煤浆^[20-22]和金属浆。半固态金属合金具有悬浮在液态金属基体中的球状颗粒的特殊微观结构, 具有触变性。锡铅合金(Sn-15% Pb)的微观结构与铝合金相似。将液态锡铅合金或铝合金在不断剪切下冷却到半固态, 然后在等温条件下观察, 发现显微结构具有剪切时间的依赖性^[23-25], 因此, 锡铅合金和铝合金的微观结构可以用于触变成形。润滑脂是流变复杂的材料, 虽然主要是剪切降解, 但也可以检测到部分恢复^[26], 也被归类为触变。类似的还有含蜡原油, 也显示出一定程度的可逆的触变行为^[27, 28]。涂料属于最早研究的工业触变材料^[29], 在现代高固体和水性配方中, 触变性十分重要^[30-32]。磁性悬浮液^[33-35]和热塑性胶粘剂^[36]在涂层过程中, 显示触变行为。在个人护理和药物领域也大量使用触变产品^[37, 38]。

触变性悬液可以包含各种类型的胶体颗粒, 在许多情况下是金属氧化物、粘土、二氧化硅或炭黑。悬浮介质是一种低分子量液体。当胶体颗粒被添加到熔融聚合物中时, 由于悬浮介质的高粘度^[39-41], 会导致触变时间的延长。在原位聚合的许多应用中, 由触变剂^[42]可以产生对预聚体适当快速的胶凝。

综上所述, 自然界中的一些物质和工程中一些浆体

存在着触变特性, 一些触变特性被应用于工程技术中, 而另一些触变特性是要求在工程实施中加以克服的。这些触变特性为我们开发直接用于工程技术的触变材料提供了广泛的参考空间。

2 正触变材料

正触变现象最早是由 Schalek 和 Szegvari 于 1923 年在研究水合氧化铁凝胶的过程中发现的^[43]。所谓正触变性(positive thixotropy)是指在外切力的作用下体系的粘度随时间下降, 静止后又恢复, 即具有时间因素的切稀现象。

Abend 等^[44]在粘土(负电)和镁铝层状双氢氧化物(正电)形成的微乳液体系中发现氢氧化物与膨润土表现出了流变特性(如表 1 所示)。当只加入氢氧化镁铝(质量分数 χ 为 1%)时, 乳剂表现为牛顿流体; 添加膨润土后, 氢氧化物含量 χ 从 1%降到 0.5%, 宾汉粘度略有上升, 屈服值达到 8~9 Pa, 流动曲线形成小的滞后, 表明呈现弱的正触变性。在氢氧化物含量 $\chi < 0.5$ 时, 流变行为从正触变变为负触变^[45, 46]。在镁铝微乳液体系中, 滞后曲线在 $\chi \leq 0.1$ 时, 屈服值减小^[47]。这种现象的原因是: 当 χ 值越大, 粘土矿物相对含量越少, 氢氧化物分子移动到油水分离界面上, 在分离界面上围绕油滴形成一层致密膜, 这层膜使油滴间不能结合, 这时体系接近于牛顿体系, 正触变性很小; 随着粘土矿物相对含量增多, 氢氧化物含量 χ 值降低到 0.2 附近, 带正电的氢氧化物粒子与带负电的粘土矿物相互吸引, 一起形成了空间网状结构, 体系表现出负触变性。

表 1 不同氢氧化物/蒙脱土比率 χ 下得到的稳定油水乳剂流变性^[43]

Table 1 Rheological properties of stable oil-water emulsions obtained from different hydroxide/montmorillonite ratios^[43]

χ	τ_0 (Pa)	τ_B (Pa)	η_0 (mPa · s)	η_B (mPa · s)	Hysteresis (kPa · s ⁻¹)
0	0.21	2.67	24	10.7	+0.45
0.1	<0.1	1.67	21.8	14.1	-0.65
0.2	11.14	23.05	923.0	35.0	-19.08
0.5	8.82	9.12	277.0	8.1	+1.66
0.8	8.82	7.11	131.0	11.6	+0.09
1.0	0.1	0	11.1	7.8	-0.37

Notes: χ : mass fraction of hydroxide; τ_0 : yield value; τ_B : Bingham yield value; η_0 : zero-shear viscosity; η_B : Bingham viscosity; Hysteresis expressed by the area of the hysteresis loop

陈宗洪等^[48]将海藻酸钠溶液及其添加不同含量氯化钙后的溶液充分打碎、搅拌, 用 NDJ-1 粘度计在 6 r · min⁻¹转

速下测定粘度 η_0 ，经过 t 时间后，测得粘度为 η_t ，用 θ 代表触变性大小：

$$\theta = G(\eta_t - \eta_0) \quad (1)$$

取 $G=1$ ，得图 2 及图 3。可以看出，纯海藻酸钠为正触变性，即 $\theta > 1$ ，静置一段时间粘度上升，这是由于静置后结构会慢慢地恢复而导致粘度的升高。产生负触变性的原因是：在剧烈搅拌或流动时，会使分子从卷曲到伸直，同时， $-\text{CO}_2\text{Ca}^+$ 的结合并不牢固，也可能 Ca^{2+} 脱离高分子，体系的粘度上升；但静置以后，由于静电吸引又形成 $-\text{CO}_2\text{Ca}^+$ ，导致大分子又呈卷曲状，体系的粘度又下降。体系粘度的升高和下降都具有时间性，这是由于大分子的伸展和卷曲、对 Ca^{2+} 的吸附和脱附都有一定的弛豫时间。如果 Ca^{2+} 的量不足以“屏蔽”高分子之间的相互吸引，体系仍为正触变性。如果 Ca^{2+} 的量很大，也能

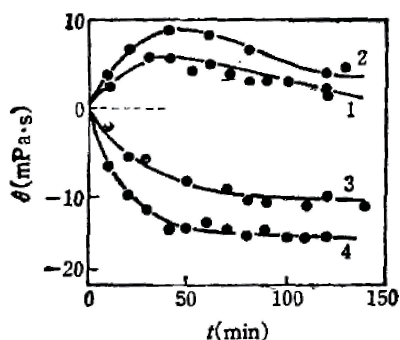


图 2 氯化钙含量对海藻酸钠溶液触变性的影响^[48]，海藻酸钠浓度为 1%，氯化钙含量：曲线 1—0%；曲线 2—0.005%；曲线 3—0.01%；曲线 4—0.02%

Fig. 2 Effects of calcium chloride content on thixotropy of sodium alginate solution^[48], sodium alginate concentration is 1%; calcium chloride content: curve 1—0%, curve 2—0.005%, curve 3—0.01%, curve 4—0.02%

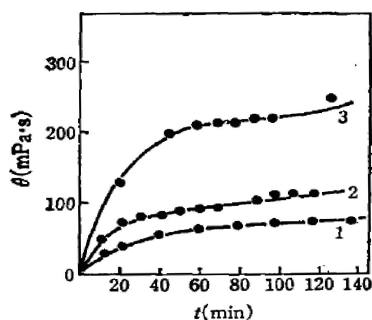


图 3 氯化钙含量对海藻酸钠溶液触变性的影响^[48]，海藻酸钠浓度为 1%，氯化钙含量：曲线 1—0.04%；曲线 2—0.05%；曲线 3—0.06%

Fig. 3 Effects of calcium chloride content on thixotropy of sodium alginate solution^[48], sodium alginate concentration is 1%; calcium chloride content: curve 1—0.04%, curve 2—0.05%, curve 3—0.06%

使负触变性消失，因为 Ca^{2+} 能在海藻酸钠分子之间架桥，体系产生结构粘度，这种结构可能为： $-\text{[CO}_2\text{CaO}_2\text{C]}-$ ，该结构不牢固，经剧烈搅动，结构会被破坏，体系粘度下降，即切稀现象。静置后，结构又恢复，粘度回升，体系表现出正触变性。

3 负触变材料

负触变性正好与正触变性相反，是一种具有时间因素的切稠现象，即在外加切力或切速下，体系的粘度上升，静置以后又恢复的现象。起初 Crane^[49] 在 1956 年发现 5% 的聚异丁烯四氢萘溶液具有比较典型的负触变性。1978 年，Heckroodt 发现南非某些蒙脱土悬浮体具有负触变性。近年来，乳液中也发现存在负触变性，在研究镁铝型混合金属氢氧化物-蒙脱土悬浮体流变性时，也发现在一定条件下可产生负触变性^[50]。

陈宗淇等^[51] 研究后将外加聚合物影响负触变性的原因归结为粒子在聚合物上的吸附。在二氧化硅悬浮体中加入 PHPA (部分水解聚丙烯酰胺)，聚丙烯酰胺主要以酰胺基团与二氧化硅粒子之间吸引，随着水解度的增加，羧酸根增多，粒子间吸引力由强变弱，絮凝体结构逐渐变得疏松，体系出现了负触变性。他们认为这是由于固体粒子“屏蔽”了高分子之间的相互吸引力产生的结果，所以静止以后，高分子吸附了二氧化硅粒子，体系的粘度下降了。但是 HPAM 对二氧化硅粒子的吸附是弱的，在外剪切力的作用下可以脱附，表现出粘度随剪切力而升高，静止以后又吸附，体系粘度下降。这种吸附和脱附是可逆的，并有一定时间性。吸附变弱的原因是 HPAM 分子中的羧酸根代替了原有的酰胺基团。羧酸根的电负性在一定程度上还对二氧化硅粒子起到排斥作用。

Kanai 等^[52] 对 Fe_2O_3 分散于矿物油中形成的磁悬浮液采用不同速率进行预剪切，在低剪切速率下 (0.5 s^{-1}) 测量磁悬浮液的粘度与时间的函数关系 (图 4)。预剪切速率低于 50 s^{-1} 时悬浮液的粘度对预剪切速率的依赖性很强。当剪切速率大于 50 s^{-1} 时，粘度到达最高值。针状磁性粒子有很强的絮凝性，在一定范围的流动条件下剪切促进碰撞而使结构形成，在预剪切速率 50 s^{-1} 左右开始出现负触变性，低于该值，体系表现为正触变性，高于该值，将引起很强的负触变性 (如图 4 所示)。

李淑萍等^[53] 研究了剪切速率对 Fe-Al-Mg 型混合金属氢氧化物 (简称 MMH)/钠质蒙脱土 (简称 MT) 混合悬浮体系及纯 MT 体系触变性的影响，结果显示：纯的 MT 体系在剪切速率 D_L 为 10, 170, 511 和 1022 s^{-1} 时为正触变性 (如图 5 所示)。MMH/MT 质量比 (R) 为 0.013 的体系在同样剪切速率

下也为正触变性, 剪切速率不影响触变性类型。 $R=0.051$ 的体系, 低 D_L 时 (10 和 170 s^{-1}) 呈现复合触变性, 高 D_L 时 (511 和 1022 s^{-1}) 呈现正触变性 (如图 6 所示)。 $R=0.091$ 的体系在低 D_L 时 (10 和 170 s^{-1}) 呈现负触变性, 在高 D_L 时 (511 和 1022 s^{-1}) 呈现复合触变性 (如图 7 所示)。

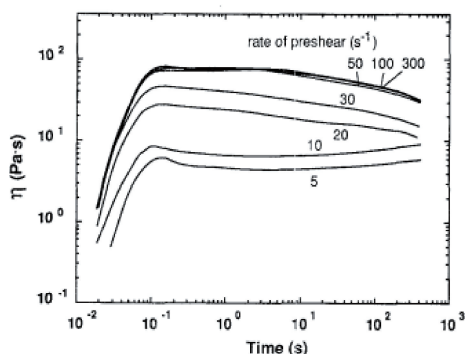


图 4 不同预剪切速率下粘度随时间变化的曲线^[52]

Fig. 4 Curves of viscosity over time at different preshear rates^[52]

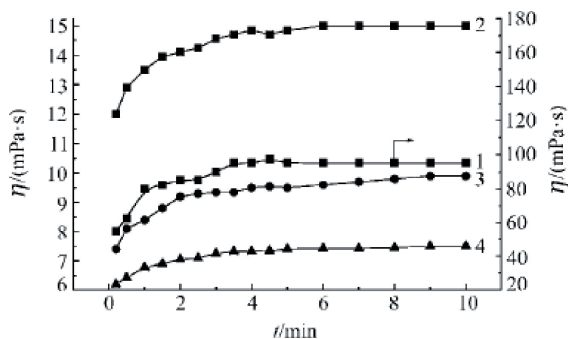


图 5 蒙脱土体系在各剪切速率下的粘度变化曲线^[53]

Fig. 5 Viscosity variation curve of MT system at various shear rates^[53]; curve 1— 10 s^{-1} ; curve 2— 170 s^{-1} ; curve 3— 511 s^{-1} ; curve 4— 1022 s^{-1}

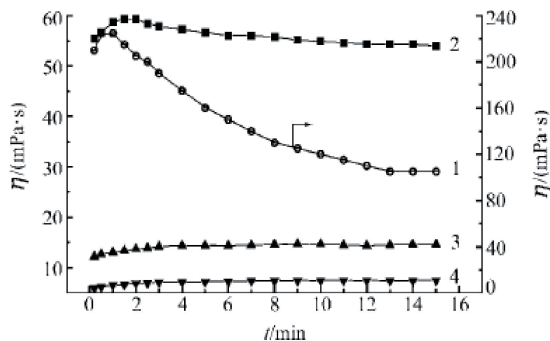


图 6 MMH/MT 质量比为 0.051 的分散体系在不同剪切速率下的粘度变化曲线^[53]

Fig. 6 Viscosity variation curve of Fe-Al-Mg MMH/MT system (mass ratio=0.051) at various shear rates^[53]; curve 1— 10 s^{-1} ; curve 2— 170 s^{-1} ; curve 3— 511 s^{-1} ; curve 4— 1022 s^{-1}

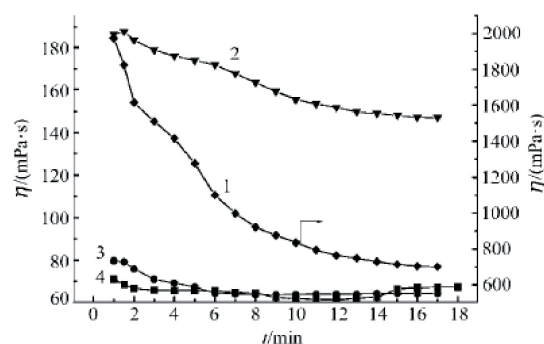


图 7 MMH/MT 质量比为 0.091 的分散体系在不同剪切速率下的粘度变化曲线^[53]

Fig. 7 Viscosity variation curve of Fe-Al-Mg MMH/MT system (mass ratio=0.091) at various shear rates^[53]; curve 1— 10 s^{-1} ; curve 2— 170 s^{-1} ; curve 3— 511 s^{-1} ; curve 4— 1022 s^{-1}

陈飞跃等^[54]用硬脂酸对 50~100 nm 超细碳酸钙的表面进行改性, 与邻苯二甲酸二辛脂 (DOP)、氧化钙混合成黏稠的悬浮体系, 快速搅拌并静置一段时间后体系的“滞后圈”由逆时针逐渐转变为顺时针, 即由正触变性逐渐转变为负触变性。该团队还研究发现该悬浮体系在静置时, 由于分子间力的作用使碳酸钙粒子间出现缠结并形成三维空间网络的结构 (如图 8 所示), 受到剪切作用后, 网络结构的缠结点慢慢被解开, 破坏了网络构象, 当剪切力超过临界值时, 会导致碳酸钙粒子做快速且无规则的运动, 此时碳酸钙粒子上的脂肪酸分子链缠结, 体系剪切增稠表现了负触变性。

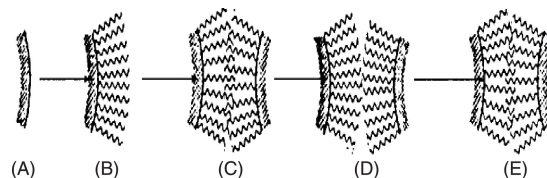


图 8 触变微结构^[54]

Fig. 8 The microstructure of thixotropy^[54]

伍秋美等^[55]用丙二醇 (PG)、乙二醇 (EG) 及丁二醇 (BG) 等不同分散介质与 SiO_2 制备了悬浮体系。不同分散介质制备的悬浮体系都具有可逆的剪切变稀和剪切增稠现象, 用“粒子簇”生成机理能较好地解释这种流变现象, 即: 剪切变稀与体系中连续空间网络结构的破坏有关, 而剪切增稠则是流体作用力促使不稳定的“粒子簇”的生成所致。

孙德军等^[56]总结了悬浮体的触变性机理, 当体系受到剪切力作用时, 悬浮体微观结构的变化由以下两方面决定: 一方面分散相粒子间的结构被剪切力破坏, 另一方面分散相粒子间的结构又在体系布朗运动和流动加快

粒子间碰撞的双重作用下形成。若流动或受到剪切作用时粒子间的结构形成而静止后结构被破坏,体系表现出负触变性^[57]。

4 触变材料开发与应用

4.1 防弹衣中的触变材料

防弹衣的研究目的是开发低成本、轻便、可穿戴且具有弹道冲击阻力的服装系统,芳纶和超高分子量聚乙烯已作为基础材料引入对弹道的保护。这些高性能纤维具有低密度、高强度、高能量吸收的特点^[58]。然而,要满足防御子弹威胁的要求,大约需要 20~50 层织物。由此产生的装甲硬度限制了它的舒适度。Lee 等^[59]研究了将 Kevlar 编织的具有弹道防御性能复合材料,用胶体剪切增稠液(含 450 nm 二氧化硅颗粒)浸渍后分散于乙二醇中。在低应变速率下,这种液体不会对织物造成任何弯曲和变形,柔韧性也没有变化。然而,在弹道冲击的高压力下,流体剪切增稠,增强了抗冲击性(如图 9 所示)。结果证明了新的组合材料可以使防弹衣更灵活,体积更小。

Tan 等^[60]将 Twaron 织物浸渍于不同粒子浓度的二氧化硅胶体悬浮液,研究了制备织物的弹道性能。将浸渍于二氧化硅颗粒浓度为 20%、40%和 50%(质量分数)的悬浮液的单层、双层、四层和六层织物体系的冲击极限和比冲击能与未处理体系进行了比较。结果表明,浸渍于浓度为 40%的悬浮液的单层、双层和四层体系的冲击极限最高,双层体系的改善最大,弹道限值比纯双层系统的弹道限值高 70%。抗冲击性能的提高是由于二氧化硅颗粒和二氧化硅团簇产生的弹织物摩擦和纱线间摩擦增加。

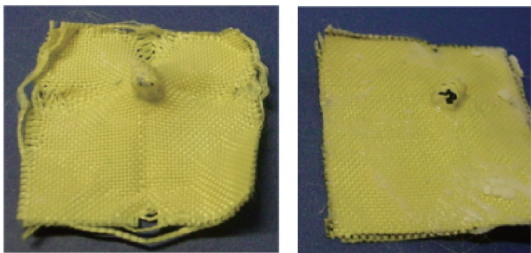


图 9 两种防弹衣弹道试验前后层对比:(a)未浸渍触变液;(b)浸渍触变液^[59]

Fig. 9 Comparison of the front layer of body armors unimpregnated in thixotropic liquid (a) and impregnated in thixotropic liquid (b) after ballistic test^[59]

4.2 触变水泥浆

目前,我国在石油勘探开发中遇到大量的海相沉积储层,该储层具有大量的裂缝和孔洞,钻井和固井都会面临着海相地层严重井漏的问题^[61]。触变性水泥浆在注入顶替过程中是稀的流体,泵送停止后则迅速形成具有刚性、能自身支持的凝胶结构,从而有效解决漏失问题。因此,触变性水泥浆是目前解决恶性井漏的一项重要技术手段。

步玉环等^[62]研制了一种新型触变性水泥浆,其利用丙烯酰胺单体能够与触变副剂 DS、引发剂 SG 迅速高效地发生聚合和交联反应,生成网状结构的高茹聚合物来改善水泥浆触变性能。相对于其它触变性水泥浆,其在具有更好的触变性能的同时,还具有较低失水量、较好的流动性以及较高的强度(如表 2 所示)。在静止状态下,能较快形成高静胶凝强度;75 ℃温度下失水量为 81 mL,24 h 抗压强度达到 19.4 MPa,游离液量达到 0.8%以下,均满足固井要求。该触变性水泥浆对于解决钻井固井过程中出现的裂缝性、溶洞性漏失难题有重要的现实意义。

表 2 触变性水泥浆与常规水泥浆基本性能对比^[62]

Table 2 Properties comparison of thixotropic cement and conventional cement^[62]

Cement liquid	<i>n</i>	<i>K</i> /Pa·s ^{<i>n</i>}	Thickening time/min		Water loss/mL	Free liquid volume/%	24 h Compressive strength/Pa
			30 Bc	100 Bc			
Ordinary	0.8266	0.2271	120	158	90	1.13	22
Thixotropy	0.8262	0.2128	242	286	81	0.76	19.4

4.3 高楼缓降器

作为一种操作简单方便的大众化救生设备——高楼自救缓降器的出现,使高层楼房住户能够在发生火灾、地震等灾难后即时自救逃生。使用高楼缓降器一方面可以尽可能地保护住户自身生命安全,减少财产损失;另一方面也可以降低参与救援的消防官兵的人身伤亡。目前,高楼缓降救生设备存在一些不足之处,导致了产品的普及程度不高,实际中的应用效果也不好。因此,研

发更稳定、安全和高效率的高楼缓降器,并将其应用在高楼灾难应急逃生有着迫切的社会需要。

利用负触变材料所设计的高楼缓降器,能够实现低成本、易操作、小体积、轻质量、缓降可控的功能,还可根据不同缓降逃生者的年龄、体重、心理承受能力和身体状况改变,使制造出来的高楼缓降器具有普适性。

作者课题组^[63]将部分水解的聚丙烯酰胺加入搅拌均匀的、一定浓度的钠基蒙脱土悬浮体系中,制备出具有

触变性的混合体系。组装好高楼缓降器模型, 将样品加入缓降器料筒内(如图 10 所示), 1 号重物的缓降试验结果显示, 下落前期速率逐渐增大, 当达到一个极大值 0.36 m/s 后, 速率略微减小, 并稳定在 0.29 m/s 直到平稳落地, 而 2 号重物的缓降试验也得到了类似的结果, 不同的是当速率增大到一个极大值 0.35 m/s 后, 减小的比较大, 最后速率稳定在 0.075 m/s (如图 11 所示)。



图 10 缓降器模型照片^[63]

Fig. 10 Image of descending model^[63]

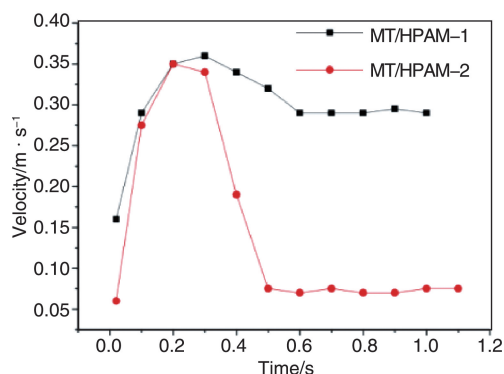


图 11 缓降速度随时间变化曲线^[63]

Fig. 11 Variation curves of descent velocity of descending model with time^[63]

5 结 语

触变性在自然界中和工程浆体中广泛存在, 在工程实施中物质的触变性常作为工程技术的辅助手段, 但目前缺乏对这一现象的深入、系统化的科学研究, 需要对该现象的科学规律进行系统总结。直接应用于工程实际的触变性功能材料的开发仍处于初级阶段, 这一方面需要深入研究物质触变性的科学规律, 另一方面, 需要不断地开发一些“响应”快、触变特性优异的新材料。触变材料在一些重大安全、环境机械力发生突变的工程领域具有重大应用前景, 如紧急制动、灾害冲击、缓降逃生、

防弹衣、泥浆固井等领域, 具有其他材料不可比拟的特殊优异性能。

参考文献 References

- [1] Liu Huanhong (刘焕红). *Bulletin of Biology* (生物学通报) [J], 2003, 38(10): 48.
- [2] Toorman E A. *Rheologica Acta* [J], 1997, 36: 56–65.
- [3] Chu G C. *Journal of Structural Biology* [J], 1999, 13: 171–174.
- [4] Mitchell R J, Markell A R. *Canadian Geotechnical Journal* [J], 1974, 11: 11–31.
- [5] Huang C R, et al. *Biorheology* [J], 1975, 12: 279–282.
- [6] Bureau M, Healy J C, Bourgoin D, et al. *Biorheology* [J], 1980, 17: 191–203.
- [7] Quemada D, Droz R. *Biorheology* [J], 1983, 20: 635–651.
- [8] Sun N, Kee D D. *Canadian Journal of Chemical Engineering* [J], 2001, 79: 36–41.
- [9] Owens R G. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [J], 2006, 140: 57–70.
- [10] Kretser R G de, Boger D V. *Rheologica Acta* [J], 2001, 40: 582–590.
- [11] Klein B, Hallbom D J. *Minerals Engineering* [J], 2002, 15: 745–749.
- [12] Nguyen Q D, Boger D V. *Rheologica Acta* [J], 1985, 24: 427–437.
- [13] Park K, Ree T. *Daehan Hwanak Hwojee* [J], 1975, 15: 293–306.
- [14] Huynh H T, Roussel N, Coussot P. *Physics of Fluids* [J], 2005, 17: 033101.
- [15] Choi Y H, Yoo B. *International Journal of Food Science and Technology* [J], 2004, 39: 801–805.
- [16] Gray G R. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* [M]. Gulf Publ Co, 1988.
- [17] Tattersall G H, Banfill P F G. *The Rheology of Fresh Concrete* [M]. 1983.
- [18] Jarny S, Roussel N, Rodts S, et al. *Cement and Concrete Research* [J], 2005, 35: 1873–1881.
- [19] Wallevik J E. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [J], 2005, 132: 86–89.
- [20] Usui H, Sano Y. *Journal of Chemical Engineering of Japan* [J], 1985, 18: 519–525.
- [21] Usui H. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [J], 1995, 60: 259–275.
- [22] Goudoulas T B, Kastrinakis E G, Nychas S G. *Rheologica Acta* [J], 2003, 42: 73–85.
- [23] Modigell M, Koke J. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2001, 111: 53–58.
- [24] Vieira E A, Klianga A M, Ferrante M, et al. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2004, 155: 1623–1628.
- [25] Azzi L, Ajersch F. *Metallurgical and Materials Transactions B* [J], 2006, 37: 1067–1074.
- [26] Coussot P, Leonov A I, Piau J M, et al. *Journal of Fluid Mechanics*

- [J], 1993, 46: 179–217.
- [27] Yonggang M, Jie Z. *Tribology International*[J], 1998, 31: 619–625.
- [28] Chang C, Nguyen Q D, Ronningsen H P, et al. *Journal of Fluid Mechanics* [J], 1999, 87: 127–154.
- [29] Mewis J, Norman J W. *Advances in Colloid and Interface Science*[J], 2009, 147: 214–227.
- [30] Xu J, Koelling K W. *Progress in Organic Coatings* [J], 2005, 53: 169–176.
- [31] Bosma M, Brinkhuis R, Coopmans J, et al. *Progress in Organic Coatings* [J], 2006, 55: 97–104.
- [32] Armelin E, Marti M, Rudé E J, et al. *Progress in Organic Coatings* [J], 2006, 57: 229–235.
- [33] Veitch R J. *IEEE Transactions on Magnetism* [J], 1996, 32: 4028–4033.
- [34] Potanin A A, Shrauti S M, Arnold D W, et al. *Rheologica Acta* [J], 1998, 37: 89–96.
- [35] Ponton A, Bee A, Talbot D, et al. *Journal of Physics: Condensed Matter* [J], 2005, 17: 821–836.
- [36] Jauregui-Beloqui B, Fernandez-Garcia J C, Orgiles-Barcelo A C, et al. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [J], 1999, 19: 321–328.
- [37] Stokes J R, Telford J H. *Journal of Non-Newton Fluid Mechanics*[J], 2004, 124: 137–146.
- [38] Lippacher A, Müller R H, MäderEurop K J. *Pharmac Biopharmac* [J], 2004, 58: 561–567.
- [39] Le Meins J F, Moldenaers P, MewisInd J. *Industrial and Engineering Chemistry Research*[J], 2002, 41: 6297–6304.
- [40] Abu-Jdayil B. *Journal of Food Engineering* [J], 2003, 57: 7.
- [41] Montes S, White J L. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [J], 1993, 49: 277–298.
- [42] Olesky M, Heneczkowski M, Galina H. *Polimery*[J], 2007, 52: 345.
- [43] Schalek E, Azegvari A, Koloid Z. *English Translation Given in Bauer and Collins* [J], 1923, 32.
- [44] Abend S, Bonnke N, Cuttshner U, et al. *Colloid and Polymer Science* [J], 1998, 276: 730.
- [45] Brandenburg U, Lagaly G. *Applied Clay Science* [J], 1988, 3: 263–279.
- [46] Lagaly G. *Applied Clay Science* [J], 1989 4: 105–123.
- [47] Hou W, Sun D, Han Sh, et al. *Colloid and Polymer Science*[J], 1998, 3: 274–276.
- [48] Chen Zongqi(陈宗淇), Wang Ninghua(王宁华), Han Enshan(韩恩山). *Acta Chimica Sinica*(化学学报)[J], 1991, 49: 462–467.
- [49] Crane J, Schiffer D. *Polymer Science*[J], 1956, 23: 93.
- [50] Hou Wanguo(侯万国), Sun Dejun(孙德军), Han Shuhua(韩淑华), et al. *Chemical Journal of Chinese Universities* (高等学校化学学报)[J], 1997, 13(1): 86.
- [51] Chen Zongqi(陈宗淇), Xin Yinchang(辛寅昌), Li Xiaozeng(李孝增), et al. *Acta Chimica Sinica*(化学学报)[J], 1989, 47: 152.
- [52] Kanai H, Amari T. *Rheologica Acta* [J], 1995, 34: 303.
- [53] Li Shuping(李淑萍), Hou Wanguo(侯万国), Dai Xiaonan(戴肖南), et al. *Acta Chimica Sinica*(化学学报)[J], 2002, 60(4): 749–752.
- [54] Chen Feiyue(陈飞跃), Gu Yanfang(顾燕芳), Wang Song(王松), et al. *Chemical Journal of Chinese University* (高等学校化学学报)[J], 1998, 19(1): 99–102.
- [55] Wu Qiumei(伍秋美), Ruan Jianming(阮建明), Huang Boyun(黄伯云), et al. *Journal of Central South University(Science and Technology)*(中南大学学报(自然科学版)) [J], 2006, 37: 862–866.
- [56] Sun Dejun(孙德军), Hou Wanguo(侯万国), Liu Shangying(刘尚营), et al. *Acta Chimica Sinica*(化学学报) [J], 2001, 59(2): 163–167.
- [57] Maranzano B J, Wagner N J. *Journal of Chemical Physics*[J], 2002, 117(22): 10291–10302.
- [58] Jacobs M J N, Van Dingenen J L J. *Journal of Materials Science* [J], 2001, 36: 3137–3142.
- [59] Lee Y S, Wetzel E D, Wagner N J. *Journal of Materials Science*[J], 2003, 38: 2825–2833.
- [60] Tan V B C, Tay T E, Teo W K. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2005, 42: 1561–1576.
- [61] Xu Tongtai(徐同台), Liu Yujie(刘玉杰), Shen Wei(申威). *Drilling Engineering Leak Prevention and Stoppage Technology*(钻井工程防漏堵漏技术)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [62] Bu Yuhuan(步玉环), You Jun(尤军), Jiang Linlin(姜林林). *Petroleum Drilling Techniques*(石油钻探技术)[J], 2009, 37: 110–114.
- [63] Wu Bin(武斌). *Dissertation for Master* (硕士论文)[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.

(编辑 惠琼)