

隧道通风試驗研究

鐵道部隧道通风試驗工作組編

人民鐵道出版社

隧道通风試驗研究

鐵道部隧道通风試驗工作組編

人民鐵道出版社

一九六一年·北京

本書系根據設有噴嘴式、豎井式和斜井式永久通風的三座隧道通風試驗的資料整編而成，對自然通風、列車活塞作用和機械通風效果，以及粉塵和有害氣體含量等試驗結果，加以綜合分析，詳加研討，對長隧道永久通風的設計提出結論性的建議。

本書可供隧道和礦井的設計、施工及運行人員參考。

隧道通風試驗研究

鐵道部隧道通風試驗工作組編

人民鐵道出版社出版

(北京市霞公府17號)

北京市書刊出版業營業許可證出字第010號

新華書店科技發行所發行

各地新華書店經售

人民鐵道出版社印刷廠印

書號1754 開本787×1092 $\frac{1}{16}$ 印張4 $\frac{1}{2}$ 插頁4 字數55千

1961年1月第1版

1961年1月第1版第1次印刷

印數0,001—1,680冊 定價(10)0.69元

目 录

前言	1
第一章 噴嘴式隧道通风試驗	3
第一节 隧道及通风設備概况	3
第二节 通风試驗概况	5
第三节 試驗結果的分析及討論	5
一、列車活塞作用情况	5
二、机械通风情况	10
三、自然通风情况	19
四、通风机械及电力設備問題	20
五、有害气体的分析	25
第四节 試驗的結論	27
第二章 豎井式隧道通风試驗	28
第一节 隧道及通风設備概况	28
第二节 通风試驗概况	30
第三节 試驗結果的分析及討論	31
一、列車活塞作用情况	31
二、机械通风对有害气体濃度降低的作用及机械通风量 在隧道內分配情况	32
三、自然通风情况	33
四、有害气体及粉尘濃度的分析	34
五、通风机械及电力設備問題	36
第四节 存在問題，改进意見及結論	38
第三章 斜井式隧道通风試驗	40
第一节 隧道及通风設備概况	40
第二节 通风試驗概况	41
第三节 試驗結果的分析及討論	43
一、列車活塞作用情况	43
二、机械通风效果	46
三、自然风对机械通风的影响	52
四、通风机械性能	53
五、有害气体的分析	56
六、隧道內严重潮湿漏水对通风的影响	57

七、帘幕的作用.....	58
八、对斜井机械通风方式的讨论.....	60
第四节 改进本隧道通风的意见.....	61
第四章 分析及讨论.....	62
一、关于进一步改善隧道养护人员的劳动条件，确免有害气体慢性中毒的产生问题.....	62
二、关于一氧化碳 (CO) 容许浓度的标准.....	63
三、关于微量一氧化碳 (CO) 测定时存在的问题.....	64
四、有关竖井通风方式几个问题的探讨.....	64
五、关于隧道断面平均风速的测定问题.....	65
第五章 结 论.....	67
附 录.....	69
一、单线铁路隧道列车活塞作用影响曲线图.....	69
二、一氧化碳 (CO) 及丙烯醛的性质.....	70
三、隧道通风计算资料的搜集.....	71
四、相对湿度表.....	72
五、在不同温度下的空气比重，比重换算常数及风速常数表.....	73
六、通风试验测定记录表.....	73

前 言

解放前我国没有一个隧道設有机械通风設備。解放后，随着山区铁路建設的发展及已有綫路行車密度的增大，党和政府对劳动者健康的关怀，需要設置机械通风者日益增多，通风問題的解决也愈加迫切。特别是近年来铁路长隧道不断出現，通风問題已为各方重視并有較大的发展。

我国初次进行隧道机械通风設計是在1954年，当时在丰沙綫七座1公里以上的隧道采用正峒門設置帘幕的风道式通风系統，通风机为Y-20型，每座隧道裝置3台至5台，峒內設計风速为3~5米/秒，并在1955年将通风設備安裝就緒。交付运营后，因帘幕未裝設信号，使用部門弃置未用，以后因常被风刮坏而將帘幕拆除。

1957年铁道部前設計总局認為丰沙綫长隧道机械通风究竟需要設置与否，需作全面的通风試驗，根据列車通过隧道后，一氧化碳濃度經過規定時間15分鐘是否能降低到允許标准而定。并于同年11月組織了通风試驗組，在丰沙綫七座有通风設備的隧道作了半个多月的試驗。根据总结，認為两座2公里以上的隧道应恢复机械通风；三座长度分别为1632、1692、1757米的隧道需結合各地自然风流情况，观测一段時間，再行决定；两座較短的隧道，长度为1174米及1329米，机械通风裝置可撤消。通过这次試驗对于設計原則方面提出三点建議：（1）在規定時間15分鐘內，設計的通风量应考虑列車活塞作用所引进新鮮空气的因素，并不应大于隧道內空間体积；（2）隧道內的設計风速須考虑逆风影响，一般不应小于3米/秒；（3）风道式机械通风，正峒門設置帘幕很重要，尤其在有逆风的情况下必須設置帘幕。另外，在丰沙綫通风試驗总结“风量的分析”一章中，曾說明列車通过隧道后，含一氧化碳的煤烟經過机械通风，大部分是被排挤出去，而冲淡作用仅发生在烟气尾部与引进的新鮮空气交接的一段长度上。

在丰沙綫通风試驗的基础上，为了进一步观测各种不同通风方式的通风效果，求得必要的設計数据資料，改进通风設計及施工中存在的理論和实际問題，并进一步从实践中探討通风方案及有关問題，以指导今后的永久通风設計，铁道部基建总局于1959年上半年召集有关各局、院商討，决定再次組織通风試驗工作組，对噴嘴式、豎井式及斜井式隧道通风效果进行比较系統的試驗。

这次通风試驗工作自1959年6月2日开始，于7月3日結束，参加的单位达17个，参加試驗人員仅工程技術人員及医务人员即将近100人，共分三大組进行工作，即风速組、机械組及有害气体測定組。此三大組均由核心組統一指揮，各隧道通风試驗核心組則由基建总局、铁道科学研究院及各隧道通风試驗主办单位負責工程師等組成。

这次試驗的主要項目計有下列14項：

1. 自然通风的效果；
2. 列車活塞作用所引进新鮮空气的长度及相应的风速；
3. 通风机械设备的运用效能；
4. 噴嘴式机械通风試驗两种噴口尺寸，比較它的效能及其与带进空气关系；
5. 噴嘴口风速分布及噴嘴风量的控制測量；
6. 豎井和斜井通风效果及吹入、吸出式通风方案的比較；
7. 半环状通风方案的效果；
8. 帘幕的作用，隧道内风速风压与帘幕启閉的关系；
9. 空气流速在隧道断面内的分布情况（即隧道断面平均风速的測定）；
10. 隧道摩擦阻力及局部阻力系数的測定；
11. 一氧化碳及二氧化硫有害气体濃度的測定；
12. 隧道内粉尘含量的測定；
13. 在单綫隧道中煤烟受挤压及冲淡作用的实际情况；
14. 提出通风机运轉及通风设备改善的具体意見。

为了保証这次通风試驗工作的順利进行，基建总局于1959年4月下旬即在京召开了由各隧道通风試驗之主办单位及其他有关单位参加的統一安排計劃會議。会上拟定了通风試驗日期、試驗組織、参加单位及人数和通风試驗的主要項目等，并对各隧道通风机械、动力设备等方面的試驗前准备工作作了檢查和部署。

在四月間开会时，三座隧道的通风机尚未运到工地，动力装置也有很繁重的工作。經太原局、第四設計院、錦州局、海拉尔局、吉林局积极想办法，尽了很大的努力，在一个多月的時間里完成机械安装，得以如期进行試驗。

这次試驗工作是在党的正确領導和大力支持下，在参加工作的全体同志的努力下完成的，在試驗进行期間主办单位的首长亦都亲临指导，铁道部各級領導对隧道通风工作的重視充分体现了党对劳动者的关怀。

在試驗工作完毕后，我們即着手編写本試驗报告，于8月間完成，对試驗結果加以綜合分析，詳加研討，提出通风机运轉及改善的意見，并得出可供今后隧道永久通风設計参考的結論性建議。惟参加通风試驗及編写者水平有限，虽經討論研究提出一些办法及处理的意見，所論未必尽当，深望讀者指正幸。

在这次通风試驗及總結的过程中，北京矿业学院通风安全教研組的同志們給予我們不少宝貴的帮助，在此謹致謝意。

第一章 噴嘴式隧道通風試驗

第一節 隧道及通風設備概況

隧道全長 1376.90 米，其中東峒口長 168 米一段在 300 米半徑之曲線上，余均為直線，詳見圖 1—1。綫路由東向西為上坡，坡度為 +10.4% 及 +13.7%，兩峒口高差約 17 米。隧道襯砌大部分為合整體灌注，峒內乾燥無水。

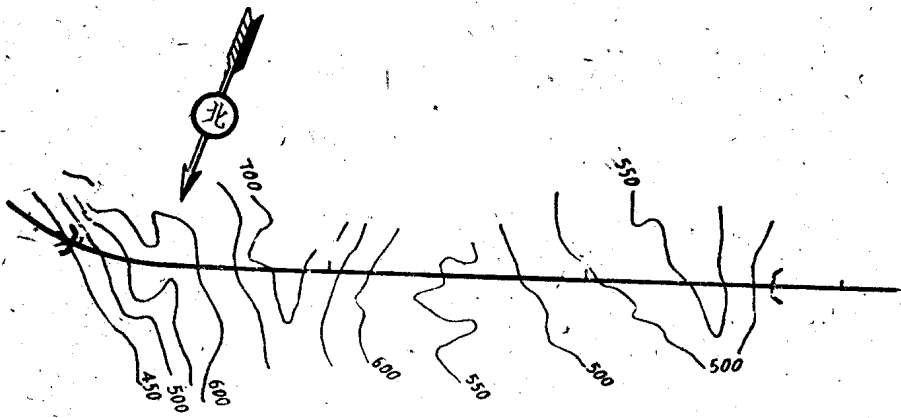


圖 1—1 隧道平面示意圖

隧道自然通風情況，據橋隧工區介紹：春秋季陰天最差，峒內排煙時間常需 30~40 分鐘，而在下次車來前峒內煤煙尚未排盡。通風試驗期間為 1959 年 6 月 2 至 8 日，峒內外溫度差最大為 8°C ，峒內多自然東風，風速 0.5~1.5 米/秒。

通風設計採用噴嘴式，曾按 JF 機車牽引 900 噸、通風時間為 15 分鐘、一氧化碳 (CO) 允許濃度以 0.1 克/米³ 計算、機車出峒後峒內初始 CO 濃度大於 0.1 克/米³，計算所需風量甚小。為考慮通風最小風速，並控制不小於 2 米/秒，算得風量為 229,000 米³/時，峒內風速為 2.1 米/秒，其中 20% 為噴嘴負壓引入的峒外風量，80% 為通風機的工作風量。通風機計算風壓為 52.92 毫米水柱，選用兩台 CTД-57-B 型 16 號離心式通風機，每台各以 40 瓩交流電動機用三角皮帶轉動，每台通風機設計工作風量為 26.4 米³/秒、風壓為 68 毫米水柱。

通風機設於東峒口峒頂機房內，其工作風量分別經由送風道流匯於貯風室，以靜壓從噴嘴高速噴入隧道向西端送風。噴嘴與隧道中心偏角為 10° 。由於本設計的效果在設計時尚無可靠的實踐資料，故又將噴嘴設計成 14、17、21、24 厘米等不同寬度，使能調整噴嘴風速，以得到最好效果。本次試驗證明：噴嘴 18.5 厘米寬度較 24 厘米寬度為優。設備概況見圖 1—2。

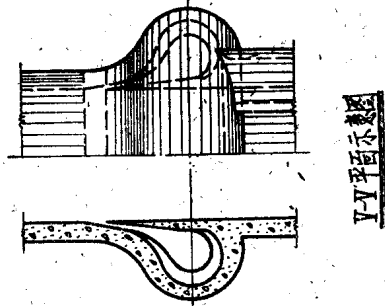
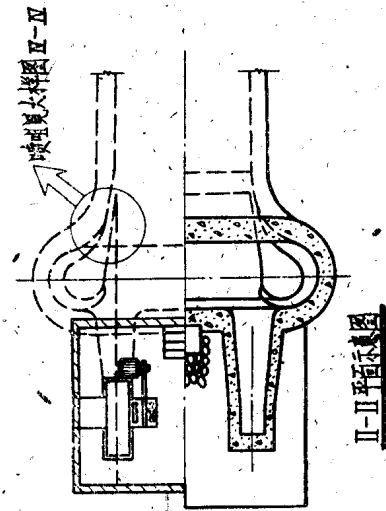
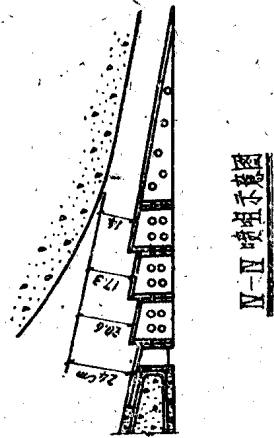
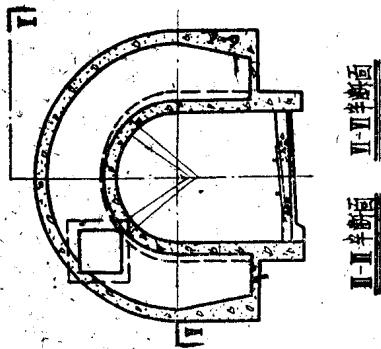
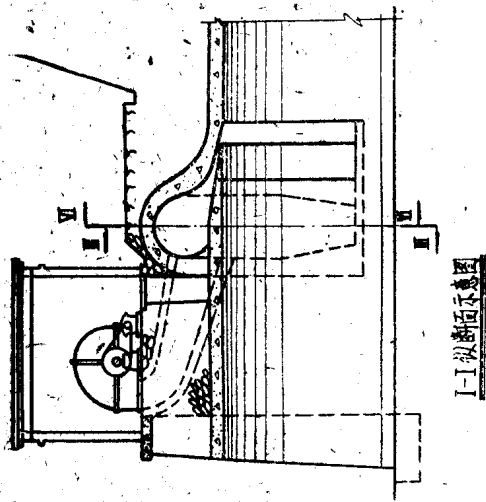
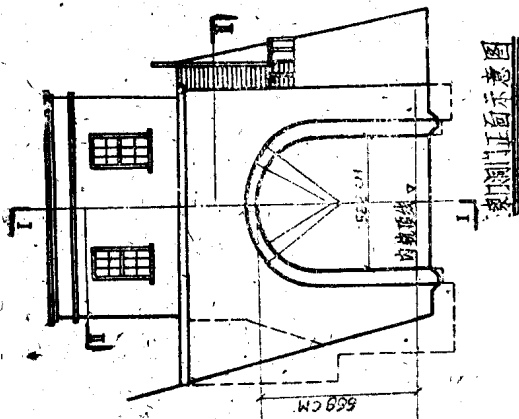


图1—2 喷嘴式隧道通风设备示意图

第二節 通风試驗概况

試驗中对风道系統的风压、风量以及峒内有害气体的含量，結合上下行車次的活塞风速，系統地观测了相互間随时间的变化关系，并测定了风速在各主要风道范围内的分布情况，噴嘴不同寬度的观测，以及对通风机、电动机和发电机等運轉的机械特性的测定。

峒内风速观测共38次，其中有机械通风的上行車3次，下行車17次，无机械通风的上行車3次，下行車5次。

隧道共有避人峒14座，峒内风速测站分設于3、25、35、43号避人峒内，有害气体测站分設于25、35、39号避人峒内，见图1—3。东峒口外之自然风速、风向及湿度等有一流动組测定，西峒口外則由靠近西峒口之风速組兼测。另有机械組在机房及风道内观测机械運轉性能及风压风量。

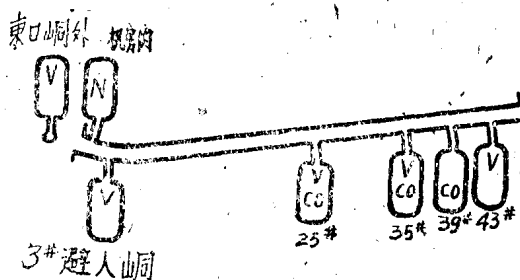


图 1—3 通风試驗测站分布图

第三節 試驗結果的分析及討論

一、列車活塞作用情况

对上坡的下行車不开通风机共作了五次試驗，測驗活塞风速的有关項目，以与計算的理論活塞作用曲綫图上的相应数值比較。理論活塞作用曲綫图(图1—4)是根据苏联И·М·Митрофанов著“单綫鐵路隧道的通风問題”一文中关于列車在隧道中的活塞作用理論及公式計算，有关数据选定如下： $F_a=12.6m^2$ (列車正面积)， $F=30m^2$ (隧道断面积)， $R=\frac{30}{21}m$ (隧道的水力半徑)， $\lambda=0.015$ (空气与隧道的摩擦系数)， $S_g=1.8 \times 2.9m^2$ (列車表面积)。

1. 无自然风的情况：见图1—5及表1—1中22行， $V_k=1.2$ ， $V_{ka}=1.5$ ，其数值較为接近；在同一行 $t=7'06''$ ， $t_a=6'51''$ ； $V=2.7$ ， $V_a=2.9$ 。綜合以上情况，在无自然风的情况下計算数值与实测数值均甚相近，可以說明所采用的計算公式大致符合实际情况。根据活塞风排烟的时间仅需7分鐘，所以在无自然风时机械通风是不需要的。

2. 有自然东风(即順风)的情况：见图1—6及表1—1中23行，有自然順风(即与活塞作用同方向)1.7米/秒的情况， $V_k=1.2$ ， $V_{ka}=1.8$ ； $t=6'51''$ ， $t_a=3'33''$ ； $V=2.8$ ， $V_a=3.2$ 。以上 $V_{ka}>V_k$ ， $t_a<t$ ， $V_a>V$ ，因为有自然順风的影响，結果还是合理的。突出的是排烟时间 t_a 几乎縮短了一半。

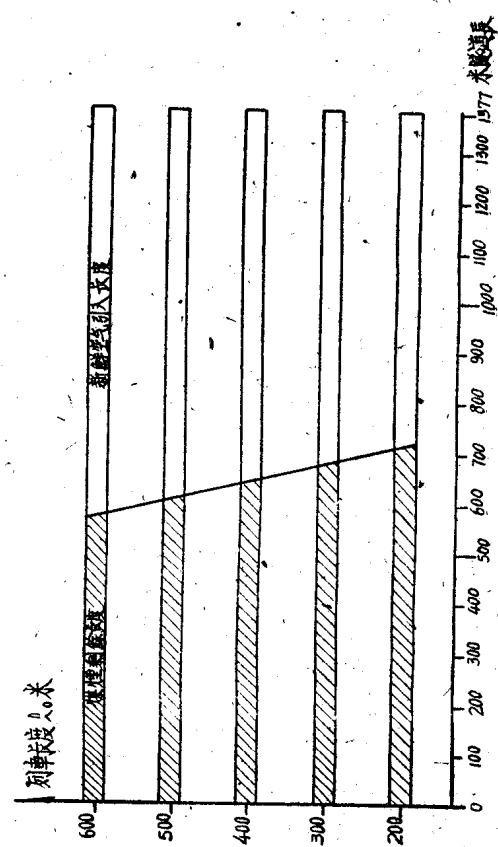
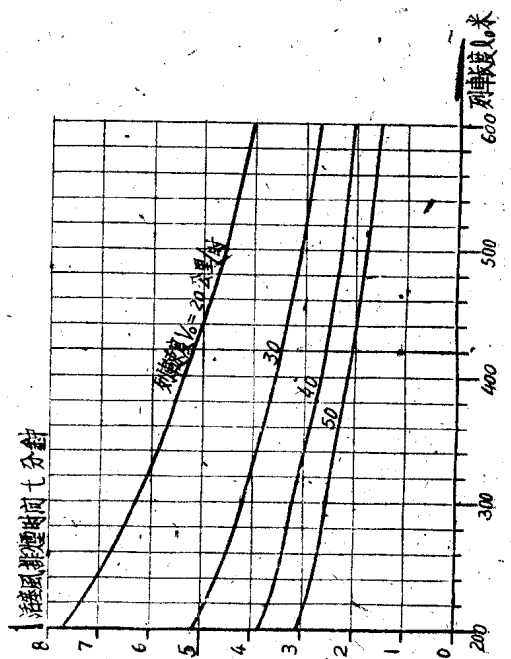
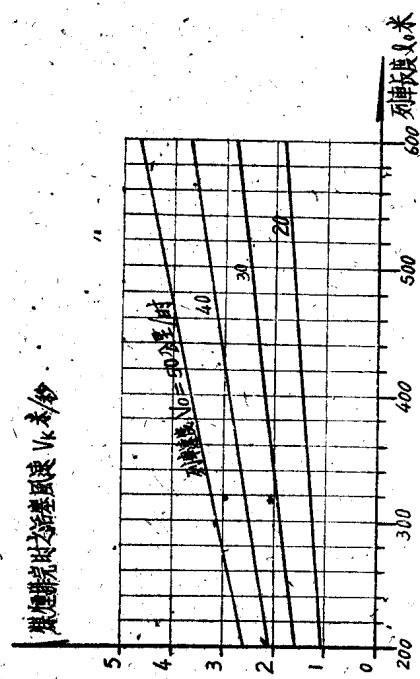
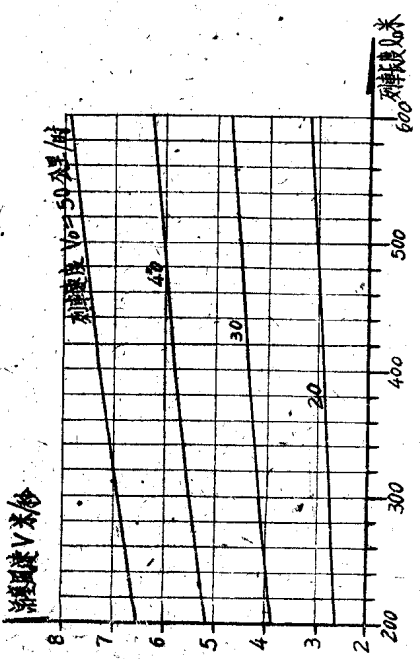


图 1—4 列車活塞作用曲線圖

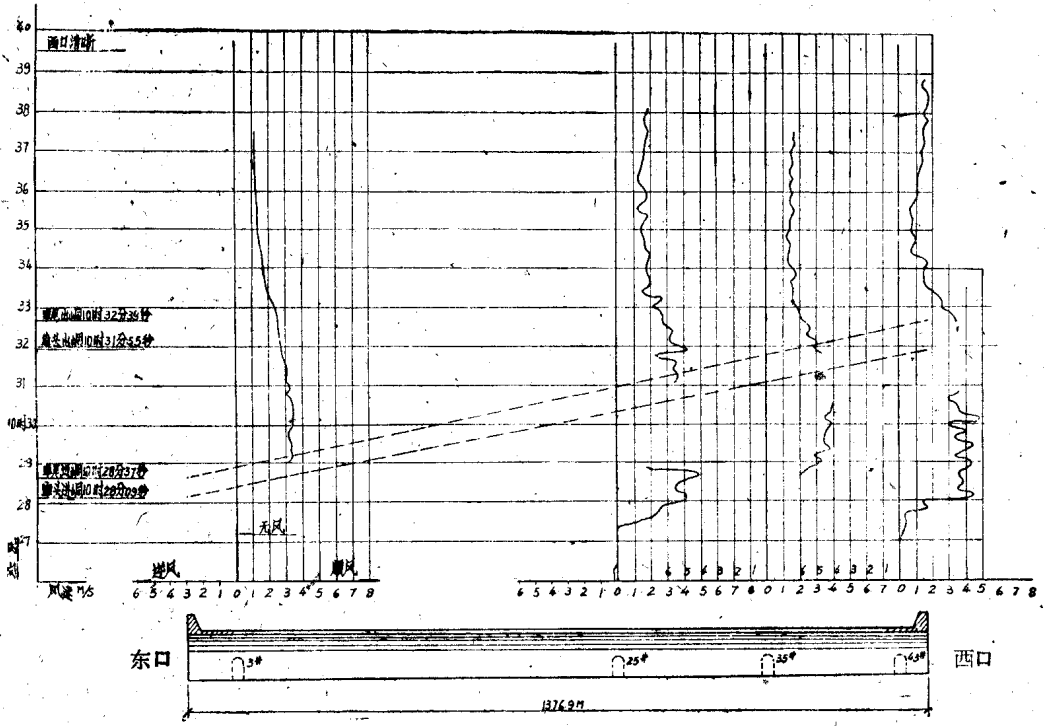


图 1—5 风速测定图
(1959.6.4, JF 机车牵引 960t, 时速 20.5km, 列车长 240m, 未开通风机)

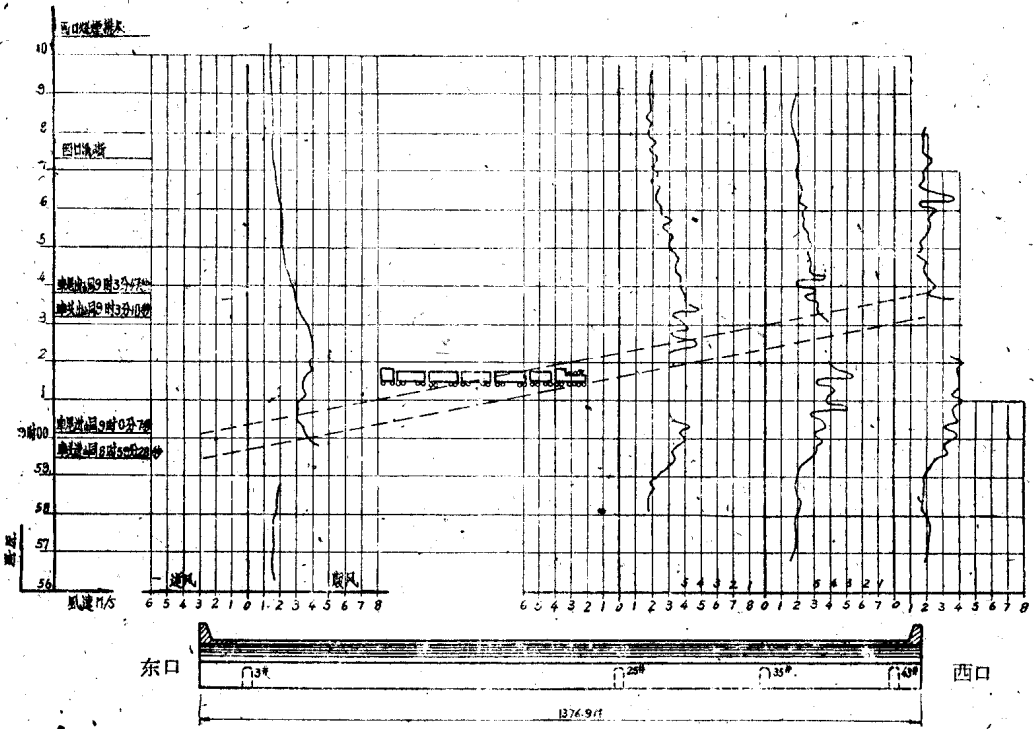


图 1—6 风速测定图
(1959.6.4, JF 机车牵引 886t, 时速 21.2km, 列车长 234m, 未开通风机)

3. 有自然西风(即逆风)的情况: 见表 1—119 行, 自然风速为 -1.3 米/秒。在此种比较小的逆风情况下, 从图 1—7 可以看出在西口煤烟尚未排尽而即有返回的现象, CO 浓度在 39# 避人峒因返烟而有增加, 在列车出峒后 13 分钟浓度为 0.07 克/米³, 超过允许浓度。此段由西口返烟经东口排清的时间适有上行车经过, 煤烟冲散后未能获得实测的排烟时间。但根据该风速图, 其返烟排尽时间尚可大致算出。列车出峒后约 4 分钟西峒口风速降为零, 再经约 5 分钟开始有逆向风, 又经 4 分钟逆向风由零增为 1.3 米/秒, 以后峒内逆风按 1.3 米/秒计, 故总排烟时间应为

$$4 + 5 + 4 + \frac{1377 - 240 \times 0.7}{1.3 \times 60} = 4 + 5 + 4 + 16 = 29 \text{ 分钟}$$

另一次记录, 见表 1—1 中 21 行, 逆风风速为 1.0 米/秒, 未开通风机, 亦有返烟情况, 列车出峒后 4 分钟风速降为零, 再经 5 分钟将开始有逆向自然风而返烟时, 因开动风机, 返烟排洩时间亦未获得, 但因逆风较低, 其返烟时间当较上述 29 分钟者为更长。

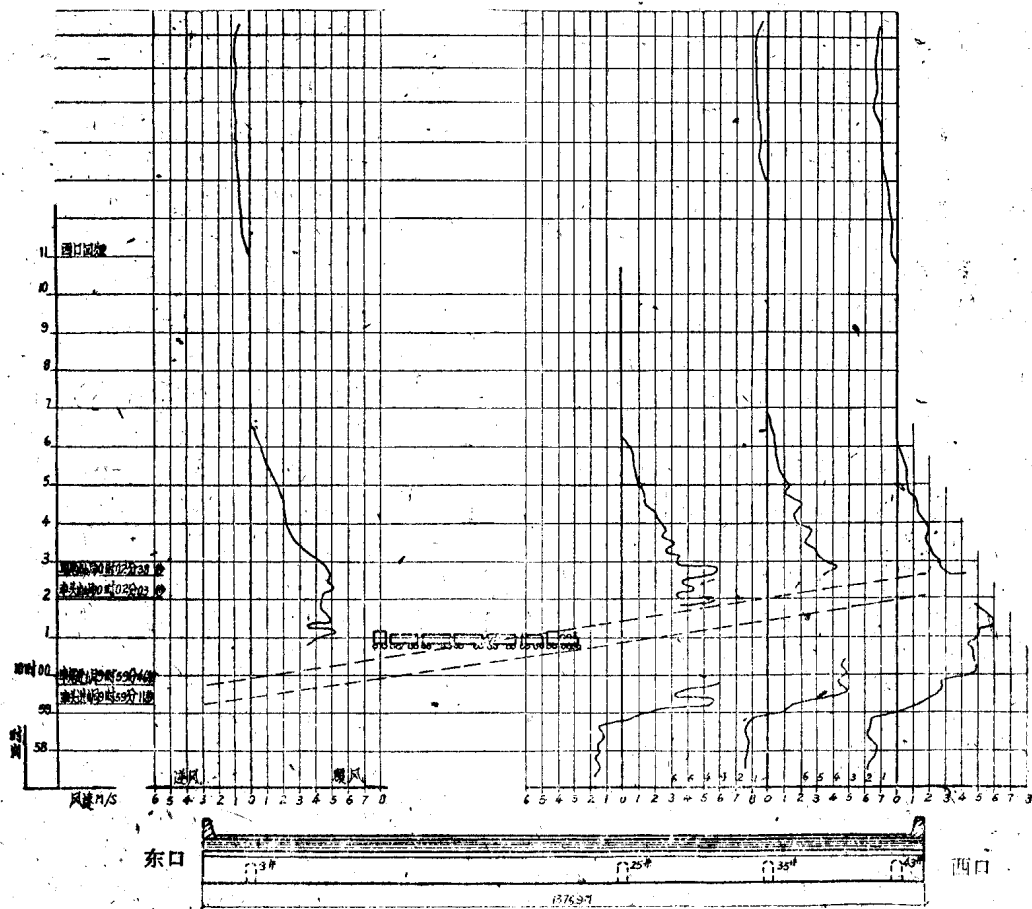


图 1—7 风速测定图

(1959.6.6, JF 机车牵引 888t, 时速 28.8km, 列车长 261m, 未开通风机)

列車活塞風各計算值与实測值比較表

表1-1

行次	月日	上下行車	車次	風機 開 閉 情 况	車長		平均 活 塞 風 速		洞 內 機 械 突 風 測 速	洞 內 自 然 風	煤 煙 排 塞 的 瞬 時 風 速		排 煙 時 間		引 入 氣 新 長 度		附 注	
					米	公 里	米/時	米/秒			米/秒	米/秒	米/秒	計 算	實 測	計 算		實 測
1																		
2																		
3	6	4	下	2033	開	589	23.8	3.5		3.0		2.0		3'50"	3'03"	797		
4	5	5	"	143	"	268	30.1	4.1		3.1		1.9		4'25"	3'15"	697		
5	"	"	"	2035	"	265	27.5	3.6		3.0		1.5		5'10"	3'23"	697		
6	"	"	"	2037	"	532	28.8	4.4		3.0		2.4		3'15"	3'08"	777		
7	"	"	"	2437	"	354	26.1	3.6		2.9		1.7		4'50"	3'50"	717		
8	"	"	"	315	"	794	30.1	5.0		3.0		3.5		2'00"	1'46"	877		
9	"	"	"	109	"	287	23.2	3.2		3.0		1.4		5'40"	2'37"	707		
10	"	"	"	2043	"	243	29.5	3.9		2.8		1.5		5'00"	2'02"	687		
11	"	"	"	2045	"	611	24	3.8		3.0		2.3		3'30"	1'45"	807		
12	6	6	"	2043	"	547	26.6	4.0		3.7		2.3		3'30"		787		
13	"	"	"	2045	"	255	28.8	3.8		3.8		1.5		5'00"	2'56"	687		
14	"	"	"	2047	"	278	23.2	3.1		3.4		1.4		5'50"	3'18"	697		
15	6	8	"	2035	"	504	29.2	4.4		3.0		2.4		3'10"	2'	777		噴嘴寬 18.5厘米
16	"	"	"	2037	"	228	33.1	4.4		3.5		1.8		4'30"	4'13"	677		
17	6	6	"	2075	"	490	27.1	4.2		3.3		2.2		3'30"	3'22"	767		
18	"	"	"	2049	"	530	23.7	3.6		3.2		2.1		3'50"	3'23"	787		
19	"	"	"	2033	米	261	28.8	3.9	4.5	-1.3				29'00"				回 烟
20	6	5	"	2047	"	222	24.8	3.3	4.0	-0.9				6'40"				
21	6	6	"	143	"	263	23.8	3.3	3.6	-1.0						687	約580	
22	6	4	"	2035	"	240	20.5	2.7	2.9		1.2	1.5	7'06"	6'51"	687			
23	"	"	"	2029	"	234	21.2	2.8	3.2		1.7	1.2	1.8	6'54"	3'31"	677		
24	6	8	上	2438	"	442	31.4	4.7	4.6					3'10"		740		回烟噴嘴 寬18.5厘米
25	6	6	"	2438	"	387	44.2	6.3	7.0	-1.5				2'40"		727		
26	"	"	"	2038	"	454	38.5	5.7	6.0		1.0	1.3		2'40"		758		

注：1. 排煙時間為車尾出烟后至喇口清晰時間。

2. 噴嘴寬除注明者外均為25.5厘米。

3. 列車活塞風各計算值可查列車活塞作用曲綫圖(圖1-4)。

在对列车活塞作用引进新鲜空气的长度的一次测验中，当列车出峒时，距东峒口780米了望东口，煤烟已较清淡，测取CO浓度为0.018克/米³，估计引进新鲜空气长度略小于780米，根据计算为687米，两数大致相近。

根据以上有1米/秒左右逆风的情况下，返烟排洩时间长达半小时，且CO浓度超过允许标准。参考设计文件该隧道地区一年中有10个月自然风为西北向，据现场养护人员谈一年春秋两季峒内经常积烟，一般达30~40分钟之久。因此虽在无自然风的情况下机械通风可以不设，但根据该隧道内常有1米/秒的逆向自然风的特点，依照逆风排烟的情况，应当设置机械通风。

二、机械通风情况

1. 峒内机械通风风速及排烟情况：在东峒口设置CTF-57-B型16#通风机两台，设计特性风压为68毫米水柱，两部通风机风量之和为52.8米³/秒。通风机开动后，新鲜空气经贮风室由喷嘴以17~23米/秒的风速喷入峒内，这样在峒内造成机械风速为3~4米/秒。

表1—1中3~18行均为开两部通风机时的各项记录。先看排烟时间，计算排烟时间最低为2'00"，最高为5'50"，实测最低为1'43"，最高为3'15"。这些排烟时间因列车长度、速度及通风机的效能不同而数值各异，所以不能概括而论，但相对地比较则开通风机时可以缩短排烟时间，最主要的是在有1~2米/秒的逆风时能够克服逆风而将煤烟排出。

这次试验因以三台发电机并联临时供电，由于发电机不好，操作困难，通风机每一开动即不停地连续运转，以致影响各种记录的独立性。

关于通风机排烟情况，兹再举一例说明各项计算数字与实测数字的比较。

看表1—1第9行，计算活塞风为3.2米/秒，仅靠活塞风的计算排烟时间为5'50"，开通风机的实际排烟时间为2'37"，列车出峒后引进新鲜空气的长度为707米，剩余浓烟长度为670米，列车在峒内的走行时间从图1—8中算得为17'03" - 13'30" = 3'33"即213"。因列车进峒前通风机已开动，在列车进峒时峒内已有3米/秒的风速，所以实际引进的新鲜空气长度比计算值更大。图1—8中平均活塞风速约为4米，故引进的新鲜空气长度为213 × 4 = 852米，剩余煤烟长度为1377 - 852 = 525米。煤烟在峒内运行平均速度由图1—8查得为3.4米/秒，故525/3.4 = 155 = 2'35"，与上述2'37"极为相近，这又可证明煤烟自峒中流出是排挤作用。

假设列车出峒后再开通风机，则引进新鲜空气的长度按计算应为707米，较图1—8实际引进的新鲜空气长度852米短少145米，亦即煤烟长度增多145米，故排烟时间当增长145/3.4 = 43秒。由此可以推知，列车到达前不开通风机，而在列车出峒后再开通风机，则需要通风的时间应为2'37" + 43" = 3'20"，较仅靠活塞风的排烟时间5'50"减少2'30"。

2. 机械风克服逆风的效果及自然风与机械风的共同作用：为了试验通风机克服逆风的能力，曾利用上行下坡车的活塞风并以通风机迎活塞风向送风以资说明。看

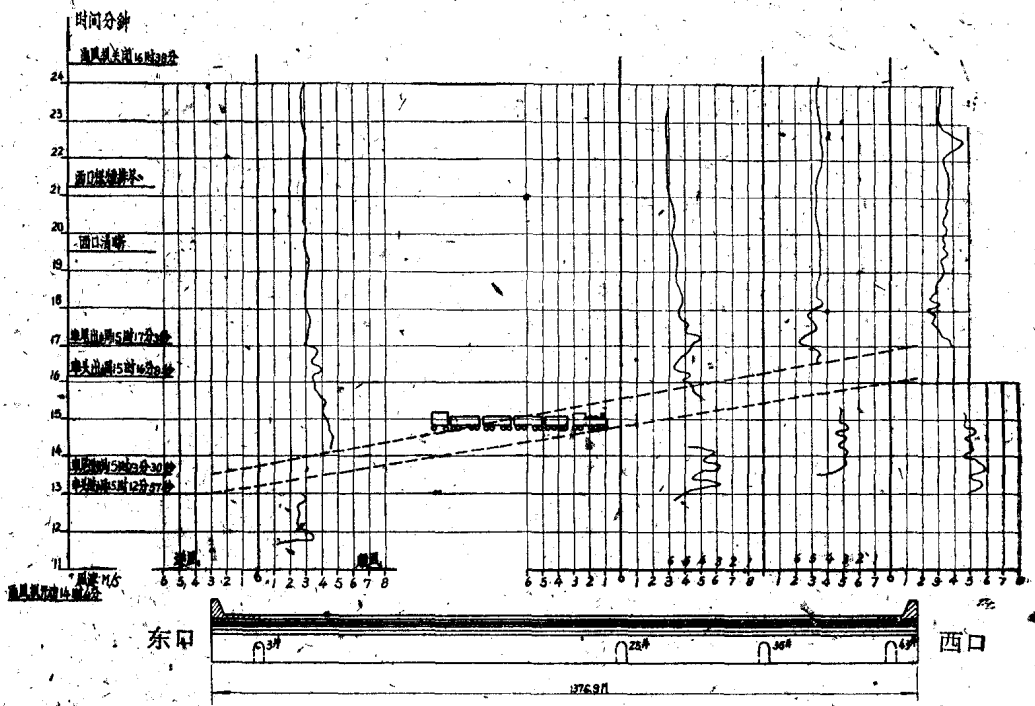


图 1—8 风速测定图

(1959.6.5, JF 機車牵引 634t, 时速 23.2km, 列車长 237m, 开通风机)

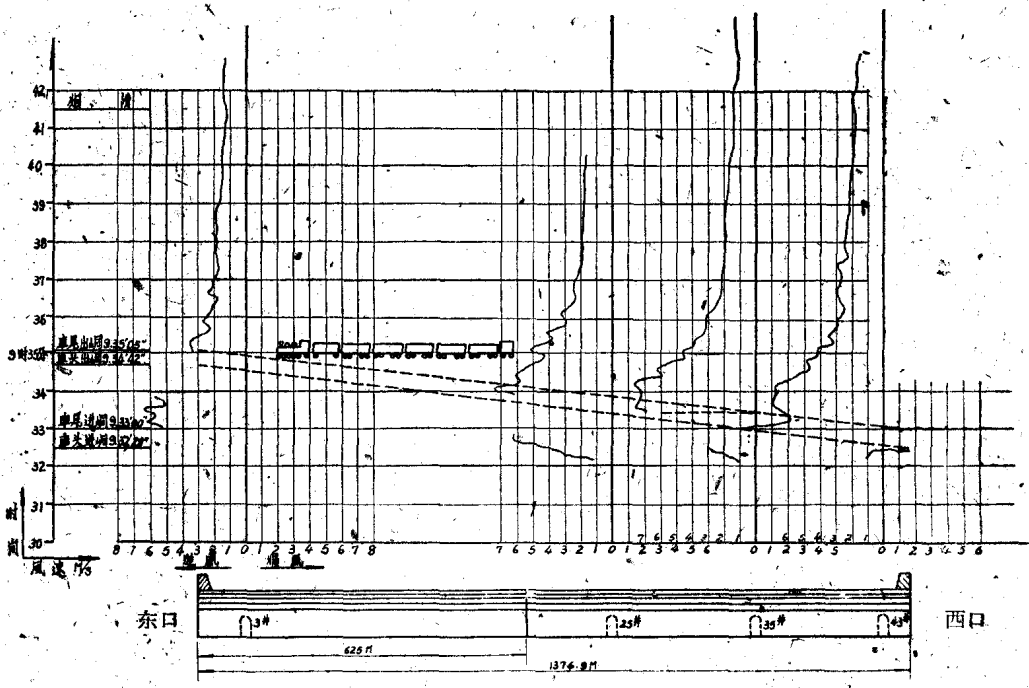


图 1—9 风速测定图

(1959.6.8, JF 機車牵引 1900t, 时速 31.4km, 列車长 442m, 开通风机)

图 1-9，列車通过后产生的活塞风速由西向东約有 5~6 米/秒，但列車出峒后 1 分鐘活塞风即降低到零，再过 3 分鐘，通风机的风速由东向西即恢复到 3.5 米/秒。再看图 1-10，上行下坡車活塞风速仍有 5~6 米/秒，在无通风机的時候，列車出峒两分鐘后风速降低到 1.5 米/秒，一直延长 3 分鐘，以下則未测。这可說明通风机克服逆风的能力是相当强的，可以肯定地說，这样的通风设备克服 2 米/秒的逆风是不成問題的。

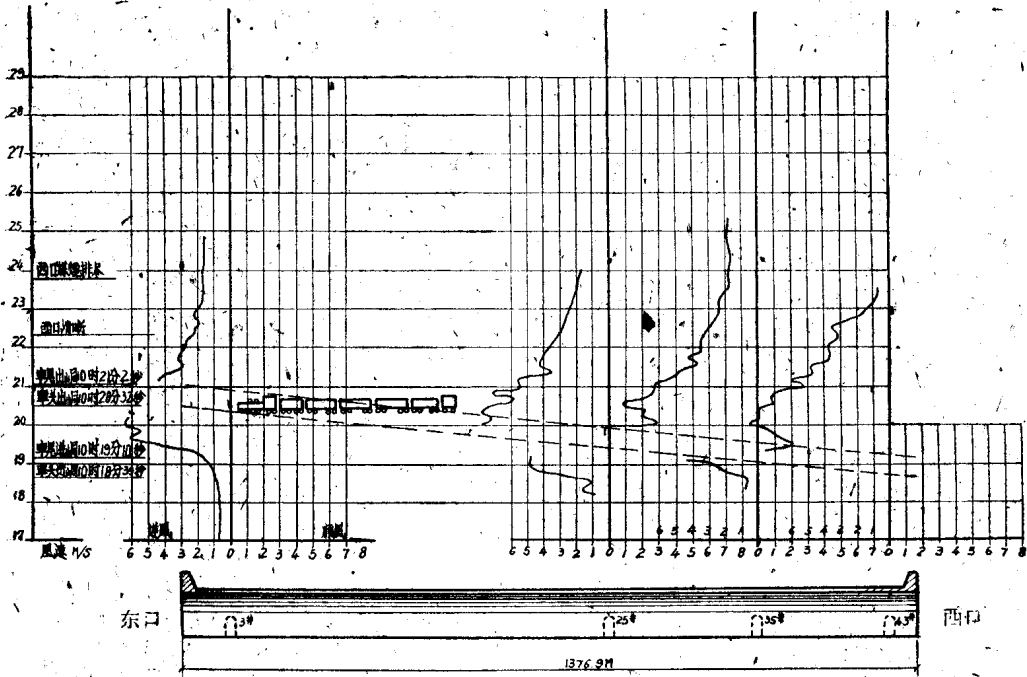


图 1-10 风速测定图

(1959.6.8, JF 機車牵引 1950t, 时速 44.2km, 列車长 387m, 未开通风机)

从試驗記錄說明，自然风与机械风共同作用时，其合成值不等于分別作用的代数之和。由于尚缺少足够的試驗資料和完整的理論分析，目前对其合成的規律尚难确定，为此将已有的两种論点介紹比較如下，以供参考。

日本下川潮編著的“隧道通风中摩擦系数的测定”第二章第 8 节“自然风对人工通风的影响”一节內，有如下的論点：

两种风力在同一风道內共同作用时，其合成結果为两个风速立方之和开立方，即：

$$V = \sqrt[3]{V_1^3 \pm V_2^3}$$

式中 V_1 ——机械风速； V_2 ——自然风速。

按照两种风力所作的功之和应等于合成风所作之功推論如下：

$$\text{功率 } N = \frac{Qh}{K}, \quad \text{則 } \frac{Qh}{K} = \frac{Q_1 h_1}{K} + \frac{Q_2 h_2}{K}$$