

三相泡沫流体

密封技术及其应用

林柏泉 著



中国矿业大学出版社

TB42

L-138

三相泡沫流体密封技术及其应用

林柏泉 著

江苏省青蓝工程基金资助

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书在对密封的基本理论进行研究的基础上,深入研究了泡沫的基本特性及其密封性能、钻孔密封段的密封机理,介绍了泡沫封孔测压仪及其在煤巷突出危险性预测中应用,探讨了煤巷卸压区对煤和瓦斯突出发生的作用机理。

本书可供从事流体密封技术及矿井瓦斯突出危险性预测研究的科技工作者参考。

责任编辑:马跃龙

三相泡沫流体密封技术及其应用

林柏泉 著

中国矿业大学出版社出版

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 7.26 字数 110 千字

1997年10月第一版 1997年10月第一次印刷

印数 1—600 册

ISBN 7 - 81040 - 746 - 5

TB·7

定价:12.00 元

Abstract

Based on the research of basic theory of sealing technique, this book has expounded the basic character of foaming fluid and its sealing property, the sealing mechanism of fluid in boreholes. The instrument of gas pressure measurement with foaming fluid sealing has been made and applied in outburst forecast of coal tunnel. Finally, the mechanism of outburst happening in unloading area of coal-head has been discussed in it. The book is suitable to anyone who is engaged in this kind of work.

主要物理量

- t ——时间；
 k ——玻尔兹曼常数；
 T ——绝对温度；
 E ——分子活化能；
 W ——分子所做的功；
 S ——表面积；
 θ ——湿润角；
 ρ_l, ρ_g ——液体和气体的密度；
 R ——曲率半径；
 r ——毛细管半径；
 p ——压力；
 μ ——介质粘度；
 D ——直径；
 λ ——故障率；
 \bar{u} ——平均速度；
 $P_c(t)$ ——串联连接系统的故障率；
 $P_b(t)$ ——并联连接系统的故障率；
 σ ——表面张力；
 h ——膜厚；
 p_s ——楔压；
 ω_g, ω_l ——气相和液相速度；
 V_g, V_l ——气相和液相的容积流量；
 A ——流道面积；
 A_g, A_l ——气相和液相流动面积；
 \bar{s} ——滑动(滑移)比；
 f_g ——空隙率；
 X ——质量含气率；
 M_g, M_l ——气相和液相的质量流量；
 i ——两相混合物的焓；
 $i_{l,s}$ ——液相在饱和温度下的焓；
 \bar{r} ——汽化潜热；
 β ——容积含气率；
 ρ_0 ——流动密度；
 ρ ——真实密度；
 K_g ——气相质量浓度；
 F_{bg}, F_{bl} ——气相和液相的体积力；
 τ_g^ij, τ_l^ij ——气相和液相的粘性应力；
 K_{gl} ——相间摩擦系数；

n_2 ——单位体积内气泡个数；	u ——流动速度；
$D_{g,l}$ ——气体在液体中的扩散系数；	δ ——偏心率；
W_i^i ——气体扩散速度；	Δh ——缝隙宽度；
K_T ——气相与液相间的热摩擦系数；	d_t ——壁厚；
τ ——剪切应力；	σ_p ——材料的许用应力；
μ_p ——塑性粘度；	σ_b ——材料的抗拉强度；
K_r ——稠度系数；	S_s ——安全系数；
u_s ——光滑管内的泡体速度；	p_p ——试验压力；
u_d ——粗糙管内的泡体速度；	λ ——渗漏率；
u_s ——泡沫滑移速度；	K_s ——应力集中系数；
μ_s ——泡沫表观粘度；	γ ——岩石的容重；
\bar{u} ——泡沫平均线性速度；	Q ——侧压系数；
τ_y ——宾汉屈服值；	f ——摩擦系数；
n ——流性指数；	K ——渗透率；
$\frac{d\tau}{dt}$ ——剪切速率；	B ——单位修正系数；
	q ——瓦斯比流量；
	C_M ——含瓦斯煤体的内聚力；
	ϕ_M ——含瓦斯煤体的内摩擦角。

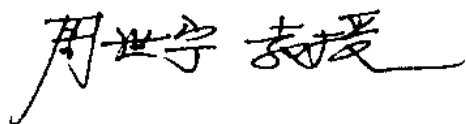
序

密封是广泛应用于许多行业的一种常用技术,根据密封对象的特点和要求,使用不同的密封方法。密封的材料有固体、气体、液体和固、液两相混合物质,但用气、固、液三相物质混合生成的泡沫作为密封材料迄今极少见到。本书作者在研究工作中为了在多孔隙大裂隙带的煤层中准确测定其中的瓦斯压力,创造性地使用由压力气体生成的三相泡沫作为密封材料,圆满地解决了这一世界性难题。它的意义不仅仅在于解决了煤矿中的一项煤与瓦斯突出危险性的准确预测问题,而且通过三相泡沫密封机理的研究,创造出一种新的密封技术,这对解决有毒、有害气体或液体的动态密封提供了一个新的途径。它的基本原理是利用携带固体粉粒的气泡,在泄漏的途径中随着压力降低,气泡膨胀将粘附在气泡表面的固体颗粒压涂在裂隙表面,从而迅速减小了间隙的空间,完成了封堵过程。由于气泡的压力是可调的,且始终高于被封堵物质的压力,而且在间隙尺寸发生变化时能自动追踪封堵,因而实现了没有泄漏。这一构思是巧妙的,它克服了固、液二相物质在封堵时的随机性,所以在生产中应用效果良好。现在的问题是如何能将这一技术迅速扩展应用

到其他领域,这有待于推广和交流。本书的出版有助于从事密封技术的科学工作者对此进行研究和推广。

在科学技术发展的历史长河中,辛勤劳动是基础,但新思想、新观点和新方法则更加可贵。我希望读者在阅读本书时能重视作者不拘一格创造思维的思想方法,并且在这方面有所收益。

中国矿业大学安全技术及工程学科
博士生导师

A handwritten signature in black ink, reading '周世中 教授' (Zhou Shizhong, Professor). The characters are written in a cursive, flowing style.

1997年10月24日

前 言

流体密封技术是保证机械设备正常运转,防止跑、冒、滴、漏的关键,是衡量机械设备可靠性的重要标志之一。因此,研究流体密封机理及技术,探索新的实用型流体密封液,提高机械设备密封的可靠性,既具有重要的理论和实际意义,又具有重要的经济价值。

目前,国内外工业密封技术基本上可分为接触式密封和非接触式密封两大类。接触式密封是依靠弹性密封材料对被密封面的压紧来实现的,当被密封面不严或接触应力较低时,则易于泄漏,尤其是对运动部件的密封,在摩擦力的作用下,密封元件往往易于磨损而产生泄漏。非接触式密封则是以尽可能小的流量给所要密封的流体形成压力降,同时容许在运动部件之间有不受限制的相对运动,依靠对泄漏流体的调节,使得机器内部和外部环境之间保持一定压差,从而达到密封的作用。目前,非接触式密封以流体密封为主,而流体密封中广泛采用单相介质的液体作为密封液,当被密封面间隙较大时,这种密封液往往容易泄漏。因此,研究流体密封技术,探索新型流体,有利于提高非接触式流体密封的效果。

目前,流体密封技术正在发展成为一门综合性技术,它与流体力学、密封材料学、渗流力学、润滑学、固体力学等学科相互渗透、密切相关。国内外有关学者对此已进行了不同程度的研究工作。由于问题的复杂性,当前,国内在两相介质流体的流动特性方面进行了许多研究,但在非接触式流体密封中所采用的密封液多局限于单相介质。国外已开始着手研究二相介质流体的密封问题,如美国学者 W. F. Hughes、德国学者 W. Hass 和 H. K. Müller、日本学者

F. Hiram, 但他们的研究也多限于非接触式流体密封实际运行过程中出现的二相介质问题, 真正采用二相介质流体(气、液或液、固)作为密封液进行非接触式流体密封, 基本上还处于初期。

近年来, 随着航天、国防、核能、化工、冶金、煤炭、石油等工业的发展, 流体密封技术得到了迅速地发展和广泛地应用。特别是对于量大面广的通用机械和化工设备而言, 不仅离不开流体密封技术, 而且密封性能的好坏更是衡量其可靠性的重要标志之一。当今, 许多机器和设备的跑、冒、滴、漏现象, 不仅浪费了大量的能源, 污染了环境, 而且会酿成恶性事故, 造成重大损失。如 1986 年 1 月, 美国“挑战者”号航天飞机升空片刻即发生机毁人亡的悲剧事件, 就只是由于助推火箭组合密封中一个小小的 O 形橡胶圈失效而造成。可见, 如何提高流体密封的可靠性, 探索采用新型密封是当前所要解决的重大问题之一。

在科学技术高度发展的今天, 流体密封技术已应用到国民经济建设的各个部门, 日益受到极大关注。作者认为, 要使流体密封技术有一个较大的发展, 必须采用多学科、多技术手段交叉的研究方法, 并尽量采用新理论和新方法来探索新的密封技术。为此, 九十年代以来, 作者一直从事流体密封技术的研究和试验工作, 在固液两相密封液的基础上, 应用表面物理化学、渗流力学、密封材料学等知识, 开发研究了一种新型液体——三相压力泡沫流体, 它是由压力气体通过微孔在含有固体颗粒的发泡粘液中形成的一种特殊流体, 这种流体经试验和初步应用表明, 具有优异的密封性能。当被密封部位产生泄漏时, 压力泡沫能将附着在液相泡沫面上的固相物质, 自动紧密的压附在泄漏面上, 形成稳固的附着层, 并自动迅速地将泄漏处加以密封。这种密封技术经委托中国科技情报所进行国内外资料检索表明, 属世界首创, 并已成功地应用于煤矿井下裂隙发育的煤巷卸压区瓦斯压力测定中的封孔。以该项密封技术为基础完成的“煤和瓦斯突出危险性预测仪研制”科研项目,

于1993年3月份通过了煤炭工业部技术发展局组织的专家鉴定(鉴定意见认为“三相泡沫流体密封技术为世界首创”),1994年获煤炭工业部科技进步三等奖。为了总结在这方面所做的工作,进一步提高研究水平,作者撰写了这本专著以期对流体密封技术的理论研究和实际应用有所帮助。本书是在作者博士论文基础上修改补充而成,全书共五章,主要内容包括密封的基本理论、泡沫的基本特性及其密封性能研究、钻孔密封段的密封机理及其分析、泡沫封孔测压仪的研制及其在煤巷突出危险性预测中的应用。

三相泡沫流体密封技术是一个十分复杂的问题,许多内容还有待于今后的进一步研究和开发。由于作者的水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者提出宝贵意见。

作者衷心感谢导师周世宁教授的培养,作者的科研能力、工作能力和许多学术思想均得益于周教授的传授,使作者终生受益,永生难忘。感谢张仁贵工程师在泡沫封孔测压仪的加工和试验中给予作者的极大帮助。此外,在现场试验中得到了焦作矿务局科研所、焦西矿以及平煤集团公司瓦斯所、五矿、十二矿等单位有关领导和工程技术人员的热情帮助和大力支持,在此一并向他们表示衷心地感谢!

最后谨向支持和帮助本书出版的马跃龙编辑以及中国矿业大学出版社的有关人员表示衷心地感谢!

著 者

1997年6月20日

目 录

序	周世宁
前 言	(1)
第一章 密封的基本理论	(1)
1.1 密封介质	(1)
1.2 接触密封的密封性	(6)
1.3 密封的可靠性及密封设计原则	(10)
1.3.1 密封的可靠性	(10)
1.3.2 密封设计的原则	(12)
1.3.3 评定泄漏量的工程方法	(13)
第二章 泡沫的基本特性及其密封性能研究	(15)
2.1 泡沫的基本特性	(15)
2.1.1 泡沫的生成	(15)
2.1.2 泡沫的结构	(16)
2.1.3 泡沫的稳定性及其分析	(19)
2.1.4 泡沫的破裂机理	(22)
2.2 泡沫流体的流动特性	(23)
2.2.1 垂直管路中泡沫流体的流型	(23)
2.2.2 水平管中泡沫流体的流型	(24)
2.2.3 泡沫流体流动的基本方程	(30)
2.3 泡沫流体的流变特性	(35)
2.3.1 一般流体的流变特性	(35)

2.3.2	泡沫流体的流变特性·····	(38)
2.4	泡沫流体的密封性能及其参数选择·····	(45)
2.4.1	发泡剂的选择·····	(45)
2.4.2	泡沫液的配制·····	(46)
2.4.3	三相泡沫流体的特点·····	(50)
2.5	三相泡沫流体封堵裂隙性能的模拟实验·····	(53)
2.5.1	实验装置的设计·····	(53)
2.5.2	封堵裂隙模拟实验·····	(53)
2.5.3	钻孔模拟封孔实验·····	(55)
第三章	钻孔密封段的密封机理及其分析 ·····	(57)
3.1	钻孔密封段的密封机理·····	(57)
3.2	钻孔周边缝隙中流动方程的建立及其泄漏量的 计算和分析·····	(59)
3.2.1	钻孔周边缝隙中流体流动方程·····	(59)
3.2.2	钻孔周边泄漏量的计算及分析·····	(61)
3.3	钻孔周边液体泄漏量的影响因素及其分析·····	(63)
3.3.1	缝隙宽度·····	(63)
3.3.2	密封液粘度·····	(65)
3.3.3	钻孔直径·····	(65)
3.3.4	偏心率·····	(66)
3.4	钻孔密封段中密封液的径向渗漏及其分析·····	(67)
第四章	泡沫封孔测压仪 ·····	(70)
4.1	泡沫封孔测压的基本原理·····	(71)
4.2	端头密封装置的研制·····	(72)
4.2.1	可变形弹性密封件的研制·····	(73)
4.2.2	可变形胶圈密封件的密封原理及其分析·····	(75)

4.3	泡沫发生器的研制	(77)
4.3.1	喷嘴	(78)
4.3.2	泡沫液容器	(79)
4.4	泡沫封孔测压仪的基本部件及其工作原理	(81)
4.4.1	泡沫封孔测压仪的基本部件	(81)
4.4.2	泡沫封孔测压仪的基本技术指标	(81)
4.4.3	泡沫封孔测压仪的工作过程	(83)
4.5	泡沫封孔测压仪的试验及应用	(83)
4.5.1	实验室试验	(84)
4.5.2	现场试验及应用	(85)
第五章	煤巷卸压带对煤与瓦斯突出的作用机理	(95)
5.1	煤体作为连续性介质的条件	(95)
5.2	巷道煤层区域中应力分布状态及其划分	(98)
5.3	极限平衡区中煤层界面的应力分布状态及其分析	(99)
5.4	瓦斯压力分布及其在突出过程中的作用	(103)
5.4.1	极限平衡区中瓦斯压力的分布状态	(103)
5.4.2	瓦斯在突出过程中的作用	(105)
5.5	卸压区煤体稳定性分析及其安全宽度的确定	(107)
5.5.1	卸压区煤体的破坏判据	(107)
5.5.2	卸压区中煤体稳定性分析及其安全宽度确定	(109)
5.6	煤巷卸压区和煤与瓦斯突出危险性之间的关系	(110)
5.7	煤巷工作面突出危险性预测及其防突措施效果检验	(112)
	参考文献	(114)

第一章 密封的基本理论

1.1 密封介质

现代密封技术所涉及的密封介质种类很多,这些介质多数以液相和气相存在,它们具有不同的密度、粘度、表面自由能和其它特性;这些特性决定了介质的渗透能力。渗透能力是介质在密封间隙中流动的一种特性,这种特性决定了密封容积内介质与周围介质之间质的传递。确定密封介质渗透能力是一个多学科交叉的复杂问题,它涉及表面现象、物理化学、流体动力学、液态物理学、分子物理学、热力学等许多学科。

液体的性质和固体有些类似,如具有不明显的可压缩性和较大的密度,但液体没有弹性,且易流动。液体的渗透能力是由液体分子在接近于平衡状态的热波动状况所决定的,与固体不同,液体的平衡状态并不是不变的,经过一定时间 t , 分子就会处子一个新的平衡位置。位移的距离与分子间平均距离相差不多。 t 的平均值为分子的“定居生存”平均时间

$$[t] = t_0 e^{E/RT} \quad (1-1-1)$$

式中 $t_0 \approx 10^{-12}$ s;

k ——玻尔兹曼常数;

T ——绝对温度;

E ——分子从一个平衡位置移到邻近平衡位置的活化能。

对于低粘度介质 $[t] \approx 10^{-11}$ s。不同的液体其动力粘度也不同,如,在 273 K 时,水的动力粘度为 1.79×10^4 Pa · s; 而甘油则为 12.1 Pa · s。

液体中分子的相互作用主要取决于表面张力或比单位表面自由能：

$$\sigma = (W/S)_T \quad (1-1-2)$$

式中 W ——在可逆等温过程中，形成新的表面积 S 所做的功；

T ——恒温情况下分子相互作用。

当液体温度高于其自身临界温度时，介质只能处于气体状态。在通常的压力和温度下，气体分子间的平均距离比液体和固体约大一个数量级。因此，气体的密度比液体的密度小得多。介质的渗透能力则按气体—蒸气—液体的顺序递减，而对于同一种介质则随着密度和粘度的增加，其渗透能力下降。

液体的渗透能力是使固体润湿的一种性质。润湿是固体与液体接触时，由于分子之间相互作用的结果而产生的一种现象。与固体完全浸入液体中的浸没法润湿相比，当所研究的液体和气体或者其它液体与固体接触时，接触润湿会显现出较多的密封介质所具有的一些性质。测定液体表面与固体表面润湿部分的倾斜角，即边角，可以评价接触润湿的程度。图 1-1-1 表示接触润湿角的测定方法。在有液体的地方，与液体表面相切的切线 AB 构成上述边角，边角的顶点 A 位于润湿线上，沿润湿线与被润湿相相接触。平衡边角与不平衡边界是不同的，平衡边角 θ 仅取决于系统的热动力学性质，即润湿相分界处边界上的表面张力。在系统偏离热力学平衡状态时可以测出非平衡边角。液体沿固体表面流动的过程中发生变化的边界被称为动态边界。

液体渗透能力与平衡边角的关系，可按下述几种主要情况进行评价：

① 不润湿(较差的润湿)， $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ ，如水在石蜡表面上时；

② 润湿(有限润湿)， $0 < \theta_0 < 90^\circ$ ，如水在覆盖氧化膜的金属表面上时；

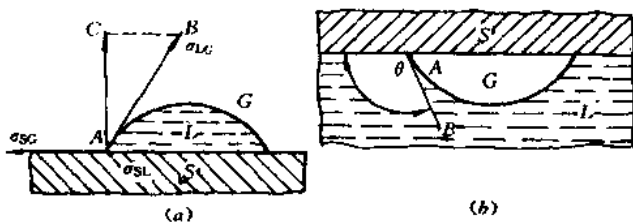


图 1-1-1 固体(S)—液体(L)—气体(G)系统中的接触润湿边角^[16]

(a) 固体表面上的液角；

(b) 液体内的气泡(σ_{LG} 、 σ_{SL} 、 σ_{SG} ——相分界面上的表面张力)

③ 完全润湿，平衡边角不稳定、液滴在薄膜上流动，如水银在铅表面上时。

润湿与毛细压力之间有着密切的联系，在密封装置使用中，当毛细压力升高或液位下降时，这种联系更加明显。如果液体润湿圆柱形毛细管壁形成凹的弯月形液面，那么液位就会升高。当毛细压力与液柱流体静压力 $H_0(\rho_L - \rho_G)g$ 相平衡时，液位升高将停止。式中 H_0 为液位升高的高度； ρ_L 和 ρ_G 为液体和气体的密度； g 为自由落体加速度。

若液体表面呈曲率半径为 $R=r/\cos\theta_0$ 的球状(r ——毛细管半径)，毛细压力为 $p_c=2\sigma_{LG}\cos\theta_0/r$ 。平衡条件则变为

$$H_0(\rho_L - \rho_G)g = 2\sigma_{LG}\cos\theta_0/r$$

由此可得出

$$H_0 = 2\sigma_{LG}\cos\theta_0/(\rho_L - \rho_G)gr \quad (1-1-3)$$

如果为完全润湿，式(1-1-3)可简化为

$$H_0 = 2\sigma_{LG}/\rho_L g r$$

当液体不能很好地润湿毛细管壁时($\theta_0 > 90^\circ$)，毛细压力为正值，面毛细管中的液面比容器敞口部分的液面低。表征液体渗透能力的是毛细常数 $a^2 = 2\sigma_{LG}/\rho_L g$ ，其值取决于液体的性质，而与毛细