第1章
Chapter 1

矿井空气

Mine Air

本章主要介绍矿井空气成分、矿井空气中的有害气体及检测、矿井空气的物理参数、矿井空气的热力变化过程、矿井气候。本章内容为进一步学习矿井通风的基本理论奠定了基础。

1.1 矿井空气成分
Composition of Mine Air

1.1.1 地面空气的组成
Composition of Ground Air

众所周知，空气成分以氮气、氧气为主，是长期以来自然界里各种变化所造成的。原始的绿色植物出现前，原始大气以一氧化碳、二氧化碳、甲烷和氨为主。绿色植物出现后，植物在光合作用中释放出的游离氧，使原始大气里的一氧化碳氧化成为二氧化碳，甲烷氧化成为水蒸气和二氧化碳，氨氧化成为水蒸气和氮气。随着植物光合作用的持续进行，空气里的二氧化碳被吸收了大部分，并使空气里的氧气越来越多，最终形成了以氮气和氧气为主的空气成分。

It is well-known that air is mainly composed of nitrogen and oxygen, which is a result of various natural changes over a long period. Before the emergence of primitive green plants, the primitive atmosphere was dominated by carbon monoxide, carbon dioxide, methane, and ammonia. After the appearance of green plants, the free oxygen released by plants during photosynthesis oxidized the carbon monoxide in the primitive atmosphere into carbon dioxide, methane into water vapor and carbon dioxide, and ammonia into water vapor and nitrogen. With the continuous progress of plant photosynthesis, most of the carbon dioxide in the air was absorbed during the process of plant photosynthesis, and the oxygen in the air increased continuously. Eventually, the air composition mainly consisting of nitrogen and oxygen was formed.

在煤矿领域，地面空气的定义是：由干空气和水蒸气组成的混合气体，亦称湿空气。

In the coal mining field, the definition of ground air is: a mixed gas composed of dry air and water vapor, also known as moist air.

干空气是指完全不含水蒸气的空气，主要由氧气(O_2)、氮气(N_2)、二氧化碳(CO_2)、氩气(Ar)、氖气(Ne)、氦气(He)、氪气(Kr)、氙气(Xe)等气体组成。

Dry air refers to air that contains no water vapor at all, and it is mainly composed of gases such as oxygen (O_2), nitrogen (N_2), carbon dioxide (CO_2), argon (Ar), neon (Ne), helium (He), krypton (Kr), and xenon (Xe).

氧气和氮气被视为干空气的恒定组成部分，其在空气中的含量变化非常小，虽然可能因地理位置、温度等因素略有波动，但这些波动范围通常较小。而空气中的可变组成部分（如二氧化碳、甲烷、氨、臭氧等）会随着不同地区的环境、气候以及人为活动等因素的变化而有所不同。此外，干空气中还可能含有微量的氢气、二氧化氮、尘埃等杂质。空气成分通常用体积浓度或质量浓度来表示，前者为某种气体的体积在干空气的总体积中所占的百分比，后者为某种气体的质量在干空气的总质量中所占的百分比。其主要成分如表 1-1 所示。

表 1-1　干空气的组成成分

Table 1-1　Composition of Dry Air

气体成分	所占比例(按体积计)/%	所占比例(按质量计)/%	备　注
氧气(O_2)	20.96	23.23	稀有气体氦、氖、氩、氪、氙等计入氮气中
氮气(N_2)	79.0	76.71	
二氧化碳(CO_2)	0.04	0.06	

湿空气中含有水蒸气，其含量的变化会引起湿空气的物理性质和状态变化。在混合空气中，水蒸气的浓度随地区和季节而变化，其平均体积浓度约为 1%，此外，还含有尘埃和烟雾等杂质，有时会污染局部地区的地面空气。

地面空气进入矿井后称为矿井空气，即来自地面的新鲜空气、井下产生的有害气体及浮尘的混合体。

1.1.2　井下空气成分的生成
Formation of Underground Air Composition

地面空气进入井下后，因发生物理和化学两种变化，使其成分种类增多，各种成分的浓度有所改变。

1. 物理变化
Physical Change

井下空气的物理变化有气体混入、固体混入和气象变化 3 种。

There are three types of physical changes in underground air: gas mixing, solid mixing, and meteorological changes.

气体混入是指瓦斯、二氧化碳和硫化氢等气体从地层中涌出并进入井下空气。多数矿井存在瓦斯涌出现象，但涌出量的大小不同，有些矿井瓦斯涌出量高达 40～50 m^3/min，有

些矿井还伴随瓦斯涌出氮气、二氧化硫和氢气等气体。

固体混入是指井下各种作业所产生的微小岩尘、煤尘，柴油机产生的烟尘和其他杂尘浮游在井下空气中。

气象变化主要是指井下空气的温度、气压和湿度的变化引起井下空气体积和浓度的变化。

2. 化学变化
Chemical Change

井下空气的化学变化：井下一切物质(煤、岩石、坑木等)的缓慢氧化、爆破工作、火区氧化(采空区的煤炭被空气氧化而逐渐起火的自燃现象)和人员的呼吸等都会产生二氧化碳；井下的爆破工作、火区氧化和机械润滑油高温分解等都能产生一氧化碳；井下火区氧化和含硫煤的水解都能产生硫化氢；井下火区氧化和含硫煤的缓慢氧化都能产生二氧化硫；井下爆破工作能产生氧化氮；井下充电硐室的电解能产生氢；井下火区氧化能产生氨。

Chemical Changes of Underground Air: Slow oxidation of all underground substances (coal, rock, pit wood, etc.), blasting operations, spontaneous combustion period (a spontaneous combustion phenomenon where coal in gobs is gradually ignited by oxidation with air), and personnel respiration can all produce carbon dioxide; Blasting operations, spontaneous combustion period, and high-temperature decomposition of mechanical lubricating oil underground can all generate carbon monoxide; spontaneous combustion period and hydrolysis of sulfur-containing coal underground can produce hydrogen sulfide; spontaneous combustion period and slow oxidation of sulfur-containing coal underground can generate sulfur dioxide; Blasting operations underground can produce nitrogen oxides; Electrolysis in underground charging chambers can generate hydrogen; spontaneous combustion period underground can produce ammonia.

以上化学变化的结果，不仅使井下空气的成分种类和浓度发生变化，而且各种化学变化都要消耗空气中的氧而产生二氧化碳，使井下空气中的氧含量减少，二氧化碳含量增加。就煤矿而言，井下空气的成分种类共有氧、甲烷、二氧化碳、一氧化碳、硫化氢、二氧化硫、氮、氧化氮(二氧化氮或五氧化二氮)、氢、氨、水蒸气和浮尘 12 种。井下空气也是湿空气。由于各矿的具体条件不同，各矿的井下空气成分种类和浓度都不相同。

在上述井下空气成分中，氧气必须保持足够的浓度；其余 9 种(水蒸气除外)气体和浮尘超过一定浓度时，对人体都是有害的，必须把它们的浓度降低到没有危害的程度。在这 9 种气体中，一氧化碳、硫化氢、二氧化硫和氧化氮(二氧化氮或五氧化二氮)超过一定浓度时，还能使人体中毒，故称这 9 种气体为有毒有害气体，又称为广义的矿井瓦斯；而狭义的矿井瓦斯则专指甲烷。

1.1.3 矿井空气的主要成分及基本性质
Main Components and Basic Properties of Mine Air

1. 氧气
Oxygen

氧气是维持人体正常生理机能所需的气体，相对密度为 1.105，比空气重。人体维持正

常生命过程所需的氧气量取决于人的体质、精神状态和劳动强度等。一般情况下，人体输氧量与劳动强度的关系如表 1-2 所示。

Oxygen is a gas required to maintain the normal physiological functions of the human body, with a relative density of 1.105, which is heavier than air. The amount of oxygen needed by the human body to maintain normal life processes depends on factors such as a person's physical fitness, mental state, and labor intensity. Under normal circumstances, the relationship between the human body's oxygen delivery volume and labor intensity is shown in Table 1-2.

表 1-2　人体输氧量与劳动强度的关系

Table 1-2　Relationship Between Human Body's Oxygen Delivery Volume and Labor Intensity

劳 动 强 度	呼吸空气量/(L/min)	氧气消耗量/(L/min)
休息	6～15	0.2～0.4
轻劳动	20～25	0.6～1.0
中等劳动	30～40	1.2～2.6
重劳动	40～60	1.8～2.4
极重劳动	40～80	2.5～3.1

当空气中的氧浓度降低时，人体可能产生不良的生理反应，出现种种不舒适的症状，严重时可导致缺氧死亡。人体缺氧症状与空气中氧浓度的关系如表 1-3 所示。

表 1-3　人体缺氧症状与空气中氧浓度的关系

Table 1-3　Relationship Between Human Hypoxia Symptoms and Oxygen Concentration in Air

氧浓度(体积分数)/%	主 要 症 状
17	静止时无影响，工作时能引起喘息和呼吸困难
15	呼吸及心跳急促，耳鸣目眩，感觉和判断能力降低，失去劳动能力
10～12	失去理智，时间稍长有生命危险
6～9	失去知觉，呼吸停止，如不及时抢救，几分钟内可导致死亡

空气中氧浓度降低的主要原因：人员呼吸，煤岩和其他有机物的缓慢氧化，煤炭自燃，瓦斯、煤尘爆炸。此外，煤岩氧化和生产过程中产生的各种有害气体，也使空气中的氧浓度相对降低。

2. 二氧化碳
Carbon Dioxide

二氧化碳不助燃，也不能供人呼吸，略带酸臭味。二氧化碳比空气重（其相对密度为1.52），在风速较小的巷道中，底板附近浓度较大；在风速较大的巷道中，一般能与空气均匀混合。空气中二氧化碳对人体的危害程度与浓度的关系如表 1-4 所示。

Carbon dioxide does not support combustion and cannot be used for human respiration, with a slight acidic odor. It is heavier than air (its relative density is 1.52), in roadways with low wind velocity, its concentration near the floor is relatively high; in roadways with high wind velocity, it can generally mix evenly with air. The relationship

between the degree of harm of carbon dioxide in air to the human body and its concentration is shown in Table 1-4.

表 1-4 二氧化碳对人体的危害程度与浓度的关系

Table 1-4 Relationship Between the Degree of Harm of Carbon Dioxide to Human Body and Its Concentration

二氧化碳浓度(体积分数)/%	主 要 症 状
1	呼吸加深,对工作效率无明显影响
3	呼吸急促,心跳加快,头痛,人体很快疲劳
5	呼吸困难,头痛,恶心,呕吐,耳鸣
6	严重喘息,极度虚弱无力
7～9	动作不协调,大约 10 min 可发生昏迷
10～11	几分钟内可导致死亡

矿井空气中二氧化碳的主要来源:煤和有机物的氧化,人员呼吸,碳酸盐岩石分解,炸药爆破,煤炭自燃,瓦斯、煤尘爆炸等。此外,有的煤层和岩层中也能长期连续地放出二氧化碳,有的甚至能与煤岩粉一起突然大量喷出二氧化碳,给矿井带来极大危害。

3. 氮气
Nitrogen

氮气是一种惰化气体,它本身无毒、不助燃,也不供呼吸。但空气中氮含量升高,势必造成氧含量相对降低,从而也可能造成人员的窒息性伤害。正因为氮气具有惰性,所以可将其用于井下防火、灭火和防止瓦斯爆炸。

Nitrogen is an inert gas. It is non-toxic, does not support combustion, and cannot be used for respiration itself. However, an increase in nitrogen content in the air will inevitably lead to a relative decrease in oxygen content, which may also cause suffocation injuries to personnel. Precisely because of its inertness, nitrogen can be used for underground fire prevention, fire extinguishing, and prevention of gas explosions.

矿井空气中氮气的主要来源:井下爆破和生物的腐烂,有些煤岩层中氮气涌出,灭火过程中人为注氮。

1.1.4 矿井空气主要成分的质量(浓度)标准
Quality (Concentration) Standards for Main Components of Mine Air

《煤矿安全规程》对不同工况下矿井空气中主要成分(氧气、二氧化碳)的浓度标准作出明确的规定,如表 1-5 所示。

表 1-5 不同工况下矿井空气中主要成分的浓度标准

Table 1-5 Concentration Standards of Main Components in Mine Air Under Different Working Conditions

工 况	最高允许浓度(体积分数)/%		最低检出浓度(体积分数)/%
	二氧化碳	甲烷	氧气
采区回风巷、采掘工作面回风巷风流	1.5	1.0	—
矿井总回风巷或者一翼回风巷	0.75	0.75	—

续表

工　　况	最高允许浓度(体积分数)/%		最低检出浓度(体积分数)/%
	二氧化碳	甲烷	氧气
采掘工作面的进风流	0.5	—	20
矿井开拓新水平和准备新采区的回风流	0.5	0.5	—
甲烷浓度超过1.0%或者二氧化碳浓度超过1.5%的停风区	3.0	3.0	—

1.2 矿井空气中的有害气体
Harmful Gases in Mine Air

1.2.1 空气中常见有害气体
Common Harmful Gases in Air

空气中常见的有害气体：一氧化碳、硫化氢、二氧化氮、二氧化硫、氨气、氢气。

1. 一氧化碳
Carbon Monoxide

一氧化碳是一种无色、无味、无臭的气体，相对密度为0.97，微溶于水，能与空气均匀混合。一氧化碳能燃烧，当空气中一氧化碳浓度(体积分数)在13%～75%时有爆炸危险。

Carbon monoxide is a colorless, odorless, and tasteless gas with a relative density of 0.97, it is slightly soluble in water and can mix evenly with air. Carbon monoxide is flammable, and there is an explosion risk when its volume fraction (concentration) in air ranges from 13% to 75%.

主要危害：一氧化碳进入人体后，首先与血液中的血红蛋白结合，从而减少了血红蛋白与氧结合的机会，使血红蛋白失去输氧功能，进而造成人体血液“窒息”。人体吸入一氧化碳后的中毒症状与空气中一氧化碳浓度和时间的关系如表1-6所示。

表1-6　一氧化碳中毒症状与浓度和时间的关系

Table 1-6　Relationship Between Carbon Monoxide Poisoning Symptoms and Concentration & Exposure Time

一氧化碳浓度(体积分数)/%	主 要 症 状
0.02	2～3 h内可能引起轻微头痛
0.08	40 min内出现头痛、眩晕和恶心；2 h内发生体温和血压下降，脉搏微弱，出冷汗，可能出现昏迷
0.32	5～10 min内出现头痛、眩晕；0.5 h内可能出现昏迷并有死亡危险
1.28	几分钟内出现昏迷和死亡

主要来源：井下爆破，矿井火灾，煤炭自燃以及煤尘、瓦斯爆炸事故等。

2. 硫化氢
Hydrogen Sulfide

硫化氢无色、微甜、有浓烈的臭鸡蛋味，当空气中浓度(体积分数)达到0.0001%即可嗅到。但当浓度较高时，因嗅觉神经中毒麻痹，反而嗅不到。硫化氢相对密度为1.19，易溶于水，在常温、常压下1个体积的水可溶解2.5个体积的硫化氢，所以它可能积存于旧巷的积水中。硫化氢能燃烧，空气中硫化氢浓度(体积分数)为4.3%～45.5%时有爆炸危险。

Hydrogen sulfide is a colorless gas with a faint sweet taste and a strong smell of rotten eggs. Its odor can be detected when its (volume fraction) in the air reaches 0.0001%, yet the olfactory nerves will be poisoned and paralyzed at higher concentrations, making the gas undetectable instead. It has a relative density of 1.19 and is highly soluble in water: 1 volume of water can dissolve 2.5 volumes of hydrogen sulfide under normal temperature and pressure, which is why the gas may accumulate in stagnant water in abandoned roadways. Hydrogen sulfide is flammable, and there is a risk of explosion when its volume fraction in the air ranges from 4.3% to 45.5%.

主要危害：硫化氢剧毒，有强烈的刺激作用，不但能引起鼻炎、气管炎和肺水肿，而且能阻碍生物氧化过程，造成人体缺氧。当空气中硫化氢浓度较低时以腐蚀刺激作用为主，浓度较高时能导致人体迅速昏迷甚至死亡，腐蚀刺激作用往往不明显。硫化氢中毒症状与浓度的关系如表1-7所示。

表1-7 硫化氢中毒症状与浓度的关系

Table 1-7 Relationship Between Hydrogen Sulfide Poisoning Symptoms and Its Concentration

硫化氢浓度(体积分数)/%	主要症状
0.0025～0.003	有强烈臭味
0.005～0.01	1～2 h内出现眼及呼吸道刺激症状，臭味“减弱”或“消失”
0.015～0.02	出现恶心、呕吐、头晕、四肢无力、反应迟钝，眼及呼吸道有强烈刺激症状
0.035～0.045	0.5～1 h内出现严重中毒，可发生支气管炎、肺炎及肺水肿，有死亡危险
0.06～0.07	很快昏迷，短时间内死亡

主要来源：有机物腐烂、含硫矿物的水解、矿物氧化和燃烧、从老空区和旧巷积水中放出。

3. 二氧化氮
Nitrogen Dioxide

二氧化氮是一种褐红色的气体，有强烈的刺激气味，相对密度为1.59，易溶于水。

Nitrogen dioxide is a brownish-red gas with a strong pungent odor, it has a relative density of 1.59 and is highly soluble in water.

主要危害：二氧化氮溶于水后生成腐蚀性很强的硝酸，对眼睛、呼吸道黏膜和肺部有强烈的刺激及腐蚀作用。二氧化氮中毒症状与浓度的关系如表1-8所示。

表 1-8　二氧化氮中毒症状与浓度的关系

Table 1-8　Relationship Between Nitrogen Dioxide Poisoning Symptoms and Its Concentration

二氧化氮浓度(体积分数)/%	主 要 症 状
0.004	2～4 h 内出现咳嗽症状
0.006	短时间内感到喉咙刺激、咳嗽、胸痛
0.01	短时间内出现严重中毒症状，神经麻痹、严重咳嗽、恶心、呕吐
0.025	短时间内可能出现死亡

主要来源：井下爆破工作。

4. 二氧化硫
Sulfur Dioxide

二氧化硫无色、有强烈的硫黄气味及酸味，空气中浓度(体积分数)达到 0.0005%即可嗅到。其相对密度为 2.22，易溶于水。

Sulfur dioxide is colorless with a strong sulfurous odor and a sour taste, and its odor can be detected when its volume fraction in the air reaches 0.0005%. It has a relative density of 2.22 and is highly soluble in water.

主要危害：遇水后生成亚硫酸，进一步氧化形成硫酸，对眼睛及呼吸系统黏膜有强烈的刺激作用，可引起喉炎和肺水肿。

主要来源：含硫矿物的氧化与自燃，在含硫矿物中爆破，以及从含硫矿层中涌出。

5. 氨气
Ammonia

无色、有浓烈臭味的气体，相对密度为 0.596，易溶于水。

Ammonia is a colorless gas with a strong pungent odor, having a relative density of 0.596 and being highly soluble in water.

主要危害：氨气对皮肤和呼吸道黏膜有刺激作用，可引起喉头水肿。其空气浓度(体积分数)达 30%时有爆炸危险。

主要来源：爆破工作、注凝胶、水灭火等；部分岩层中也有氨气涌出。

6. 氢气
Hydrogen

无色、无味、无毒，相对密度为 0.07。氢气能自燃，其燃点温度比甲烷低 100～200℃。

It is colorless, odorless and non-toxic, with a relative density of 0.07. Hydrogen is capable of spontaneous combustion, and its ignition temperature is 100℃ to 200℃ lower than that of methane.

主要危害：当空气中氢气浓度(体积分数)为 4%～74%时有爆炸危险。

主要来源：井下蓄电池充电时可放出氢气，有些中等变质的煤层中也有氢气涌出，或者煤氧化过程也可产生氢气。

1.2.2　矿井空气中有害气体的安全浓度标准
Safety Concentration Standards for Harmful Gases in Mine Air

《煤矿安全规程》对常见有害气体的安全标准做了明确规定，井下部分有害气体的浓度不得超过表 1-9 的规定。

表 1-9　矿井有害气体最高允许浓度

Table 1-9　Maximum Allowable Concentrations of Harmful Gases in Mines

名　　称	最高允许浓度（体积分数）/%	名　　称	最高允许浓度（体积分数）/%
一氧化碳	0.0024	硫化氢	0.00066
氧化氮（换算成二氧化氮）	0.00025	氨	0.004
二氧化硫	0.0005		

1.2.3　有害气体检测
Harmful Gas Detection

随着时代的发展，煤矿井下监测监控技术装备也在不断地更新迭代。针对井下有毒有害气体的检测，涌现出包括 CD10 型多参数气体检测仪、BMK-Ⅲ便携式煤矿气体检测仪、有毒有害气体检测仪、KYS-400 型复合气体分析仪等一系列仪器（图 1-1），为煤矿安全提供了先进可靠的检测手段。下面具体以 CD10 型多参数气体检测仪为例，介绍该仪器的一些特点。

With the development of the times, the monitoring and control technology and equipment in underground coal mines have been continuously updated and upgraded. For the detection of toxic and harmful gases underground, a series of instruments have emerged, including the CD10 multi-parameter gas detector, BMK-Ⅲ portable coal mine gas detector, toxic and harmful gas detector, and KYS-400 composite gas analyzer (Fig. 1-1). These instruments also provide advanced and reliable detection methods for coal mine safety. The following takes the CD10 multi-parameter gas detector as a specific example to introduce some of its characteristics.

规格：180 mm×50 mm×90 mm。

技术参数：温度 0～40℃，湿度＜95%（25℃，大气压 80～110 kPa，贮存温度－40～60℃）。

工作环境：具有爆炸性气体混合物的煤矿井下危险场所。

Working environment: hazardous locations underground in coal mines with explosive gas mixtures.

主要用途：用于煤矿井下有毒有害气体（甲烷、一氧化碳、二氧化氮、二氧化碳、硫化氢、二氧化硫）、氧气、可燃性气体及温度、湿度检测。

Main purpose: used for detecting toxic and harmful gases (methane, carbon monoxide, nitrogen dioxide, carbon dioxide, hydrogen sulfide, sulfur dioxide), oxygen,



图 1-1　井下有毒有害气体检测仪器

Fig. 1-1　Underground Toxic and Harmful Gas Detection Instruments

（a）CD10 型多参数气体检测仪；（b）BMK-Ⅲ便携式煤矿气体检测仪；（c）KYS-400 型复合气体分析仪

(a) CD10 Multi-parameter Gas Detector; (b) BMK-Ⅲ Portable Coal Mine Gas Detector; (c) KYS-400 Composite Gas Analyzer

flammable gases, as well as temperature and humidity in underground coal mines.

优点：响应时间快、性能稳定可靠，低漂移，长寿命，体积小方便携带，随时随地进行高效检测。

Advantages: fast response time, stable and reliable performance, low drift, long service life, small size for easy portability, enabling efficient detection anytime and anywhere.