

# 高海拔地区地下工程施工有关问题的探讨

水电部成都勘测设计院施工处 傅鸿明

## 一、劳动定额及劳动强度问题

高海拔地区空气稀薄、大气压力低，内地人员进入后，由于缺氧和不适应高原气候条件，易发生多种急、慢性高原病，从事体力劳动能力会明显下降。地下工程施工条件差，劳动能力还会进一步降低。几个工程施工实践证明：海拔高程越高，劳动效率越低，详见表1。

表1 几个高海拔巷道开挖进尺表

工程名称	海拔高程 (米)	地质情况	施工方法与主要设备	巷道开挖尺寸 (宽×高)(米)	平均开挖进尺
奎鲜隧道	2932~2982	花岗片麻岩、 大理岩	装岩机、U型矿车； 平行导坑领进开挖法。	(4~4.2)×2.8	100米/月
606工程	3000	变质花岗岩	气腿手风钻、人工装斗车； 下导坑领进分块开挖法。	2×2	1米/工班
土门煤矿	5070	细砂岩	人工手风钻、斗车； 全断面一次开挖法。	(2~3)×2.3	25米/月

表2 单项体力劳动强度分级参考标准表

强度分级	轻	中	次重	重	超重	极重
心率(次/分)	90	115	135	150	170	>170
耗氧量 升/分	0.70	1.0	1.2	1.35	1.45	>1.45
耗氧量 毫升/搏	7.777	8.696	8.888	9.00	8.529	8.021

表 3

人体动脉血氧饱和度随高程增高而降低表

高程 (米)	气 压 (毫米汞柱)	吸入气中 氧分压 (毫米汞柱)	肺 泡 气 氧分压 (毫米汞柱)	动脉血氧 饱和度 (%)	人 体 反 映
0	760	159	105	95	正 常
1000	680	140	90	94	
2000	600	125	70	92	基 本 正 常
3000	530	110	62	90	
4000	460	98	50	85	脑集中能力减退, 肌肉 精细协调能力下降。
5000	405	85	45	75	可能发生智力判断错 误、肌肉功能障碍和情 绪不稳定。
6000	355	74	40	70	可能发生中枢神经 系统进行性抑制、
7000	310	65	35	60	意识丧失。

注: “动脉血氧饱和度”是血红蛋白饱和的百分数。

人们从事体力劳动的能力，因劳动强度不同，在人体生理功能上反映出心率、耗氧量和动脉血氧饱和度不一。医学科学院卫生研究所曾针对平原地区不同体力劳动强度时心率和耗氧量进行过测定，见表2。

从表2可见：劳动强度越大，心率越快，耗氧量越多。当劳动强度从“重”增加到“超重”时，心率继续加快，而每搏耗氧量却开始下降了，说明“重”劳动强度时，人体功能已到供氧极限。因此，在平原地区，“重”劳动强度定为卫生上限。

在高海拔地区，医科院曾对参加青藏铁路施工的63名自海拔2800米进入海拔4340米高程次/分钟的健康男青年，作生理功能检查：93.5~84.7%人员心率加快，由74.1次/分钟增加到97.2~88.3次/分钟，心率快了18~31%；动脉血氧饱和度下降，下降程度随海拔高程与劳动强度不同而有较大差异，详见表3。从表3可见，在海拔高程5000米处，人体血氧饱和度为75%，生理功能已达安全限度。当进行体力劳动时血氧饱和度还会进一步下降7.6~18.1%。

医科院在4340米高程施工工地上，对一些工种的单项工作劳动强度作实地查定表明：当人体吸入相当于平原地区消耗的同样氧气量，肺通气量要比平原地区增加56%，可能承担的劳动强度较平原地区一般低两级左右。若平原地区以“重”劳动强度作为人体卫生上限，在4340米高程，“中”等劳动强度则应作为卫生上限。

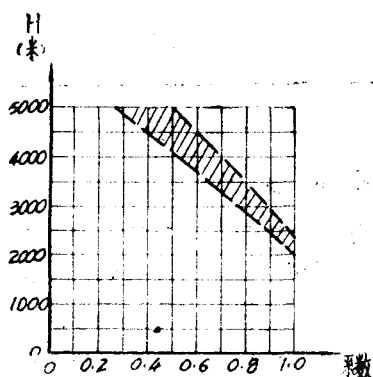


图1 高程对劳动能力影响曲线

总之，工人在高海拔地区劳动时，人体生理功能上反映出来的无论是心率加快、动脉血氧饱和度降低、还是耗氧量增加，其结果均使劳动能力减退，并随高程增加而递减。如果再有高原病侵扰、食欲不振、长期热量不足等因素，劳动能力会减退更多。图1绘出了人体平均劳动能力随不同高程的降低曲线，仅供制定高海拔地区劳动定额时参考。

根据此曲线，我们认为交通部和铁路部在1973年和1980年编制的高原地区劳动定额可能偏高。现将该两部高原地区定额修正系数和我们建议的修正系数对照于表4中。

在高海拔地区，应限制工人最大劳动强度，具体建议见表5。如工程需要工人承担更高强度劳动时，尚应缩短每工日作业时间及一次劳动持续时间。此外，按劳动卫生与劳动保护观点，施工人员在高海拔地区每年连续劳动时间不宜超过6~8个月，待返回平原地区（指3000米高程以下）休整2~6个月后，才能再参加高海拔地区施工劳动。

## 二、施工补氧问题

我国矿山安全法（草案）第三十条规定：“矿井采掘工作面进风风流中，按体积计算，氧气不得低于20%”。该安全法在第二条指出：“该法适用于在中华人民共和国境内开办的一切矿山企业。”据此，在高海拔地区地下工程施工补氧问题，提出以下几点看法：

### （一）地下工程与地面工程施工在缺氧上的差别

不论任何地区，因地下洞室内物质氧化、炸药爆炸耗氧以及洞内因施工活动产生多种

表4

劳动定额概预算修正系数对照表

海拔高程 (米)	资料分类	交通部	铁道部	本文建议 地下工程劳动定额
		公路工程 概算定额	铁路工程 预算定额	
0		1.0	1.0	1.0
2500		1.1	1.13	1.05~1.1
3000		1.2	1.25	1.1~1.3
4000		1.4	1.37	1.4~2.0
5000		1.6		2.0~3.5

表5

最大劳动强度与工时建议表

海拔高程 (米)		3000以下	3000~4000	4000以上
最大 劳动 强度	相当于平原地区强度分级	重	次重	中
	生理功能指标			
	心率 (次/分钟)	150	150	150
	耗氧量 (升/分钟)	1.35	1.2	1.1
	能量消耗值(千卡/人、小时)	270	230	192
每工 日 劳动 时间	总工时(小时)	8	8	7
	洞内作业时间(小时)	7	5	4
	洞内劳动时间率(%)	80	50	50

注:

- 1.耗氧量系指平原标准状态值时的体积,
- 2.劳动时间率系实际操作时间与作业时间比值。

有害气体,必然降低洞内空气中氧气浓度。但如通风措施有效,氧浓度减少量是有限的,仍有可能达到规定指标。例如67年5月及69年11月对施工中的映秀湾水电站引水隧洞多次实测过洞内大气成份,虽然一氧化碳和氮氧化物含量已超过规范规定指标2~15倍,但氧气占空气体积的20.1~20.7%,仍在“安全法”规定标准内。

在高海拔地区,由于空气稀薄,氧气量低于平原地区,不论在地下施工还是地面施工,都存在缺氧问题。特别是地下工程施工,如果通风不畅,还会进一步降低氧气量;采取良好通风设施后,可能得到映秀湾隧洞同样效果,即洞内空气中的含氧量大体上仍可达到当地露天空气中的含氧标准。因此,高海拔地区地下工程施工,关键在于加强通风,确保通风良好,并在施工过程中加强检查以及降低洞内工人劳动强度、缩短连续作业时间。这样,补氧问题可和露天施工同样对待,无须采取更为特殊的措施。

## (二) 施工中需否补氧问题

高海拔地区大气随高程增加,气压降低、容重减小;虽然空气中的组成成份比例仍与平原地区一样,即氧、氮、二氧化碳所占体积百分比仍分别约为20.96%、79%及0.04%,但由于空气稀薄,氧气量绝对值较平原地区少,详见表6。

表6 高程与氧气量关系表

海拔高程 (米)	氧气含量 (%)	氧气量减少率 (%)	人体动脉血氧饱和度 (%)
0	20.96	0	95
1000	18.50	11.7	94
2000	16.50	21.3	92
3000	14.50	30.8	90
4000	12.70	39.4	85
5000	11.20	46.6	75
6000	9.75	53.5	70
7000	8.57	59.1	60
8000	7.38	64.8	50

注:

1. “氧气含量”系指相当于占平原地区标准状况下,氧气占空气体积的百分数;
2. “氧气量减少率”是假定氧气在标准大气中为100%,随高程升高,空气中氧气含量相对减少的百分比。

高程3000米以下地区，无须采取补氧措施。高程5000米地区，因缺氧使人体正常活动功能达到安全限度，从卫生观点，宜尽量避免在此高程以上地区施工；如确有必要，应采取具体可靠的补氧措施，甚至应考虑连续补氧。3000~5000米地区施工，缺氧使得人体生理功能失常，劳动能力下降，应针对不同工种和劳动强度，采取不同方式补氧。补氧作用在于提高人体内动脉氧血饱和度；对缺氧引起的头痛、心率过速等病症是有措施；对高血红蛋白症和红细胞增多症也有明显效果（但对人体心电图向量图及心电图异常用作不大）。因此，补氧可提高人体劳动能力，是预防急、慢性高原反应症的一种手段。

### （三）补氧方式

一般补氧方式有管道连续补氧、隔绝式氧气瓶补氧和开放式化学生氧器补氧等方式。

管道连续补氧仅限于地下工程，需设置专门制氧厂，补氧费用高。我们曾比较某工程洞内连续补氧和个体补氧器两种方案，当空气中氧含量提高2%时，管道连续补氧费用高达1200万元，个体补氧器仅需90万元，两者相差13倍。另外，管道连续补氧设施复杂，使用局限性大，使用中稍有不慎，还会造成安全事故。因此，这种补氧方式仅在不得已的情况下采用，当可用其它方式代替时，则一般不用。

隔绝式化学生氧补氧器多为钢制高压氧气瓶，常用于防毒、防化、潜水、登山等方面。但其结构复杂，形体笨重，持续使用时间较短，需特殊固定设备才能更新生氧剂，成本也较高。

开放式化学生氧补氧器（又称高原个体补氧器），为医科院卫生研究所等单位研制成功的产品。具有结构简单、重量轻、有效使用时间较长、成本低等优点，既适用于地下工程施工，也适用于地面工程施工。在海拔4000米使用时，能收得良好效果。缺点是仅适用于中等以下劳动强度的工种，对重体力劳动，使用时有憋气感。作为工人预防或已发生高原症时，采用此种补氧器较为方便有效。因此，在高海拔地区地下工程施工中，应考虑配备足够数量的高原个体补氧器，以利安全生产。

## 三、地下工程施工机械效率问题

随海拔高程增加，空气性质发生变化，部份施工机械性能与效率会相应改变，兹将地下工程中常用的几类施工设备效率改变情况，简单分析如下：

### （一）空气压缩机

云南澜泥坪铜矿（高程2921米）和因民铜矿（高程2472米），曾分别对1—40/8型、1—100/7型及L型522马力空压机的排气量作过实测，高程影响系数K分别为0.7、0.763及0.735。由北京第一通用机械厂试制供高山地区使用的YW—9/7 II型电动移动式空压机，在川藏公路舍季拉山（海拔4435米）试验结果表明：海拔高程每升高1000米，排气约量降2.0~3.0%（按体积计）和11~12%（按重量计）。

本文针对厂泛应用的双级空压机工作原理，分析其效率受高程影响情况。

### 1. 风量

以“V”表示每一行程的活塞容积，“λ”表示容积系数，应吸入的空气体积为“λV”。由于容积不随高程变化，故单级空压机在海拔H米处工作时，“体积生产能力”比值ξ为：

$$\xi = \frac{\lambda_H}{\lambda_0} \dots\dots\dots (1-1)$$

注：下标“0”及“H”分别表示指标状况与海拔高程H米处的相应数值

双级空压机的风量生产能力，是指每分钟吸入第一级气缸的空气量，大小取决于第一级压缩。其压缩比 $e_1$ 与双级空压机的排气压力及工作条件几乎无关，主要是由第一级和第二级气缸尺寸决定。故 $e_1$ 不受高程变化的影响，即 $e_1 = \text{常数}$ 。此时： $\xi = \frac{\lambda_H}{\lambda_0} = 1$

即高海拔地区双级空压机“体积生产能力”一般与平原地区相同。

“重量生产能力”降低系数可根据理想气体状态方程式导出：

$$\text{海平面时， } P_0 \lambda_0 V = G_0 R T_0 \dots\dots\dots (1-2)$$

$$\text{海拔H米处， } P_H \lambda_H V = G_H R T_H \dots\dots\dots (1-3)$$

容积V和空气气体常数R为定值。单级空压机的“重量生产能力”降低系数用 $\alpha_I$ 表示。 $(1-3)$ 式除以 $(1-2)$ 式，稍加整理后可得：

$$\alpha_I = \xi \frac{P_H T_0}{P_0 T_H} \dots\dots\dots (1-4)$$

双级空压机“重量生产能力”降低系数用 $\alpha_{II}$ 表示，因其 $\xi = 1$ ，

$$\text{因为 } \alpha_{II} = \frac{P_H \cdot T_0}{P_0 \cdot T_H} \dots\dots\dots (1-5)$$

式中： $G_H, G_0$ —同体积(V)空气重量，(公斤)；

$T_H, T_0$ —空气温度，( $^{\circ}K$ )；

$P_H, P_0$ —空气压力，(公斤/平方厘米)。

为使用方便，将公式(1-5)绘成 $\alpha_{II}$ 曲线(见图2)。

### 2. 风压

双级空压机风压系指第二级气缸排出气体的表压力(即计示压力)，一般不受高程影响。

计示压力是以大气压为起始点测出的，即绝对压力与大气压力之差。双级空压机输出的压缩空气随高程增高绝对压力值降低，但幅度不大。且双级空压机的计示压力值高达6~8公斤/平方厘米，所以降低值常忽略不计。

### 3. 功率

在海拔H米处，双级空压机第一级与第二级所作的功，分别为：

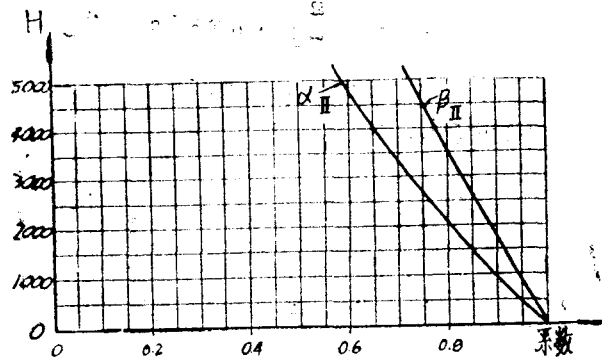


图2 双级空压机重量生产能力及功率与高程关系曲线

注：曲线 $\beta_1$ 计算假定：

$e_1 = 3; n = 1.3; P_M = 6$ 公斤/平方厘米。



$$L_H' = \frac{n}{n-1} P_H V_H (\epsilon_1^{\frac{n-1}{n}} - 1) \dots\dots\dots (1-6)$$

$$L_H'' = \frac{n}{n-1} P_X V_X (\epsilon_2^{\frac{n-1}{n}} - 1) \dots\dots\dots (1-7)$$

式中：\$L\_H'\$、\$L\_H''\$~第一级和第二级所作的功，

\$P\_X\$、\$V\_X\$~空气在冷却器内的压力与体积，

\$\epsilon\_1\$、\$\epsilon\_2\$~第一级与第二级空气压缩比，

\$n\$~空气多变膨胀指数。

近似假定空气经冷却器冷却后，在第一级和第二级压缩时的温度相等，则：

$$P_X V_X = P_H V_H \dots\dots\dots (1-8)$$

$$\therefore \epsilon_1 = \frac{P_X}{P_H} \dots\dots\dots (1-9)$$

$$\epsilon_2 = \frac{P_M + P_H}{P_X} = \frac{P_M + P_H}{\epsilon_1 P_H} \dots\dots\dots (1-10)$$

将公式(1-8)与(1-10)代入式(1-7)中，得：

$$L_H'' = \frac{n}{n-1} P_H V_H \left[ \left( \frac{P_M + P_H}{\epsilon_1 P_H} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \dots\dots\dots (1-11)$$

式中：\$P\_M\$~双级空压机计示压力。

双级空压机所作全功，等于一、二级功之和。即：\$L\_H = L\_H' + L\_H''\$

$$= \frac{n}{n-1} P_H V_H \left[ \epsilon_1^{\frac{n-1}{n}} + \left( \frac{P_M + P_H}{\epsilon_1 P_H} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right] \dots\dots\dots (1-12)$$

同理，双级空压机在海平面上所作功为：

$$L_0 = \frac{n}{n-1} P_0 V_0 \left[ \epsilon_1^{\frac{n-1}{n}} + \left( \frac{P_M + P_0}{\epsilon_1 P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right] \dots\dots\dots (1-13)$$

由于\$V\_0 = V\_H\$。用(1-12)式除以(1-13)式，并以\$\beta\_H\$代表双级空压机在海拔\$H\$米处作功降低系数，则：

$$\beta_H = \frac{P_H}{P_0} = \frac{P_H \left( \epsilon_1^{\frac{n-1}{n}} + \left( \frac{P_M + P_H}{\epsilon_1 P_H} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right)}{P_0 \left( \epsilon_1^{\frac{n-1}{n}} + \left( \frac{P_M + P_0}{\epsilon_1 P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right)} \dots\dots\dots (1-14)$$

为使用方便，绘出\$\beta\_H\$特性曲线(见图2)。

空压机的电动或柴油发动机功率，应和空压机功率降低相适应。另外，当二级压缩比\$\epsilon\_2\$增大时，排气气温增高问题不宜忽视。

## (二) 风动机械



本文仅讨论使用广泛的、空气不膨胀的风动机械（如风动凿岩机、风动装岩机等）在高海拔地区工作情况。

### 1. 耗气量

当空气重量为G（公斤）、相应体积为V（立方米）、在气体状态时存在下面关系”

$$P V = G R T \dots\dots\dots (2-1)$$

风动机械在海拔H米处工作与其在海平面上工作之比为：

$$\frac{G_H R T_H}{G_O R T_O} = \frac{R'_1 V_H}{P_1 V_O} \dots\dots\dots (2-2)$$

因风动机械进气时空气体积不变，即  $V_H = V_O$ ，消耗的空气重量比 $\delta$ 为：

$$\delta = \frac{G_H}{G_O} = \frac{P_1 T_O}{P'_1 T_H} = \frac{(P_M + R_H) T_O}{(P_M + P_O) T_H} \dots\dots\dots (2-3)$$

式中： $P_1$ 、 $P'_1$ —相应于海平面及海拔H米处空气进入风动机械内绝对压力。

$\delta$ 值常接近于1，即风动机械所消耗的空气重量，几乎不随高程增高而改变。

### 2. 理论上所作的功

风动机械所作的功L，在海平面和海拔高程H米处分别为：

$$L_O = (P_1 - P_O) \times V \dots\dots\dots (2-4)$$

$$L_H = (P'_1 - P_H) \times V \dots\dots\dots (2-5)$$

因V与高程无关。若风动机械表压力相同：

$$P_1 - P_O = P'_1 - P_H = P_M \dots\dots\dots (2-6)$$

则  $L_O = L_H$ 。即其做功大小不受高程影响。

## (三) 内燃机械

内燃机械的功率是在标准大气状况（大气压力760毫米汞柱、环境温度20℃、相对湿度60%）下标定的。当在高海拔地区使用时，其功率将随空气性质改变而变化。

### 1. 汽油机功率

转速一定时，发动机有效功率N与气缸充气 $G_K$ 成正比。根据试验，汽油机充气量与大气中干空气压力成正比、与环境温度平方根成反比，即：

$$G_K = K \frac{P - \varphi P \omega}{\sqrt{T}} \dots\dots\dots (3-1)$$

因此，在海平面上和海拔H米处，汽油机功率比可由下式表示：

$$\frac{N_O}{N_H} = \frac{G_{K_O}}{G_{K_H}} = \frac{P_O - \varphi_O P \omega_O}{P_H - \varphi_H P \omega_H} \sqrt{\frac{T_H}{T_O}} \dots\dots\dots (3-2)$$

式中：N—汽油机功率，马力；

$P \omega$ —饱和蒸汽压力，毫米汞柱；

$\varphi$ —空气相对湿度，%。

高海拔地区水蒸汽分压力 $\varphi_H P \omega_H$ 有如下经验公式：

$$\varphi_H P_{\omega_H} = P_0 \times 10^{-\frac{H}{8360}}$$

尽管该式反映了空气湿度随高程增加而递减的规律，但由于数值不大，对汽油机功率影响甚微，可以忽略。因此，式(3-2)简化为：

$$\frac{N_H}{N_0} = \frac{P_H}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T_H}} \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

高程对大气气温有影响，对流圈大气中，一般气温梯度为0.004~0.0065℃/米，我国多采用0.005℃/米，即：

$$\frac{T_H}{T_0} = 1 - \frac{\Delta T H}{293} = 1 - \frac{0.005 H}{293} = 1 - 0.00001709 H \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

在海拔5000米以下地区，气压随高程递减的规律，可用简化的拉普拉斯公式表示：

$$\frac{P_H}{P_0} = 10^{-\frac{H}{18400}} \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

将(3-5)、(3-6)式代入公式(3-4)中可得：

$$N_H = \frac{10^{-\frac{H}{18400}}}{\sqrt{1 - 0.00001760 H}} \cdot N_0 \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

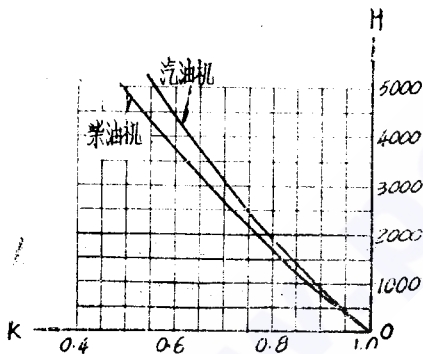


图3 内燃机功率与高程关系曲线

为便于使用，根据公式(3-7)高程对汽油机功率的影响，绘出降低系数曲线，见图3。

### 2. 柴油机功率

非增压和机械增压的柴油机械，由于干空气充气量减少，功率降低。若与标准状况比较，其有效功率换算系数C，可用下式表示：

$$C = \frac{N_H}{N_0} = F + 0.7(F - 1) \left( \frac{1}{\eta_{m0}} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (3-8)$$

式中：F—柴油机指示功率换算系数；

$$F = \frac{N'_H}{N'_0} = \left( \frac{T_0}{T_H} \right)^{0.75} \left( \frac{P_H - \varphi_H P_{\omega_H}}{P_0 - \varphi_0 P_{\omega_0}} \right) \quad \dots\dots\dots (3-9)$$

$N'_H$ —柴油机指示功率，马力；

$N'_0$ —柴油机有效功率，马力；

$\eta_{m0}$ —标准状况下的机械效率。

当缺少大气实测数据时，因大气中水蒸汽分压力 $\varphi P_{\omega}$ 较小，不同高程干空气压力比相差甚微，可以忽略，则公式(3-9)简化为：

$$F = \frac{N'_H}{N'_0} = \frac{P_H}{P_0} \left( \frac{T_0}{T_H} \right)^{0.75}$$

$$= 10^{-\frac{H}{18400}} \cdot (1 - 0.00001706H)^{-0.75} \dots\dots\dots (3-10)$$

柴油机机械效率取为0.8, 则(3-8)式简化为:

$$C = \frac{N_H}{N_0} = F + 0.7(F - 1) \left( \frac{1}{0.8} - 1 \right) = 1.175F - 0.175 \dots\dots\dots (3-11)$$

为使用方便, 根据公式(3-10)、(3-11), 绘出柴油机功率高程换算系数(C)曲线, 见图3。

归纳起来, 无论汽油机或柴油机功率将明显降低, 油耗量也会增加。为提高内燃机功率, 可用专门增压器预先压缩进入发动机工作气缸的空气, 以提高空气密度。

对汽油机增压, 容易引起气缸爆燃, 实用上尚有困难。对柴油机进行机械增压(转子或离心式增压器由发动机曲轴通过机械传动系统驱动。)具有噪音大、对传动系统要求高等缺点。因此, 在高海拔地区的柴油机械, 应尽量考虑装置废气涡轮增压器(由发动机废气推动涡轮机, 再由涡轮机直接驱动离心式压气机)。

#### (四) 电动机械

现有新、老系列产品及按现行国家标准生产的电动机(以及发电机)产品, 工作条件均规定不超过海拔1000米; 允许环境气温40℃(旧系列电动机为35℃)。当工作条件改变, 电动机额定率必将随之变化, 影响其性能。

##### 1. 功率不改变的电动机

当电动机在高海拔地区使用时, 电机温升递增值与使用地点环境温度递减值、如能满足以下关系式, 则电动机可按铭牌额定功率运行。

$$(H - 1000) \times \Delta i \leq (40 - t_h) \dots\dots\dots (4-1)$$

式中:  $\Delta i$ —海拔高程每增加100米电动机温升的递增值, 取 $\Delta i = 0.5^\circ\text{C}/100\text{米}$ ;

$t_h$ —使用地点的冷却空气实际最高温度,  $^\circ\text{C}$ 。

##### 2. 功率改变的电动机

当电动机温升递增值高于使用地点环境温度的递减值, 即:

$$(H - 1000) \times \Delta i > (40 - t_h) \text{ 时,}$$

电动机额定功率将降低。在该电动机允许极限工作温度内, 凡每超过 $1^\circ\text{C}$ , 则降低额定功率1%, 即:

$$[(H - 1000) \Delta i - (40 - t_h)] \times 1\% \dots\dots\dots (4-2)$$

##### 3. 电动机械轴功率的修正

电动施工机械品种较多, 其轴功率的计算公式不完全一致。不但额定功率安全系数随容量大小而不同(一般是1.1~1.5), 而且传动系数因传动方式不同(直接传动或由皮带、齿轮传动)也有区别(一般是0.88~1.0)。因此, 电动施工机械轴功率是否会随电动机功率改变而改变, 以及改变多少? 应作分析。

当电动机在气温 $20^\circ\text{C}$ 以下环境中运行时, 电动施工机械的轴功率可不修正。若与此条件不符, 电动施工机械的轴功率应考虑降低。

为方便使用, 现将不同海拔高程最高气温对电动机功率的影响系数绘在图4中。

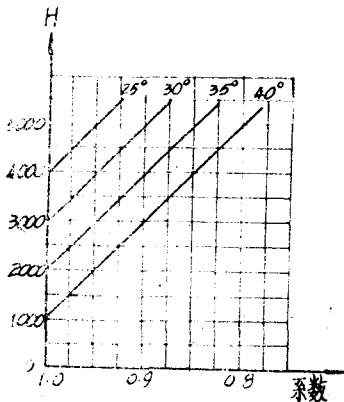


图4 高程对电动机功率影响曲线

## (5) 通风机械

### 1. 风机风量与风机效率

由于风机风压一般在 500 毫米汞柱以下，通风计算中假定空气不受压缩，所以通风机生产风量  $Q$ （单位时间内通过风机的空气体积）与风机效率  $\eta$ （输出功率与轴功率之比）均与空气容重无关，不受高程变化的影响，即  $Q_H = Q_0$ ；

$$\eta_H = \eta_0。$$

### 2. 风机风压与风机功率

通风机的风压与轴功率均随空气容重而变化，且与其成正比，即：

$$\frac{h_H}{h_0} = \frac{N_H}{N_0} = \frac{\gamma_H}{\gamma_0} = K$$

式中： $h$ —风机的风压，毫米汞柱；

$N$ —风机的轴功率，瓩；

$\gamma$ —空气容重，公斤/立方米。

即高海拔地区通风机风压与轴功率均较标准条件减少  $K$  倍。但在风量一定时，风压降低与风管阻力降低相同，计算风管阻力与选择风机容量时，可不考虑高程影响。风压与轴功率的降低系数（即高程系数）与双级空压机重量生产能力降低系数  $\alpha$  相同，可查用图 2  $\alpha$  值曲线。

综上所述，施工机械在高海拔地区使用时，其功率和生产能力随高程的增加而下降。其中以非增压和机械增压的柴油机械的有效功率下降值最大；汽油机械、空压机及通风机次之；电动机械下降最小。对进气不膨胀的风动机械，其所做的功及消耗的空气重量改变甚微，但空压机效率降低较多，压气站规模必然加大。因此，设备选型时宜优先选用电动机械。

通过以上分析，在表 7 中列出了我们建议的各类机械的高程影响系数，并同时列出铁道部、交通部概予算定额值，以便对比。

## 四、地下工程施工通风计算问题

### (一) 高程对风量的影响

#### 1. 排尘风量

施工规范中对粉尘浓度的有关规定，是针对空气中所含浮尘数量作出的。我国规定采用重量法表示粉尘浓度，即在一立方米空气中所含浮尘的毫克数。所以，粉尘浓度仅与空气体积有关而与空气容重无关。

浮尘在空气中飞扬时间的长短，与尘粒大小、重量、形状以及空气湿度和风速均有密切关系。随外界条件改变，浮尘和落尘也会相互转化。静止空气中粉尘沉降速度公式如下：

表7 各类机械高程影响系数及概预算定额修正系数对照表

资料来源	高程(米)	交通部		铁道部		本文建议数据 (高程影响系数)																		
		公路工程概算定额修正系数	1.0	1.2	1.4	1.8	2.5	双级空压机	柴油机油耗率	A	C	柴油机油耗率	功率定额	汽油机功率	$N_H/N_0$	30°C/40°C	功率	电动机功率	风量	$Q_H/Q_0$	风压与功率	K	风机	
未	2500	1.0	1.29	1.4	1.84	2.5	0.76	0.85	1.32	1.06	0.71	1.41	0.75	1.33	1.0	0.93	1.08	1.0	1.0	0.76	1.32	1.39	1.54	1.72
3000	0.72	0.83	1.39	1.08	0.66	1.52	0.71	1.41	1.0	0.90	1.11	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.72	1.39	1.54	1.72	
4000	0.65	0.77	1.54	1.11	0.58	1.72	0.63	1.59	0.95	0.85	1.18	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.65	1.54	1.72	1.72	
5000	0.58	0.72	1.72	1.15	0.50	2.00	0.56	1.79	0.90	0.80	1.25	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.58	1.72	1.72	1.72	

注：“本文建议数据”中的“定额”值，系高程影响系数的倒数，以便与交通、铁道部的概预算定额修正系数对照。

$$U = \frac{2}{g} R^2 \frac{\rho - \rho_1}{\mu} g \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

式中:

- U—尘粒沉降速度, 厘米/秒;
- g—重力加速度, 取981厘米/秒<sup>2</sup>;
- R—尘粒半径, 厘米;
- $\rho$ —尘粒密度, 克·秒<sup>2</sup>/厘米<sup>4</sup>;
- $\rho_1$ —空气密度, 克·秒<sup>2</sup>/厘米<sup>4</sup>;
- $\mu$ —静停空气粘性系数(当温度21°C时, 等于 $1.81 \times 10^{-4}$ 克·秒/厘米<sup>2</sup>)。

在高海拔地区, 由于空气稀薄, 尘粒沉降速度稍有增加。但由于 $\rho_1$ 值比 $\rho$ 值小得多, 因此空气容重变化对尘粒沉降速度影响不大, 按排尘计算风量时可不加修正。

## 2. 炸药需风量修正

地下工程大气中有害气体的允许浓度, 是在标准条件下制定的。根据理想气体方程式, 当气压及温度发生变化时, 炸药产生的有害气体将随之变化, 可以导出以下关系式:

$$b_H = b_0 \cdot \frac{1}{K} \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

式中:  $b_H, b_0$ —海拔H米处及海平面的一公斤炸药爆破时产生的有害气体量, 公斤/公斤。  
高海拔地区冲淡和排除炸药产生的有害气体所需风量, 应按下式修正:

$$Q_H = \frac{1}{K} Q_0 \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

式中:  $Q_H$ —海拔H米处的通风量, 米<sup>3</sup>/秒;  
 $Q_0$ —海平面标准条件的通风量, 米<sup>3</sup>/秒

对于高程系数K, 目前有以下几种计算公式:

(1) 用气压系数 $K_p$ 代替高程系数, 即:

$$K = K_p = \frac{P_H}{P_0} \quad \dots\dots\dots (5-4)$$

(2) 当高程H = 500~2500米时,

$$K = 1 - 104H \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (5-5)$$

当高程H = 2500~4000米时,

$$K = 0.95 - 33.5H \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

$$K = \frac{\frac{P_H}{T_H}}{\frac{P_0}{T_0}} = \frac{K_p}{K_T} \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

当缺乏现场气压 $P_H$ 与气温 $T_H$ 的实测数据时, 可按下列式计算:

$$K = \frac{K_p}{K_T} = \frac{10^{-\frac{H}{18400}}}{1 - 0.00001706H} \quad \dots\dots\dots (5-8)$$

以上三种计算公式中, (5-4)式仅考虑气压变化, 计算结果偏于安全。(5-5)、(5-6)式仅用于在4000米高程以下的地区, 计算值居中。(5-7)式概括了高程对空气

性质的影响，误差在气象条件波动范围之内，是本文推荐公式。

为便于使用，根据该公式绘成曲线图5。

### 3. 柴油机械需风量修正

柴油机械在高海拔地区地下工程使用时，由于下述原因，致使排出的废气中有害气体量增大。

(1) 从理想气体方程可知：气压降低，有害气体体积增大。其值用高程系数K的倒数表示。

(2) 有害气体量大体上与燃油耗量成正比。随高程变化，柴油机油耗增大，有害气体量必然改变。

柴油机油耗率（只适用于非增压和机械增压的柴油机）可按下式换算：

$$A = \frac{g \cdot H}{g_0} = \frac{F}{C} = \frac{F}{F + 0.7(F - 1)\left(\frac{1}{K} - 1\right)} \quad (5-9)$$

式中：

A — 柴油机油耗率换算系数；

$g_0$  — 标准状况油耗率，克/马力小时；

$g$  — 海拔H米处油耗率，克/马力小时。

对柴油汽车，因柴油机随高程增加功率降低，不但爬坡能力下降，且而常在最大功率状态下工作。

(3) 柴油机在标准状况下工作时，空气量与燃油量之比 $m > 14.4$ 。因空气稀薄使m值降低，柴油机吸进的空气量无法满足柴油燃烧所需氧气，造成燃烧不充分、有害气体浓度提高。

目前，柴油机械进洞所需风量的计算公式与计算方法不一，对高海拔地区如何修正通风量的文献资料更为贫乏，尚难合理准确计算风量。仅根据上海市隧道建设公司等单位编写的“道路隧道通风量试验报告”，汽油车（亦可用于柴油车）风量高程修正系数示于图6曲线

(1)。但该曲线高程仅到2000米。

高海拔地区有害气体体积膨胀、油耗量增加、功率下降，计算的高程影响系数示于图6曲线(2)。该曲线尚未考虑由于燃烧不充分致使有害气体浓度提高的影响，只作为修正柴油机械所需通风量参考之用。

从曲线(2)说明：高海拔地区地下工程尽可能采用有轨运输，柴油机不进洞。否则，施通风量会成倍增加，增加通风散烟困难。

### (二) 高程对风压的影响

通风压力与通风阻力因次相同，数值相等，方向相反。按通风阻力可细分为摩阻力与局部阻力。中其摩阻力一般占

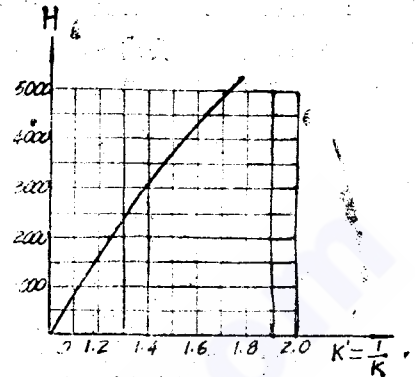


图5 高程对井巷风量修正系数曲线

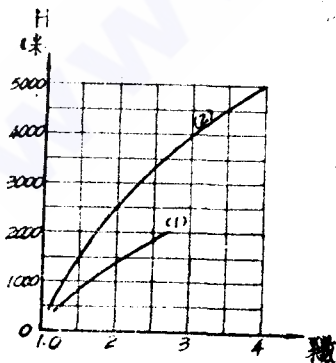


图6 柴油机油量修正系数



总阻力的80~90%，因此，计算出高程对摩阻力的影响，就能近似确定高程对风压的影响。

常用的摩阻力公式中，摩阻力系数 $\alpha$ 与空气容重 $\gamma$ 成正比。随着海拔高度增高空气容重减小，相同管道 $\alpha$ 及 $h_{\text{摩}}$ 值降低，即：

$$\alpha_{\text{H}} = \frac{\gamma_{\text{H}}}{\gamma_0} \alpha_0 = K \cdot \alpha_0 \dots\dots\dots (5-10)$$

$$h_{\text{H}} = \frac{\gamma_{\text{H}}}{\gamma_0} h_0 = K \cdot h_0 \dots\dots\dots (5-11)$$

式中： $\alpha_{\text{H}}$ 、 $\alpha_0$ —海拔H米及海平面处的通风阻力系数，公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>4</sup>；

$h_{\text{H}}$ 、 $h_0$ —海拔H米处及海平面处的通风摩阻力，毫米汞柱。

高海拔地区高程系数K恒小于1，有利于改善井巷通风。

通风方式宜采用压入式。但在寒冷季节，当冷空气送入施工工作面引起洞内出现负温（据某工程实践，其范围约距洞口200米）、恶化施工条件时，则可考虑采用吸出式。必要时，在洞口应采取加温措施。

水平有限，谬误之处恳请指正。另外，本文编写中承蒙徐世志，王友全两位同志多次指导，谨此致谢。

#### 主要参考资料

1. 铁道部铁路工程预算定额，人民铁道出版社，（1964年）7页。
2. 交通部公路工程概算定额（试行），人民交通出版社，（1973年）2页。
3. 于永中等：高原劳动卫生与劳动保护问题的研究，中国医学科学院学报，第1卷，第3期，（1979年）248页。
4. 苏联·谢·伊里伊契夫，矿山压缩空气设备，燃料工业出版社，（1955年）334页。
5. 吉林工业大学内燃机教研室；内燃机理论与设计，机械工业出版社，（1975年）140页。
6. 西北电力设计院等；电力工程设计手册，上海人民出版社，（1972年）258页。
7. 高山地区矿井通风问题初探，冶金安全，（1975）5期。