

电流变技术

——机理·材料·工程应用

魏宸官 著

(国家自然科学基金资助项目)

北京理工大学出版社

内 容 简 介

电流变技术被人们认为是一门极富革命和创新意识的高新科学技术,有人认为它是当代的一门未来技术(Future Technic),有人认为它能引起某些工程领域革命性的变化,并从中看到了第三个机器时代的曙光,也有人认为它具有为社会创造成亿元经济效益的潜力。

本书是作者在此领域从事多年科研探索和实践的基础上写成的一本专著,全书共有六章,第一章介绍有关电流变技术的基本概念,发展历史及当前的现状、存在问题;第二章阐述电流变效应的基本原理;第三章介绍电流变液体的组成、性能及影响其性能的有关因素;第四章介绍测试电流变液体性能的有关仪器设备、测试方法和标准;第五章介绍电流变技术的工程应用及举例;第六章是全书的总结,详谈了它所面临的问题和未来的发展前途,最后还附有关于电流变技术的重要文献和资料。

由于电流变技术是一门新兴的热门学科,国内外读者很希望能有一本系统介绍这一技术的专门著作。因此,作者对此作了一次大胆的尝试,难免会存在很多不足之处。

本书可作为高等学校本科生、研究生,科研机构的研究人员以及对此技术有兴趣人员的教科书、参考读物和入门读物。

图书在版编目(CIP)数据

电流变技术:机理、材料、工程应用/魏宸官著. —北京:北京理工大学出版社,2000.3

ISBN 7-81045-662-8

I. 电… II. 魏… . 电流-流变学 IV.O361

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 13427 号

责任印制:刘京凤 责任校对:郑兴玉

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码 100081 电话 (010)68912824

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

850毫米×1168毫米 32开本 11.5印张 289千字

2000年3月第1版 2000年3月第1次印刷

印数:1—2000册 定价:25.00元

※ 图书印装有误,可随时与我社退换 ※

前 言

电流变技术及其工程应用,曾是作者接受国家自然科学基金委员会工程与材料学部列为国家重大科研课题予以资助的科研项目。此项科学研究始于1988年8月,在我国是首次被正式列项,并作为一门高新技术开始研究工作,至今已有10余年的历史了。

电流变技术所以被有关部门重视,是因为它是进入20世纪90年代以来,在国内外被人们认为是一项极富革命和创新精神、又有广阔应用前景的高新技术。国外许多专家、学者及刊物的评论家认为,电流变技术的广泛应用可以促使和推动某些工程领域获得革命性的进步,并可在许多工程领域产生奇迹和开发出新一代的产品。正因为如此,作者才不失时机地投入了这项技术的研究和开发工作。

电流变技术的第一届国际学术会议是1987年8月4日在美国波士顿召开的,此后每两年举行一次,作者有幸参加多次会议,此后,历届会议都有中国的学者参加。这一历史事实说明,我国的科学技术工作者极敏锐地意识到电流变技术的重大学术价值和推动国民经济发展的巨大现实意义,同时也可以引以自豪的是,我们几乎与世界各国学者同步地参与了这项具有重大学术意义和工程应用价值的技术的开拓和发展,并在此学科领域占有重要的一席之地。

电流变技术是当代被人们公认的一门高新技术,虽然,作为电流变技术的基础——电流变现象的发现和工程应用前景的提出,可以追溯至20世纪的40年代,即由美国学者W. M. Winslow发表的研究论文及几项著名的专利为标志,但能够成为国内外学者所公认的一门专门技术和独立学科,似乎是20世纪80年代末、90

年代初的事情,它的重要标志是第一届国际电流变学术会议的召开(1987年8月)及第一本会议论文集的出版(1989年8月)。

电流变技术经国内外学者多年系统的科研工作,它的内容已初具规模。一般说来,它包括四个方面的内容:电流变现象的基础理论;电流变液体的材料及制作工艺;电流变液体性能的试验及测试;电流变技术及其工程应用。

基础理论的研究是为了深刻地认识电流变现象的起因及影响因素,并为找到可供工程应用的电流变液体材料指明方向和依据。高性能电流变液体材料的研制和生产是发展电流变技术的关键,没有高性能和满足工程应用要求的电流变液体,就谈不到电流变技术的工程应用和发展。最后,必须指出发展电流变技术的最终目的是为了工程应用,任何一项高新技术不能成功地应用于生产,推动生产的发展、技术的进步以及促进财富和经济的增长,这项技术也就必然会失去它的根本价值。因此,机理、材料和工程应用乃是发展电流变技术的重要和相互有关的因素。此外,必须指出,为了保证电流变技术发展的科学性,完善的设备必不可缺,没有可以定性、直观和精确定量的测试手段,难以保证整个科研工作的科学性,使电流变技术的发展失去科学的依据。

多年来,经过国内外科学技术工作者的辛勤努力,电流变技术由鲜为人知的一门学科,发展到今天,已逐步成为一门引人注目的热门学科,目前在国内外参与此项科研开发的人员日益增多,各国投入的物力和人力也日益增加。因此,为了有力促进这门学科的发展,归纳和总结多年来人们在此领域的工作成果,系统地向人们进行广泛介绍,已经变得十分必要。

作者作为我国在此领域最早从事此项技术研究的科研人员之一,深感编撰这样一本著作是自己的一种责任和心愿。尽管个人才薄学浅,但是作者愿以最大的努力去完成这项工作,以便对后来人有所帮助。

编写本书时,作者力求作到以下几点,并以此作为编写本书的

指导原则:

1. 尽可能以作者参与的科学研究和科学试验为基础来编写此书,因为实践是知识的第一来源,同时实践也是检验真理和区别科学真伪的重要依据。

2. 广泛介绍国内外学者在此领域已取得的成就和成果。

3. 充分注意在介绍本项技术时的系统性和完整性。

4. 重视理论联系实际,所介绍的理论应能够说明问题和指导实践。

5. 重视本项技术的工程应用,虽然到目前为止,用电流变技术开发成功的产品,尚未进入市场和商品化,但作为一门未来的高新技术,这是最为重要的一个内容。

希望本书各章节所介绍的内容,能够为后来人在开拓一个新的工程领域时有所帮助。

另外,作者所从事的电流变技术研究工作,始终是在国家自然科学基金委员会的资助下进行的,在十年内共三次给作者以资助。因此,可以说没有这项资助,也就不会有本书的面世,对此,作者再次向国家自然科学基金委员会表示最深切的谢意。

最后,作者深知自己的能力有限,编写此书只是个人于出一种责任驱使而必须从事的工作。由于能力和水平,谬误和不当之处敬请读者指正。

著 者

一九九九年十月于北京



作者简介

魏宸官,1933年8月20日生于江苏省常州市。1953年毕业于清华大学,现为北京理工大学教授、博士生导师。曾任北京理工大学校学术及学位委员会副主任,车辆工程学院学术及学位委员会主任,中国兵工学会学术工作委员会委员,全国高等工科院校教学指导委员会军用车专业主任委员。长期从事履带车辆、轮式车辆及传动科学的教学和科研工作,共出版专著及译著12种,发表论文百余篇,其代表作是:

《坦克理论》、《履带行驶装置原理》、《车辆液力传动》、《液体粘性传动技术》及《电流变技术原理》。是我国在这些学科领域最早的开拓者和倡导者,在国内外有较高的知名度。由于在上述学术和工程领域的成就,曾获国家发明奖1项、部级科技进步奖4项、发明专利1项、实用新型专利6项。1986年12月由于在液体粘性传动方面的突出成就,获得第35届尤里卡国际发明博览会个人发明最高荣誉奖,一级骑士勋章。1990年获人事部授予的国家有突出贡献的中青年专家称号。

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 有关电流变技术的基本概念	(1)
1.2 电流变技术的发展历史	(3)
1.3 电流变技术进入工程领域的发展.....	(16)
1.4 电流变技术能够作为一门高新技术获得发展的 依据.....	(21)
1.5 电流变技术发展的现状,面临的问题及今后的 工作.....	(24)
第二章 电流变效应及其机理	(31)
2.1 引言.....	(31)
2.2 电流变效应的定义和特征.....	(32)
2.3 有关电流变效应机理的基础知识.....	(33)
2.3.1 电导体和电介质.....	(33)
2.3.2 电介质的极化.....	(37)
2.3.3 电介质极化的可能形式及微观结构.....	(39)
2.3.4 电介质的电极化强度和极化率.....	(42)
2.3.5 电介质的相对介电系数 ϵ_r	(47)
2.3.6 电介质的介电损耗.....	(51)
2.3.7 电介质的介电击穿.....	(53)
2.3.8 电介质的电导.....	(55)
2.3.9 极化电荷及其建立的电场.....	(59)
2.4 电流变效应的机理.....	(64)
2.4.1 电流变液体的极化.....	(66)
2.4.2 电流变液体极化后的结构形成.....	(72)
2.4.3 粒子极化后形成稳定结构时的抗剪屈服 应力.....	(78)

2.4.4	影响电流变效应的各种因素	(83)
2.5	附录	(98)
2.5.1	电流变液体的双电层极化模型	(98)
2.5.2	表面力	(106)
2.5.3	电流变液体在零电场时的粘度 η_0	(114)
第三章	电流变液体	(117)
3.1	电流变液体的分类	(117)
3.2	电流变液体的组成及要求	(120)
3.2.1	电流变液体的分散相——固体粒子	(120)
3.2.2	电流变液体的分散介质——基础液	(122)
3.2.3	电流变液体中的添加剂	(125)
3.3	对电流变液体的性能要求	(126)
3.4	常用的电流变液体	(130)
3.4.1	粒子为无机化合物类型的电流变液体	(131)
3.4.2	粒子为有机化合物类型的电流变液体	(134)
3.4.3	粒子为复合材料的电流变液体	(137)
3.4.4	单相均匀的电流变液体——液晶及其混 合液	(141)
3.4.5	电磁流变液体	(160)
3.4.6	关于电流变液体发展的总结	(167)
3.5	电流变液体的性能及其评价指标	(169)
3.6	某些商品化电流变液体的性能简介	(178)
3.6.1	美国 Lord Corporation 生产的 VersaFlo™系列电流变液体	(178)
3.6.2	日本 Nippon Shokubai 公司生产的 TX—ER 系列的电流变液体	(195)
3.6.3	德国 Bayer 公司生产的 Rheobay 系列的 电流变液体	(203)
3.7	几种典型的非商品化电流变液体的制配工艺 过程和性能	(209)
3.7.1	以聚丙烯酸为分散相粒子的电流变液体	(209)
3.7.2	以硫酸联氨锂为分散相粒子的电流变液体	(215)

3.7.3	分散相为金属氧化物超微粒子的电流变液体	(218)
3.8	关于电流变液体的总结	(222)
3.8.1	电流变液体的发展过程	(223)
3.8.2	指导研究电流变液体的机理	(224)
3.8.3	工程应用对电流变液体的要求	(224)
3.8.4	在工程应用实践中发现的当前电流变液体性能上的不足和问题	(225)
3.8.5	电流变液体材料和机理研究与工程应用的关系	(226)
3.8.6	机理研究中当前迫切要求解决的问题	(227)
3.8.7	当前材料研制中希望解决的几个问题	(228)
3.8.8	结束语	(229)
3.9	附 录	(229)
3.9.1	现有电流变液体及其组成	(229)
3.9.2	关于电流变液体的性能评价标准及性能测试方法标准的建议	(236)
第四章	研究电流变液体性能的有关设备和仪器	(240)
4.1	多功能可调压、调频的交直流高压电源	(240)
4.2	颗粒度分析仪	(247)
4.3	电流变效应的微观显示系统	(251)
4.4	电流变液体流变学性能的测试系统——电流变仪	(254)
第五章	电流变技术的工程应用	(269)
5.1	电流变技术的应用领域	(270)
5.2	电流变液体器件的特点	(273)
5.3	典型的电流变液体器件	(274)
5.3.1	电流变液体阀	(275)
5.3.2	电流变液体减振器和隔振器	(285)
5.3.3	电流变液体减振器的设计	(293)
5.3.4	电流变液体隔振器的设计	(313)
5.3.5	电流变液体离合器和制动器	(324)

5.3.6 电流变液体离合器的设计示例	(329)
第六章 电流变技术的总结及未来的发展前途	(339)
参考文献	(350)
I 作者发表的有关电流变技术的文献著作	(350)
II 有关电流变技术的博士学位论文	(353)
III 有关电流变技术的重要国际会议及国内会议论 文集	(354)
IV 有关发展电流变技术的重要论证报告	(356)

第一章 绪 论

1.1 有关电流变技术的基本概念

电流变技术是指将电流变效应或电流变现象(Electrorheological effect 或 Electrorheological phenomenon)成功地应用于工程实践的一项技术或一门学科。它所涉及的内容包括电流变效应的机理,电流变液体材料及电流变液体效应的工程应用。

电流变技术的理论基础是电流变效应。电流变效应是指某种特殊液体,在电场作用或控制下,表征液体流动属性的粘度,在一定的剪切速率下,可发生明显变化的现象,而且这种变化是可逆的、连续无级的和可以控制的。这种变化能够使可流动的液体变稠、变硬直至停止流动,达到凝固,如图 1-1(a);并且使此时的液体具有固态的属性,即保持形状或具有明显的抗剪切屈服应力出现,或者表示固体特征的弹性模量有明显的变化。而当电场消失时,电流变液体立即变稀,恢复原来液体状态,如图 1-1(b)。电流变效应的这些特征,为它在工程应用中提供了广阔的前景。

电流变技术的物质基础是电流变液体(Electrorheological Fluids),电流变液体是指在电场作用下能产生明显电流变效应的一类特殊液体。目前可以产生电流变效应的电流变液体很多,但是只有那些性能优良、工作稳定、寿命长,且能够全面满足工程应用要求的电流变液体才具有真正的工程应用价值,而这样的液体目前正是人们花费极大人力和物力去探索寻求的课题之一。

电流变技术的工程应用则是指充分利用电流变效应的特长和传统的机械设计方法,去开拓某些为实现规定功能的新装置和新产品。尽管机械设计方法是一种古老和传统的方法,但是开发利用

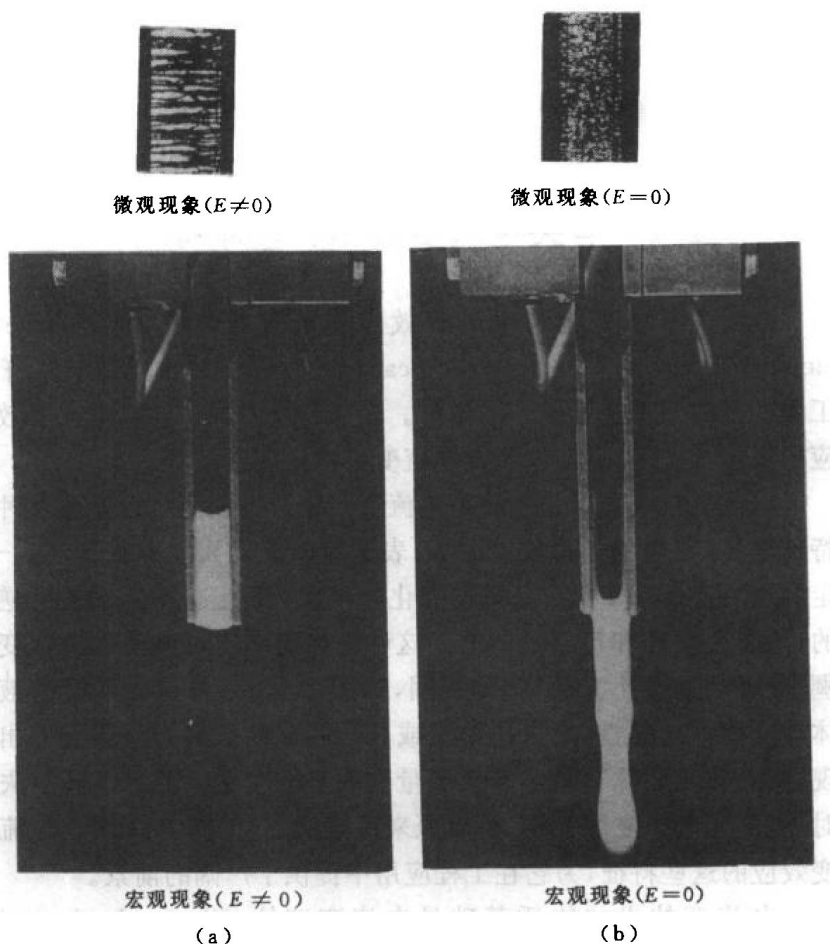


图 1-1 电流变效应的宏观及微观情况
 (a) 电流变液体在电场作用下, 固化或停止流动;
 (b) 电流变液体失去电场作用时, 恢复流动

电流变效应而构思的产品, 则必须充分考虑电流变效应以及其工作介质——电流变液体的某些特殊条件。

以上简单描述了有关电流变技术的全貌及有关的基本概念。

1.2 电流变技术的发展历史

一种现象,从发现到逐步发展成为一门能用于生产实践、创造物质财富、并造福于人类的新兴技术和学科,需要众多的人们为之奋斗和努力,而且需要一定的时间。

电流变技术的发生和发展,正是这样。从电流变效应被发现,直至今天能初步形成一门新的学科——电流变学(Electrorheology)和一门新兴的技术——电流变技术(Electrorheological Technology),大致经历了 50~100 年的时间。其中有很多国家的学者,从各自的专业角度,对电流变技术的发展作出过贡献。他们从电流变现象的机理、电流变液体的材料以及电流变液体的工程应用进行了大量的研究和开拓工作,大大丰富了有关电流变技术的内容和知识,使它有可能形成今日为人们所关注的一门崭新的技术和学科。

在电流变技术的形成和发展过程中,人们公认(因为在 1989 年第二届国际电流变液体学术会议上,各国学者在会议主持人的倡议下,一致通过了一项决议,即把电流变效应称作为 Winslow 效应)美国学者 W. M. Winslow 是电流变技术的创始人。

Winslow 从 1939 年即开始了电流变技术的研究工作,大致在 19 世纪 40 年代至 50 年代,他发表和申请了许多有关电流变效应、电流变液体材料和电流变液体工程应用方面的论文和专利。可以说电流变技术的概念是他首先用自己的全部工作形成和建立的。

Winslow 在电流变技术发展中的功绩之一是发现和找到了具有较强电流变效应的电流变液体及配制这种液体的材料。这种液体不是单组份的液体,也不是多组份的溶液,而是一种由介电的固体粒子(Partical 分散相)和绝缘性良好的基础液(Base Oil 分散介质)所组成的悬浮液,这种液体具有非常奇特的性能,它在电场作

用下当剪切速率较低时,或液体处于静止时,其表观粘度可比无电场下增大几个数量级,并且呈现凝固或固化状态,使不能抗剪切的液体产生屈服现象,并具有明显的屈服应力,而且当液体在低速流动时使有电场时的剪切应力比无电场时的剪切应力增大若干倍,这种液体以前是没有的,它被命名为电流变液体。这是一项重大的发现,并且可以说是 Winslow 首先发现的。正因为如此,人们建议把电流变效应称作 Winslow 效应。

Winslow 在电流变技术发展中的第二个功绩是他最早看到电流变效应用于工程实践的可行性和它极其宝贵的价值,并以自己发明的电流变液体为工作介质设计和研制了多种可供工程应用的新器件和新装置。如电流变液体离合器、电流变液体的控制器和减振器等,而且申请和获得了多项发明专利。这些专利和构思虽然只停留在样品和原理性的实验阶段,但能够把一种有价值的物理现象变为现实的装置,这是一种创举,它为未来在工程领域开创新一代的产品找到了一种崭新的技术方法。尽管到目前为止还没有见到成熟的、投放于市场的电流变液体装置,但这一构思是极为宝贵的。

Winslow 在电流变技术发展中的第三个功绩是他通过大量观察和实验研究,阐明了电流变液体产生电流变效应的机理。尽管这些阐述在目前看来是不完善的。他把电流变效应的成因,归结为两相悬浮液中的固体粒子,在电场作用下被极化后形成纤维状或链状的结构;这种重新排列的粒子结构(即由无序到有序的结构变化)可以使液体的表观粘度增加,同时链间粒子极化后的相互作用力,可以承受外界的横向剪切力,表现某种固态的属性。

正是由于以上贡献,他在电流变技术的发展上,获得了人们一致的公认。

Winslow 于 1972 年已经从工作岗位退休,但至今他还在从事着他所关心的电流变技术事业,可以说他是一位把毕生精力贡献给这一技术发展的学者。

Winslow 虽然被公认为电流变技术的创始人,但在以前并非无人研究过液体的电流变现象。文献查阅告诉我们,早在 19 世纪 80 年代就有很多著名学者从事过与此有关的科学研究,其中有:W. Konig (1885 年), A. W. Duff (1896 年), L. Onsager (1932 年), Y. Bjornstahl (1935 年), E. D. Alcock (1935 年), W. Krosng — Ergen (1936 年), E. N. Andrade (1939 年); C. Dodd (1939 年), S. Sosinski (1939 年)等。

1885 年 W. Konig 在他所发表的论文“几种液体粘性的测定及磁场和电场对液体粘性影响的研究”中,最早对电场强度对不导电的(绝缘的或电介质的)液体粘性的影响进行了研究,但这项研究未发现粘度有明显的变化。但它却是探讨电场对液体粘性影响的第一人。

1896 年 A. W. Duff 的论文“极化后的绝缘液体的粘度”,首先通过实验,研究了极化后绝缘液体的粘度问题。Duff 测量了在电场作用下这类液体粘度的变化。他研究的液体是甘油、蓖麻油和沥青。但研究表明,不同的液体,其粘性的影响是不同的。蓖麻油在场强为 2.7kV/mm 时,粘度增加了 53%;而甘油和沥青(石蜡)的粘度变化不明显,甚至降低。

1935—1939 年 Y. Bjornstahl 等连续发表的 3 篇论文:“电场对各向异性液体(液晶)粘性的影响”、“电场对液体和胶状悬浮液体(液晶)粘性的影响”、“电场对各向同性液体粘性的影响”,比较系统地研究了电场对各种液体粘性的影响。他们的结论是:在电场作用下,各向同性液体的粘度降低,各向异性液体的(如液晶)粘度上升。前者粘性的降低,可能是电泳的作用,而后者粘性的增加,则可能是由于电场作用下晶体分子的重新排列,使其轴平行于电场方向所致。

1935 年 E. D. Alcock 首次用旋转粘度计研究了在电场作用下对某些极性和非极性液体粘性的影响,实验用的液体有四氯化碳、苯、氯仿、乙醚、丙酮、硝基苯、甲苯和丁基溴。他得到的结论是:

极性液体的粘性在电场作用下有变化且粘度增加；而非极性液体在电场作用下，其粘性不受电场影响。极性液体粘度的变化最大可达到 200%，其施加的电场强度为 2kV/mm。

与 Winslow 大致同一年代的 E. N. Andrade 和 C. Dodd，在 1939 年、1946 年和 1951 年相继发表了研究“电场对液体粘性影响”的论文，他们研究工作的主要结论是：

①对非极性液体，不管是无水和不导电的还是有水 and 导电的，在电场作用下，对粘性都没有影响；

②对于导电率极低的极性液体，在电场作用下，对粘性的影响也不明显；

③对于导电的极性液体，则不论是纯粹的液体或掺水的液体，在电场作用下，粘性有重大的变化。

Andrade 的结论与 Alcock 的结论基本相同。他们对粘度发生变化的解释是：

①由于极性分子在电场中的有向排列；

②由于离子在电极表面附近的集聚。但也有人认为这一影响是由于空间电荷所引起的库仑力的作用。

1932 年 L. Onsager 和 R. M. Fuoss 的论文对电场对电解质溶液表观粘度的影响进行了研究，并提出了用离子氛的概念来解释小分子电解质溶液粘度在电场作用下增大的现象。他认为离子氛在剪切力场中的变形，是导致溶液表观粘度增大的原因。

1936 年 W. Krösgen-Ergen 研究了电场对悬浮液的粘度的影响，当悬浮液较稀，且粒子带有电荷时，静电对悬浮液的表观粘度的影响可用如下公式表示，即

$$\eta_0 = \eta_g \left\{ 1 + 2.5\Phi \left[1 + \frac{1}{\sigma\eta_g a^2} \left(\frac{\xi\epsilon}{2\pi} \right)^2 \right] \right\}$$

其中， η_0 ——悬浮液的表观粘度；

Φ ——粒子的体积分数；

ϵ ——基础液的介电系数；

σ ——悬浮粒子的电导率；

a ——粒子的半径；

ξ ——粒子的 Zeta 电势；

η_g ——基础液(分散介质或连续相)的粘度。

上述关系是在悬浮液中粒子浓度较稀,且不存在双电层相互交叠的前提下得到的。它是由双电层在剪切力场中的变形所引起的。当悬浮液中的粒子的体积分数较大时,双电层会相互交叠,从而出现静电斥力,上述关系就不复存在。

1939 年 Sosinski 和 Sokolow 在其所发表的论文“电场对液体粘性的影响”中,介绍了他们在 1935 年所作的有关电场对液体粘性影响的研究结果。

应该说在 Winslow 以前,许多学者所从事的研究工作和发表的论著,虽然或多或少与电流变技术的发展有一定的关系,但与目前我们所理解的电流变效应、电流变液体以及它的工程应用,还是存在着明显的差别。

首先,他们用来研究电场对液体粘性影响所应用的液体是一般的纯液体、溶液或悬浮液,这些液体与我们目前所理解的电流变液体有着明显的区别,最主要的差别在于前者在电场作用下,其粘度只有微弱的变化,一般不超过 200%;而当今的特殊液体——电流变液体,在电场作用下的粘度比无电场作用时,在剪切速率较低时,可增大几百甚至几千倍以上,同时有可能出现固化效应,甚至液体停止流动。因此他们所研究的液体不能称作电流变液体,真正的电流变液体是 Winslow 首先制成和发明的。

其次,由于他们所应用的液体不是电流变液体,因此,他们把自己的研究范围定义在电粘效应(Electroviscous effect)之内,这与目前所理解的电流变效应(Electrorheological effect)是完全不同的概念。

最后,也是很重要的一点,即 Winslow 以前的许多研究者,他们只限于研究电场对液体粘性影响这一物理现象,他们的研究工