

真空管道交通真空泵排气与运行排气 比较研究及合理配置

张耀平*

(西京学院真空管道交通研究所 西安 710123)

Proposal of Auxilary Pumping Technique: Taking-in and Pushing-out Low-Pressure Air with Running Vehicle in Vacuum Tube Transport

Zhang Yaoping*

(Institute of Vacuum Tube Transport, Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract A novel technique was proposed to further remove the low pressure air in the vacuum tube, pumped down from atmosphere to $\sim 10^4$ Pa via the stationary pumping stations, by means of the running vehicle in vacuum tube transport. In the proposed pumping scheme, the fast-running vehicle takes air in and stores the compressed air in its mobile storage tanks, while pushing out the air in the tube through the openings, constructed along the tube wall. The impact of the technical factors, including but not limited to the compressor's energy consumption, number of mobile storage tank, pumping capacity, construction cost, and possible technical problems to be solved, on the pumping efficiency and feasibility of the proposed technique was tentatively discussed in a though provoking way. We suggest that the novel auxiliary pumping method may be of some basic and technological interest in development of vacuum tube transport.

Keywords Vacuum tube transport, Pumping by vacuum pump, Pumping by running vehicle, Gas storage bottle, Mending pumping

摘要 真空形成与维持是保证真空管道交通正常运行的重要工作,此工作可通过真空泵排气、车辆运行排气或活塞排气等方式予以实现。在粗真空形成阶段,即从常压 1.01325×10^5 到 1.01325×10^4 Pa,需要排出 90% 气体,适合采用建设在管道沿线的真空泵排气方式,同时,活塞式排气方式亦可考虑。在 1.01325×10^4 Pa 以后,即管道内真空度高于 1/10 大气压时,管道内残留的气体小于常压时气体量的 10%,气压较低,用真空泵排气时效率低,能耗大,而用车辆运行排气方式时,相对效率较高,所需高压储气瓶数量不多,排气总成本较小,因此适合采用车辆运行排气方式。补抽气属于后期阶段排气过程,宜优先采用车辆运行排气方式。

关键词 真空管道交通 真空泵排气 运行排气 储气瓶 补抽气

中图分类号:U14 文献标识码:A doi:10.13922/j.cnki.cjovst.2016.07.0

真空管道交通(Vacuum Tube Transport, VTT)全称为“真空管道高速磁浮交通”(Vacuum Tube High-speed Maglev Transport),即把磁悬浮列车置于抽成一定真空的管道中,由于同时消除了机械摩擦和空气阻力,运行车辆在管道中可以超高速行驶^[1]。其特征是,低能耗、低碳排放、低污染、相对安全,建设和运营成本较低,初期运行速度 600 ~ 1000 km/h,中期

达到超音速,远期达到高超音速,使人类实现地面的太空旅行^[2-4]。

真空管道交通是一项巨系统工程,涉及的工作任务很多。其中真空形成与维持是保证真空管道交通正常运行的重要工作之一,基本实施方式有三种:

(1)在管道沿线每隔一定距离布置真空泵站,通过这些真空泵站对管道内抽真空或者补抽气。这种

方式称为真空泵排气方式。

(2)在运行车辆前端安装空气压缩机,吸入管道内的气体,经压缩后收集在车辆所带的高压储气瓶内,并在线路终点将气体带出管道,这种方式我们称为运行排气方式。专利“真空管道高速交通运行抽气系统”即涉及这项技术^[5]。

(3)用活塞方式把管道内的部分气体挤压排出管道,这种方式我们称为活塞排气方式。活塞排气方式时不一定要求活塞和管道壁紧密贴合,容许存在间隙,列车在高速运行时对前方气体会形成挤压,能将受挤压的高压气体通过单向阀门排出管道即可。

真空泵排气方式和运行排气方式是两种公认可行的排气抽真空方式,但哪种方式更优?或者哪种方式更适合某种工况?两种排气方式之一能否成为唯一的选择,或者两种排气方式配合使用才能达到最优效果?本文对此进行研究并给出结论。

1 分析模型、假设

1.1 管道模型

如图1所示,本文计算模型的管道内径2.8 m,管道长度1000 km。

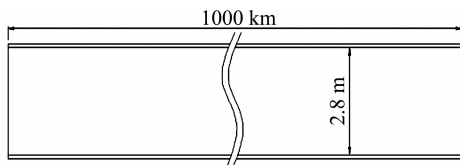


图1 管道内径与长度

Fig.1 Schematic diagram of the tube structure in vacuum tube transport

1.2 抽真空阶段模型

本文把真空管道交通的管道内排气过程分成5个阶段,即(1~1/10, 1/10~1/100, 1/100~1/1000, 1/1000~1/10000, 1/10000~1/100000)(大气压, atm),对应的用管道内气体压强表示的5个阶段则是:

第1阶段: $1.101325 \times 10^5 \sim 1.101325 \times 10^4$ Pa;

第2阶段: $1.101325 \times 10^4 \sim 1.101325 \times 10^3$ Pa;

第3阶段: $1.101325 \times 10^3 \sim 1.101325 \times 10^2$ Pa;

第4阶段: $1.101325 \times 10^2 \sim 1.101325 \times 10^1$ Pa;

第5阶段: $1.101325 \times 10^1 \sim 1.101325 \times 10^0$ Pa。

这里所列5阶段并不意味着所有真空管道线路都要实施全部5个阶段的抽真空,至于要涉及几个

阶段,应根据优化分析所确定的额定真空度而定。将来目标速度很高,如5000,或10000 km/h以上时,或许需要考虑实施第6阶段($1.101325 \times 10^0 \sim 1.101325 \times 10^{-1}$ Pa,)以后的排气抽真空任务。

1.3 假设

(1)假设为理想管道,管道内壁光滑,不考虑沿线气体隔离门、管道内各种设施对管道内体积和抽气效果的影响。

(2)管道沿线真空泵/真空机组布置与配置达到最优化,不计管道流导影响,没有因此造成的抽气功效降低。

(3)抽气车辆总是在最理想速度下运行,即运行抽气过程中行车速度能保证空气阻力与压缩机工作的理想工况相一致,压缩机抽气和储气效率最高。

2 真空泵排气方式形成真空的功率与能耗

根据本文计算模型,真空管道内体积 $V = 6154400 \text{ m}^3$,每千米管道体积则为 6154.4 m^3 。如果建设一个真空泵站,对整个1000 km长管道抽真空,显然很不合理,很不经济,抽气时间会很长。要想使抽气时间最小,一个极限方法是,极度密集地设置真空泵站,如10 m一个,虽然这样能使抽真空时间最小化,但显然也不合理、不经济。根据真空行业的实践经验,估计真空管道交通真空泵站的合理设置间距在1~10 km之间,也许2~5 km为好。

假如每5 km建设一个真空泵站(根据已有细长管道抽真空系统的理论与经验,此应为真空管道交通系统真空泵站设置的上限距离间隔,更合理的布局应该小于这一距离),泵站有效抽速 $S_e = 5 \text{ m}^3/\text{s}$,则从常压 p_0 抽真空到 $p_1 = 1.101325 \times 10^2$ Pa 时所需抽气时间为^[6]

$$t = \frac{V}{S_e} \ln \frac{p_0}{p_1} = \frac{5 \times 6154.4}{5} \ln \frac{1.101325 \times 10^5}{1.101325 \times 10^2} \\ = 6154.4 \times \ln 1000 = 11.8 \text{ h}$$

式中, V 为真空管道目空体体积, R_1 为真空管道内额定真空度下的压强。

当前 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 大抽速真空泵的运行功率最低需200 kW。每5 km建设一个真空泵站,则1000 km长管道线路需要建设的真空泵站数为200,所需真空泵总功率则为40000 kW, 11.8 h所消耗电能为472000 kWh。

如果从常压抽到1/10大气压,即 $p_1 = 10132.5$ Pa,则所需抽气时间为

$$t = \frac{5 \times 6154.4}{5} \ln \frac{101325}{10132.5} = 6154.4 \times \ln 10$$

$$= 14171 \text{ s} = 3.94 \text{ h}$$

所消耗电能为 157600 kWh。

由真空抽气时间计算的指数特征可知^[6-8],真空泵排气方式形成真空时,第 2 阶段、第 3 阶段、第 4 阶段、第 5 阶段排气能耗均为 157600 kWh。

3 车辆运行抽气方式形成真空的功率与能耗

在车辆运行排气方式下,主要能耗有两个方面:运行车辆动力消耗和压缩机工作能耗。跟真空泵排气方式相比,需要特别考虑对收集气体的压缩、临时储存和带出的问题,高压储气容器便成为必须的配置。

3.1 所需储气容器容积总和计算

已知管道总体积为 V ,此即为管道内常压时的空气体积量,对应的气体压强为 p_0 。当管道内真空度(气体压强)抽到 p_1 时,所需抽出的以 p_0 计的空气体积量为 V_{vp0} ,所剩余以 p_0 计的空气体积量为 V_{lp0} ,如图 2 所示。

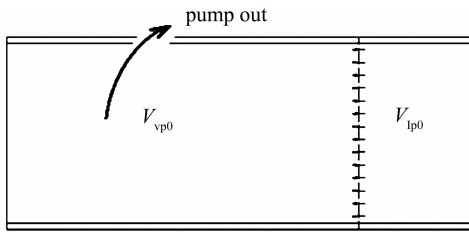


图 2 气体体积量变动示意图

Fig.2 Schematic illustration of the variations in gas volume

则有 $V_{vp0} + V_{lp0} = V$ (1)

根据波义耳定律,有

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{V_{lp0}}{V} = \frac{V - V_{vp0}}{V} \quad (2)$$

$$V_{vp0} = V(1 - \frac{p_1}{p_0}) \quad (3)$$

令 p_2 为储气瓶内压力, V_2 为所需要储气容器体积总和。根据波义耳定律,则有

$$p_0 V_{vp0} = p_2 V_2 \quad (4)$$

即

$$V_2 = \frac{p_0 V_{vp0}}{p_2} \quad (5)$$

将式(3)代入式(5),则有

$$V_2 = V(\frac{p_0 - p_1}{p_2}) \quad (6)$$

取管道内额定真空度为 1/1000 大气压,即 $p_1 = 101.325 \text{ Pa}$;再取储气瓶内压力 $p_2 = 15 \text{ MPa}$,代入式(6),可得所需要的储气容器总容积为

$$V_2 = 6154400 \times (\frac{101325 - 101.325}{15 \times 10^6}) = 41531 \text{ m}^3$$

当额定真空度 p_1 取值 10132.5, 1013.25, 101.325, 10.1325, 1.01325 Pa, 储气瓶内压力 p_2 取值 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 MPa, 计算可得不同额定真空度与不同规格储气瓶时所需要的储气容器总容积如表 1 所示。

表 1 所需要的储气容器总容积

p_1/Pa	总容积/ m^3						
	10	15	20	25	30	35	40
10132.5	56124	37416	28062	22449	18708	16035	14031
1013.25	61736	41157	30868	24694	20579	17639	15434
101.325	62297	41531	31149	24919	20766	17799	15574
10.1325	62353	41569	31177	24941	20784	17815	15588
1.01325	62359	41573	31179	24944	20786	17817	15590

在内部直径为 2.8 m 的真空管道中,能够容纳的储气瓶合理断面直径为 1 ~ 2.4 m, 断面面积 0.785 ~ 4.5216 m^2 。每个储气罐长度按 10 m 考虑,则一个储气罐的容积为 7.8 ~ 45.216 m^3 。于是按运行排气方式形成真空时,所排出空气的罐数如表 2 所示。

表 2 所需不同压力级储气瓶数

Tab.2 Required number of the high pressure gas storage tank

p_1/Pa	储气瓶数						
	10	15	20	25	30	35	40
10132.5	7150/1241	4766/828	3575/621	2860/497	2383/414	2043/355	1787/310
1013.25	7864/1365	5243/910	3932/683	3146/546	2622/455	2247/390	1966/341
101.325	7936/1378	5290/919	3968/689	3174/551	2645/459	2267/394	1984/344
10.1325	7943/1379	5295/919	3972/690	3177/552	2648/460	2270/394	1986/345
1.01325	7944/1379	5296/919	3972/690	3178/552	2648/460	2270/394	1986/345

注:单元格中位于分子和分母的两数字分别代表小瓶(内径 1 m)和大瓶(内径 2.4 m)的需求数量。

从表2可知,当储气瓶承压强度 $p_2 = 40$ MPa,储气瓶断面直径为 2.4 m,长度 10 m,则运行排气方式下管道内达到 1/1000 大气压所需的储气罐数为 344 个。若每列抽气车辆连挂 100 个储罐车,则完成 1000 km 长管道的抽真空任务需要 3.5 列次车,即两对抽气运行储罐车列可完成一次对真空管道的抽真空任务。

3.2 排出气体量计算

根据式(3),当管道内气压降低到 1/10 大气压时,排出气体体积数为

$$V_{vp0} = V(1 - \frac{p_1}{p_0}) = 6154400 \times (1 - 0.1) = 5538960 \text{ m}^3$$

也就是说,在气压降低到 1/10 大气压时,已经有 90% 的气体被抽出。

表3 各阶段排气量及所占总量的百分比

Tab.3 Percentage of the gas pumped out in each stage

阶段	第1阶段	第2阶段	第3阶段	第4阶段	第5阶段
气压变化/1.101325 Pa	$10^5 \rightarrow 10^4$	$10^4 \rightarrow 10^3$	$10^3 \rightarrow 10^2$	$10^2 \rightarrow 10^1$	$10^1 \rightarrow 10^0$
排气量/ m^3	5538960	553896	55389.6	5538.96	553.896
所占总量百分比/%	90	9	0.9	0.09	0.009

3.3 运行排气方式形成真空功耗计算

对于排气量在 $100 \text{ m}^3/\text{min}$,排气终了压力 10 ~ 100 MPa 的大型高压压缩机,其轴功率通常大于 250 kW,但小于 1000 kWh。

从常压排气到 1/10 大气压,所需排出气体为 5538960 m^3 ,使用这种大型高压压缩机,所需排气时间为 55390 min,即 923 h。这里假设压缩机排气过程中管道内气压不降低,实际上在密封的管道内用这种方式排气时,管道内气压会有明显降低,而且必须要降低,因此实际的抽气效率会低于压缩机的额定排气量,实际排气时间也会大于 923 h。

运行排气方式下,除了压缩机工作消耗能量,车辆运行驱动也消耗能量。因为排气过程中管道内还不是理想状态的低气压环境,车辆运行时会有较大的运行阻力,运行最小功率将大于 250 kW,但不会大于 1000 kWh。这意味着在运行排气方式下,从常压排气到 1/10 大气压所消耗电能最少为 $923 \times 500 = 461500 \text{ kWh}$,最多为 $923 \times 2000 = 1846000 \text{ kWh}$ 。

另外,用一台这样的压缩机对真空管道进行第 1 阶段抽气(从常压到 1/10 大气压)显然速度太慢,耗时太长,不能满足现实运营需求。因此,运行抽气方式下,第 1 阶段抽真空时不宜采用车辆全程运行抽真空的方式,而可采用抽气车辆从多个车站出发,

同理可以计算从 1/10 大气压抽真空到 1/100 大气压时所抽出的空气为

$$\begin{aligned} V_{vp0} &= V(1 - \frac{1013.25}{101325}) - 5538960 \\ &= 6154400 \times (1 - 0.01) - 5538960 \\ &= 553896 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

只有从常压抽到 1/10 大气压时排出气体量的 1/10。

各阶段排气量及所占总量的百分比如表 3 所示。

从式(3)与表 3 可知,从第 2 阶段开始,每一阶段抽真空过程中所排出气体是其上一阶段抽真空过程所排出气体量的 1/10;第 5 阶段,即从 1/10000 大气压抽真空到 1/100000 大气压,所排出气体是第 1 阶段(从常压到 1/10 大气压)所排出气体的 1/10000。

分区间抽真空方式。第 1 阶段抽真空以后,管道内气压已经被降低,以后则可采用全程运行抽真空方式。

令人鼓舞的是,一个显明的事实呈现在我们面前,即在第 2 阶段以后的抽气过程中,用运行排气方式形成真空的能耗比第 1 阶段有明显的下降。例如,在第 2 阶段排气过程中,由于气压已经较低,在保持压缩机前端气体压强相同的情况下,运行车辆速度可以很大幅度提高,而这时提高运行速度并不需要以驱动动力的相应提高为代价,所需提高的驱动动力可以忽略不计。同时,由于这一阶段所需排出的气体只有第 1 阶段的 1/10,那么在运行排气方式下第 2 阶段所消耗电能只需要第 1 阶段的 1/10,即 46150 kWh。同理,第 3 阶段所消耗电能为 4615 kWh,第 4 和第 5 阶段所消耗电能则分别为 461.5 和 46.15 kWh。

即使按照高功率方案考虑,即压缩机功率 1000 kW,而第 2 阶段低气压环境中车辆运行驱动功率取 500 kW 应该是其最大值。计算可得第 2 阶段运行排气的最大能耗为 $92.3 \times 1500 = 138450 \text{ kWh}$,小于真空泵排气方式时的能耗。

运行排气方式形成真空在第 2 阶段以后所表现出的优越性是真空泵排气方式所无法比拟的。

4 真空泵站与运行抽气相结合的抽真空方式

由前述计算知道,在真空泵排气方式下,从常压 p_0 抽真空到 $1/1000$ 大气压,即 $p_1 = 101.325$ Pa时所需抽气时间为 11.8 h;从常压抽到 $1/10$ 大气压,即 $p_1 = 10132.5$ Pa时,所需抽气时间为 3.94 h,即从常压抽到 $1/10$ 大气压的耗时/能耗为抽到 $1/1000$ 大气压时耗时/能耗的 $1/3$ 。经计算已经知道,利用布置在管道沿线的真空泵抽真空方式从常压抽到 $1/10$ 大气压时(第1阶段)已经排出真空管道内 90% 空气。而这一阶段对运行排气方式抽真空来说是困难的,主要困难和成本压力有两个方面:

(1)需要准备大量的储气罐。对于本文的管道模型,从表2可知,从常压抽气到 $1/10$ 大气压需要规格为 $\Phi 2.4 \times 10$ m(直径*长度)储气罐(40 MPa)310个;如果采用 $\Phi 1 \times 10$ m储气罐(15 MPa),则需要4766个。

(2)压缩机排气和压缩空气到储气罐中耗时很长。当使用排气量 100 m³/min,排气终了压力 $10 \sim 100$ MPa的大型高压压缩机,对真空管道从常压排气到 $1/10$ 大气压时需要排出空气 5538960 m³,至少耗时 55390 min。

当采用运行抽气方式从 $1/10$ 大气压排气到 $1/100$ 大气压时,需要 $\Phi 2.4 \times 10$ m储气罐(40 MPa)31个,需要 $\Phi 1 \times 10$ m储气罐(15 MPa)477个,所需排气时间 5539 min。

上述计算表明,从 $1/10$ 大气压抽真空到 $1/100$ 大气压时所抽出的空气为从常压抽到 $1/10$ 大气压时排出空气量的 $1/10$ 。因此,应该考虑采用真空泵站与运行抽气相结合的抽真空方式。从常压抽真空到 $1/10$ 大气压时,排气量很大,而管道内真空度不高,所以这一阶段(第1阶段)适合采用通过沿线布置的真空泵进行抽气,而且这些真空泵的极限真空不需要很高,显然,大抽速的粗真空泵即能满足要求。在第2阶段,通过运行抽气方式从 $1/10$ 大气压抽气到 $1/100$ 大气压,或者更低的气压。把 $1/10$ 大气压作为两种排气方式(真空泵排气/运行排气)转换分界点是本文给出的一个粗略估计值,在实际工程设计中应该通过进一步优化分析和实验验证,得出更精确的分界点数值。

5 恢复真空补抽气时的功率消耗

真空管道交通在运行过程中,由于可能出现管道裂缝、孔隙、车辆漏气,以及车站的对接装置和车

辆进出气闸站等环节漏气,部分空气会进入真空管道内部,导致管道内真空度降低^[9]。这里假设管道内真空度因漏气从 $1/1000$ 大气压降低到 $1/100$ 大气压,然后对两种不同抽气方式下的抽真空能耗与成本进行估算分析。

通过真空泵排气方式,即管道外设的真空泵进行补抽气,当真空泵站间距 5 km,有效抽速 $S_e = 5$ m³/s时,从 1013.25 Pa抽真空到 102.325 Pa时所需抽气时间为 3.94 h,消耗总电量 157600 kWh。

通过运行排气方式,即车辆运行抽气方式补抽气。根据式(3),对直径 2.8 m、长度 1000 km的真空管道从 1013.25 Pa抽真空到 102.325 Pa时将抽出气体

$$\begin{aligned} V_{vp0} &= V_1 \left(1 - \frac{101.325}{101325}\right) - V_1 \left(1 - \frac{1013.25}{101325}\right) \\ &= 615440 \times (0.01 - 0.001) \\ &= 609286 \times 0.009 \\ &= 5484 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

根据式(6),压缩进入 15 MPa的储气罐后的总体积为

$$V_2 = 5484 \times \left(\frac{101325}{15 \times 10^6}\right) = 37 \text{ m}^3$$

也就是说,只需要一个容积为 40 m³的 15 MPa高压储气罐即可。

当使用排气量 100 m³/min,排气终了压力 $10 \sim 100$ MPa的大型高压压缩机,对真空管道从 $1/100$ 大气压排气到 $1/1000$ 大气压时需耗时 54.84 min。根据文献[9]对气动阻力的仿真估算,即使在 1000 km/h速度运行,当管道中气压低于 $1/100$ 大气压时施加在车辆上的全部空气阻力小于 150 kN,不超过直线电机所能提供牵引动力的上限。而且,由于采用运行抽气方式,这种阻力对压缩机排气工作十分有利。

假设车辆行驶驱动功率为 2000 kW,压缩机工作功率为 250 kW,运行抽气车辆行驶速度 200 km/h,则完成一次补抽气时间需要 5 h,所消耗总能耗为 11250 kWh,远小于采用沿线真空泵补抽真空的能耗。

就设备成本而言,当对低于 1000 Pa的环境抽真空时,需要采用极限真空度较高的真空泵,或者需要用两级真空机组,对于 1000 km的线路,增加 200 个或者更多的二级真空泵的设备成本将明显高于一个只需要“一个车辆+一个 40 m³的 15 MPa高压储气罐+一套大型高压压缩机”的设备成本。

因此,可以得出一个重要结论,真空管道中的补抽气过程应该采用运行抽气方式。

6 上述估算分析的可信度

6.1 能耗估算结果可信度及其对研究结论的影响

(1)对真空泵排气方式进行抽气时间计算时,假设管道及真空泵配置均达到理想状态,这使得计算的抽气时间必定小于实际抽气时间。据此求得的抽真空功率与能耗必然小于实际值。

(2)本文计算抽真空功率时假设每5 km 设置一个真空泵站,而管道直径为2.8 m,这种抽真空系统属于细长管道,抽真空的流导较小^[6-8,11],当不计流导时,计算抽气时间会小于实际抽气时间,将导致计算抽气能耗小于实际抽气能耗。

(3)5 m³/s 大抽速真空泵的运行功率最小200 kW,这是一个偏低的取值,因此计算的抽气能耗会低于实际抽气能耗。

(4)假设车辆行驶驱动功率为250 kW 是一个保守的取值,真空管道交通中车辆行驶所需动力不会超过这一数值。按此假设计算的运行车辆动力消耗大于实际能耗。

如果真空泵排气方式下实际能耗大于三倍的计算结果,157600 × 3 = 472800 > 461500 kWh,则抽真空的第1阶段也有必要考虑采用运行抽气方式。果真如此的话,第2阶段以后采用运行排气方式这一结论则更加确信无疑。

6.2 建设成本估算结果可信度及其对研究结论的影响

本文并未对设备成本和建设成本进行数值分析,只是给出定性分析。

对于真空泵排气方式,在第1阶段抽真空过程中,若想缩短排气时间,增加真空泵站布置密度以加大抽真空流导的方案比增加真空泵功率会更有效,更合理。增加真空泵站后,每个泵站的功率可以减小,但为达到同样功效,所有泵站加和总功率不会减小。也就是说,增加真空泵站设置将增加设备成本、建设成本,而总能耗不会减小。因此,增加真空泵站不会对本文的定性结论产生影响。

对于运行排气方式,第2阶段排气所需要的能耗比第1阶段大大减少,而所需设备成本并未增加,实际上所需的储气瓶数量也大大减少,因此从设备成本变化来看,第2阶段以后抽真空排气宜采用运行排气方式的结论更加确信无疑。

7 结论

通过以上对真空泵排气与运行排气的比较研究,可得出结论如下:

(1)从常压到1/10 大气压抽真空,即第1阶段排气过程,将排出90%气体,如果用运行排气方式,则所需时间、储气瓶数量和功率消耗都很大。若用真空泵排气方式,由于管道内气体压强较高,排气效率很高。因此,这一阶段抽真空适合由管道沿线布置的真空泵站来完成,即适合采用真空泵排气方式。

(2)在以后的研究中,应该对真空泵排气方式的抽气时间、功率消耗、设备成本进行深入研究和实验验证,如果**后继研究**表明真空泵排气方式下抽气时间和功率消耗大于本文假设条件下计算所得抽气时间和功率消耗的三倍,则第1阶段排气亦可考虑采用运行抽气方式。

(3)对于第1阶段抽真空过程,由于气体密度很大,亦可考虑采用活塞式排气方式,即通过车辆运行时的活塞效应,把挤压到前方的高压气体经由设置在管道壁上的单向弹性阀门排出管道。

(4)从1/10 大气压抽真空到1/100 大气压,即第2阶段排气过程,所排出气体量小于原气体总量的10%。这一阶段管道内气压已经较低,真空泵工作效率不高,而采用运行排气方式,则可以较低的设备投入与较低能耗,高效率地把大部分剩余气体排出管道。

(5)从1/100 大气压抽真空到1/1000 大气压,即第3阶段排气过程,所排出气体量小于原气体总量的1%,采用运行排气方式可以低成本、高效率地把剩余气体排出管道。以后的第4阶段、第5阶段,采用运行排气方式的优势更加明显。

(6)真空管道中的补抽气过程实际上可以看作第2阶段以后的抽真空过程,自然应该采用运行抽气方式。

本文计算过程中对真空泵有效抽速、真空泵功率、压缩机排气量、压缩机功率等均使用了假设或估计数值,该数值不一定非常符合实际情况,由此引起的偏差会影响真空排气与运行排气之间转换点取值,但不会影响本文所得出的三个重要结论的正确性:①真空管道交通的真空形成应该使用**真空排气**与运行排气相结合的抽真空方式;②第1阶段(或管道内气压较高时)宜采用真空泵排气方式,第2阶段(或管道内气压较低时)以后宜采用运行排气方式;③补抽气应该采用运行抽气方式。

参 考 文 献

- [1] 张耀平.真空管道交通术语规范化探讨[J].中国科技术语,2015,17(3):23-27
- [2] 张耀平.真空管道交通生命保障系统参数选择及其人体生理基础[J].真空,2015,52(3):26-31
- [3] 张耀平.真空管道交通—人类交通困境的有效解决途径[J].真空,2015,52(5):23-27
- [4] Daryl OSTER, Masayuki KUMADA, Yaoping ZHANG. Evacuated tube Transport Technologies (ET3) tm: a Maximum Value Global Transportation Network for Passengers and Cargo[M]. Chengdu: Journal of Modern Transportation, 2011, 19(1): 42-50
- [5] 张耀平,刘本林,赵勇.真空管道高速交通运行抽气系统[P].中国:2009103059627,2009-8-24
- [6] 徐海成,巴德纯,于溥,等.真空工程技术[M].北京:化学工业出版社,2006:349
- [7] 达道安.真空设计手册(第3版)[M].北京:国防工业出版社,2006:773-775
- [8] 王欲知,陈旭.真空技术(第2版)[M].北京:北京航空航天大学出版社,2007:562
- [9] Zhang Yaoping, Yu Jianye, Shen Maoxing, et al. Affecting Factors and Numerical Value Calculation Relating to Vacuumizing Time in Evacuated Tube Transportation[C]. The 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2011), Harbin: 2011, (8): 246-249
- [10] Zhang Yaoping. Numerical Calculation and Analyses on Aerodynamic Drag of Subsonic Train in Evacuated Tube Transportation[J]. Chengdu: Journal of Modern Transportation, 2012, 20(1): 44-48
- [11] 李建军,王小菊.真空技术[M].北京:国防工业出版社,2014:45-46

