

利用梯度磁场的拦截作用富集氧气的研究

蔡军¹ 王立^{1*} 吴平² 童利葛¹ 孙淑凤¹

(北京科技大学 1. 机械工程学院; 2. 应用科学学院, 北京 100083)

摘要: 提出了一种利用梯度磁场对氧分子形成的拦截作用实现氧气富集的新方法。用两块相距一定距离的矩形钕铁硼永磁体异极相对围成一个磁场空间,在磁场空间的边界处存在梯度磁场。当被引入磁场空间的空气穿过边界流出磁场空间时,氧分子受到梯度磁场的拦截作用,而氮分子则顺利流出,从而实现氧气富集。实验测得,当进出磁场空间的空气流量分别为 40, 20 mL/min, 气体温度为 298 K, 磁感应强度与场强梯度乘积的最大值为 $563 \text{ T}^2/\text{m}$ (磁极间距为 1 mm) 时,氧气的富集量最大,达到了 0.65%。当气体温度升高至 343 K 时,氧气的富集量降至 0.32%;当磁感应强度与场强梯度乘积的最大值减小为 $101 \text{ T}^2/\text{m}$ (磁极间距为 4 mm) 时,氧气的富集量降至 0.23%。实验结果显示进出磁场空间的空气流量存在一个最佳比值,使氧富集程度达到最大。本文实验条件下,该值在 2.0 左右。本文提出的方法被证明可以连续富集氧气,而且比其他磁分富氧方法具有更高的富集水平。

关键词: 磁分离; 富氧; 梯度磁场; 氧氮分离; 磁化力

中图分类号: TQ028

自 1847 年法拉第发现气体运动的磁效应以来,研究者们对这种磁致气流行为进行了研究并且加以应用。Wakayama 观察到磁致气流行为可以促进扩散火焰的燃烧^[1],对注入空气中的氧气流产生加速和减速作用^[2],以及促进呼吸过程中的吸气和呼气^[3]。基于顺磁性氧气与抗磁性氮气在梯度磁场中呈现出不同的磁行为,朱重光^[4]讨论了横向非均匀磁场对氧气和氮气的分离作用,并提出了相应的磁分富氧装置,遗憾的是没有进行实验验证。O-hara^[5]等人利用磁性细线磁化后表面存在的高磁场梯度来捕集氧分子并以此实现氧气富集,氧浓度最大增加了 0.4%,但这种方法相当于静态吸附,不能连续富集氧气。近年出现的磁分富氧装置的专利^[6-7]大多还停留在构想阶段,所采用的方法也基本上是在气体通道上施加一个梯度磁场,单纯依靠氧氮分子在梯度磁场中受到的相反磁力来改变它们的行进轨迹,从而实现氧氮分离。实际上,氧氮分子在梯度磁场中受到的磁力非常微弱,而且磁力把氧

氮气体的行进轨迹分开以后,气体湍流作用以及分子扩散可以轻易地使氧氮发生再混合。

利用梯度磁场从空气中富集氧气,要解决的一个难题就是如何避免气体湍流作用以及分子扩散对磁分富氧过程的影响。本文针对该问题提出了一种全新的思路,建立了相应的磁场富氧装置,并对各种影响因素进行了研究和分析。

1 实验装置

为了避开气体湍流以及分子扩散对磁分富氧过程的影响,本文利用梯度磁场对氧分子形成的拦截作用实现氧气富集,与依靠磁力改变氧氮轨迹实现富集的方法有着本质的不同。实验所需磁场空间的设计如图 1 所示。

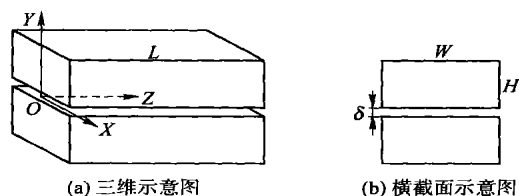


图 1 磁极布置形式

Fig. 1 Layout of magnetic poles

磁场空间由两块相同的矩形钕铁硼永磁体构成,其几何尺寸 $L \times W \times H$ 为 $78 \text{ mm} \times 38 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。两块永磁体异极相对,磁极间距 可以调节。

收稿日期: 2006-06-16

基金项目: 教育部科技重点项目 (00020); 北京科技大学科技发展基金项目 (20040600290)

第一作者: 男, 1977 年生, 博士生

*通讯联系人

E-mail: liwang @me.ustb.edu.cn

本文采用的钕铁硼永磁体 N35 的性能为^[8]:剩磁 1.25 T;矫顽力 860 kA/m;内禀矫顽力 1000 kA/m;最大磁能积 290 kJ/m。采用 ANSYS 有限元分析软件对空间内的磁场分布进行分析,图 2 所示为 $\delta = 1$ mm 时,空间内的气隙磁场沿 X 轴方向上的磁场分布。由图 2 可知磁场分布关于 Z 轴对称,在 -15 mm X +15 mm 的区间内,磁场强度几乎不变,约为 1.17 T,在 $X < -15$ mm 和 $X > +15$ mm 区间内,磁场空间内的磁场强度开始急剧下降,并在磁场空间边界处降为零,这一区间内存在相当大的场强梯度,磁感应强度与梯度乘积的最大值达到了 563 T²/m。

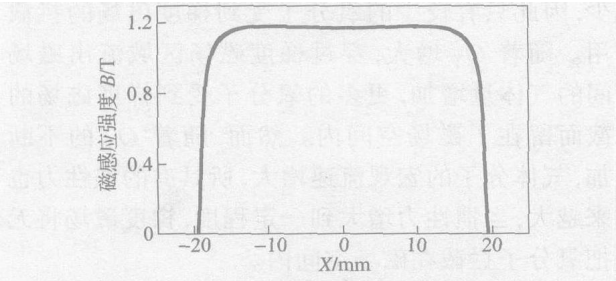


图 2 气隙磁场沿 X 轴方向上的场强分布
Fig. 2 Field intensity distribution of the air-gap field in the X -direction

图 3 为气体在磁场空间内流动的二维示意图。当流量为 Q_1 的空气从磁场空间左端面进入磁场空间后,流量为 Q_2 ($Q_2 < Q_1$) 的气体从磁场空间的右端面抽出,其余气体将分别 X 沿轴的正负方向流出磁场空间,这部分气体在流出磁场空间前要穿过边界处的梯度磁场区域,其中的顺磁性氧分子受到梯度磁场的拦截作用,抗磁性氮分子由于受到与氧分子相反的磁力而顺利流出磁场空间,从而在磁场空间内部实现氧气的富集。存在于磁场空间边界处的梯度磁场的作用相当于一个具有选择性的“筛子”,它对氧氮分子具有相反的选择性。由于不是单纯依靠磁力改变氧氮的轨迹来实现氧气富集,所以完全避开了气体湍流及分子扩散所造成的氧氮再混合。

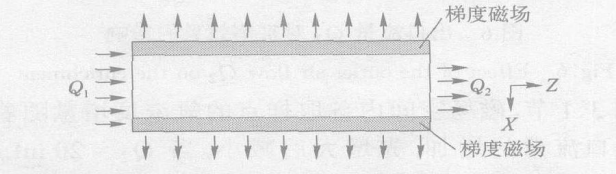


图 3 气体在磁场空间内的二维流动示意图
Fig. 3 Two-dimensional sketch of gas flow in the magnetic space

利用梯度磁场的拦截作用富集氧气的完整实验装置如图 4 所示。永磁体被放入一个方形容器中。流量为 Q_1 的空气经过缓冲容器由进气口(6)进入磁场空间,其中流量为 Q_2 的气体通过流量计 12 流出容器,流量为 $Q_1 - Q_2$ 的气体穿过图 3 所示的梯度磁场区域并流出磁场空间,最后汇集在一起,通过流量计 13 流出。通过配合调节流量计 12 和 13 的进口阀门,不但可以调节各自的流量,还可以调节进入磁场空间的空气流量。缓冲容器中安装有加热电阻丝,通过调节调压器,可以把气体加热到所需温度。带有针头(7)的塑料软管(8)用于沿 Z 轴定点取样,针头的取样端插入到磁场空间的中心位置($X = 0$),容器壁上开有与塑料软管相对应的小孔,每个小孔用橡皮密封。取样时,把注射器(容积为 1 mL)的针头插入塑料软管内即可。与磁场空间右端面平齐的容器壁上开有一排圆孔(11),圆孔用橡胶垫(10)进行密封。通过圆孔,把注射器的针头直接插入到磁场空间内可以在磁场空间右端面出口处沿 X 轴进行定点取样(根据对称性,只对 X 半轴进行取样)。隔板(9)的作用是为了把通过流量计 12 流出的气体与通过流量计 13 流出的气体分隔开,以防止两股气流的混合。对于从流量计 12 流出的气体,直接用注射器进行取样。

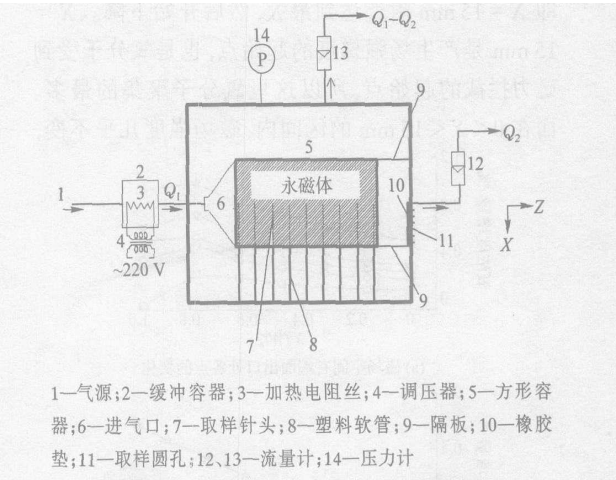


图 4 利用梯度磁场的拦截作用富集氧气的实验装置示意图

Fig. 4 Sketch of the experimental setup for oxygen enrichment using the interception effect of the gradient magnetic field

2 氧浓度分析方法

本文采取定点取样的方法对磁场空间内的氧浓

度进行分析。由于氧浓度增量很小,为了保证测量精度以及分析氧浓度变化规律,采用间接测量方法分析所抽取气样的氧浓度。具体作法是:以高纯氮气(纯度达到 99.999%)作为背景气,用微量氧分析仪器(EC911 型微量氧分析仪,英国 SYSTECH INSTRUMENTS 公司)测出高纯氮气中的氧浓度,然后把体积已知的背景气与所抽取的气样混合,并用微量氧分析仪给出混合气体的氧浓度,最后通过如下公式返算气样中的氧浓度 $C(\%)$ 。

$$C = \frac{(V_{N_2} + V_S) \cdot C_2 - V_{N_2} \cdot C_1}{V_S} \times 100\%$$

式中, V_{N_2} 为高纯氮气的体积; V_S 为抽取气样的体积; C_2 为高纯氮气与气样混合后的氧浓度; C_1 为高纯氮气中的氧浓度。

3 结果与讨论

3.1 进口流量 Q_1 对富集效果的影响

图 5 为 $Q_2 = 20 \text{ mL/min}$ 时,磁场空间内各取样点的氧浓度增量随 Q_1 的变化情况。其他实验参数: $T = 298 \text{ K}$, $\delta = 1 \text{ mm}$ (磁感应强度与场强梯度乘积的最大值为 $563 \text{ T}^2/\text{m}$), 气体压力为 101.325 kPa 。在磁场空间右端面出口处,随着 X 值的逐渐增大,氧浓度增量也逐渐增加,约在 $X/(W/2) = 0.789$, 即 $X = 15 \text{ mm}$ 附近达到最大,然后开始下降。 $X = 15 \text{ mm}$ 是产生场强梯度的起始点,也是氧分子受到磁力拦截的起始点,所以这里氧分子聚集的最多。而在 $0 < X < 15 \text{ mm}$ 的区间内,磁场强度几乎不变,

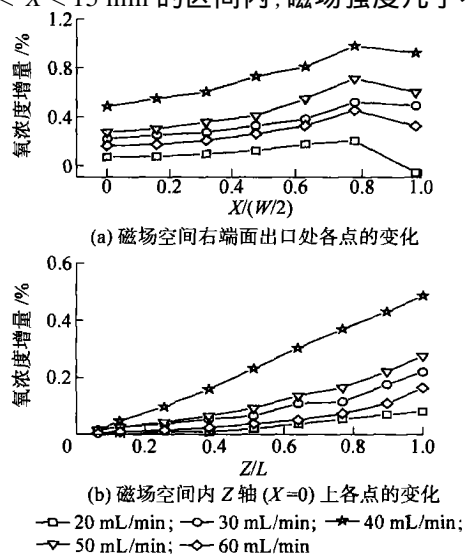


图 5 进口流量 Q_1 对富集效果的影响

Fig. 5 Effect of the inlet air flow Q_1 on the enrichment

氧分子在该区间内不会受到磁力作用,也就不会发生聚集,但是聚集在梯度磁场区域内的氧分子会向均匀磁场区域扩散,使得均匀磁场区域内的氧浓度也增加。磁场空间内 Z 轴上各取样点的氧浓度增量沿 Z 轴正方向逐渐增大,在右端面出口处(即距空气入口最远边界处)达到最大。比较图 5(a)、(b)可知,随着 Q_1 的增加,氧浓度的增量先增大后减小,当 $Q_1 = 40 \text{ mL/min}$ 时氧浓度增量达到最大,实验测得从流量计 12 流出气体的氧浓度增量这时候达到了 0.65% 。这表明,在 Q_2 一定的情况下, Q_1 存在一个最佳值,这种情况可以解释为,当 Q_1 很小时,穿过梯度磁场区域流出磁场空间的气体量相应减少,因此只有较少的氧分子受到梯度磁场的拦截作用。随着 Q_1 增大,穿过梯度磁场区域流出磁场空间的气体量增加,更多的氧分子受到梯度磁场的拦截而留在了磁场空间内。然而,随着 Q_1 的不断增大,气体分子的宏观流速增大,所具有的惯性力也越来越大,当惯性力增大到一定程度,梯度磁场将无法把氧分子拦截在磁场空间内。

3.2 出口流量 Q_2 对富集效果的影响

图 6 为 $Q_1 = 50 \text{ mL/min}$ 时,磁场空间内各取样点的氧浓度增量随 Q_2 的变化情况。其他实验参数

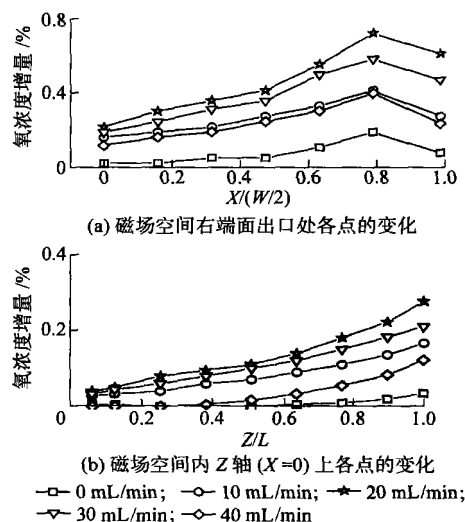


图 6 出口流量 Q_2 对富集效果的影响

Fig. 6 Effect of the outlet air flow Q_2 on the enrichment

同 3.1 节。磁场空间内各取样点的氧浓度增量随着出口流量的增加,先增大后减小,当 $Q_2 = 20 \text{ mL/min}$ 时,氧浓度增量达到最大值,实验测得从流量计 12 流出气体的氧浓度增量这时候达到了 0.44% 。这表明在 Q_1 一定的情况下, Q_2 存在一个最佳值。

结合 3.1 节中的讨论可知, Q_1 与 Q_2 之间存在一个最佳比值。结合图 5 与图 6 可知, 本文实验条件下, Q_1/Q_2 的最佳比值在 2.0 左右。

3.3 气体温度对富集效果的影响

图 7 为磁场空间内各取样点氧浓度增量随气体温度的变化情况。其他实验参数: $Q_1 = 40 \text{ mL/min}$, $Q_2 = 20 \text{ mL/min}$, $\delta = 1 \text{ mm}$ (磁感应强度与场强梯度乘积的最大值为 $563 \text{ T}^2/\text{m}$), 气体压力为 101.325 kPa 。

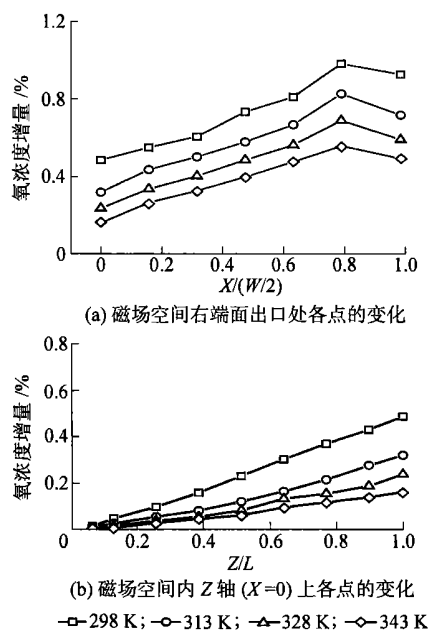


图 7 气体温度对富集效果的影响

Fig. 7 Effect of the gas temperature on the enrichment

各抽样点的氧浓度增量随气体温度的升高而减小。当气体温度从 298 K 升高至 343 K 时, 实验测得从流量计 12 流出气体的氧浓度增量由 0.65 % 下降至 0.32 %。氧气的体积磁化率与温度的平方成反比, 而氧气受到的磁力与体积磁化率成正比。气体温度升高导致氧分子受到的磁力减小, 梯度磁场对氧分子的拦截作用减弱, 被梯度磁场拦在磁场空间内的氧分子数量减少。由此可见, 降低进入磁场空间的空气的温度, 可以增强梯度磁场对氧分子的拦截作用, 从而提高氧气的富集程度。

3.4 磁场对富集效果的影响

图 8 为磁场空间内各取样点氧浓度增量随的变化情况。其他实验参数: $Q_1 = 40 \text{ mL/min}$, $Q_2 = 20 \text{ mL/min}$, $T = 298 \text{ K}$, 气体压力为 101.325 kPa 。

各取样点的氧浓度增量随着 δ 的增大而减小。当 δ 从 1 mm 增至 2 mm 时, 实验测得从流量计 12

流出的气体的氧浓度增量由 0.65 % 急剧下降至 0.3 %, 当 δ 继续增大至 4 mm (相应的磁感应强度与场强梯度乘积的最大值为 $101 \text{ T}^2/\text{m}$) 时, 氧浓度增量缓慢降至 0.23 %。出现这一现象的原因是: 当 δ 增大时, 磁场空间内的磁场强度会减弱, 而边界处的场强梯度也将减小。氧分子受到的磁力与磁感应强度和场强梯度的乘积成正比, δ 增大导致氧分子受到的磁力降低, 梯度磁场对氧分子的拦截作用减弱, 被梯度磁场拦在磁场空间内的氧分子数量减少。

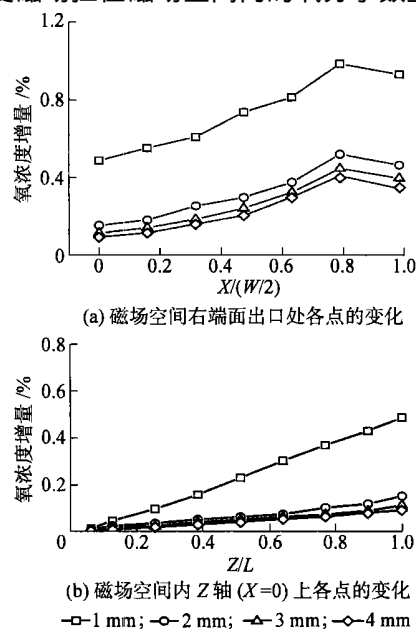


图 8 磁极间距对富集效果的影响

Fig. 8 Effect of the distance between two magnetic poles on the enrichment

4 结论

(1) 利用梯度磁场的拦截作用可以实现从空气中连续富集氧气, 该富集方式避免了气体湍流及分子扩散所造成的氧氮再混合。

(2) 当进出磁场空间的气体流量分别为 40 mL/min 和 20 mL/min , 气体温度为 298 K, 磁极间距为 1 mm (磁感应强度与场强梯度乘积的最大值为 $563 \text{ T}^2/\text{m}$) 时, 氧气的富集程度达到了 0.65 %。

(3) 在一定流量范围内 (60 mL/min), 进出磁场空间的气体流量存在一个最佳比值, 使氧气的富集程度达到最大。本文实验条件下, 该值约为 2.0。

(4) 氧气的富集程度受气体温度和磁场的影响较大。当气体温度升高至 343 K 时, 氧气的富集量降至 0.32 %; 当磁极间距增至 4 mm (磁感应强度与

场强梯度乘积的最大值为 $101 \text{ T}^2/\text{m}$ 时,氧气的富集量降至 0.23 %。

参 考 文 献

- [1] Wakayama N I. Magnetic promotion of combustion in diffusion flames[J]. Combustion Flame, 1993, 93: 207 - 214.
- [2] Wakayama N I. Magnetic acceleration and deceleration of O_2 gas stream injected into air[J]. IEEE Trans Magn, 1995, 31 (1): 897 - 901.
- [3] Wakayama N I, Wakayama M. Magnetic acceleration of inhaled and exhaled flows in breathing[J]. Jpn J Appl Phys, 2000, 39: L262 - 264.
- [4] 朱重光. 磁分制氧机理[J]. 淮北煤炭师范学院学报, 1997, 18 (1): 22 - 25.
- [5] Ohara T, Ichida T, Ooura H, *et al.* Experiment on oxygen enrichment of air using superconducting high intensity magnetic field[J]. Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, 1984, 48(12): 928 - 935.
- [6] 伍永峰. 场流分馏式制氧机: 中国, CN00268311.3 [P]. 2002-04-03.
- [7] 李学金. 磁热式氧气富集器: 中国, CN00247125.6 [P]. 2002-01-23.
- [8] 杨立军, 任建勋, 宋耀祖, 等. 不同磁场布置对空气自然对流的影响[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 413 - 420.

Oxygen enrichment from air by use of the interception effect of a gradient magnetic field on oxygen molecules

CAI Jun¹ WANG Li¹ WU Ping² TONG Li-ge¹ SUN Shu-feng¹

(1. School of Mechanical Engineering; 2. School of Applied Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper presents a novel method for oxygen enrichment from air based on the interception effect of a gradient magnetic field on oxygen molecules. Placing opposite magnetic poles of two magnets with a certain distance between them forms a magnetic space having a field intensity gradient near its borders. When air injected into the magnetic space flows out via its borders, oxygen molecules in the air will experience the interception effect of the gradient magnetic field, but nitrogen molecules will flow out from the magnetic space without hindrance. As a result, continuous oxygen enrichment is realized. The enrichment degree of oxygen reaches 0.65 % when the inlet and outlet air flows are 40 mL/min and 20 mL/min respectively and the gas temperature is 298 K and the maximum product of magnetic flux density and field intensity gradient is $563 \text{ T}^2/\text{m}$ (the distance between two magnetic poles being 1 mm). When the gas temperature rises to 343 K, the enrichment degree drops to 0.32 %; when the maximum product of magnetic flux density and field intensity gradient drops to $101 \text{ T}^2/\text{m}$ (the distance between two magnetic poles being 4 mm), the enrichment degree drops to 0.23 %. The experimental results show that there is an optimal ratio between the inlet air flow and the outlet air flow. Under the experimental conditions used in this work, the value of this ratio is about 2.0. It is demonstrated that the method presented here can continuously enrich oxygen and has a higher enrichment degree than other oxygen enrichment methods using magnetic separation.

Key words: magnetic separation; oxygen enrichment; gradient magnetic field; separation of oxygen and nitrogen; magnetizing force