

第 1 章 地下工程施工通风

【本章重难点内容】

- (1) 地下工程施工环境的卫生标准。
- (2) 自然风流与常见的自然通风。
- (3) 基本的机械通风方式。
- (4) 常见隧道及辅助坑道的通风方式。
- (5) 施工通风量、管网漏风、通风阻力计算方法。

1.1 地下工程施工环境中的卫生标准

在隧道施工中，不可避免的会产生一些有害物质，并排放到隧道空气中，造成对隧道空气的污染，会对隧道内作业人员的健康产生损害。这些有害物质可分为气体、粉尘和噪音三大类。常见的有害气体主要包括一氧化碳、二氧化碳、一氧化氮、二氧化氮、二氧化硫、硫化氢和瓦斯等。

1.1.1 行业卫生标准

为了保护地下施工人员的健康，保证安全生产，我国相关行业都对地下施工作业环境的卫生标准做了明确的规定。

1. 现行《铁路隧道施工规范》规定的卫生标准

铁路隧道施工目前执行的是铁道部 2002 年 3 月发布的《铁路隧道施工规范》（TB 10204—2002），其中对隧道中空气的氧气含量、粉尘浓度、有害气体浓度、温度和噪声等都做了明确的规定，要求在隧道施工过程中作业环境应达到如下标准：

- (1) 空气中氧气含量，按体积计不得小于 20%。
- (2) 粉尘容许浓度，每立方米空气中含有 10% 以上的游离二氧化硅的粉尘不得大于 2 mg。
- (3) 瓦斯装药爆破时，爆破地点 20 m 内，风流种瓦斯浓度必须小于 1.0%；总回风道风流种瓦斯浓度应小于 0.75%；开挖面瓦斯浓度大于 1.5% 时，所有人员必须撤至安全地点。
- (4) 有害气体最高容许浓度：一氧化碳最高容许浓度为 30 mg/m³，在特殊情况下，施工人员必须进入工作面时，浓度为 100 mg/m³，但工作时间不得大于 30 min；二氧化碳按体积计不得大于 0.5%；氮氧化物（换算成 NO₂）为 5 mg/m³ 以下。
- (5) 隧道内气温不得高于 28 ℃。

(6) 隧道内噪声不得大于 90 dB。

2. 现行《公路隧道施工技术规范》规定的卫生标准

公路隧道施工目前执行的是交通运输部 2009 年 9 月发布的《公路隧道施工技术规范》(JTG F60—2009)，其中对隧道中空气的氧气含量、粉尘浓度、有害气体浓度、温度和噪声等都做了明确的规定，要求在隧道施工过程中作业环境应达到如下标准：

(1) 隧道空气中，氧气含量按体积计不应小于 20%。

(2) 隧道内气温不宜大于 28 ℃。

(3) 噪声不应大于 90 dB。

(4) 粉尘浓度，每立方米空气中含有 10% 以上的游离二氧化硅的粉尘不得大于 2 mg。

(5) 有害气体浓度：一氧化碳一般情况下不大于 30 mg/m³，特殊情况下施工人员必须进入工作面时，可为 100 mg/m³，但工作时间不得超过 30 min；二氧化碳按体积计不得大于 0.5%；氮氧化物（换算成 NO₂）在 5 mg/m³ 以下。

(6) 瓦斯隧道爆破时，爆破地点 20 m 以内，风流中瓦斯浓度必须小于 1.0%；总回风道风流中瓦斯浓度小于 0.75%；开挖面瓦斯浓度大于 1.5% 时，所有人员必须撤至安全地点。

3. 现行《煤矿安全规程》规定的卫生标准

现行《煤矿安全规程》于 2015 年 12 月 22 日由国家安全生产监督管理总局第 13 次局长办公会议审议通过，自 2016 年 10 月 1 日实行。该规程规定的卫生标准为：

(1) 采掘工作面的进风流中，氧气浓度不低于 20%，二氧化碳浓度不超过 0.5%。

(2) 有害气体的浓度不超过表 1-1 规定。

(3) 甲烷、二氧化碳和氢气的允许浓度按本规程的有关规定执行。

表 1-1 瓦斯有害气体最高允许浓度

名 称	最大容许浓度/%	名 称	最大容许浓度/%
一氧化碳 CO	0.002 4	硫化氢 H ₂ S	0.000 66
二氧化氮（换算成二氧化氮 NO ₂ ）	0.000 25	氨 NH ₃	0.004
二氧化硫 SO ₂	0.000 5		

4. 现行《金属非金属矿山安全规程》规定的卫生标准

现行《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2006) 由国家安全生产监督管理总局 2006 年 6 月发布，该规程规定的地下矿井的卫生标准为：

(1) 井下采掘工作面进风流中的空气成分（按体积计算），氧气应不低于 20%，二氧化碳不应高于 0.5%。

(2) 入风井巷和采掘工作面的风源含尘量，应不超过 0.5 mg/m³。

(3) 进下作业地点的空气中，有害物质的接触限值应不超过 GBZ 2 的规定。

(4) 含铀、钍等放射性元素的矿山中，井下空气中的氡及其子体的浓度应符合 GB 4792 的规定。

5. 现行《冶金地下矿山安全规程》规定的卫生标准

原冶金工业部、原中国有色金属工业总公司、原劳动部 1990 年 4 月颁发《冶金地下矿山安全规程》，对井下卫生标准做了如下规定：

(1) 井下采掘工作面进风流中的空气成分，氧气含量按体积计不得低于 20%，二氧化碳含量按体积计不得高于 0.5%。

(2) 井下所有作业地点的空气含尘量不得超过 2 mg/m^3 ，入风井巷和采掘工作面的风源含尘量不得超过 0.5 mg/m^3 。

(3) 井下作业地点（无柴油装备的矿井），有毒有害气体的浓度不得超过表 1-2 的规定。

(4) 使用柴油机设备的矿井，井下作业地点有毒有害气体的浓度应符合下列规定：一氧化碳小于 60 mg/m^3 ，氧化氮含量小于 10 mg/m^3 ，甲醛小于 6 mg/m^3 ，丙烯醛小于 0.6 mg/m^3 。

(5) 采掘工作面的空气温度不得超过 27°C ；热水型矿井和高硫矿井的空气温度不得超过 27.5°C 。

(6) 作业场所空气中的粉尘浓度应符合《工业企业设计卫生标准》（TJ 36）的有关规定。

表 1-2 冶金矿井有害气体最高容许浓度

名 称	最大容许浓度 / (mg/m^3)	名 称	最大容许浓度 / (mg/m^3)
一氧化碳 CO	30	硫化氢 H_2S	15
氧化氮（换算成二氧化氮 NO_2 ）	5	氨 NH_3	10

1.1.2 国家卫生标准

国家卫生标准主要包括《工业企业设计卫生标准》（GBZ 1—2015）、《工作场所有害因素职业接触限值 第一部分：化学有害因素》（GBZ 2.1—2007）和《工作场所有害因素职业接触限值 第二部分：物理因素》（GBZ 2.2—2007）。

关于作业场所有害气体的容许浓度包含在《工作场所有害因素职业接触限值 第一部分：化学有害因素》（GBZ 2.1—2007）中，它对 339 中化学物质和 47 中粉尘的容许浓度做了规定。与隧道施工作业环境有关的几种化学物质（有害气体）容许浓度见表 1-3，粉尘容许浓度见表 1-4。

表 1-3 隧道工作场所空气中化学物质容许浓度

序号	中文名	化学文摘号 (CAS No.)	OELs/ (mg/m^3)		
			MAC	PC-TWA	PC-STEL
1	一氧化碳	630-08-0			
	非高原		—	20	30
	高原				
	海拔 2 000 ~ 3 000 m		20	—	—
	海拔 > 3 000 m		15	—	—
2	一氧化氮	10102-43-9	—	15	—

3	二氧化氮	10102-44-0	—	5	10
4	二氧化硫	7446-09-5	—	5	10
5	硫化氢	7783-06-4	10	—	—
6	二氧化碳	124-38-9	—	9 000	18 000

表 1-4 隧道工作场所粉尘浓度

序号	中文名	化学名摘号 (CAS No.)	PC-TWA/ (mg/m ³)		备注
			总尘	呼尘	
1	矽尘	148080-60-7			GI (结晶型)
	10% ≤ 游离 SiO ₂ ≤ 50%		1	0.7	
	50% < 游离 SiO ₂ ≤ 80%		0.7	0.3	
	游离 SiO ₂ > 80%		0.5	0.2	

其中化学物质职业接触限值 (OEL) 包括时间加权平均容许浓度 (PC-TWA)、短间接接触容许浓度 (PC-STEL) 和最高容许浓度 (MAC) 三个指标, 粉尘的容许浓度仅包括时间加权平均容许浓度 (PC-TWA) 一个指标。

时间加权平均容许浓度 (PC-TWA) 是指以时间为权数规定的 8 h 工作日、40 h 工作周的平均容许接触浓度。

短间接接触容许浓度 (PC-STEL) 是指在遵循 PC-TWA 前提下容许短时间 (15 min) 接触的浓度。

最高容许浓度 (MAC) 是指工作地点、在一个工作日内、任何时间有毒化学物质均不应超过的浓度。

1.1.3 国外标准

1. 美国

美国工业卫生学家委员会及 6 个学术团体推荐了职业接触限值。美国劳工部职业安全与卫生署 (OSHA) 在 Federal Register (联邦年鉴) 上公布职业有害因素的容许接触限值 (Permissible Exposure Limits, PELs), 经公众评议修正后, 在第 29 卷“联邦法典”中正式颁布, 作为强制执行的作业场所卫生标准。

美国劳工部职业安全与卫生署 (OSHA) 发布的强制性职业接触限值达 650 余种, 表 1-5 列出了与隧道施工作业环境有关的强制性职业接触限值。

表 1-5 美国隧道施工作业环境有关的强制性职业接触限值

化学物质	化学名摘号 (CAS No.)	PELs ^①	
		/ppm ^②	/(mg/m ³) ^③
二氧化碳	124-38-9	5 000	9 000
一氧化碳	630-08-0	50	55
硫化氢	7783-06-4	—	见表 1-6

二氧化氮	10102-44-0	5 ^④	9 ^④
二氧化硫	7446-09-5	5	13

注：① PELs (除非另行注明) 均为 8 h 的 TWAs。

② 25 °C、760 mmHg 大气压下的蒸汽或气体的体积的 10⁻⁶ 浓度。

③ 浓度单位为 mg/m³。

④ 表示的是上限值。

表 1-6 美国隧道施工作业环境有关的强制性职业接触限值附表

化学物质	8 h 加权平均值	可接受的上限浓度	超过可接受上限浓度时 8 h 一次可接受极限值	
			浓度	最长持续时间
硫化氢	—	20 ppm	50 ppm	10 min, 不得已的情况下

2. 德 国

德国联邦劳动和社会事务部发布的工作场所化学物质卫生标准，分为最高容许浓度 (MAK) 和生物耐受值 (BTA) 两大部分。MAK 通常为一个工作日或工作班内浓度测定的平均值，而非一次测定值。BTA 也是按一般情况下每天最多接触 8 h，每周 40 h 而制定的。另外，标准还对化学物质的接触上限做了明确的规定，接触上限分为短时间平均值和瞬时值。

1996 年制定的 MAK 的化学物质数量有 700 种，1996 年制定 BTA 的化学物质数量有 44 种。表 1-7 列出与隧道施工作业环境有关的化学物质 MAK。表 1-8 是与表 1-7 对应的化学物质接触的上限。

表 1-7 德国隧道工作场所化学物质标准

化学物质 [CAS 号]	MAK 值		接触 上限	H : S S (P)	致癌物 质分类	孕期 毒性	遗传 毒性	蒸汽压 /(hPa/20 °C)
	/(mL/m ³)	/(mg/m ³)						
一氧化碳 [630-8-0 号]	30	33	II.1			B		
二氧化碳 [124-38-9 号]	5 000	9 000	IV					
二氧化硫 [7746-09-5 号]	2	5	I					
硫化氢 [7783-6-4 号]	10	14	V			II c		
二氧化氮 [10102-44-0 号]	5	9	I					

表 1-8 德国化学物质的接触上限

类别	接触上限		每工作班允许接触的 最多次数
	MAK 倍数	持续时间	
I 局部刺激物	2	5 min, 瞬时值	8
II 2 h 内出现作用的全身毒性			
II.1 : 半减期 < 2 h	2	30 min, 平均值	4

II.2: 半减期 2 h 至 1 个工班	5	30 min, 平均值	2
III 2 h 内出现作用的全身毒性			
半减期 > 1 个工作班 (强蓄积性)	10	30 min, 平均值	1
IV 作用很弱的物质			
MAK > 500 × 10 ⁻⁶	2	60 min, 瞬时值	3
V 有强烈气味的物质	2	10 min, 瞬时值	4

1.2 自然通风

地下工程施工的通风方式按照动力来源分为自然通风和机械通风。自然通风利用的是自然风压，而机械通风利用的是通风机产生的风压。本节只介绍自然通风，机械通风在下节中介绍。

隧道自然通风就是不用风机设备，完全依靠自然风的作用，将施工中产生的污染物排出隧道的一种方法。它不需要设备和电力，非常节省能源和运行费用，是一种理想的通风方式。但这种方法并不是可以随意利用的，它受到隧道内外温差、气象条件、辅助坑道设置、坡度等各因素的制约。要利用自然通风就需要了解它的自然规律。

1.2.1 隧道自然风流

1. 自然风流的形成

隧道内自然风流的形成包括三个方面原因，即隧道内外的温度差、进出风口高点水平气压差和隧道外大气自然风。

1) 温度差

当隧道内外温度不同时，隧道内外空气的密度就不相同，若进、出风口存在高差，就会形成压差，从而产生空气的流动，这种压差被称为热外差。当然温度差不是形成密度差的唯一因素，但密度差通常都是由温度差引起的。

2) 水平气压差

在大的范围内，不同地方气候不同，空气温度、湿度等存在差别，同一水平上的大气压也不相同，即存在水平压力差，气象学上用气压梯度来表示这种气压的差异。所谓气压梯度，就是垂直于等压线的一个向量，以子午线 1 度或 111.1 km 为一个单位距离，在每一个单位距离内气压变化的大小叫做一个气压梯度。

可以看出，气压梯度通常是针对较大范围的概念，在小范围内通常同一水平气压差别很小，可以忽略不计。但在“一年有四季，十里不同天”的山区，贯通特长隧道的进、出口外的温度和湿度通常是不同的，水平气压差就不能不考虑。

3) 隧道外的大气自然风

隧道外吹向洞口的大气自然风，碰到山坡后，其动压的一部分可转换为静压力。这部分动力的大小与大气自然风的方向和风速有关，通常按下式计算：