



高纯度车载应急救援制氮设备研制与应用研究

于文海 崔祥 宗凯

氮

气是一种惰性气体，较为稳定，在常温下不易被点燃，因此它可以作为防爆以及防止工作介质氧化的一种保护气体，被广泛应用在煤矿井下的防火作业中。随着研究人员对氮气性质的进一步研究，氮气的其他性质（如制药过程中的医药包装、医药置换气，冶金行业中的退火保护气等）也被发掘出来，其应用也逐步从煤炭行业发展到了其他多个行业。随着各行业对火灾防护的不断重视，氮气在生活之中的应用领域也逐步得到扩大，随之大家对氮气纯度的要求更高；通过改进制氮装置，提高生产出来的氮气纯度，帮助企业不断创新发展，提高相关技术，引进高新科技设备，促进企业生产出符合市场需要的氮气。

现阶段煤矿主要制氮形式采用地面的变压吸附式碳分子筛制氮装置和井下膜分离制氮装置，2种制氮方式可以满足大部分煤矿的用氮需求。但由于井下注氮设备产气量小、产气效率较低，所以在煤矿井下发生火灾时，会出现用气量不足的情况；但这2种制氮装置的产氮能力在出厂时已经固定。在煤矿突发紧急状况时，矿方可能会遇到注氮量不足，需要临时增加制氮机以满足井下对氮气的需求。但分子筛制氮装置需要一定的安装空间以及大量的前期安装过程；膜分离制氮装置由于产品的价格较高，大部分煤矿的备货量少，且生产周期较长，无法满足煤矿的应急救援需求。因此，研究一种可移动的注氮装置，既可解决煤矿临时注氮的问题，也可解决无法建立地面制氮车间的问题。针对此种情况，笔者研发一种可在地面使用、产气量大、纯度高、制氮快、移动方便，并可进行集中控

制操作的高纯度车载应急救援制氮设备。

变压吸附制氮技术

变压吸附技术（Pressure Swing Adsorption, PSA）是利用氮、氧原子直径的不同，在一定压力下氮原子直径较小，可通过13x沸石分子筛，同时将空气中的氧分子和其他分子吸附住，达到分离目的，从而实现从多种混合气体分离和提纯。随着对吸附材料研究的不断深入，相关吸附材料的性质逐渐被熟知，而变压吸附制氮技术也成为了一种更为常见的氮气制取方式。我国的变压吸附制氮技术从20世纪90年代末开始应用，当时氮气的应用领域较为狭窄。随着国家科技的进步和工业产品的发展，氮气的应用范围不断延展，现在在日常生活及化工过程之中均有使用，尤其是煤矿、瓦斯气防爆和消防用氮过程等，氮气的应用更是必不可少。

变压吸附制氮技术是一种自动化程度较高的新型气体分离技术，在工业中有着较为强大的应用，因为这种方式操作简便，节约成本，后续维修量也较小。变压吸附制氮技术基本原理：利用吸附剂自身特性对不同气体进行吸附，吸附剂的吸附量以及吸附速度等方面都有着不同程度的差别。同时，吸附剂的吸附容量也能够受到压力的控制，因此可以通过改变压力来进行气体的分离过程，如可以在加大压力的情况下完成混合气体吸附分离的过程；通过减小压力的方式分解吸附剂所吸附出来的杂质，保障吸附剂吸附的成分进行分离。吸附剂的这些性质可在实现气体分离完成之后回到原来的状态，进而能够重复利用，可大幅降低企业的生产成

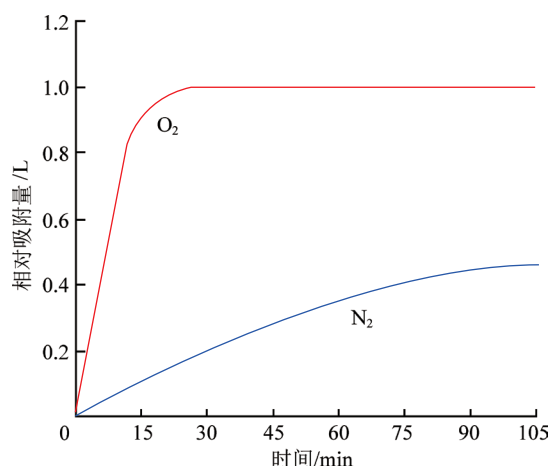


图1 碳分子筛对氧氮的吸附动力学曲线

本,保障企业内部资源的合理利用,最大程度上减少对环境的污染程度。

一般的制氮方式主要有深冷分离、变压吸附和膜分离。变压吸附制氮通常运用两塔并联的方式,将常温状态下的空气作为基本材料,碳分子筛(Carbon Molecular Sieves, CMS)作为吸附剂,碳分子具有吸附相关气体的性质,且碳分子对氧气以及氮气的吸附速度差异较大。因为,氮气和氧气在CMS上的扩散速率以及吸附的容量不同,而氧气的直径较小,因此能够更好地进入碳分子筛之中,直径较小,扩散速度也较快,这就可以帮助氮气富集于气相中。经过一段时间的反应,碳分子筛不断地对气体进行吸附,达到吸附氧气的平衡之后,进行降压就能达到解吸的目的。碳分子筛吸附情况如图1所示,可以发现,利用活性炭进行吸附,活性炭对氧气的吸附速度远大于对氮气的吸附速度,因此就可以利用碳分子的这个特性来迅速地将氧气与氮气分离。通过上述分析可以发现,改变压力也可以改变吸附剂对气体的吸附容量,因此可以通过改变压力来控制碳分子筛选氧气的吸附容量。经过试验发现,碳分子筛选氧气的吸附容量随着压力的降低而减少,倘若减轻压力就可以解吸,进而帮助碳分子筛重新工作。碳分子筛对二氧化碳以及水分都有吸附能力,在筛选过程之中较为容易。

变压吸附技术是气体分离应用十分广泛的一种新型技术,尤其是在工业的气体分离与净化过程之中,在气体干燥、氢气分离精制等领域,也有着较为广泛的应用前景。针对企业自身而言,变压吸附的投资较小,维护较为简单,可大幅节省生产成本,降低企业在操作过程中的安全隐患。变压吸附技术自动化程度高,并且能够在常温状态下运行,打破了企业地域的限制,企业只需做好设备的日常维护工作,就能够很好地运行变压吸附技术。

制氮模式选用

制氮加注车应用了变压吸附制氮技术,相较于其他制氮技术,该技术优势诸多。通常制氮模式以及相关特性表现为:①深冷制氮,该模式系统繁杂、设备多、体积大、能耗消耗大、故障频繁、开机时间长、不可长时间停机,多次开启不能完成移动运送与郊外保障要求;②膜渗透制氮,该模式需要安装二次提纯设备,设备占地面积大,0℃以下时,氮氧分离膜里面很容易发生结冰现象,导致设备损坏,同时不能修缮,也不适宜郊外存放与应用。而变压吸附制氮借助高性能碳分子筛的压力影响,借助氮、氧在分子筛当中不一样的吸收速度,把氧吸附而送出高纯氮气。与变压吸附流程相比较为简便,一次提纯就能收获高纯度氮气,可在-60~-30℃下存放;同时变压吸附制氮技术能达成移动保证,实现现代郊外作战要求。

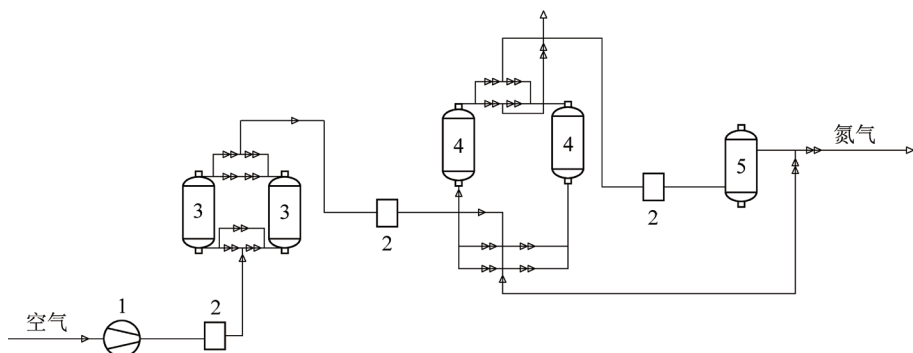
变压吸附相关工作程序

变压吸附相关程序设置有专用碳分子筛的吸附塔A塔和B塔,干燥纯净的压缩空气由底端流入A塔端口,通过碳分子筛床层往上方出口端流出,在压缩空气当中的氧气被吸附,产品氮气获得富集,同时吸附塔上端出口自动外流。通过相当长时间的吸附之后,A塔里面碳分子筛吸附实现饱和时,A塔将通过计算机控制自动暂停吸附。通过短时间均压之后,压缩空气主动输入B塔实施吸附,



- 1—压缩机;
2—过滤器;
3—干燥器;
4—吸附塔;
5—氮气缓冲罐

图2 传统变压吸附制氮程序



生产氮的任务进程跟A塔类似，且对A塔分子筛实施再生，把吸附塔里面压力快速减少到常压，此时被吸附的氧气快速排到大气当中，由此完成再生。A塔和B塔替换工作实施吸附与再生，实现氮与氧分离，持续制造出成品氮气。传统变压吸附制氮程序如图2所示。

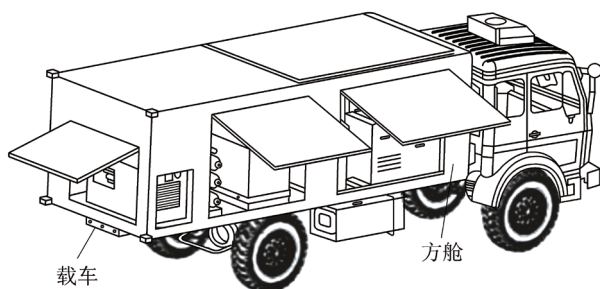


图3 制氮加注车整体车外形

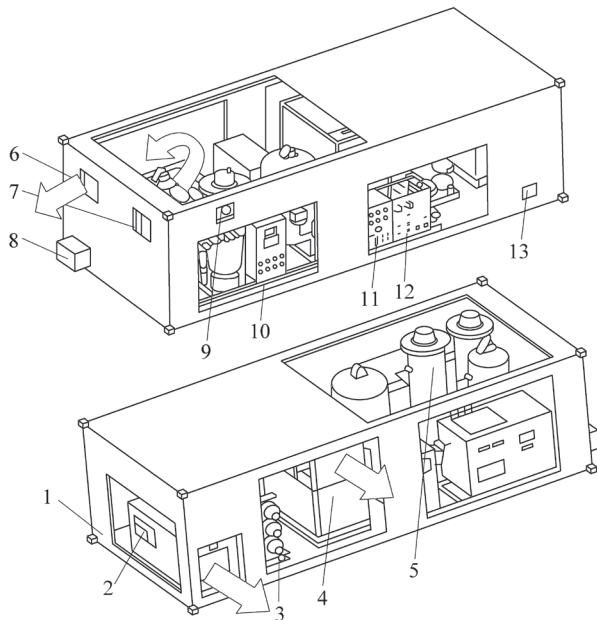
高纯度车载应急救援制氮设备结构布置及其产品特性

结构布置

由载车承载的集成制氮加注车单体设备的整车外形如图3所示，其内部布置如图4所示。制氮加注车方舱和载车通过标准旋锁机构关联，经过拆装旋锁能够完成分离与组装。在图4中，方舱有承载全部单体设备的效果，尤其在郊外执行任务时，发电机能产生制氮加注车运转所急需的动力电源。

重心设计

重心设计确保制氮加注车吊装与运送的安全性，明确一些不易调动的大质量单体设施位置是十分重要的，如制氮机、隔膜式压缩机与发电机位置。其中，制氮机可使用撬装结构，其位置被定位安装在方舱前端；发电机位置被定位在方舱后端，排烟口紧邻舱壁，防止油烟影响到方舱内部环境；而隔膜式压缩机位置空间狭小，设计在维修通道之



- 1—方舱；2—发电；3—储气瓶组；
4—隔膜式压缩机；5—制氮机组；6—散热门；
7—轴流风机排风门；8—暖风机；9—富氧排散门；
10—控制系统；11—电控柜；
12—输出系统；13—电源壁盒

图4 制氮加注车方舱内部布置

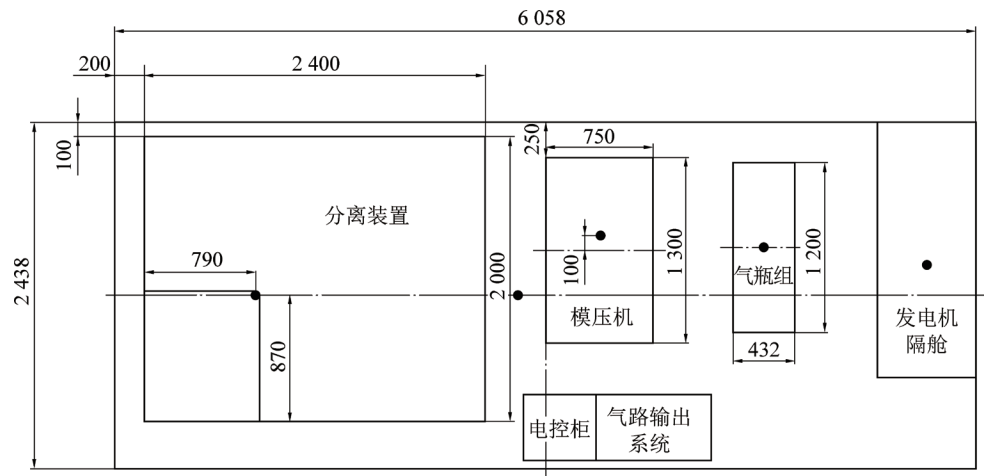
图5 制氮加注车方舱
各设备重心位置

图6 制氮加注车方舱外形实物

后，其安装位置可根据方舱几何中心间距与质量来明确，然后在安装位置处进行固定。

通过早期数据，核算出储气瓶组重心位置需要距离轴向中线位置大约100 mm，考虑到维修通道，综合加注车承载中心、备件工具储存、埋铁位置将储气瓶组安装在离轴向中线位置300 mm处。

通过核算径向质量分布获得重心图（图5），图中“•”位置体现出了各单体设备重心位置。

制氮加注车方舱具备优良的重心性，在验证重心和载车承载重心合并车舱分开吊装进程中，展现出非常高的安全性。制氮加注车方舱外形如图6所示。



(a) 空压机段实物



(b) 空气预处理段实物



(c) 变压吸附分离段实物

图8 制氮装置

备维修,减小设备运行故障对企业造成的经济损失,最大程度上保障企业的经济收益。及时有效地维修设备可以提高设备的使用寿命,降低对设备的损耗。

制氮装置优势和特点

制氮装置由空压机段、空气预处理段及其变压吸附分离段3个方面构成(图8)。分体组装到矿用平板车上面后,空压机段、空气预处理段及其变压吸附分离段采用波纹管相互关联,电控系统由橡胶套电缆连接,如此便组装成制氮装置,其具有6点优势:①制氮装置整体设备防爆,不仅能制造出井下移动式,也能制造出地面固定式或地面移动式;②占地面积小,安装移动便捷,制氮装置能便捷运动至任意注氮区域,尤其是可使用在多个工作面或矿井;③性能稳定、操作简便,除空压机段为运转部件外,其他局部都是静态工作,能够确保长时间运转,且系统性能非常平稳;④产氮数量可调控,通过调节吸附塔入口进气量调节氮气出口流量;⑤保护功能齐全,制氮装置具备超温、超压等各种保护功能,同时在线不间断展示重点技术参数;⑥数据输出,氮气纯度与瞬时流量值是标准电流信号输出,能够达成联网。

制氮装置主要技术指标及使用环境条件如下:

氮气露点/℃	≤-40
氮气体积分数/%	>98
氮气压力/MPa	≤0.7
氮气温度/℃	环境温度(2~40)
相对湿度/%	≤95(25℃)
大气压力/kPa	80~106

制氮装置具有以下3个特点:

(1) 节能高效

针对制氮工艺的改进,可以将最终生产出来的氮气纯度提高到99.995%。此外,这种制氮方式和传统的制氮工艺相比,提升了产生氮的速度,节省了企业的生产成本,帮助企业充分利用各种资源。氮气的产量为40 m³/h。



（2）维护频率减少

充分运用实时压紧技术，不仅能够减少生产过程中分子筛消耗的情况，提高分子筛的使用寿命，而且可以增加分子筛的性能，减少分子筛的更换频率。

（3）扩展功能

生产出来的装置可以扩展I/O接口，能够加大对数据的采集，帮助更多的数据收录到系统之中。通过计算机技术加强对数据信息的采集工作，提高扩展的网络通信功能。

技术方向选择及设计改进

在进行高效节能制氮机的研制过程中，需要尽可能地减少设备在运行过程中消耗的能量，并且监控设备的运行状态，加强保养提醒。由于PSA制氮不同工艺步骤的能耗都关乎着整个变压吸附气体分离能否实现，因此需要科学地对整个化学过程进行控制，帮助优化变压吸附制氮工艺，尽可能地节约压缩性能的损耗，节省资源。

采用将吸附完成之后的吸附剂床层内高压气体引进到另一个吸附床上的方式，保障气体的再生；同时，引入这些压力气体可以回收的部分压缩能，就能够进一步的减少气体的排放量，而气体排放量的减少，又可以促进回收率的提升；气体从一个吸附塔进入到另一个吸附塔的过程中，难免会由于气体内部能量的损失而造成制氮过程之中能量的损耗，因此可以选择更为理想的吸附剂；为保障吸附剂吸附的容量更加强大，吸附性更强，并降低生产成本，就可以选用价格较为低廉的吸附剂，即采用不同的分子筛，就可以导致制氮设备产生根本性的不同。此外，需要深入地进行研究和讨论，改善均压工作，经过试验可以发现，在均压管路之中设置独特的节流装置，能够提高装置的制氮效率。

与10年前相比，现在的吸附剂颗粒直径越来越小，吸附剂的颗粒也越来越细，这导致吸附床的流体阻力增加，从一定程度上延长了清洗器的清洗时间，清洗器的清洗时间可以增大床层的利用率。为了适应现在吸附剂颗粒直径越来越小的需求，应

当进一步改善制氮装置的均压设计，将这种设置与吸附塔的结构设计整合在一起。可以采用“短粗”模式的结构设计，这种方式可以减小吸附床层压力梯度，降低整个装置产生的能耗；也可以设置防冲挡板来改善吸附塔内的补气方式，防止高压高速气流对分子筛吸附剂造成冲击，进而影响到整个吸附剂的使用寿命。通过建立防冲挡板的方式，可以保障吸附剂不产生松动，延长吸附剂的使用时长。

要想进行设计改进，需要加强对清洗气量的控制。PSA变压吸附制氮工艺在吸附完成均压之后会向大气环境卸压，可以通过这种方式将少量的氮气引入到卸压之后的吸附塔内进行清洗。这个过程中，既需要保障顺利完成吸附塔的清洗，又要避免氮气过量造成能源的浪费。因此，需要采用一种“SHUT”的工艺操作方式，之所以选择这种操作方式，是希望引入的氮气可以运用到再生阶段的清洗气量，增加装置之内的氮气含量，且能够达到清洗氮气的目的。在研发过程中，经过不断试验，发现设置均压节流可以保障生产出来的氮气产品的纯度增加，同时也能够达到良好的节省能源效果。因此，可以将这项技术运用到生产过程中以提高生产出来的气体纯度，保障生产效率。

产品应用情况及推广应用前景

在煤炭领域的应用

由于氮气的化学性质不活泼，常温状态下氮气的性质比较稳定，因此它可以广泛地运用在煤油以及油田工业之中。氮气不容易点燃，因此可以作为灭火的介质。按照《煤矿安全规程》，想要更好地保障煤矿生产安全，就需要增强氮气的生产浓度，生产出来的氮气浓度应当大于97%。因此，需要改善变压吸附式碳分子筛制氮装置的研制过程，提高生产出来氮气的浓度，将生产出来的氮气用于高温高湿的生产环境，最终达到防火的目的。在工作过程中，将高浓度的氮气注入到火灾之中，可有效地降低氧气浓度到5%以下，燃料缺少了氧气就

无法进行燃烧,同时氧气含量的降低也可以防止瓦斯爆炸。经过多年的工业应用检验,可以发现高纯度的井下移动碳分子筛制氮装置技术可以广泛地应用在工业之中。这种技术运行较为稳定,可以更好地保障煤炭工作人员的生命安全,增强企业运行过程的安全性,降低煤炭生产过程中发生火灾的风险,从而保障煤炭生产过程的安全高效。

在非煤领域的应用

随着国家科技的不断发展,低温化学热处理技术也取得了相应创新。在科技发展的过程中,需要更多地处理大型精密齿轮以及高性能齿轮,为解决此难题,可以通过深层离子渗氮技术来提高这些齿轮的性能,促进其抗击变能力以及抗咬合性能的提升。这种方式可以帮助齿轮在渗透氮之后,加强齿轮表面的硬度,保证齿轮的耐磨性,这样齿轮可以更长时间地运行,减少企业更换齿轮的成本,同时提高齿轮的弯曲疲劳强度,保证齿轮能够时刻保持良好的运行状态,减小由于齿轮外形损伤而造成整个设备无法运行的状况发生。

推广应用前景

变压吸附式碳分子筛制氮装置可以很好地提高生产出来的氮气浓度,并且这种方式生产成本较小,能进一步提高制氮机的产氮量,增强氮气的回收率。通过这种方式,可以让氮气拥有更加广泛的应用领域,满足市场对氮气的需求,提高设备的市

场竞争能力,如在冶金工业之中,高纯度的氮气可以更好地保障冶金完成之后工作环境的安全性,在金属热处理的过程中,运用氮气可以帮助企业生产出来的金属表面更加光滑、有色泽。此外,在进行有色金属的冶炼过程中,氮气可以吹扫钢水,提高生产出来的产品纯度,这种方式也能够提高钢之中氢的含量,促进钢强度的提升。在医疗过程中,可以利用液氮低温的特性帮助患者去除身体上的疤痕。此外,在医药的包装过程中可利用高纯度的氮气以更好地帮助食品进行保鲜。

结语

高纯度车载应急救援制氮设备的成功研发,标志着制氮技术迈向了一个新的台阶。笔者深度介绍了变压吸附制氮技术,研发出高纯度车载应急救援制氮设备,并介绍其工作原理、优势及特点,提出了技术方向的选择以及相关设计的改进方式;并对高纯度车载应急救援制氮设备的应用情况以及推广应用前景进行详细论述,希望能够帮助读者深入了解高纯度车载应急救援制氮设备及其应用前景。

■ 责任编辑:李金松

作者简介:

第一作者:于文海,工程师,现任大同科工安全仪器有限公司副总工程师。E-mail:2164532@qq.com

作者单位:大同科工安全仪器有限公司;
陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司;
北京航天万源科技有限公司

热点问答

生态硬约束给煤炭工业发展带来怎么样的挑战?

生态硬约束使开采成本大幅度增加。采矿与生态既是矛盾,又可友好协调,生态保护的红线要求煤炭必须绿色开发,建设绿色矿山,充填开采、矸石处理、保水开采、塌陷区治理等现有煤炭资源绿色开发技术普遍存在效率低、效益差等问题,煤炭资源绿色开发势必将大幅增加煤炭开发利用成本,降低煤炭资源价格竞争优势,煤炭资源绿色高效开发技术体系亟待完善。

——摘自《中国煤矿智能化发展报告(2022年)》