

第一章 船舶静电事故

因静电放电引起的船舶事故，国内外均时有发生。为了便于吸取教训，也为了便于对船舶事故进行深入地分析研究，下面分几种类型，把国内外典型的重大船舶事故作一些介绍。

第一节 油船洗舱静电事故

1969年12月在不到1个月的时间内，有3艘超级油船因洗舱作业发生了爆炸，使整个航运界为之震惊。

1969年12月11日荷兰Shell Tankers N.V公司一艘20.8万t的超级油船“MARPESSA”号(1969年10月刚由日本建造成功下水不久)，在向波斯湾压载航行的途中，开始用海水洗舱作业。12月11日第2中央舱冲洗完毕，12日正在冲洗第5中央舱时发生爆炸。船体于12月14日23点30分沉没。1名船员失踪。

1969年12月29日，Shell Tankers U.K公司一艘20.8万t的超级油船“MACTRA”号(1966年3月由联邦德国建造)通过非洲东部的莫桑比克海峡时开始用海水冲洗油舱。从第4中央舱开始冲洗。在冲洗即将结束时发生了大爆炸。2名船员死亡3名受伤。船体遭受严重破坏。

1969年12月30日挪威Hilmarreksten公司一艘20.9万t的超级油船“KONG HAAKON 7”号(1969年8月由挪威建造的新船)，用海水冲洗左右两舷，22日开始，29日结束。30日在两舷中注入压舱水排去第5中央舱压舱水，开始冲洗第5中央舱。当天下午6点结束。然后用蒸汽喷射器除气，同时开始冲洗第4中央舱。但是晚上10点50分第4和第3中央舱突然发生了爆炸。

正当专家们对 3 艘超级油船爆炸事故进行调查、分析和试验研究时,1973 年 11 月 5 日又一艘 21.6 万 t 的超级油船“GOLAR PATRICIA”号 1970 年 1 月日本建造,船主为 Ocen Oil Ventures INC) 在英国卸完原油用喷嘴压力为 0.9MPa 的移动式清洗机 4 台进行洗舱作业。清洗后的污水通过排放管、距废油舱 6m 高的排出口排入右舷废油舱。废油舱内的气体则经通到舷外的塑料软管在距水面 10ft 高处的开口放出。5 号右舷前半部清洗 6h。9 点 30 分开始清洗后半部,12 点 10 分左右废油舱突然爆炸;并诱发其他油舱二次爆炸。船体沉没,一名船员失踪。

法国 1971 年建造的 22 万 t 的超级油船卸完原油在航行中用大容量固定式洗舱机和移动式洗舱机同时进行洗舱作业。8 点通蒸汽,10 点 30 分废油温度为 38℃。14 点再注入蒸汽,这次孔盖打开。14 点 15 分管理员检查右舷废油舱的油汽混合气体浓度约为 8%。这时又开始用海水进行洗舱作业。14 点 55 分想再次清洗左舷废油舱打开水阀给洗舱送水刚转开 1 圈油舱内发生爆炸。

1971 年,一艘 10 万 t 的油船,在联邦德国两个港口卸完伊拉克原油,12 点清洗机同时工作。喷出压力为 1.2MPa。水温为 50℃。17 点 30 分清洗完毕(此时舱内已形成了很强的带电水雾)开始提收洗舱机。同时,为了浚通舱底残留污水,支管还在工作。17 点 55 分机匠减慢了 2 号泵的转速,此时水手长和 4 名水手站在洗舱孔附近,将系着的软管和洗舱机一起提出,提出时突然发生爆炸。船体沉没,一名船员失踪。在静电场中提升已成孤立导体的洗舱机,洗舱机因感应已带静电,提升时发生火花放电,引起了爆炸。

1978 年 3 月,一艘 5.1 万 t 的油船,在对装过石脑油和柴油的油舱进行清洗时,突然爆炸。

第二节 船舶压舱水静电事故

1967~1972 年间,若干艘大型 OBO 船(Oil-bulk-ore 即石油一

散装货—矿石混装船)，在海上相继发生爆炸。这几次爆炸事故与洗舱作业并无关系。经国际航运协会油船工作委员会组织的专家工作组调查、试验、研究最后认为：混合压舱水在激涌时的电位与油船在洗舱时是相似的。比如在存在油脚水的货舱中每边最大为 4° 的角度摇晃时，所激起的波浪就足以形成带电的雾气（mist）其电荷密度可与用水清洗含有污水的相似货舱时所产生的电荷密度相比拟，甚至更高。观测到的最大空间电位为 -50kV 最大电荷密度为 $50\text{nC}/\text{m}^3$ 。因此，这些爆炸事故极大可能由静电放电所引起。

不仅如此，受污染的压舱水在排放的过程中，也能产生很强的静电场。由此引起的事故也屡见报道。

1967年12月，一艘7.2万t的OBO船卸下轻质汽油第5舱约有75%深度的污秽压舱水，14日早晨7点35分空的第6舱正在使用射流泵排水时，突然发生爆炸。

1970年10月24日挪威一艘9.6万t的OBO船第9舱正在进行洗舱作业。同时用两个射流泵把污水排至右舷污水舱，舱内约有75%的污水。17点45分，该污水舱突然发生爆炸。

1971年4月2日，一艘15.1万t的OBO船，刚在哈佛卸完原油。它的第1中央舱内装有 $2/3$ 的压舱水（污水）。正在排出污水时，该舱突然爆炸。舱盖被炸飞。

1973年9月，一艘7万t的矿石、石油混装船，卸完原油后装入压舱水驶往南非伊丽莎白港。第7舱突然爆炸，舱盖被炸飞。当时海上有中浪，船体摇晃甚剧，压舱水的波动产生了很强的静电场。

一艘6.8万t的OBO船，1968年3月21日压载航行途中其他舱均已清洁。只有第7舱装有污水，大约只有20%的深度。正利用射流泵进行排水时发生爆炸，舱盖炸飞。

1976年新年，挪威别尔根生航运公司一艘载重22万t的石油矿石船别克·依司脱号在巴西开往日本途中压载航行船舱内突然连续发生3次强烈爆炸，致使船舶裂成几段，迅速沉没海里，

32 名船员只有 2 人生还。

1986 年 10 月我国一艘 2 万多 t 的油船，停靠在码头进行排放压舱水作业。因舱内有块状残余原油，同时用蒸汽管道在舱内加温。当第 2 中央舱压舱水即将排完时，突然发生了爆炸。整条船报废。

第三节 其他类型船舶静电事故

日本下津港于 1949 年 3 月，给停泊在码头上的油船装汽油。用长 6m 直径 10cm 的橡胶管从岸上油罐将油装进油船，舱口直径 35cm，装油开始后几分钟，船上油舱突然爆炸，舱盖炸飞，甲板起火，7 名船员伤亡。据判断是油品带电，静电放电引燃汽油，造成事故。

20 世纪 60 年代初，苏联油船埃罗来夫斯克号也曾发生 3 次相类似的静电起火爆炸。

一艘油船向陆上直径 12m 的油罐卸煤油。泵起动 1min 油罐发生爆炸，罐顶炸飞。幸亏只是油罐爆炸，燃油并未着火。据分析，在卸煤油之前，这条管道用来装载汽油，后来曾用水进行管道冲洗。同时与这条管道连接的汽油管有少量的汽油泄漏，帮助产生爆炸性混合气体。管道冲洗后剩下的水与煤油一起被送入油罐，产生了过量的静电。

1971 年我国某大庆油船，在某港炼油厂装锅炉燃料渣油。但输油管中原来含有较多的汽油、煤油的混合油，随之装入油舱。当船员打开人孔盖观察已装了多少渣油时，大量蒸汽冲出人孔，并冲进附近的舵机间，立即发生爆炸。铁门被吸入，装在舵机间的油桶被打出 2 名船员被烧成重伤。据分析，汽油、煤油蒸汽中带有大量静电，对尖端金属部件放电引起燃烧爆炸。

1993 年 7 月 12 日我国大庆 256 轮中 2 舱发生了爆炸。该船由瑞典 1964 年建造，载货定额 4.7 万 t。7 月 9 日开始中 2 舱一组蒸汽加温管开始加温。由于该船船龄已 29 年，有一组加温管泄

漏。至 7 月 12 日爆炸 加温已有 3d, 当时舱内货油已接近卸空状态。泄漏的蒸汽极易在舱内产生带电的油蒸汽水雾。当用系着化纤绳的铜棒测量油位时, 可能在铜棒上产生感应或聚集电荷而引起对船体静电放电, 或因不慎将测深棒掉入货油舱, 也能产生静电火花。很可能是静电放电火花, 引起了该舱爆炸。

装油时流速太快, 静电起电量很高, 也能引起爆炸。某炼油厂经输油管给一艘 210t 的小油船输送 Jp-4 航空煤油时, 因流速高达 14m/s 输油 10min 后阀门附近突然发生了爆炸。1972 年 12 月至 1973 年 1 月, 加拿大发生的 4 起事故, 1976 年 12 月德国发生的 2 起事故也均与装油速度有关。

用蒸汽喷射清洗油舱, 也能产生很高的静电。1963 年一艘 665t 的小油船, 卸完航空煤油 Jp-4 对 1 号油舱进行蒸舱作业, 2 号油舱却转换为蒸汽喷射作业, 不久, 2 号舱就发生了爆炸。

不仅蒸汽喷射能产生静电, 即便本来是用于灭火的二氧化碳灭火器, 二氧化碳气体在压力下释放时, 也会产生很强的静电。如果使用不当, 也会引起事故。1966 年一艘油船的一名船员向油舱释放二氧化碳气体时引起了爆炸。1973 年一水用手提式二氧化碳灭火器向油舱油面喷射二氧化碳气体时, 也引起了爆炸。

第四节 船舶事故统计资料

鉴于国内船舶事故统计资料较少, 现根据 ITSC (International Tanker Safety Conference) 1967 年的一份统计资料以及日本学者今井金矢在《油舱火灾及对策》中提供的资料, 给出了如表 1-1 所示的船舶事故统计表, 供分析研究时参考。该统计表仅包括 1948 ~ 1965 年间船舶事故资料。

从表 1-1 的统计资料可以看出: ①静电放电作为点火源, 早已威胁着船舶安全, 只不过 1969 年以前, 未引起航运界的重视罢了。

与其他点火源相比, 静电火源占第三位, 可见是船舶燃爆的重要火源之一。人们必须重视它, 研究它, 才能有利于船舶安全。

船舶事故统计表 1948~1965)

表 1-1

装货时的船舶事故(27起)			
船 名	时 间	事故主要原因	装 载 货 物
Aurelian	1950.9.20	明火	航空汽油
Dromus	1951.8.20	明火	汽油
Adinda	1951.11.8	明火	汽油
Mollie G	1953.5.7	电气设备	汽油
Argus	1953.6.15	自动发火	汽油
Hammersborg	1955.1.14	—	—
Marianne	1955.5.31	明火	汽油
Liberty Bell	1955.6.12	明火(手电筒火花)	原油
Phryni	1955.8.20	静电	原油
Salem Maritime	1956.1.17	静电	原油
Esso Paterson	1956.3.29	静电	原油
Government Camp	1956.10.19	焦热性残渣	汽油
Norse Mountain	1956.12.26	电气设备	原油
British General	1957.2	自动发火	汽油
Tanker Empress	1959.9.4	电气设备	原油
Astarte	1959.10.18	—	原油
Amoco Virginia	1959.11.8	外部发火源	汽油
Torna	1960.1	装置类	—
Mobil Astral	1960.5.25	明火	原油
Polyana	1960.10.21	Al Mg 化合物	原油
さんじえで丸	1937.5	外部火源(驳船明火)	柴油
楠荣丸	1948.5.2	外部明火	汽油
栗荣丸	1948.12.29	明火	汽油
德岛石油船	1956.6.19	电气设备	汽油
ジョーズチャンピオン	1964.9.25	居民区煤气侵入的明火	原油
Luisa	1965.6.5	—	原油
海藏丸	1965.8.5	居民区煤气明火侵入	原油

续上表

卸货时的船舶事故(26起)			
船名	时间	事故主要原因	装载货物
Elkhound	1949.5.3	—	汽油
Lingula	1950.4.16	外部发火源	汽油
Poplar Branch	1950.11.5	明火	汽油
Beaufighter	1950.12.24	电气设备	原油
Lompoc	1953.7.12	外部发火源	原油
Victor H. Kelly	1953.7.12	外部发火源	原油
Caltex Saigon	1953.9.25	—	汽油、煤油
Otto	1954.6.22	外部发火源	—
Nippo Maru No.28	1954.8.30	电气设备	汽油
Anthong M	1955.4.3	自动发火	汽油
Stanvae HongKong	1955.9.18	外部发火源	—
Detroit	1956.2.6	电气设备	汽油
E. W. Sinclair	1956.4	—	汽油
Amapa	1957.1.17	外部发火源	汽油
British Talent	1957.5.13	自然发火	原油
Hemifuses	1957.7.9	装置着火	原油
Lake Charles	1957.8.27	装置着火	原油
Esso Dakotah	1958.6.4	明火	汽油
Guff Deer	1958.7.3	装置着火	汽油
Mirador	1958.12.16	装置着火	航空汽油
Caltex Gorinchem	1959.4.28	—	汽油
Athel Duchess	1960.4.18	外部发火源	—
Esso Portsmouth	1960.7.9	撞击火花	原油
Texacs Delaware	1960.8.15	装置着火	原油
Rosa Pellegrino	1960.9.13	—	航空汽油
Allgnity	1961.5.25	—	汽油

续上表

油舱清洗时的船舶事故(31起)			
船名	时间	事故主要原因	装载货物
W. S. farish	1948.1.16	电气设备	原油
Fetroil	1950.6.5	静电	原油
Springwater	1951.5.24	—	—
Imperial Ledue	1951.12.10	电气设备	原油
Bulkpetrol	1951.12.24	电气设备	原油
Trykon	1952.5.31	—	原油
Gulfland	1952.8.14	电气设备	汽油
Derwentfield	1952.9.1	电气设备	原油
Marhaba	1952.11.7	电气设备	—
Ticonderoga	1953.9.27	自然发火	原油
Gustaf Reuter	1953.12.22	电气设备	原油
Folga	1954.10.11	静电	汽油
Olav Ringdal Tr.	1954.11.27	电气设备	原油
Duffield	1955.4.24	静电	汽油
President Dutra	1955.8	—	燃料油
President Meny	1956.5.1	静电	汽油
British Bulldog	1956.9.9	撞击火花	原油
Eagle	1956.10.14	静电	原油
Amoco Maine	1957.11.26	电气设备	汽油
Mare Nostrum	1957.2.1	静电	原油
N. W. Gorkey	1957.5.24	—	—
World Splendour	1957.8.20	静电	原油
Sechura	1957.11.18	静电	—
Tupavuori	1958.10.5	装置着火	—
Stanvac Japan	1958.10.9	铝、镁化合物	原油
Athene	1959.5.25	静电	原油
Bulkoccl	1960.5.12	静电	原油

油舱清洗时的船舶事故(31起)

船名	时间	事故主要原因	装载货物
Esso Durham	1961.1.29	铝、镁化合物	原油
アセルクイン	1933.8.31	—	原油
共荣丸	1956.2.1	电气设备(切断电线的火花)	汽油
37浪速丸	1965.10.30	电气设备(灯泡火花)	—

其他方面的船舶事故(44起)

船名	时间	事故主要原因	装载货物	状态
Afghanistan	1948.10	—	—	—
Atlantic Africa	1950.11.30	电气设备	—	卸货
Hoegh Hood	1950.12.20	明火	原油	空船
Atlantic Dealer	1951.2.1	明火	—	压载中
Atlantic Duchess	1951.2.2	—	原油	压载中
Salto 55	1952.1.3	—	—	压载中
Esso Neuquen	1952.2.22	—	原油	满舱
Harold Reinauer	1952.5	明火	—	空船
Taigete	1952.5.17	—	原油	满船
Gundine	1952.6.2	明火	原油	满船
Esso Belfast	1952.7	明火	—	修理
Angy	1953.5.10	—	原油	满船
Pan Georgia	1953.7.23	外部火源	汽油	压载中
Blue Comet	1953.10.29	装置着火	汽油	满船
Newminster	1954.5	明火	—	修理
British Gratitude	1954.4.8	电气设备	原油	满船
Fontvielle	1954.7	电气设备	—	修理
Burmah Sapphire	1955.8	电气设备	—	修理
British Zeal	1955.9	明火	—	修理
Evita	1955.9	—	汽油	修理

续上表

船 名	时 间	事故主要原因	装 载 货 物	状 态
Irvingdale	1955.9.29	—	原油	空船
Tank Enperor	1955.10	撞击火花	—	修理
Regng	1955.2.1	电气设备	原油	满船
Oiltransporter	1956.9.25	—	—	满船
Gilda	1956.12	—	—	修理
Zaragoza	1957.6	明火	—	修理
Perma	1957.5.18	—	大豆油	满船
Albery G. Brown	1957.5	明火	—	修理
British Peer	1957.6.30	撞击火花	—	修理
Julian	1957.9	—	原油	满船
Giovanni Fassio	1958.5.12	撞击火花	原油	满船
London Pride	1958.5.27	自然现象	原油	满船
Mirador	1959.6.13	外部火源	航空汽油	满船
Farmand	1959.4.29	装置着火	—	满船
Stanvac Manila	1959.5.22	外部火源	—	空船
Esso Maraccaibo	1956.6	电气设备 (电灯火花)	—	修理
St. Gobain	1956.10.15	明火	—	修理
Gulf Tiger	1956.12.4	装置着火	石脑油	满船
Johann Halterman	1957.5.28	—	—	空船
Zephyr	1957.8	—	—	修理
Sinclair Petrolore	1957.12.6	—	原油	满船
Egorjevsh	1957.12.19	铝、镁化合物	汽油	空船
Florentino Ameghi- no	1958.5	—	—	修理

续上表

点火源综合统计		
火源类别	事故起数	所占百分比
电气设备	24	18.8
明火	21	16
外部发火源	13	10
静电	13	10
装置类	10	7.8
撞击与摩擦火花	5	3.9
自动发火	4	3.1
铝镁化合物	4	3.1
自然现象	1	0.8
自然发火	1	0.8
不明原因	31	24
合计	128	100

第二章 船舶静电起电机理

第一节 输油管线中的静电起电

一、偶电层的理论基础

液体起电的偶电层理论，是在固体接触起电的基础上发展起来的。而人们对固体接触起电的认识，又首先是从两种固体金属材料的接触起电开始的。

早在 1796 年 伏打就发现 两种不同的金属 A 和 B 接触后 如果接触距离很小（达到或小于 $25 \times 10^{-8} \text{cm}$ ）在接触面上就产生电势差。该电势差一般在十分之几伏到几伏之间，并且存在着一个系列 即（+）铝 锌 锡 镉 铅 锑 铋 黄铜 汞 铁 钢 铜 银 金，铂，钯 $\text{MnO}_2, \text{PbO}_2$ （-），前后任意两种固体接触时，前者带正电，后者带负电。

1879 年亥姆霍兹（Helmholtz）指出，在固体接触面的两方，形成等量异号的电荷层，如图 2-1 所示，称为偶电层。

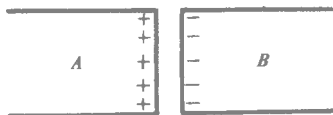


图 2-1 两金属接触处形成偶电层

两种金属接触分离以后，分别带上了静电。这很快得到了实验证实。

1932 年 Kullrath 将金属粉末从铜管内吹出去，粉末与铜管经历了接触分离过程，使这个对地绝缘的粉末发生器产生了 26 万 V 的高电压。并观测到，吹铁粉或锑粉时，起电效果最显著。两金属接触

后再分离产生的静电起源于接触电势差，这一点是由 Harper 1951 年证实的。根据金属内电子的势能井，很容易计算出接触面上的面电荷密度：

$$\delta_{12} = \frac{\epsilon}{ed}(\phi_1 - \phi_2) \quad (2-1)$$

式中： δ_{12} ——偶电层上的面电荷密度；

ϵ ——接触间隙的介电常数；

e ——电子电量；

d ——接触间隙距离；

ϕ_1, ϕ_2 ——两种金属的电子逸出功或功函数。

该式能很好地解释静电带电系列，功函数的高者带负电，低者带正电。

金属与半导体接触，同样出现偶电层。但已不像两种金属那样对称，半导体表面电荷已有一部分深入到表面层内部。1971 年 Krupp 根据金属—半导体接触面的势垒理论，计算了接触面上的表面电荷密度：

$$\delta_{12} = \frac{\epsilon}{ed}(\phi_m - \phi_s) = \frac{\epsilon}{ed}(\phi_m - E_g - x + \phi_0) \quad (2-2)$$

式中： δ, ϵ, c, d 同式 (2-1)；

ψ_m ——金属费米能级至导带的能距；

ψ_s ——半导体功函数；

E_g ——禁带宽度；

x ——半导体导带底在表面处的电子逸出功，又称半导体电子亲合势；

ϕ_0 ——能距，下位置为价带顶，上位置是为使半导体表面电中性，电子的占据的那些表面态的顶。

金属与介质接触 δ 与式 (2-2) 基本相同。因为半导体与介质相比，除了介质的禁带宽度较大之外，概念上并无根本不同。

金属与高分子材料接触后，高分子固体表面的电荷密度为：

$$\delta = eD_s(\phi_m - \phi_p) \quad (2-3)$$

$$D_s \ll \frac{\epsilon_i}{de^2}$$

式中： D_s ——高分子表面态密度；
 ψ_m ——金属功函数；
 ϕ_p ——高分子固体表面功函数；
 e, d ——与式 (2-1) 相同；
 ϵ_i ——高分子固体的介电常数。

如果两种高分子材料相接触，则面电荷密度为

$$\delta = 1.77 \times 10^{-9} \frac{\phi_{p1} - \phi_{p2}}{e \left(\frac{\lambda_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{\lambda_2}{\epsilon_{r2}} \right)} \quad (2-4)$$

式中， ϕ_{p1}, ϕ_{p2} ——两种高分子材料的功函数；
 $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$ ——两种高分子材料的相对介电常数；
 λ_1, λ_2 ——两种介质接触面处的电荷穿入深度。

下面，重点讨论一下固体与液体接触时的偶电层理论。

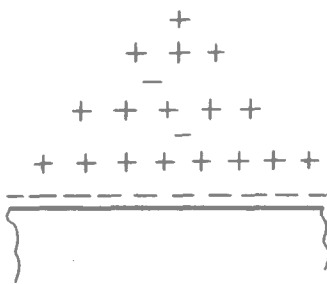


图 2-2 固体-液体偶电层示意图

亥姆霍兹 (Helmholtz), Perrin, Gouy 等人认为：液体与固体之间虽然也出现偶电层，但与两种金属固体接触时的偶电层并不相同。以水在玻璃管内流动为例，其偶电层示意图如图 2-2 所示。从图中可见，偶电层中两层电荷的分布是不相同的。固体表面上的电荷仍紧贴在固体表面，而液体表面的电荷却呈扩散分布，电

荷已渗透到液体内部。而且在液体中既有正离子又有负离子，正离子占优势，而整个偶电层体积内还是电中性，只是电荷分布不均匀罢了。

为了下面讨论液体流动起电的需要，有必要讨论一下液体中的偶电层厚度。假定固体表面吸附的是负离子，液体中是正离子，如图 2-3 所示。很明显 离界面越近 液体中离子浓度愈大 随着

与界面距离 x 的增加而逐渐减小,直到某点 b 才等于液体中离子的平均浓度 $n(\infty)$, b 点到界面的距离定义为偶电层的厚度,用 δ 表示。下面求解 δ 的表式,看它与哪些因素有关。

设离界面距离为 x 的地方,单位体积中第 i 型离子的数目为 $n_i(x)$, $n_i(x)$ 与该点的电势 $\psi(x)$ 有关用玻尔兹曼方程表示如下:

$$n_i(x) = n_i(\infty) \exp\left(-\frac{Z_i e \psi(x)}{KT}\right)$$

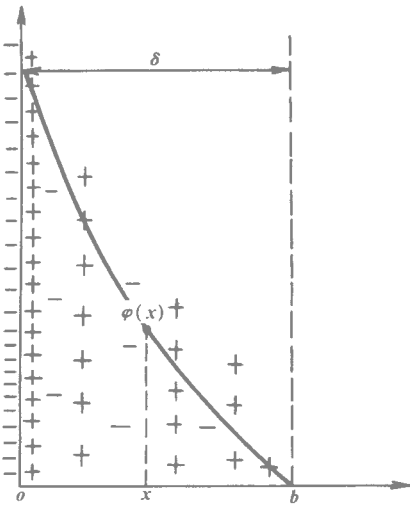


图 2-3 偶电层厚度 δ

(2-5)

式中: $n_i(\infty)$ ——远离界面处 i 型离子的平均浓度;

Z_i —— i 型离子的离子价;

e ——电子电量;

K ——玻尔兹曼常数;

T ——绝对温度。

在 x 处的电势 $\psi(x)$ 同时满足 Poisson 方程:

$$\nabla^2 \psi(x) = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2-6)$$

式中: $\rho(x)$ —— x 处的电荷密度;

ϵ_r ——扩散层的相对介电常数。

$\rho(x)$ 由各种离子的电荷构成,即

$$\rho(x) = \sum_i Z_i e n_i(x) \quad (2-7)$$

由式(2-5)、(2-6)、(2-7)可得:

$$\frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \sum_i Z_i e n_i(\infty) \exp\left(-\frac{Z_i e \psi(x)}{KT}\right) \quad (2-8)$$

式 (2-8) 为泊淞-玻尔兹曼方程, 它是偶电层理论的基本方程。下面用近似解法来求出它的解。将式 (2-8) 右端指数按幂级数展开并取其前两项得:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{1}{\epsilon_0\epsilon_r} \sum_i Z_i e n_i(\infty) + \frac{1}{\epsilon_0\epsilon_r} \sum_i \frac{Z_i^2 e^2 n_i(\infty)}{KT} \psi(x) \quad (2-9)$$

因为在远离界面处是电中性的, 因此各种类型离子的电荷总和为 0 即

$$\sum_i Z_i e n_i(\infty) = 0$$

亦即式 (2-9) 右端第一项为零, 于是 (2-9) 式变为:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = M^2 \psi(x) \quad (2-10)$$

式中 M^2 为

$$M^2 = \frac{\sum_i Z_i^2 e^2 n_i(\infty)}{\epsilon_0\epsilon_r KT} \quad (2-11)$$

方程 (2-10) 的通解为

$$\psi(x) = c_1 e^{Mx} + c_2 e^{-Mx}$$

利用边界条件: $x \rightarrow \infty$ 时 $\psi(x) = 0$

$$x \rightarrow 0 \text{ 时 } \psi(x) = \psi(0)$$

定出积分常数 $c_1 = 0, c_2 = \psi(0)$, 于是得出泊淞-玻尔兹曼方程式 (2-8) 的近似解为:

$$\psi(x) = \psi(0) \exp - Mx \quad (2-12)$$

式中: $\psi(0)$ ——界面上的电势。

式 (2-12) 表明, 偶电层中的电势在界面处最高, 随着与界面距离的增加而按指数规律衰减, 衰减的快慢决定于 M 的值。同时式 (2-12) 还表明, $1/M$ 具有长度的因次, 因此称 $1/M$ 为偶电层的厚度并用 δ 表示 即

$$\delta = \frac{1}{M} = \sqrt{\frac{\epsilon_0\epsilon_r KT}{\sum_i Z_i^2 e^2 n_i(\infty)}} \quad (2-13)$$

如果液体中只有一种正离子和一种负离子，且设他们的离子价相等 在远离界面处 由于电中性 两种离子的平均浓度亦相等，则式 (2-13) 可写为：

$$\delta = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r K T}{2 Z^2 e^2 n(\infty)}} \quad (2-14)$$

由式 (2-13)、(2-14) 可知，偶电层的厚度不仅与温度和介电常数有关，还与离子价和离子在均匀分布状态下的平均浓度 n 有关。一定的液体在一定温度下，离子的浓度越大，偶电层的厚度愈薄，反之亦然。

如果引用分子扩散系数 λ 液体电阻率为 ρ 则从斯托克斯 (Stokes) 定律、牛顿定律、粘滞阻力等可以导出：

$$\delta = \sqrt{\lambda \rho \epsilon_0 \epsilon_r} = \sqrt{\lambda \tau} \quad (2-15)$$

式中： λ ——液体分子扩散系数；

ρ ——液体电阻率；

τ ——液体时间常数，又叫弛豫时间。

由式 (2-15) 可知，偶电层厚度由离子的扩散系数和液体的时间常数决定。

必须指出，上述提到的偶电层整体是电中性，是指固体与液体相对静止而言的。但是，如果两者作相对运动，比如油品在管道中流动时，电中性就会受到破坏，偶电层中两层电荷被分离，这时就会出现静电起电现象。实验发现，当固体与液体作相对运动时，滑动不是直接发生在固体表面，而是在液体内部距固体表面有一距离 d 处的 AB 面上发生滑动，如图 2-4 所示。 AB 面叫做滑动面。滑动面与界面的距离 d 长约为一个分子大小。滑动面的存在，表明了吸附在固体表面上的离子与滑动面内的那些液体中离子（指图中虚线左边的那些正离子）紧密地结合成了一个整体。因此，滑动面内的那些液中离子与紧贴在固体表面上的离子一样是不随液体流动而带走的。习惯上常把整个这一部分（即滑动面左边的全部）叫固定层或吸附层 另一部分 滑动面右边部分 叫活动层或扩散层。固定层与扩散层之间的电势差就是所谓的电动电势（又叫