

密封材料手册

沈维华 编

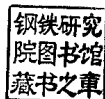
中国石化出版社

TB 42-62
S 44

密封材料手册

沈锡华 编

Q104/30



22058c

中国石化出版社

内 容 提 要

这是一本密封材料专业必备的工具书。书中对工业上广泛应用的各种金属和非金属密封材料，包括近年来出现的新型密封材料，分门别类地详细叙述了种类、特点、性能、规格及牌号等；并提出了各种密封材料在不同条件下的选用原则。同时，还对密封材料的发展趋势进行了预测。本书语言简练，重点突出，汇集了大量重要的数据资料。

本书供从事密封材料研究、生产和使用的工程技术人员，以及企业的供销人员参考。

密 封 材 料 手 册

沈 锡 华 编

中国石化出版社出版

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码：100029)

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 21.125印张 537千字 印1—5800

1991年4月北京第1版 1991年4月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-167-3/TQ·087 定价：9.30元

前 言

随着近代工程的飞速发展,对密封材料提出了越来越严格的要求,从而推动和促进了各种新型密封材料和新工艺的发展。许多崭新的密封材料相继涌现,逐渐形成和建立起一个较为完整的密封材料体系。正是这些新材料、新工艺的出现和实际应用,才得以突破近代工程中许多密封技术难题。同时,各种新型密封材料的广泛应用,无疑会给设计思想、生产管理以及使用维护带来极其深刻的影响,它改变了传统上一直把结构设计和材料分为二个系统的既定关系。事实上,许多近代工程中的密封技术难题,都有赖于结构设计和材料的密切结合。

密封材料能够得到高速度的发展,是和材料科学提供的理论上的指导作用分不开的;而密封材料发展的丰富实践,又成为材料科学理论探索中取之不尽的源泉。近二十年来,密封材料学的繁荣是前所未有的。在密封技术领域,密封技术的进步和密封能力的提高,一直是与密封材料的成就联系在一起的。回顾一下密封技术的发展历史,就可明显地看到这一点。

从1784年瓦特发明蒸汽机起,密封材料就已经考虑到采用矿物质材料,比如石棉,从而提高了填料密封的使用温度,奠定了实施密封技术的基础。十九世纪中叶,随着石油天然气工业的发展,对密封性能的要求急剧提高。由于密封材料采用了天然低模量材料,才使钻采机械的密封技术得以发展。上个世纪末真空技术的发展,同时也发展了低温技术,在此阶段,普及了低模量密封材料,研制了胶粘剂,为真空技术和低温技术做出了贡献。二十世纪初期,在美国工作的比利时化学家巴克拉德研究酚和甲醛水溶液之间的反应,获得了一种新材料,为纪念他而把这种材料命名为巴克利德,又称电木。这种材料不仅丰富了低模量合成材料系列,而且由于它具有高的化学稳定性、自润滑能力、加工性和适宜的粘弹性质,从而大大提高了许多种密封的使用寿命。在近代工程中,由于耐辐射密封材料的出现,使原子能工业完成了密封循环,成功地大幅度提高了密封系统可靠性,结果使原子能动力装置成为安全的工业装备,使核电站发展规划变为现实。在宇航事业中,要求在宇航使用的特殊条件下,动密封连接必须保证有很高的可靠性和长久的使用寿命。而液体密封材料——磁流体的出现,卓有成效地解决了这个问题。它的产生是由于研究了密封液体层中流体静力状态和流体动力状态电磁过程,考虑了磁流体动力效应、热过程、流体动力问题和材料的物理化学稳定性,研究了磁流体密封的磁特性、流变学特性及使用特性的结果。在此基础上,目前已经研制出十分紧凑的密封系统,在1cm轴长度上,密封压差可达 2×10^5 Pa。在高真空中,几年之内都可以可靠地发挥电动力学驱动作用,其中,就是在轴转速特别高的情况下,也可以保障几千小时可靠地运行。

这些简短的回顾,充分说明了密封材料在获得新的、高参数密封方面将起到十分巨大的作用。同时,在密封技术开发过程中,在制定解决密封问题所采用的新结构、新工艺之前,首先要解决密封材料问题。

提高密封能力,扩大密封使用参数,首先是由密封材料学的成就所决定的。密封能力是一个综合指标,在很大程度上是由材料变形——强度性能所决定的。当然,对于不同的密封

结构,对密封材料变形性的要求也是不一样的。密封能力概念包含密封在使用时,密封材料维持初始接触压力的性质。从这个观点出发,材料的柔韧性、可塑性、流动性还不是材料具有高密封能力的充分条件。而在机械载荷作用下,材料具有弹性并保持原来形状的能力,从而维持恒定的接触压力,这是最希望的密封材料。

密封材料导致密封能力下降的主要原因是蠕变,即材料的塑性变形随时间而增长。在发生蠕变的同时,总是伴随着密封应力的松弛和接触压力的降低。所有的固体密封材料本身都具有蠕变性质。但对于黑色金属,在温度 $500\sim 600\text{ K}$ 左右或更高时,则更为明显;而对于低模量材料,比如木材、有色金属、橡胶、塑料等,实际上在所有的使用温度范围内都存在蠕变性质。密封材料的蠕变,在密封介质的作用下往往会加剧。

在工程实际中,评定密封能力的准则是材料的变形——强度性能参数,特别是保证连接密封性的最小接触压力值。在条件相同的情况下,具有比较高密封能力的材料,其密封接触压力较低。材料的密封能力与密封连接的刚度有关,这是由二个参数所决定的,即材料的变形性和密封接触面积上间隙的大小和分布。对于弹塑性密封材料来说,在循环载荷作用状态下,会产生塑性变形积累。

密封能力是密封材料最重要的使用性能判据之一。作为密封材料的使用范围,不应仅局限于低模量材料,而应包括技术领域中所拥有的具有良好密封能力的所有结构材料。只有这样才能更好地解决工程实际所提出的密封课题。

近代科技发展和各项建设工程,都要求工程技术人员必须具有比过去任何时候都要更全面的密封材料知识,合理选择、正确使用各种密封材料将会带来显著的技术经济效益,《密封材料手册》正是基于这种考虑而编写的。

本书在编写过程中,得到了许多密封材料生产厂家的大力支持和帮助,在此一并表示深切的谢意。

目 录

第一章 概述	1
一、现代工程对密封材料的要求.....	1
二、密封材料的分类.....	4
三、密封材料的发展趋势.....	4
第二章 密封材料的选用	7
一、摩擦副组对材料.....	7
二、机械密封.....	9
三、垫片.....	13
四、填料.....	27
五、胶粘剂.....	28
六、O形圈.....	36
七、石棉橡胶板.....	38
第三章 陶瓷密封材料	39
一、陶瓷密封材料的分类.....	39
二、陶瓷密封材料的性能.....	41
三、陶瓷密封材料的规格及牌号.....	47
第四章 石墨密封材料	74
一、石墨密封材料的分类.....	74
二、石墨密封材料的性能.....	75
三、石墨密封材料的规格及牌号.....	91
第五章 橡胶密封材料	102
一、橡胶密封材料的分类及性能.....	102
二、橡胶密封材料的规格及牌号.....	109
第六章 树脂型高分子密封材料	166
一、树脂型高分子密封材料的分类.....	166
二、密封用工程塑料的分类及性能.....	166
三、树脂型高分子密封材料的规格及牌号.....	178
四、密封胶的分类及性能.....	188
五、密封胶的规格及牌号.....	203
第七章 其它非金属密封材料	210
一、皮革.....	210
二、毛毡.....	212
三、纸板.....	215
四、石棉.....	217

第八章 黑色金属密封材料	221
一、黑色金属密封材料的分类及性能.....	221
二、黑色金属密封材料的规格及牌号.....	223
第九章 有色金属密封材料	271
一、有色金属密封材料的分类.....	271
二、有色金属密封材料的规格及牌号.....	271
第十章 新型密封材料	311
一、柔性石墨.....	311
二、复合材料.....	315
参考文献	322
表索引	323

第一章 概 述

一、现代工程对密封材料的要求

在大多数技术领域中都存在着重要意义的密封问题,已越来越被人们所重视,这不仅仅是因为物料漏泄会造成能源的浪费,更重要的是,如果易燃、易爆、有毒介质漏泄,还会导致灾难性事故。例如,1984年12月,震惊世界的印度博帕尔事件,就是因为化工厂事故漏出大量异氰酸酯而引起的;1985年8月,美国西弗吉尼亚州一化工厂有一种杀虫剂漏泄出来,造成上百人死伤,震动了全美国;1986年初,加拿大安大略省,因运输途中泄漏出几百升多氯联苯,导致100多公里长的高速公路关闭一周;而最震撼世界的是1986年1月,美国挑战者号航天飞机的失事,是由于火箭助推器机械接头处的O型密封圈失效而引起的。就世界范围来说,由于密封失效而引起的重大事故,几乎每年都有发生。由此可见,小小的密封装置,其密封性能优劣关系到能源、环境及人身安全的重大问题。

近年来,随着近代工程的迅速发展,高温密封、低温密封、超低温密封、高压密封、高真空密封、高速密封以及各种易燃、易爆、有毒、强腐蚀性介质、含有泥沙等悬浮性颗粒介质的密封问题相继产生,对密封相应提出了更高的要求。为了保证密封具有良好的密封性能及长久的使用寿命,除了应具有合理的密封结构及制造工艺以外,更主要的是应具有良好的密封材料。因此,对于密封装置来说,如果说结构是先导,工艺是保证的话,材料则是基础。也就是说,密封材料才是保证密封性能和使用寿命的关键所在。密封水平的进步与密封材料的发展一直是紧密联系在一起的。近代工程对密封的要求,在很大程度上是对密封材料的要求。具体的要求主要有下面几个方面:

1. 密封材料的允许温度使用范围

在近代工程中,密封材料的温度使用范围实际上可以从超低温直至 1227°C (1500K)以上左右。当然,对于不同的密封材料,其密封性能也有较大的差异。在低温情况下,对密封材料的基本要求是物理力学及热物理性能的稳定性。

对于当前大量采用的聚合物密封材料来说,温度是限制其更广泛应用的主要因素之一。因为低温会使聚合物密封材料硬化、弹性消失以及呈现脆化。而高温则会使聚合物发生蠕变及应力松弛,对于接触型密封来说,这会使密封比压下降,并破坏密封性能的稳定性。

材料的导热性能也是决定密封材料使用性能的主要因素之一。良好的导热性可以带走动密封更多的摩擦热,降低了温度,使温度变形减少,保证密封可靠性。

对于高温密封材料,应该具有耐热强度高、抗蠕变性好、耐松弛强度高、高持久强度及耐腐蚀性好等优点。在高温下工作的密封装置其工况是比较特殊的。作为高温密封常用的密封材料金属,发生蠕变以后,温度越高,漏泄也越厉害。通常,在接触型密封装置中,密封材料许用使用温度的极值,不仅受耐热性的限制,更主要的是受一定温度下许用变形极值的限制。目前常用的高温密封材料金属陶瓷,则具有化学和热力学的综合特性。以石棉为基体的填料密封材料,在 770K (493°C)高温下仍具有良好的热稳定性。对于复合密封材料,在高温下的使用关键是热膨胀系数不能太大,线性尺寸变化太大是这类密封材料导致密封失效的主要原因之一。对于聚合物密封材料,其主要缺点就在于热稳定性差。从七十年代开始,耐热聚合

物密封材料的研究开发颇受人们的重视,其主要研究方向是在有机硅聚合物和杂链聚合物的基体上进行填充和增强,常用的组分主要有玻璃纤维、碳纤维、硼纤维等。目前所研制的石棉塑料和石墨塑料则可在温度高达570 K (299℃)的情况下使用。而氟橡胶的极限工作温度可达600 K (327℃),长时间使用的工作温度可达550 K (277℃),耐寒性为175~200 K (-102~-73℃)。

表1-1列出了常用密封材料的许用使用温度范围。

表 1-1 常用密封材料的许用使用温度范围

材 料	许用工作温度范围, K	材 料	许用工作温度范围, K
真空橡胶	250~373	铜及铜合金	70~873
氟 塑 料	70~570	硅微晶玻璃	220~873
铝	70~440	银	50~925
铝	70~473	镍	70~1025
耐热聚合物(聚硅氧烷、 氟橡胶、聚酰胺)	200~600	蒙乃尔合金	70~1100
橡胶石棉垫	90~673	不锈钢	50~1100
石棉	90~773	金属陶瓷	<1500

2. 减摩性和耐磨性

随着近代工程的发展,对密封的使用寿命要求也越来越高,因此对密封材料来说,就必须具有良好的减摩性和耐磨性才能满足这一要求。

要提高密封材料的减摩性和耐磨性方法很多,比如很早以前就采用的边界润滑和半液体润滑,近来在动密封摩擦副中,利用选择性转移,从而开辟了提高密封材料耐磨性的新的可能性。

近年来,在密封材料领域中,出现了许多具有良好减摩性和耐磨性的新材料,比如以芳香族聚合物和固体润滑剂为主的混合物,在耐磨性方面明显优于聚四氟乙烯。在提高密封材料耐磨性方面,利用以氟塑料为基体的复合材料,能够解决许多密封难题。除此而外,在橡胶上面覆上一层聚四氟乙烯也是十分有意义的,这种材料的摩擦系数和对金属的粘附力要比橡胶低好几倍。在化学工业设备中,利用这种材料,密封腐蚀性介质是有广阔前途的。

对于密封材料,要解决磨损的问题,首先要提高密封材料的硬度。在以磨粒磨损为主要形式的密封中,利用陶瓷、碳化钨等高硬材料是十分有益的,但这也不是万能的。现代的磨损观点认为磨损与材料的耐磨性有关,而材料的耐磨性并不总是随材料硬度的提高而改善。由现代摩擦学的奠基人之一克拉盖尔斯基所建立的疲劳强度理论,把磨损与薄层表面上的局部剪切变形,及无损伤积累时承受多次变形的能力关联起来,认为采用提高材料硬度的方法来防止外部损伤造成的表面磨损不是很有效的。因为在硬度增加的同时,接触应力集中也会增加;同时,硬度的增加并不会使摩擦力降低。密封实践证明,提高密封材料耐磨性和减摩性应从以下几个方面进行:

- (1) 根据非常符合理想密封材料性能的物理-机械特点,开发复合材料。
- (2) 开发在选择性转移状态下工作的密封材料,比如金属聚合物材料及润滑合金等。
- (3) 利用具有表面活性组分的金属润滑剂,在密封材料表面形成软金属层,以防止或

减少磨损。

3. 对密封介质作用的稳定性

在密封装置中,密封材料的工作能力首先是由密封介质中材料的稳定性所决定的,密封材料在密封介质中的稳定性是包括多种特性的综合判断。首先,它必须以密封材料与密封介质之间不发生化学反应为前提。其次,密封材料还要具有对该接触力松弛和蠕变的稳定性。密封材料的蠕变会导致密封件从密封间隙中被挤出,并伴随着产生密封应力的松弛,从而使漏泄增加。表1-2所列腐蚀性介质密封的材料工作能力估价,在某种程度上可以作为密封材料耐介质稳定性的判断。

表 1-2 腐蚀性介质密封的材料工作能力估价

密封介质	接 触 密 封		
	静 密 封	离 心 密 封	端 面 密 封
腐蚀性气体(二氧化碳、氯气、四氯乙烯)和浓酸(硝酸、盐酸、硫酸)	氟塑料、石棉、石棉橡胶板、聚四氟、聚乙烯	氟塑料,以氟塑料为基体的复合材料、石棉	摩擦副组对:石墨、耐腐蚀钢、陶瓷、氟塑料;陶瓷、氟塑料、司太立合金、金属陶瓷
碱和盐溶液、海水	橡胶、氟塑料、皮革、石棉橡胶板	橡胶、石棉、氟塑料	石墨、铜;石墨、青铜、铸铁、司太立合金、氟塑料、陶瓷;钢×胶木
低温介质、液化气	氟塑料、钢板纸、铝、铜、钢	石墨、氟塑料、碳石墨	石墨、填充石墨塑料、碳石墨材料
饱和和过热蒸汽	不锈钢、淬硬钢、铅、铜	铸铁、铜、青铜、有色金属箔(巴比脱合金、铝、铜)	铸铁、铜、青铜
空气、惰性气体	橡胶、钢板纸、氟塑料、聚乙烯、聚四氟、黑硬橡皮	石棉、橡胶、大麻纤维、石墨、金属、氟塑料	石墨、填充石墨塑料、碳石墨
苯、乙醇、乙醚、酮、醚	有色金属、氟塑料、胶木	氟塑料、卡波隆、有色金属箔	陶瓷、司太立合金、碳化钨
石油、油、石油产品	电瓷纸、橡胶、石棉橡胶板	橡胶、塑料、石棉、石墨、有色金属箔	青铜、铜、铸铁;石墨、铜、铸铁;青铜、氟塑料、陶瓷

4. 工艺性和经济性

密封材料的工艺性与密封制造的经济技术要求是密切相关的。对于密封件来说,除考虑结构、密封材料的性能外,还要同时考虑材料的工艺性,因为材料的工艺性关系到密封件的加工制造工时、能量消耗以及加工质量。因此材料的工艺性直接与加工制造成本有关,也就是说与经济性是紧密相连的。

比如,对于机械密封密封环的端面,由于表面粗糙度及平面度要求都比较高,一般都需要研磨加工,那么对于不同材料,其研磨加工的工艺差异很大,这不仅包括研磨机的特性,还包括研磨机在加工时转速、压重、研磨盘材质选择、磨料的种类、粒度等多种因素。对于不同材质的密封环,由于研磨工艺的不同,显然研磨的工时及成本相差都会很大。这自然会影机械密封的价格竞争能力及质量。

在密封材料中,作为高工艺性材料的例子就是密封胶,其特点是密封胶能够按密封结构自成型。密封胶同时还具有应用简单的特点,易掌握使用要领。

对于非接触密封,对材料的工艺性要求相当严格。通常,动力型非接触密封的运转零件

具有复杂的外形,材料消耗显著。这类密封的经济性主要取决于加工制造时,密封材料加工应用高生产率工艺方法的程度,比如采用压力铸造、模压、滚压等。而工作圆环的表面加工粗糙度则是重要因素,假若采用工程塑料来代替金属材料,则由于比较高的表面光洁度,不仅可减少加工工时,还可提高离心密封的效率3~5%。

应用非金属密封材料,特别是工程塑料,从经济性角度来看是十分合理的。近来,由于化学工业、石油化学工业的发展,聚合物密封材料已经可以在很广的使用范围内采用。用工程塑料来代替有色金属和合金,不锈钢是最有效的。而代替黑色金属和铅时,只有采用廉价的工程塑料,而且是大批量生产,经济性才明显。用聚合物材料代替有色金属产生节支的原因主要是:第一,塑料成本低;第二,在密封件制造和使用时所花费的工时少。

二、密封材料的分类

由于密封的工况越来越复杂,显然采用单一的密封材料,无论如何也难以满足密封系统越来越苛刻的要求。随着密封技术的进步,密封材料的种类也越来越多。也正因为这一点,目前,对于密封材料尚无一个统一的分类方法。而最常见的是把密封材料分为固体密封材料和液体密封材料两大类。固体密封材料包括非金属密封材料和金属密封材料二类。

非金属密封材料主要包括:

- (1) 陶瓷密封材料;
- (2) 石墨密封材料;
- (3) 橡胶密封材料;
- (4) 树脂型高分子密封材料;
- (5) 其他非金属密封材料(皮革、石棉、纸、毛毡等)。

金属密封材料主要包括:黑色金属密封材料和有色金属密封材料。

在液体密封材料中,主要包括胶粘剂和近代发展起来的磁流体密封材料。

胶粘剂常分为树脂基胶粘剂、橡胶型胶粘剂以及无机胶粘剂。磁流体密封材料分为油基磁流体密封材料、水基磁流体密封材料、二酯磁流体密封材料和氟碳基磁流体密封材料等。

密封材料的详细分类如表1-3所示。

三、密封材料的发展趋势

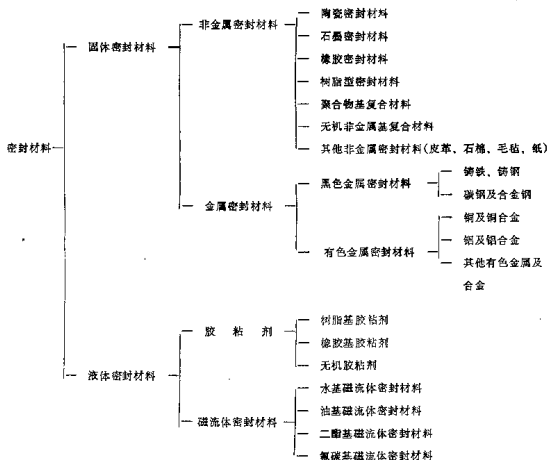
任何工程构件对所使用的材料都有一定的技术要求。对于密封装置所使用的材料,除了一般要求,如经济性、工艺性、安全可靠之外,还提出了不同于其它机械工程的特殊要求;或者要求虽同,在使用过程中却有着不同的重要意义。

密封材料首先应具有对密封介质的不渗透性,并能保证充满接触间隙,以及使运动的配合表面微观不平度压紧,构成耐摩擦副组对,保证密封接触压力的恒定。对密封材料的技术要求,虽然都有重要意义,但是重点要解决的是减少和消除介质的漏泄,这首先要使密封材料能够填充到连接处的间隙中去,由此可见,理想的密封材料应当具有结构流动性,近似于液体的流动性。这一点对于轴转速不断增加,向高速机组发展的现代技术来说特别重要。

另一方面,液态结构特性不能在密封压力及其它外界因素作用下保证密封稳定性。为抵抗密封介质压力,密封材料还应当具有固体性质,即具有足够的刚度、保证形状不变及抵抗变形的能力。因此,理想的密封材料应同时兼有液体和固体的性质。

由于摩擦、温度变化、腐蚀等外界因素的影响,接触密封的密封材料使用条件与理想状况相差很远。在这种情况下,有决定性意义的是,在许多不利因素作用下,获得密封材料长久工作能力的准则。尤其随着现代技术的发展,各种工况下的密封不断涌现,对密封材料提

表1-3 密封材料的分类



出耐温性、耐压性、耐腐蚀性、耐磨损性、不渗透性、耐辐射性等许多要求。在这种情况下,密封材料要满足密封装置的要求,除了要开发研制新型耐高温材料、耐腐蚀材料、耐磨材料、高强度材料、耐辐射材料及不透性材料以外,还必须开发复合材料,使之获得比单一材料的各种性能更佳的材料。比如,某些聚合物材料的弹性缺陷,其中包括氟塑料,可以用橡胶与之组合来补偿这个缺陷。这样复合的材料不仅具有良好的弹性,同时还保持了氟塑料本身所具有的良好耐腐蚀性。为提高动密封的使用寿命,可在密封材料中加些耐磨填充剂,在橡胶密封圈的摩擦表面上形成氟化碳氢化合物薄膜,金属箔包覆弹性填料,石墨浸渍有色金属等。

对密封材料越来越苛刻的要求,要求使之具有一些相互矛盾的性能,这对于单一材料来说往往是满足不了的。把一些不同性能的材料组合起来,取长补短,开发研制新型复合材料,显然代表着密封材料的发展趋势。目前新型复合密封材料开发趋势大致为:

- (1) 研制出强度可与钢材相比,但要兼有弹性的复合密封材料。
- (2) 能长时间耐热500℃以上,而强度要在1000MPa以上,并易机械加工的纤维增强复合密封材料。
- (3) 研制出机械性能和耐热性能超过铝合金,并可进行塑性加工的树脂基纤维增强复合密封材料。
- (4) 研制高硬度低脆性材料。
- (5) 研制比钢强,比橡胶弹性好,而且又可焊接的材料。

(6) 研制由纤维增强的新型陶瓷材料。

在密封材料的开发方面，还可以采用喷涂一层新的热固性塑料及喷镀有色金属粉末的方法，这是符合理想密封材料结构准则的。这种覆面层可用于石油天然气钻井套管的密封，钻井深度要达到几千米，甚至上万米，摆在钻采机械面前的任务就是要提高连接的密封性。复合的聚乙烯——锌覆面层可以满足这种密封性要求。从密封角度来看，接近理想的覆面层结构是可以形成的。形成共混组织的覆面层可由相态及组分粒度来控制。它可以是多相系统的覆面层，也可以是金属有机化合物覆面层。

目前，密封材料开发的另一个趋势，就是液体密封材料的研制。这里面包括二部分内容，一方面是大力开发耐高温密封胶、耐低温密封胶、无机胶、瞬干胶、无溶剂胶、低毒胶、无毒胶、水基胶、低温固化高温使用的密封胶，以及其它高性能、耐久性优异的新型密封胶。另一方面，就是磁流体密封材料的开发，这对于解决其它密封材料难于解决的密封课题是卓有成效的。

不断涌现的新型密封材料会大大促进密封技术的发展；同时，近代工程对密封技术所提出的越来越高的要求，也会刺激密封材料的加速研制。可以预见，随着技术的进步，密封材料的开发将会有有一个令人鼓舞的飞跃。

第二章 密封材料的选用

一、摩擦副组对材料

在常用密封介质中，为保证密封摩擦副具有长久的使用寿命和良好的密封性能，在决定密封摩擦副材料组对时，必须考虑下面三个因素：

1. 密封介质的性质

密封介质的性质主要包括介质的腐蚀性、沸点、温度、粘度、密度、状态及有无悬浮性颗粒等。

2. 密封摩擦副的 PV 值

密封摩擦副的 PV 值之所以是决定摩擦副材料组对的因素，主要有下面几个原因：

(1) 由于密封摩擦副的最大特点是密封面因运动而要进行不断的摩擦，摩擦是密封摩擦副运行过程中的主要物理现象。而密封面摩擦的必然结果是产生摩擦热，其单位面积、单位时间所产生的摩擦热 Q 为：

$$Q = \frac{f \cdot P \cdot V}{J}$$

式中 f ——摩擦系数；

P ——密封摩擦副的比压；

V ——密封摩擦副的平均线速度；

J ——热功当量。

由此可以看出产生的摩擦热与 PV 值成正比，而摩擦热的大小又直接影响摩擦副的温度分布，当密封摩擦副温度分布的极大值大于摩擦副间液膜的沸点时，即

$$T_{\max} > T_{\text{沸}}$$

那么密封摩擦副间的液膜就会蒸发、沸腾，并同时产生振动和噪音，最后导致密封摩擦副的干摩擦，这是密封摩擦副所不允许的，因为干摩擦势必会导致磨损加剧、寿命变短、漏泄量增加。由此就不难看出密封摩擦副的 PV 值是决定摩擦副润滑状态的重要因素，因此也是决定密封面磨损率的重要因素。所以，在选择密封摩擦副材料组合时，必须要考虑到密封摩擦副的 PV 值。

(2) 由于密封摩擦副 PV 值直接影响摩擦热的大小，而摩擦热又会使摩擦副产生温度变形，从而给密封摩擦副的磨损带来不利影响。因此，从温度变形的角度来考虑，在决定密封摩擦副材料组对时， PV 值也是一项重要因素。

(3) 密封摩擦副 PV 值所带来的另一个问题就是热强度问题，摩擦副的热应力大小直接与 PV 值有关，为防止摩擦副的热应力大于材料的许用应力，在选择摩擦副材料时，势必要考虑密封摩擦副的 PV 值。

3. 密封摩擦副的摩擦系数

决定密封摩擦副材料组对的另一个重要因素就是摩擦系数，它直接影响到摩擦热的大小。由于上述同样的原因，摩擦系数和 PV 值一样，也是选择密封摩擦副材料组对时所必需考虑的因素。

根据上面的分析,在具体选择摩擦副材料时应遵循以下几项原则:

(1) 必须具有耐磨耗性

作为密封摩擦副的最重要技术指标之一就是使用寿命,由于使用条件的不同,使用寿命也不一样,但一般都应在一年以上。因此,摩擦副材料的耐磨耗性从使用寿命上考虑应是材料选择的第一个最重要条件。

(2) 必须具有耐腐蚀性

密封摩擦副要减少漏泄量提高密封性能,对密封面间的平均间隙必须严加控制,以机械密封为例,密封端面在边界润滑条件下运行时,根据E.Mayer的漏泄量计算公式,其端面漏泄量 q 为:

$$q = \pi \cdot D_m \cdot \Delta p \cdot h^3 \cdot s / p_b^2$$

式中 D_m ——端面平均直径;

Δp ——密封端面两侧压差;

h ——折合间隙;

s ——间隙系数;

p_b ——端面比压。

由此式可以看出,密封端面漏泄量与端面的折合间隙二次方成正比,因此,即使端面由于轻微腐蚀使折合间隙变大,也会使端面漏泄量增加很多。除了腐蚀对密封性能会产生较大影响以外,腐蚀磨损的结果还会使密封寿命大大减少。因此,在选择密封摩擦副材料时,要根据密封介质的性质,考虑材料的耐腐蚀性能。

(3) 要有良好的导热性及较小的线胀系数

为减少温度变形和热应力对密封性能和使用寿命的影响,密封摩擦副应选择导热性好、线胀系数小的材料。

以机械密封为例,摩擦副环的温度变形角 θ 在一维传热的情况下:

$$\theta = \frac{\alpha \cdot f \cdot p_b \cdot V \cdot \gamma_m}{2\lambda J}$$

式中 α ——摩擦副环所用材料的线胀系数;

f ——端面摩擦系数;

p_b ——端面比压;

V ——端面平均线速度;

γ_m ——摩擦副环重心的径向位置;

λ ——摩擦副环所用材料的导热系数;

J ——热功当量。

由上式可以看出,摩擦副环的变形角与所用材料的导热系数成反比,与材料的线胀系数成正比。

从摩擦副环的热强度角度来考虑,其端面的最大热应力 $(\sigma_\varphi)_{max}$ 为:

$$(\sigma_\varphi)_{max} = \frac{2r_1 \cdot f \cdot p_b \cdot V \cdot E \cdot \alpha}{(1-\nu)\lambda J} \sigma_c$$

不难看出,为防止热裂,在选择材料时,应尽量选择导热系数大、线胀系数小的材料。

(4) 要有良好的耐热性

无论高温密封介质还是摩擦副,因摩擦产生的温升,都会给摩擦副所用材料的物理——机械性能带来影响。为此,在选择摩擦副环材料时,要考虑到耐热性问题,高温密封以及高参

数密封更应如此。

(5) 要有较高的机械强度

密封摩擦副在运行过程中将受到各种力的作用, 为避免摩擦副产生强度破坏和较大的变形, 必须选择具有一定机械强度的材料。

(6) 要具有良好的气密性

对于密封摩擦副所选用的材料, 具有良好的气密性是十分重要的, 这是保证密封摩擦副在运行过程中具有良好密封性的先决条件, 因此, 密封摩擦副在投入生产运行前都需要进行气密性试验。

(7) 要有良好的可加工性

由于密封摩擦副的使用条件越来越复杂, 因此, 近来密封摩擦副常被设计成高精度的较为复杂的形状, 这就给加工工艺带来了较大的困难, 同时使生产成本提高。为此, 在选择密封摩擦副材料组对时, 不仅要考虑材料的性质, 还要考虑到加工工艺的实施, 在其它条件允许的情况下, 要尽量选用具有良好可加工性的摩擦副材料。

(8) 要有良好的相容性

由于密封摩擦副要进行相对滑动, 所以还要考虑到摩擦副如何组对的问题, 即相容性问题。只有选择相容性好的材料进行组对, 才能保证密封摩擦副具有低的摩擦系数和较长的使用寿命。因此, 要有良好的相容性也是选择密封摩擦副材料的重要条件之一。

二、机械密封

表 2-1 常用密封介质的机械密封摩擦副环材料选用

介 质	特 点	机 械 密 封 型 式 及 摩 擦 副 环 材 料		
		<0.5MPa	0.5~1.7MPa	1.7~2.5MPa
丙酮	无色的液体, 沸点 140℃, 易聚合, 比重 1.1	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷×石墨	平衡型结构 WC×石墨
己二酸	微溶于水, 沸点 265℃	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 WC×石墨
亚硝酸	温度高时易分解, 在溶液中会产生HNO ₃	非平衡型结构 Al ₂ O ₃ 陶瓷×填充 聚四氟乙烯	平衡型结构 Al ₂ O ₃ 陶瓷×填充聚 四氟乙烯	平衡型结构 Al ₂ O ₃ 陶瓷×填充聚 四氟乙烯
亚砷酸	剧毒, GV法脱碳使 用的液体	非平衡型双端面结构 喷涂陶瓷×石墨	平衡型双端面结构 喷涂陶瓷×石墨	平衡型双端面结构 喷涂陶瓷×石墨
亚硫酸	亚硫酸溶于水, 呈 酸性, 用于纤维工业 的漂白剂	非平衡型结构 WC×WC (耐酸硬 质合金)	平衡型结构 WC×WC (耐酸硬 质合金)	平衡型结构 WC×WC (耐酸硬 质合金)
油 酸	具有代表性的不饱 和脂肪酸, 沸点234~ 235℃, 比重0.89	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 WC×WC
过氧酸	无色流动性液体, 在空气中发泡, 沸点 39℃	平衡型结构 Al ₂ O ₃ 陶瓷×填充 玻璃纤维聚四氟乙烯		

续表

介 质	特 点	机 械 密 封 型 式 及 摩 擦 副 环 材 料		
		<0.5MPa	0.5~1.7MPa	1.7~2.5MPa
过醋酸	无水过醋酸有强烈 气味, 沸点105℃	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 耐酸WC×石墨
果 酸	含有水果中的有机 酸	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 耐酸WC×石墨
甲 酸	无色, 具有刺激性 气味的有机酸, 强酸 性	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 耐酸WC×石墨
柠檬酸	有机酸, 溶解度42克 (水100克)	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 耐酸WC×石墨
混合酸	硫酸+硝酸 盐酸+硝酸 硫酸+盐酸	非平衡型结构 Al ₂ O ₃ 陶瓷×填充 玻璃纤维聚四氟乙烯	平衡型结构 Al ₂ O ₃ 陶瓷×填充 玻璃纤维聚四氟乙烯	平衡型结构 Al ₂ O ₃ 陶瓷×填充或 玻璃纤维聚四氟乙烯
醋 酸	具有刺激性的无色 液体	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 耐酸WC×石墨
水杨酸	难溶于水, 溶于乙 醇等, 比重1.48	非平衡型结构 WC×石墨	平衡型结构 WC×石墨	平衡型结构 WC×石墨
三氯化硼酸	有刺激性味道, 沸 点-101℃, 临界温度 -12.3℃, 加水分解 成H ₂ BO ₃ 和HF	双端面非平衡型结 构 Cr ₂ O ₃ 陶瓷×石墨	双端面非平衡, 平 衡型结构Cr ₂ O ₃ 陶瓷 ×石墨	双端面非平衡-平衡型 结构Cr ₂ O ₃ 陶瓷×石墨
溴 酸	存在水溶液中, 酸 性强	非平衡型结构 陶瓷×填充玻璃纤 维聚四氟乙烯	平衡型结构 陶瓷×填充玻璃纤 维聚四氟乙烯	平衡型结构 陶瓷×填充玻璃纤 维聚四氟乙烯
酒石酸	易溶于水, 有酸味	非平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 喷涂Cr ₂ O ₃ 陶瓷× 石墨	平衡型结构 WC×石墨
碳 酸	碳酸气的水溶液	非平衡型结构 喷涂陶瓷×石墨	平衡型结构 喷涂陶瓷×石墨	平衡型结构 WC×石墨
乳 酸	有酸味, 沸点120℃	非平衡型结构 喷涂陶瓷×石墨	平衡型结构 喷涂陶瓷×石墨	平衡型结构 WC×石墨
尿 酸	微溶于水, 400℃ 时分解, 比重1.89	非平衡型结构 WC×石墨	平衡型结构 WC×石墨	平衡型结构 WC×石墨