

## 管道断面尺寸对真空管道交通建设成本与运营成本的影响\*

张耀平

(西京学院真空管道交通研究所, 陕西 西安 710123)

**摘 要:**影响真空管道交通建设成本与运营成本的因素很多,其中管道断面尺寸是最主要的影响因素。管道断面越小,显然建设成本越低。但小管道断面意味着阻塞比增加和空气阻力增大,对运营成本的影响并非显然。通过对真空管道中不同阻塞比、不同真空度时列车空气阻力的计算与比较,可知对于相同的空气阻力工况,减小断面所节省的抽真空能耗大于因提高真空度而增加的抽真空能耗。因此,当不考虑真空度提高所造成的维持真空成本的增加时,减小管道断面既是降低真空管道交通建设成本的有效途径,也是降低真空管道交通运营成本的有效途径。

**关键词:**真空管道交通;管道断面;真空度;建设成本;运营成本

中图分类号:TB75;U17

文献标识码:B

文章编号:1002-0322(2012)04-0017-05

### Impact of tube section scale on the construction and operation costs of evacuated tube transportation

ZHANG Yao-ping

(Institute of Evacuated Tube Transportation, Xijing University, Xi'an 710123, China)

**Abstract:** There are many factors in impacting the construction and operation costs of evacuated tube transportation (ETT). Among them the tube section diameter is the most important one. The smaller the tube section, the less the construction cost of ETT. However, small tube section means high blockage rate as well as high air drag. It is thus needed to study how the reduction of tube section impact on the ETT operation cost. By calculating and comparing the air drag on train running in ETT tube at different blockage rates and different pressures, it is found that, for the same air drag situation, saved pumping energy due to reducing the tube section exceed the increased pumping energy due to increasing vacuum. Therefore, if not considering the cost increasing to maintain vacuum, it is efficient in reducing both the ETT construction and operation costs by using smaller tube section.

**Key words:** evacuated tube transportation; tube section; vacuum; construction cost; operation cost

真空管道交通是一种清洁、低能耗,可望达到超高速且相对安全的交通模式,美国、瑞士和我国相关领域的科研人员已经开始了面向工程化的应用基础研究<sup>[1-3]</sup>。其中成本是最受关注的问题之一。

真空管道交通的成本构成主要有建设成本和运营成本两大类。建设成本要素有:支撑管道的基础(如路基、桥梁、墩台、隧道等)、管道主体、导轨、车站、车辆,以及真空泵站、过渡舱、隔离门、检查口、逃逸/救援口、通讯与供电设施等<sup>[4]</sup>。运营成本要素主要有:车辆动力消耗,抽真空和维持真空的费用,日常检查维修成本,运行管理成本等。其

中,管道断面对建设成本和运营成本均有影响,管道断面加大,不仅增加管道自身的材料用量和加工安装费用,也会相应增加管道基础设施的规格,提高费用。管道断面的大小还直接影响运营过程中抽真空、维持真空的费用。然而,管道断面缩小并非必然减少形成真空和维持真空的成本,因为管道断面减小意味着阻塞比增大,为平衡由此而增加的列车空气阻力,则必须降低管道中气压标准,即保持较高的真空度,这会相应地增加形成和维持真空的费用。

本文就管道断面尺寸对真空管道交通建设与运营成本的影响进行研究。

收稿日期:2012-02-11

作者简介:张耀平(1969-),男,甘肃省天水市人,博士,副教授。

\* 基金项目:国家自然科学基金(编号:50678152)资助;陕西省科技计划项目(编号:2009K09-24)资助。

### 1 管道断面对真空管道交通建设成本的影响

#### 1.1 真空管道建设成本数学模型

假设轨道和车辆规格已经确定,每公里真空管道线路的建设成本则为管道断面直径(内径)的函数:

$$C_c = f_1(d_i) + f_2(d_i) + f_3(d_i) + C_r + C_e + C_p \quad (1)$$

式(1)中  $f_1(d_i)$  为管道部分成本,除了跟管道直径  $d_i$  有关外,还与管道材料、管道壁厚  $w$ 、管道长度  $L_i$ 、管壁结构等有关。

$$f_1(d_i) = V_w \cdot \gamma \cdot p_m = \pi \cdot (d_i + w) \cdot w \cdot L_i \cdot \gamma \cdot p_m \quad (2)$$

式(2)中  $V_w$  为管壁材料体积,  $\gamma$  为管道材料比重,  $p_m$  为材料价格。从(2)式可看出,真空管道材料成本与管道断面直径  $d_i$  之间是线性关系。

$f_2(d_i)$  为管道线路基础成本,当管道断面增大时,此项成本也相应增加。 $f_3(d_i)$  为真空管道加工、安装成本,随管道断面的增大而增加。 $C_r$  为轨道成本,  $C_e$  为电力、通讯等设施成本,  $C_p$  为真空泵站成本。在估算成本时,这三项可认为不随管道断面而变化。

#### 1.2 计算模型

本文中以钢管和混凝土管两种材质管道为例进行分析与计算,具体几何模型如图 1 所示。

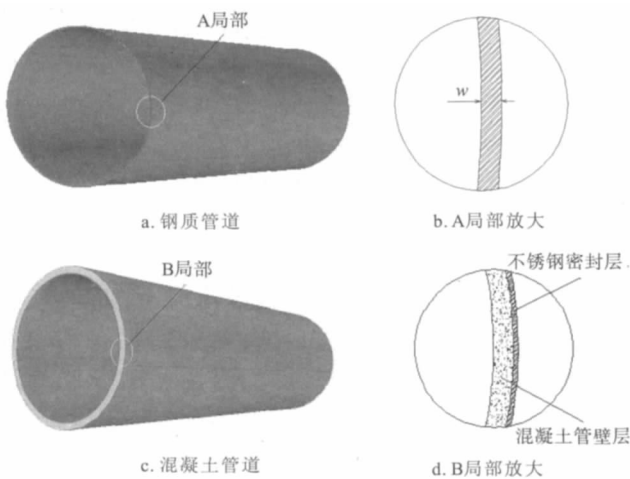


图 1 真空管道管壁结构图  
Fig.1 Tube wall structure of ETT

模型假设:

- 管道内径  $d_i=3\text{m}$ ,管道长度取 1 km ;
- 钢质管道壁厚和混凝土管道壁厚分别为 16 mm 和 160 mm ;
- 钢材比重  $\gamma$  为  $7.8(t/m^3)$ ,混凝土比重约为  $2.5(t/m^3)$  ;
- 钢材价格为 6000(元/t),商品混凝土价格为 400(元/m<sup>3</sup>)。

#### 1.3 管道材料成本计算

将以上数据代入(2)式,计算可得,每公里钢质管道材料成本为 709 万元,每公里混凝土管道材料成本为 64 万元。钢质管道和混凝土管道的重量分别为 1181.9 t/km 和 3969 t/km。混凝土是一种多孔材料,在用来制作真空管道时要进行特殊的密封处理,如果按外部包裹 1 mm 厚不锈钢板进行密封<sup>[5]</sup>,假设不锈钢板比重  $7.9 t/m^3$ ,市场价格 3 万元/t,增加的不锈钢板材料费用则为:

$$3.14 \times (3+0.32) \times 0.001 \times 1000 \times 7.9 \times 3 = 247 \text{ 万元/km}$$

这时,带有不锈钢板密封外层的混凝土管道的材料成本上升为 311 万元/km。在相同管道壁厚条件下,管道材料成本与管道直径成正比关系。仍然假设钢材比重  $7.8 t/m^3$ ,混凝土比重  $2.5 t/m^3$ ,不锈钢比重  $7.9 t/m^3$ ;钢材价格 6000 元/t,混凝土价格 400 元/m<sup>3</sup>,不锈钢板价格 3 万元/t。计算可得不同管道直径和不同壁厚时,钢质管道材料成本如表 1 所示,带有 1 mm 厚不锈钢板密封层的混凝土管道材料成本如表 2 所示。

表 1 钢质管道材料成本(单位:万元/km)

Table 1 Steel tube materials cost(Unit:CNY10 000/km)

| 管道壁厚<br>$w(\text{mm})$ | 管道内径<br>$d_i(\text{m})$ |     |     |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------------|-----|-----|------|------|------|------|
|                        | 8                       | 10  | 12  | 14   | 16   | 18   | 20   |
| 2                      | 236                     | 295 | 355 | 414  | 474  | 534  | 594  |
| 2.6                    | 306                     | 384 | 461 | 538  | 615  | 692  | 770  |
| 3                      | 354                     | 442 | 531 | 620  | 709  | 798  | 888  |
| 3.6                    | 424                     | 531 | 637 | 744  | 850  | 957  | 1064 |
| 4                      | 471                     | 589 | 708 | 826  | 944  | 1063 | 1182 |
| 4.6                    | 542                     | 677 | 813 | 949  | 1085 | 1222 | 1358 |
| 5                      | 589                     | 736 | 884 | 1032 | 1179 | 1327 | 1475 |

表 2 带有不锈钢板密封层的混凝土管道材料成本  
(单位:万元/km)

Table 2 Materials cost of concrete tube with stainless steel seal layer(Unit: CNY 10 000/km)

| 管道壁厚<br>$w(\text{mm})$ | 管道内径<br>$d_i(\text{m})$ |     |     |     |     |     |     |
|------------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                        | 80                      | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| 2                      | 213                     | 230 | 247 | 246 | 281 | 299 | 317 |
| 2.6                    | 273                     | 293 | 314 | 335 | 356 | 377 | 399 |
| 3                      | 313                     | 335 | 359 | 382 | 406 | 430 | 454 |
| 3.6                    | 372                     | 399 | 426 | 453 | 481 | 508 | 536 |
| 4                      | 412                     | 441 | 470 | 500 | 530 | 561 | 591 |
| 4.6                    | 472                     | 505 | 538 | 572 | 605 | 639 | 674 |
| 5                      | 512                     | 547 | 583 | 619 | 655 | 692 | 728 |

### 2 管道断面对真空管道交通运营成本的影响

管道断面对运营成本的影响主要体现在抽真空和维持真空方面。用  $C_o$  表示真空管道交通运营总成本  $f_4(d_i)$ 表示抽真空的动力成本  $f_5(d_i)$ 表示维持真空的成本  $f_6(d_i)$ 表示检查维修成本  $C_m$ 表示运行组织管理成本,则

$$C_o = f_4(d_i)+f_5(d_i)+f_6(d_i)+C_m \quad (3)$$

#### 2.1 管道断面与抽真空费用的关系

抽真空费用跟被抽容器体积  $V_i(m^3)$ ,抽真空时间  $t_p(s)$ ,有效抽速  $S_e(L/s)$ ,抽气前管道中气体压强  $p_0(Pa)$ 和管道中目标压强  $p_1(Pa)$ 有关。

被抽容器体积由管道直径决定:

$$V_i = \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \cdot L_i \quad (4)$$

根据低真空下抽气时间的计算理论,忽略漏气量时抽真空时间可用下式计算<sup>[6-7]</sup>:

$$t_p = \frac{V_i \ln \frac{p_0}{p_1}}{S_e} \quad (5)$$

每公里管道线路范围内真空泵组的功率为  $W_p(kW)$ ,每 kWh 电价  $p_e(元/kWh)$ ,则每公里真空管道一次抽真空的费用为:

$$C_p = \frac{t_p}{3600} W_p \times p_e \quad (6)$$

显然,抽真空费用跟抽气时间成正比关系。从式(5)可以看出,抽气时间跟真空管道的体积成正比,跟目标真空度  $p_1$ 成指数关系。管道体积跟管道直径平方成正比,因此,抽真空的费用与管道直径的平方成正比。

对于直径  $d_i=3m$ 的管道,管道长度取 1 km,在不同的有效抽速下,可计算出从普通大气压抽到不同目标真空度所需的时间如表 3 所列。

表 3 抽真空时间计算表(单位: min)

Table 3 Pumping time for creating vacuum(Unit: minute)

| 目标真空度<br>(atm)     | 1/10 | 1/100 | 1/1000 | 1/10000 |
|--------------------|------|-------|--------|---------|
| 有效抽速<br>$S_e(L/s)$ |      |       |        |         |
| 5000               | 54   | 108   | 163    | 217     |
| 10000              | 27   | 54    | 81     | 108     |
| 15000              | 18   | 36    | 54     | 72      |
| 20000              | 14   | 27    | 41     | 54      |
| 25000              | 11   | 22    | 32     | 43      |
| 30000              | 9    | 18    | 27     | 36      |

#### 2.2 空气阻力与阻塞比、气体密度等工况的对应关系

若管道内目标压强一定,则管道断面越小,

抽真空的时间越短,抽真空的费用也越小。但对于相同的列车轮廓、相同的行驶速度,当管道断面减小即阻塞比增大时,列车空气阻力会增大。因此,当管道断面减小时,为了取得相同的列车空气阻力工况,就必须提高管道内真空度,即进一步降低气体压强。这时,抽真空的时间增加,抽真空的费用也将上升,从而抵消管道断面减小带来的能耗降低和费用下降。为了比较伴随断面减小的费用减小与伴随真空度提高的费用上升之间的差额,需要对不同真空度和不同阻塞比工况下的列车空气阻力进行数值计算。

对于密封空间,即有限边界条件下运动物体所受到的空气阻力,目前没有可以直接进行计算的解析表达式,需要通过数值算法进行求解。基于 Fluent 流场计算软件,取计算模型及其尺寸如图 2 所示<sup>[8-9]</sup>。圆柱形列车直径  $d_i=3 m$ ,车身长 40 m,半圆球形车头长 1.5 m。为保证计算结果的可靠性,选择计算区域总长 200 m,车头距离边界入口 80 m,车尾尾流区域距离流场出口 80 m。管道直径  $d_i=\{6, 5, 4, 3.6\}$ (单位:m),相应的模型阻塞比  $\alpha =\{0.25, 0.36, 0.56, 0.69\}$ 。

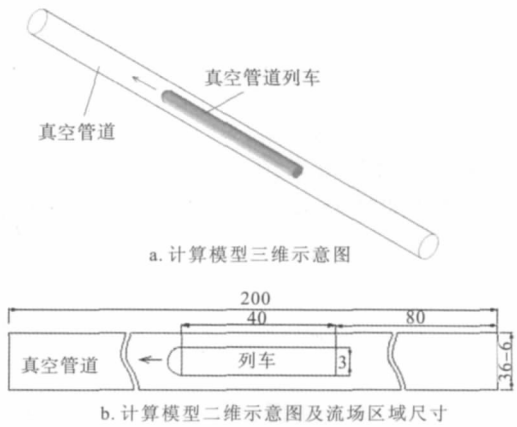


图 2 计算模型

Fig.2 Calculating model

运用 Fluent 计算软件,可模拟求得当管道直径  $d_i = 6m$ ,阻塞比  $\alpha = 0.3$ ,管道中气体密度  $\rho=0.01225 kg/m^3$ (相当于管道中压强 1013.25 Pa),速度  $v=200 m/s$ 时,列车空气阻力  $F_g=1.87 kN$ 。不同工况的计算值如表 4 所列。

假配置到 1 km 管道范围内的真空泵组有效抽速为 10 m<sup>3</sup>/s,根据公式(5)可以求得不同阻塞比时抽真空时间:

$$t_{\alpha=0.3} = \frac{28260}{10} \ln \frac{1.225}{0.01225} = 13014(s) = 217(min)$$

$$t_{\alpha=0.56} = \frac{12560}{10} \ln \frac{1.225}{0.00068} = 9415(s) = 157(min)$$

对于相同功率的真空泵组,抽气时间越长能

耗越大,费用也越高。因为  $t_{\alpha=0.3} > t_{\alpha=0.56}$ , 所以减小管道断面、提高阻塞比虽然要求提高真空度(气体密度从  $0.01225 \text{ kg/m}^3$  降低到  $0.00068 \text{ kg/m}^3$ ), 但总费用被降低。可见,减小管道断面对抽真空费用降低幅度大于阻塞比增加对抽真空费用的提高幅度。

表 4 还给出了列车速度为  $300 \text{ m/s}$ , 阻塞比为  $0.3$ 、气体密度为  $0.01225 \text{ kg/m}^3$  时的空气阻力值( $4.2 \text{ kN}$ );对于  $300 \text{ m/s}$  的车速,当阻塞比提高到  $0.56$ , 但气体密度降低为  $0.00068 \text{ kg/m}^3$  时,空气阻力仍然为  $4.2 \text{ kN}$ 。由此表明前述分析(减小管道断面对抽真空费用的降低幅度大于阻塞比增加对抽真空费用的提高幅度)是可信的,且具有良好的速度一致性,结果不随速度变化而发生变异。

表 4 不同列车速度和空气阻力对应的工况值

Table 4 Working conditions corresponding to the different train speed and air drag

| 参数项<br>列车速度<br>$v(\text{m/s})$ | 管道直径<br>$d_i(\text{m})$ | 阻塞比<br>$\alpha$ | 管道容积<br>( $\text{m}^3/\text{km}$ ) | 气体密度<br>$\rho$<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 列车空气阻力<br>$F_g(\text{kN})$ |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 200                            | 6                       | 0.3             | 28260                              | 0.01225                               | 1.87                       |
|                                | 4                       | 0.56            | 12560                              | 0.00068                               |                            |
| 300                            | 6                       | 0.3             | 28260                              | 0.01225                               | 4.2                        |
|                                | 4                       | 0.56            | 12560                              | 0.00068                               |                            |

由此进一步得出结论:减小管道断面是降低真空管道交通运营成本的有效途径。虽然管道断面减小会增加阻塞比,对相同的运行速度,为不增加空气阻力,相应要求提高真空度,但管道断面减小所节省的抽真空能耗大于真空度提高增大的抽真空能耗。

### 2.3 对“减小管道断面是降低运营成本有效途径”结论的再验证

为检验上述结论的正确性,再以不同的阻塞比工况对前面的分析进行验证。

继续运用 Fluent 软件,模拟求得当管道直径  $d_i=6.6 \text{ m}$ ,阻塞比  $\alpha=0.2$ ,管道中气体密度  $\rho=0.01225 \text{ kg/m}^3$ ,速度  $v=200\text{m/s}$  时,列车空气阻力  $F_g=1.78 \text{ kN}$ 。不同工况的计算值如表 5 所列。

仍然假配置到  $1\text{km}$  管道范围内的真空泵组有效抽速为  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ,根据公式(5)可以求得不同阻塞比时抽真空时间:

$$t_{\alpha=0.2} = \frac{34195}{10} \ln \frac{1.225}{0.01225} = 15747(\text{s}) = 262(\text{min})$$

$$t_{\alpha=0.36} = \frac{12560}{10} \ln \frac{1.225}{0.00158} = 8357(\text{s}) = 139(\text{min})$$

表明减小管道断面必然降低抽真空费用。

调整速度取值为  $50 \text{ m/s}$  和  $200 \text{ m/s}$ , 阻塞比也作一定调整,可得另一组不同工况的计算值如表 6 所列。

表 5 不同列车速度和空气阻力对应的工况值

Table 5 Working conditions corresponding to the different train speed and air drag

| 参数项<br>列车速度<br>$v(\text{m/s})$ | 管道直径<br>$d_i(\text{m})$ | 阻塞比<br>$\alpha$ | 管道容积<br>( $\text{m}^3/\text{km}$ ) | 气体密度<br>$\rho$<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 列车空气阻力<br>$F_g(\text{kN})$ |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 200                            | 6.6                     | 0.2             | 34195                              | 0.01225                               | 1.78                       |
|                                | 5                       | 0.36            | 19625                              | 0.00158                               |                            |
| 300                            | 6.6                     | 0.2             | 34195                              | 0.01225                               | 4.08                       |
|                                | 5                       | 0.36            | 19625                              | 0.00158                               |                            |

表 6 不同列车速度和空气阻力对应的工况值

Table 6 Working conditions corresponding to the different train speed and air drag

| 参数项<br>列车速度<br>$v(\text{m/s})$ | 管道直径<br>$d_i(\text{m})$ | 阻塞比<br>$\alpha$ | 管道容积<br>( $\text{m}^3/\text{km}$ ) | 气体密度<br>$\rho$<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 列车空气阻力<br>$F_g(\text{kN})$ |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 50                             | 5                       | 0.36            | 19625                              | 0.1225                                | 8.67                       |
|                                | 3.6                     | 0.69            | 10174                              | 0.0246                                |                            |
| 200                            | 5                       | 0.36            | 19625                              | 0.1225                                | 139                        |
|                                | 3.6                     | 0.69            | 10174                              | 0.0246                                |                            |

类似以上计算,根据式(5)可以求得不同阻塞比时抽真空时间:

$$t_{\alpha=0.36} = \frac{19625}{10} \ln \frac{1.225}{0.1225} = 4519(\text{s}) = 75(\text{min})$$

$$t_{\alpha=0.69} = \frac{10174}{10} \ln \frac{1.225}{0.0246} = 3976(\text{s}) = 66(\text{min})$$

再次表明随着管道断面减小和阻塞比的增大,抽真空时间总体上得以降低。

部分国产的效率较高的大抽速低真空泵机组的功率指标为:  $5000 \text{ L/s} \sim 50 \text{ kW}$ 。如对管道的有效抽速减半计算,则有效抽速  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  的真空机组所需功率为  $200 \text{ kW}$ 。那么一条  $1000 \text{ km}$  的真空管道线路上真空机组的总装机容量需要  $20 \text{ 万 kW}$ 。

### 3 结论

真空管道交通系统的总成本主要由建设成本和运营管理成本两部分构成。管道断面尺寸对建设成本和运营管理成本均有影响,对建设成本的影响十分显然。断面越大,建设成本越高,而对运营成本的影响并非显然,这种不明确性主要体现在对抽真空能耗的影响上。管道断面越小,即管道内部容积越小,就确定的目标真空度而言,抽真空的能耗显然越低。但对于确定尺寸的车辆而言,减小管道断面意味着阻塞比增加,在真空

度不变的情况下,车辆运行气动阻力会增加。为避免这种情况的发生,需要进一步提高真空度(降低管道内气体压强),而提高真空度会增加能耗,这跟减小断面降低抽真空能耗的目的相矛盾。

本文的计算分析表明,管道断面减小所带来的抽真空能耗降低幅度大于阻塞比增加造成的抽真空能耗提高幅度,因此,减小管道断面不仅能降低真空管道交通建设成本,而且能降低运营管理成本。

抽真空时间由(5)式计算,式中 $V_i$ 和 $d_i$ 是管道直径的函数。从式(4)可以明显看出,管道容积 $V_i$ 与管道直径 $d_i$ 的平方成正比。而管道内目标压强 $p_1$ 与管道直径 $d_i$ 之间是复杂的非线性关系。本文运用Fluent软件,通过试取由目标压强确定的气体密度,对列车空气阻力 $F_g$ 进行数值计算。因此,本文结论是在数值分析基础上得出的,以后的研究工作应该作进一步的严格证明,或者寻找可能的解析表达式予以确认。

另外,本文只考虑管道断面减小后需要提高真空度,从而增加抽真空的能耗。然而,真空度的提高对密封和真空维持会提出很高的技术要求,如果这一项的折算费用增加幅度高于因为断面减小带来的真空维持费用的节省幅度的话,则本文的管道断面减小能降运营费用的结论就不一定成立。

## 参考文献

- [1] Daryl OSTER, Masayuki KUMADA, Yaoping ZHANG. Evacuated tube transport technologies (ET3)tm: a maximum value global transportation network for passengers and cargo [J]. Journal of Modern Transportation, 2011,19(1):42-50.
- [2] 张瑞华, 严陆光, 徐善纲, 等. 一种新的高速磁悬浮列车——瑞士真空管道高速磁悬浮列车方案[J]. 交流与电力牵引, 2004, (01): 44-41.
- [3] Yaoping Zhang, Daryl Oster. Primary analysis on tube section size of evacuated tube transportation [C]. Beijing: ICRE 2010, Aug. 21-23, 2010: 67-72.
- [4] Yaoping ZHANG, Daryl OSTER, Masayuki KUMADA et al. Key vacuum technologies to be Solved in evacuated tube transportation [J]. Journal of Modern Transportation, 2011,19(2): 110-113.
- [5] 张耀平,李胜善,刘本林,等. 适用于真空管道交通的钢混凝土复合结构管道 [P]. 中国专利 201020540727.6, 2011- 11- 26
- [6] 徐成海. 真空工程技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006,8:34.
- [7] 达道安. 真空设计手册.3版[M]. 北京:国防工业出版社, 2006,5:773-775.
- [8] 周晓,张耀平,姚应峰. 真空管道中高速列车空气阻力数值仿真 [J]. 科学技术与工程, 2008,8(6): 1671-1819.
- [9] 周晓,张殿业,张耀平. 真空管道中阻塞比对列车空气阻力影响的数值研究 [J]. 真空科学与技术学报. 2008,28(6): 535-538.

## 中国真空学会任命刘锋同志主管学会日常工作

经中国真空学会理事会会议(2011年10月31日)研究决定:刘锋同志任中国真空学会常务副秘书长兼学会办公室主任,主管学会日常工作。

中国真空学会办公地点新迁移到:100022北京朝阳区建国路93号万达广场9号楼6层612室

电话:010-58208908 010-58208985

传真:010-58207735

电子邮箱:zgkxh@chinesevacuum.com

(真空杂志社 报导)