

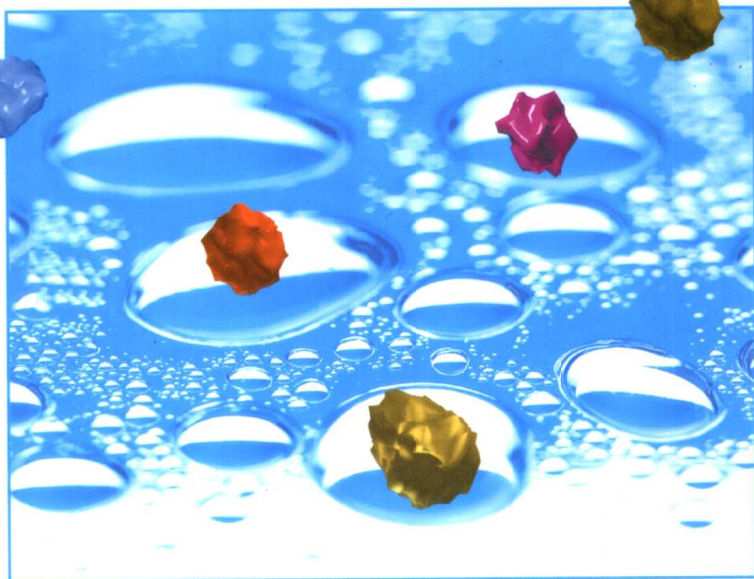
工业悬浮液

—— 性能，调制及加工

Industrial Suspensions

— properties, preparation and processing

卢寿慈 主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

工业悬浮液

——性能,调制及加工

卢寿慈 主编

化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工业悬浮液：性能，调制及加工/卢寿慈主编.
北京：化学工业出版社，2003.5
ISBN 7-5025-3712-0

I. 工… II. 卢… III. 悬浮液 IV. TQ047.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 015236 号

工业悬浮液——性能，调制及加工

卢寿慈 主编

责任编辑：龚浏澄 邢 涛

责任校对：郑 捷

封面设计：潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话：(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 19¼ 字数 520 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3712-0/TQ·1689

定 价：42.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

《工业悬浮液——性能,调制及加工》

撰稿人名单

卢寿慈:北京科技大学土木及环境工程学院,教授
第1章;第2章;第4章;第7章;第13章;
第16章

毋伟:北京化工大学化学工程学院,博士
第3章

李桂春:黑龙江科技学院资源及环境工程系,副教授
第5章

李茂林:长沙矿冶研究院,教授级高级工程师
第6章

王剑波:安徽理工大学化工学院,副教授
第8章

隋智慧:北京科技大学土木及环境工程学院,在读博士
第9章

方启学:北京矿冶研究总院,教授级高级工程师
第10章;第11章。

宋少先:Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 墨西哥,教授
第12章

任俊:中国科学院理化工程研究所,副研究员
第14章

郑水林:中国矿业大学北京校区化工学院,教授
第15章

前 言

悬浮液是指固体颗粒作为分散相与液体介质（连续相）所构成的固-液两相体系。在工业生产过程中悬浮液无处不在，有的生产过程是直接在悬浮液中进行的，例如无机盐工业、化肥工业、食品工业及农副产品加工业、造纸工业、矿物加工及湿法冶金、特种材料、制药业等；在有的工业生产中悬浮液本身便是最终产品，例如涂料、油漆及油墨，研磨液、钻井泥浆及水煤浆等；有时，悬浮液本身就是被直接处理的对象，例如，水处理工程中固体悬浮物的脱除等。据统计，化学工业领域中，大约 80% 的产品都包含着固-液加工过程。可见，工业悬浮液的特性、制备、调节及加工，工业悬浮液加工过程的工艺及理论基础，具有典型的跨行业、跨专业、跨学科的性质，在许多加工工业中均具有重要意义并备受关注。然而，迄今为止对工业悬浮液的探讨却主要局限在各自的工业部门中，因此往往是孤立的、表象的。在国内外很少有跨越行业，从工业悬浮液的普遍特性出发，深入讨论工业悬浮液的行为，调制及加工的专门论著出版。

编者在多年的研究生教学及科研实践中，从工业悬浮液的共性入手，探索并归纳工业悬浮液的基本行为及特性，工业悬浮液的调制及工业悬浮液加工的各种单元过程的理论基础及最新进展。试图从更高层次上去认识工业悬浮液的行为规律，更深入的了解并自如地控制悬浮液的加工过程。这些尝试便逐渐形成了本书所展现的总体轮廓及工业悬浮液学科体系。

全书主要由两大部分构成：工业悬浮液的理论基础及工业悬浮液制备及加工单元过程。书中的前几章主要讨论构成悬浮液的两相——固体颗粒及液体介质，它们的性质、固-液两相及固体颗粒间的相互作用、固体颗粒在流体中的运动规律及工业悬浮液的流体

动力学以及流变学特性，颗粒在悬浮液中的聚团、分散及离析等理论基础；后面的各章则分别阐述各种工业悬浮液单元过程，包括该过程的工作原理、设备及工艺、过程的最新进展及研究动向，并结合具体的工业部门举例说明其工业应用。在撰写过程中还注意反映撰写者本人在该领域的研究成果及观点。

这本书是集体创作完成的。编者邀请了一些在专业上卓有成绩的年轻专家，由他们分工撰写他们所擅长的各章。有的实际上反映了他们的博士论文工作及随后的研究成果，有的则是他们在攻读博士研究生期间的工作的一部分。读者可以发现，各章的撰写风格及侧重点不尽相同；为了保持各章的相对独立性及系统性，也会有少量的重复。

编者期望，本书的出版将加深人们对工业悬浮液这一工业生产中普遍存在的多相体系的认识，从而对从事与工业悬浮液有关的研究、教学及生产的科学工作者及工程技术人员有所裨益。

编者诚恳地欢迎对本书的批评和建议。

作者

2003. 1

内 容 提 要

全书共 16 章，首先阐述工业悬浮液中固体颗粒的表面性能及改性，颗粒的沉降及悬浮、聚沉、絮凝及团聚，悬浮液流体动力学、流变学特性及管道输送。然后介绍高分子絮凝、疏水聚团及其工业应用，悬浮液的分散调控，工业悬浮液的制备、颗粒分级和化学合成法制备工业悬浮液。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工业悬浮液的特征	1
1.2 工业悬浮液加工过程的要素	6
参考文献	11
第 2 章 固体颗粒的表面特性及固体表面与液体的作用	12
2.1 固体颗粒的表面结构	12
2.1.1 新鲜表面的不饱和度	12
2.1.2 颗粒表面的不均一性	18
2.1.3 表面能和表面自由能(表面张力)	20
2.1.4 固体物质按表面能的分类	23
2.2 工业悬浮液中的液相介质	24
2.2.1 概述	24
2.2.2 水的结构	25
2.3 固体颗粒与水的相互作用	29
2.3.1 表面离子的水合作用	30
2.3.2 颗粒表面的羟基化	31
2.4 界面水	33
2.4.1 固体断裂面同水的作用	33
2.4.2 界面水的结构	34
2.5 固体颗粒与水相互作用的热力学分析	38
2.5.1 极性表面与水的作用	38
2.5.2 非极性表面与水分子的作用	39
2.5.3 固液相互作用能	39
2.6 颗粒表面的润湿性	39
2.6.1 接触角及其物理意义	39
2.6.2 固体表面按天然润湿性的分类	41
2.7 界面双电层	42

2.7.1 颗粒表面荷电的原因	42
2.7.2 表面电势和等电点(pH_{PZC})	45
2.7.3 界面双电层的结构及电荷和电势分布	48
2.7.4 非水介质中的双电层	55
参考文献	57
第3章 固体颗粒的表面改性	61
3.1 概述	61
3.2 无机粉体的吸着法表面改性	63
3.2.1 吸着法改性分类	63
3.2.2 化学改性剂	65
3.2.3 无机粉体表面化学改性机理	68
3.2.4 化学改性剂与无机粉体之间的相互关系	71
3.2.5 无机粉体化学法聚合物接枝包覆改性	74
3.2.6 化学法表面改性应用举例	83
3.3 机械力化学改性	87
3.3.1 概述	87
3.3.2 机械力化学作用机理	88
3.3.3 无机固体颗粒的机械力化学改性及复合改性	91
3.4 物理改性	99
3.4.1 超声辐照改性	99
3.4.2 辐照改性	100
3.4.3 矿物颗粒表面电化学改性	102
参考文献	102
第4章 颗粒-颗粒相互作用	106
4.1 表面力的直接测量	106
4.2 范德华作用及范德华力	109
4.2.1 分子间的范德华作用	109
4.2.2 颗粒间的范德华作用能及作用力	110
4.2.3 Hamaker(哈梅克)常数	112
4.2.4 吸附层对范德华作用能的影响	113
4.3 双电层交叠作用能(静电作用能)及作用力	115
4.3.1 同质颗粒间静电排斥作用	115
4.3.2 异质颗粒间的静电作用	120

4.3.3 吸附层对静电作用能的影响	123
4.4 位阻效应	124
4.4.1 位阻效应的一般描述	124
4.4.2 穿插作用	125
4.4.3 压缩作用	129
4.4.4 总位阻效应	129
4.5 溶剂(水)化膜及其作用——颗粒间的结构力(结构压)	130
4.6 粒间疏水作用	135
4.7 磁吸引作用	139
4.7.1 铁磁性颗粒间的磁吸引能(力)	140
4.7.2 弱磁性颗粒间的磁吸引能(力)	140
4.7.3 铁磁性颗粒与弱磁性颗粒之间的磁吸引能(力)	143
4.8 粒间偶极作用	144
4.9 受各种粒间作用制约的颗粒聚团/分散状态	145
4.10 不同粒度的颗粒的粒间作用	148
参考文献	150
第5章 颗粒的沉降及悬浮液的浓密	153
5.1 引言	153
5.2 沉降与颗粒粒度的关系	154
5.2.1 颗粒的布朗运动位移与粒度的关系	154
5.2.2 沉降与粒度的关系	155
5.2.3 颗粒沉降的粒度极限	156
5.3 颗粒的沉降行为及沉降运动方程	157
5.3.1 自由沉降时的颗粒沉降行为	158
5.3.2 高浓度悬浮液中颗粒的沉降——干扰沉降	160
5.3.3 器壁效应和二次流	162
5.3.4 悬浮液中颗粒的聚团沉降	164
5.4 悬浮液的浓密	167
5.4.1 浓缩	167
5.4.2 重力浓缩设备	175
5.4.3 离心沉降	179
参考文献	184
第6章 工业悬浮液中颗粒的分级	185

6.1 湿法分级技术分类	185
6.2 分级原理	185
6.2.1 颗粒在流体中的运动	186
6.2.2 分离粒度	187
6.2.3 分级效率及其计算	191
6.2.4 影响分级效率的因素	193
6.3 分级设备	194
6.3.1 重力分级设备	194
6.3.2 离心分级设备	198
6.4 典型分级设备的选择	204
6.5 湿法分级的发展方向	207
6.5.1 分级对象及产品的发展方向	207
6.5.2 分级技术和装备的研制方向	208
参考文献	212
第7章 工业悬浮液的搅拌及搅拌槽内流体动力学	214
7.1 搅拌的目的和搅拌在工业中的应用	214
7.2 搅拌设备	215
7.2.1 搅拌罐	215
7.2.2 静态混合器	220
7.2.3 射流混合器	222
7.2.4 动态在线混合器	223
7.2.5 管道混合器	224
7.3 混合机理	225
7.3.1 体相对流扩散	225
7.3.2 湍流扩散	226
7.3.3 分子扩散	226
7.4 悬浮液流体动力学	227
7.4.1 搅拌作用下流体的流动	227
7.4.2 搅拌槽内液体循环量和压头	230
7.4.3 工业悬浮液操作过程中的剪切速率	232
7.4.4 搅拌槽中的流体动力学特征	233
7.4.5 流动流体中的颗粒运动	243
7.5 悬浮液中固体颗粒的悬浮	248

7.5.1	悬浮状态的分类	248
7.5.2	颗粒悬浮的机制	250
7.5.3	悬浮临界转速	252
7.5.4	用于固体颗粒悬浮的搅拌器型式	254
参考文献		255
第8章 工业悬浮液的流动及管道输送		257
8.1	概述	257
8.2	悬浮液的流动特性	259
8.2.1	固体物料在管道中的运动状态	259
8.2.2	固体颗粒的悬浮机理	260
8.2.3	固液两相流在管道中的阻力特性	262
8.3	工业悬浮液管道输送的压降计算	271
8.4	临界流速和输送流速	274
8.4.1	临界流速及其变化规律	274
8.4.2	工业悬浮液的输送流速	282
8.5	悬浮液管道输送的减阻	283
8.5.1	固液两相流管道输送减阻研究的现状	283
8.5.2	固液两相流管道输送减阻研究存在的问题	285
8.5.3	固液两相流管道输送减阻研究的发展方向	286
8.6	悬浮液输送管道设计中需要考虑的几个问题	287
8.6.1	悬浮液输送管道的磨蚀与腐蚀	287
8.6.2	管材的选择	290
8.6.3	悬浮液输送泵的选择	294
8.7	几种典型的悬浮液管道输送系统	304
8.7.1	精矿悬浮液管道输送	304
8.7.2	煤浆管道输送	306
8.7.3	尾矿浆体管道输送	307
参考文献		307
第9章 悬浮液流变特性		310
9.1	导论	310
9.2	悬浮液流变学	310
9.2.1	非牛顿流体的类型	311
9.2.2	非牛顿流体流动时的一些异常特性	317

9.2.3 非牛顿流体的表观黏度	318
9.2.4 悬浮液流变学	319
9.3 流变学在工业悬浮液中的应用	335
9.3.1 钻井液	335
9.3.2 水煤浆	338
9.3.3 陶瓷料浆	340
9.3.4 涂料和油墨	342
9.3.5 水泥浆	343
9.4 流变学的研究及应用进展	344
参考文献	348
第10章 悬浮液聚团:颗粒的聚沉,絮凝及在物理场中的聚团	351
10.1 引言	351
10.2 颗粒的聚沉	351
10.2.1 次能谷中颗粒的聚沉	353
10.2.2 主能谷中颗粒的聚沉	355
10.2.3 抗聚沉技术	358
10.2.4 颗粒的聚沉与抗聚沉机理	361
10.3 颗粒的絮凝	365
10.3.1 无机物絮凝	365
10.3.2 高分子絮凝	368
10.3.3 疏水絮凝	370
10.4 颗粒在物理场中的聚团	371
10.4.1 颗粒在电场中的聚团——电聚沉	371
10.4.2 颗粒在磁场中的聚团——磁(种)聚团	373
参考文献	395
第11章 高分子絮凝及其工业应用	397
11.1 引言	397
11.2 高分子絮凝剂	398
11.3 高分子絮凝机理	404
11.4 高分子絮凝的应用研究和工业实例	404
11.5 高分子絮凝分选新技术的研究与应用前景	405
11.5.1 赤铁矿、石英的高分子絮凝	405
11.5.2 磁种-高分子复合聚团	406

11.5.3 磁种-高分子复合聚团机理研究	414
11.5.4 磁种-高分子复合聚团分选	423
参考文献	426
第 12 章 疏水聚团及其应用	428
12.1 疏水聚团的主要影响因素	428
12.1.1 颗粒表面疏水性	428
12.1.2 能量输入	431
12.1.3 非极性油	433
12.1.4 粗颗粒的影响	436
12.1.5 外磁场的影响	437
12.2 疏水聚团理论	439
12.2.1 疏水作用力	439
12.2.2 疏水颗粒体系的分散稳定性	441
12.3 疏水聚团的工业应用	441
12.3.1 微细粒矿物的聚团浮选	441
12.3.2 油团聚制备洁净煤	444
参考文献	446
第 13 章 聚团动力学	449
13.1 悬浮液中颗粒的碰撞及聚团生成速率方程	450
13.1.1 异向聚沉中的颗粒碰撞及聚团生成速率方程	450
13.1.2 层流中颗粒的碰撞	452
13.1.3 湍流场中颗粒的碰撞及聚团形成速度	453
13.2 聚团的生成,长大及破坏	455
13.2.1 聚团的强度	455
13.2.2 聚团破坏的速率方程	459
13.2.3 临界颗粒黏附强度	460
13.2.4 最大聚团粒度, $d_{\max}$	462
13.2.5 聚团总动力学方程及聚团生成、长大与破坏的动力学 模型	464
13.3 聚团速率常数	469
13.3.1 初始聚团速率常数的理论计算	469
13.3.2 初始聚团速率常数的实验获得方法	469
13.3.3 聚团度的测量	470

13.4	聚沉动力学	471
13.5	疏水聚团动力学	473
13.5.1	疏水聚团与聚沉的动力学差异	473
13.5.2	油桥对疏水聚团的强化	475
	参考文献	476
第14章	悬浮液的分散调控	478
14.1	悬浮液分散体系	478
14.1.1	悬浮液分散体系的分类	478
14.1.2	分散质与分散介质	478
14.1.3	分散剂	479
14.2	悬浮液的分散原理	482
14.2.1	固体颗粒的润湿	482
14.2.2	固体颗粒悬浮液的分散/聚团状态	483
14.2.3	固体颗粒在水-气界面的漂浮粒度与润湿性的关系	483
14.2.4	悬浮液中固体颗粒分散的判据	485
14.2.5	颗粒的分散调控因素与其润湿性的关系	485
14.3	固体颗粒在不同悬浮介质中的分散特征	486
14.4	悬浮液分散的主要调控因素	488
14.4.1	在水中分散的主要调控因素	488
14.4.2	在非水介质中分散的主要调控因素	496
14.5	工业悬浮液分散的调控	498
14.5.1	介质调控	498
14.5.2	分散剂调控	499
14.5.3	机械搅拌调控	505
14.5.4	超声调控	507
	参考文献	509
第15章	机械粉碎法制备工业悬浮液	511
15.1	概述	511
15.2	机械粉碎原理	512
15.3	干法粉碎制备工业悬浮液	518
15.3.1	制备工艺	518
15.3.2	制备设备	519
15.4	湿法粉碎制备工业悬浮液	533

15.4.1	制备工艺	533
15.4.2	湿法粉碎设备	534
15.5	机械粉碎法制浆实践	543
15.5.1	重质碳酸钙	543
15.5.2	高岭土	543
15.5.3	胶体石墨	546
15.5.4	水煤浆	547
	参考文献	550
第 16 章	悬浮液的制备-液相合成法	552
16.1	概述	552
16.2	基本原理	553
16.2.1	晶核的生成(析晶)	553
16.2.2	成核阶段及其影响因素	555
16.2.3	颗粒的长大	557
16.2.4	沉淀颗粒粒度及形貌的控制	558
16.3	沉淀法	564
16.3.1	概述	564
16.3.2	离子反应	566
16.3.3	水解法	568
16.4	溶胶-凝胶法(Sol-Gel 法)	571
16.4.1	凝胶及其通性	572
16.4.2	溶胶-凝胶过程	573
16.4.3	溶胶-凝胶的转化过程	575
16.4.4	溶胶及凝胶的结构	578
16.4.5	溶胶-凝胶法制备超细颗粒	581
16.5	限制化学环境法	583
16.5.1	反胶团法与微乳液法	583
16.5.2	微乳液法制备超细颗粒	585
16.5.3	有机高分子乳胶悬浮液的制备	590
16.6	水热法	594
	参考文献	597

第 1 章 绪 论

悬浮液泛指固体颗粒在液体中以弥散悬浮状态存在的固-液两相或多相体系，固体颗粒是分散相，而液体是连续相。在自然界中，诸如携带泥沙的河水、泥石流以及动物体内的血液等为悬浮液。在工业生产中，悬浮液更为常见。有的最终产品就是悬浮液，例如涂料、油墨、石油钻井液、水煤浆、机械研磨液等。悬浮液也经常是生产过程的中间物，例如湿法冶金及选矿过程中的矿浆、纸浆、生物细胞培养液以及许多化工产品生产过程中的料浆等，在化学工业领域，80%的产品都包含着固-液加工过程。工业废水也往往是悬浮液，因为其中含有数量不等的固体颗粒。所有这些与工业生产有关的悬浮液统称为工业悬浮液。工业统计表明，强化工业悬浮液加工过程对改善工业生产，提高经济效率具有重要的实际意义。

1.1 工业悬浮液的特征

工业悬浮液的特征之一是它的多分散性。工业悬浮液中的固体颗粒的粒度往往呈广谱分布。通常，工业悬浮液中的固体颗粒的粒度小于 $100\mu\text{m}$ ，较粗的如水煤浆，其中的煤粒平均粒度为 $40\mu\text{m}$ ，大于 $74\mu\text{m}$ 的煤粒含量约占 20%，最大颗粒可达 $300\mu\text{m}^{[1]}$ 。再如石油钻井液，含有低密度固相颗粒，主要为膨润土、钻屑等，其粒度主要在 $2\sim 44\mu\text{m}$ 区间，占 56%~70%，大于 $74\mu\text{m}$ 的粒级也不少，但均小于 $200\mu\text{m}$ 。钻井液加重材料，如重晶石，其粒度范围是 $2\sim 74\mu\text{m}^{[2]}$ 。大多数颜料的平均粒径介于 $0.01\sim 1.0\mu\text{m}$ 之间，例如钛白 $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ ，锌白 $0.2\mu\text{m}$ ，铁红 $0.3\sim 0.4\mu\text{m}$ ，炭黑 $0.01\sim 0.3\mu\text{m}$ ；但是体质填料的粒径较大，单一粒径可达 $100\mu\text{m}$ ，平均粒径为 $50\mu\text{m}^{[3]}$ 。在精密陶瓷材料及纳米材料的化学合成中则