

高原地区室内富“氧”空间氧压系统分析计算

刘亚姣, 张 麇, 党俊虎, 徐建楠, 查吕应, 赵 宇

(军事科学院国防工程研究院, 湖北 武汉 430015)

摘要:在传统弥散供氧创造富氧空间的基础上,提出了广义的富“氧”空间,即利用空气加压设备向室内空间加压、利用制供氧设备向室内空间弥散供氧两种方式相结合的手段提升室内空间氧分压。从理论层面对加压富“氧”和增氧富“氧”的原理进行了分析计算,并给出了不同海拔室内空气氧分压提升至临界氧分压时室内需要的加压幅度和增氧幅度,结果表明通过空气加压、弥散供氧均可有效提升室内空气氧分压、降低等效海拔。此外,基于暖通空调相关标准规范和流体力学理论,分别给出了加压富“氧”、增氧富“氧”系统的计算方法,并对各系统的设计计算和效果分析进行了分析和案例计算。案例计算结果表明,为使室内空间快速充压到预设压力值,应尽量保持风机满风量运行,待完成充压后,可根据室内人员数量、空气污浊程度等实时调节风量大小,为高原地区室内广义富“氧”空间氧压系统工程设计提供借鉴和参考。

关键词:高原地区;富“氧”空间;加压;增氧;氧分压;等效海拔

中图分类号:TU83

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2025)01-0016-10

Analysis and calculation of oxygen pressure system in indoor oxygen-rich space in plateau areas

LIU Yajiao, ZHANG Ao, DANG Junhu, XU Jiannan, ZHA Lüying, ZHAO Yu

(Institute of National Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Wuhan 430015, China)

Abstract: A generalized “oxygen rich” space was proposed in this study on the basis of the traditional oxygen rich space created by diffusion oxygen supply. The oxygen partial pressure of indoor space was increased by the combination of pressurizing the indoor space with air pressurizing equipment and diffusing the oxygen supplying equipment to the indoor space. The principle of oxygen enrichment by pressure and oxygen enrichment by increase was analyzed and calculated theoretically, and the required amplitude of pressure and oxygen enhancement was given when the oxygen partial pressure of indoor air at different altitudes was raised to the critical oxygen partial pressure. The results showed that the oxygen partial pressure of indoor air can be effectively increased and the equivalent altitude could be reduced by air pressure and oxygen enrichment. In addition, based on HVAC related standards and fluid mechanics theory, the calculation methods of pressurized and oxygen-enriched systems were given respectively, and the design calculation, effect analysis and case calculation of each system were analyzed. The case calculation results showed that in order to make the indoor space quickly pressurized to the preset pressure value, the fan should be kept running at full air volume as far as possible. After the pressurization was completed, the air volume could be adjusted in real time according to the number of indoor personnel and the degree of air pollution. It provided reference for the engineering design of oxygen pressure system of the generalized “oxygen rich” space in plateau area.

Keywords: plateau area; oxygen rich space; pressurize; oxygenate; oxygen partial pressure; equivalent altitude

收稿日期:2024-06-12

作者简介:刘亚姣(1991-),男,工程师,博士,研究方向:国防工程内部环境,新能源开发与利用。E-mail:lyj199164@126.com

通信作者:张麇(1969-),男,正高级工程师,博士,研究方向:工程结构设计与防护。E-mail:15520082050@163.com

我国幅员辽阔、地势西高东低,高原地区约占全国陆地总面积的四分之一.由于高原地区空气稀薄、氧压环境恶劣,严重损害高原地区人员身体健康,特别是对于刚进入高原的低海拔人员,普遍存在较严重的高原反应^[1-5].为改善高原地区人员工作生活环境,相关学者提出了利用制供氧设备以扩散的方式向建筑室内空间供氧的富氧方式^[6-10],该方式可以通过弥散供氧形成室内富氧环境,相比传统鼻吸式补氧手段,舒适度更高、更便于人员室内活动.王莹莹等^[11]针对高原建筑室内工作点位提出了个性化弥散供氧策略,模拟分析了不同因素影响下工作点位的氧扩散过程.冉庄等^[12]研发了新型弥散供氧住宿方舱,实验测试表明通过弥散供氧方式吸氧能显著提高机体的心肺供氧能力,有效缓解高原缺氧寒冷环境对人体代谢的影响.另有相关高原医学研究表明^[13-17],空气氧分压是影响人体氧气吸收利用的关键因素.如图 1 所示,对室内空气“加压”和“增氧”均可提升室内空气氧分压,从而促进人体对氧的吸收、缓解高原缺氧症状.为此,本文在传统弥散供氧手段富氧的基础上,提出了广义的富“氧”空间,即利用空气加压设备向室内空间加压、利用制供氧设备向室内空间弥散供氧两种方式相结合的手段提升室内空间氧分压.

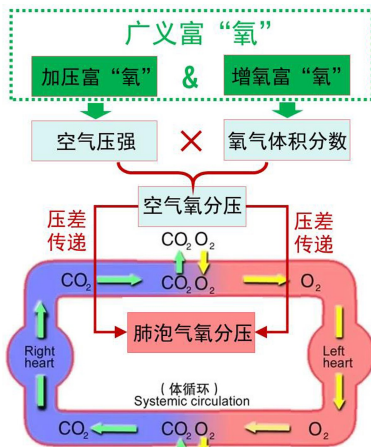


图 1 人体氧气吸收过程示意图

Fig. 1 Diagram of the oxygen absorption process in the human body

本研究通过对室内空间广义富“氧”原理进行分析,根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736 - 2012)^[18]、《高原地区室内空间弥散供氧(氧调)要求》(GB/T 35414 - 2017)^[19]等标准规范,分别给出了加压富“氧”、增氧富“氧”所需加压送风

系统、弥散供氧系统的设计计算方法,并结合某高原地区室内富“氧”空间工程案例进行氧压系统分析计算,为高原地区室内广义富“氧”空间氧压系统设计提供借鉴和参考.

1 室内空间富“氧”原理

空气氧分压(PO_2)指空气中氧气所占分压强的 大小,是影响人体氧气吸收过程的主要指标,其计算公式如式(1)所示.

$$PO_2 = P \times FO_2, \quad (1)$$

式中, PO_2 为空气氧分压(Pa); P 为空气压强(Pa); FO_2 为空气中氧气的体积分数,为恒定值,约 21%.

由上式(1)可知,对室内空间加压提升空气压强(P)、对室内空间弥散供氧提升氧气的体积分数(FO_2)均可提高室内空气氧分压(PO_2),达到室内空间广义富“氧”的目的.

1.1 加压富“氧”原理

在空气中氧气体积分数(FO_2)不变的情况下,通过上式(1)计算出了不同海拔条件下(3 000 m, 4 000 m, 5 000 m)分别使室内压强提升 10 kPa、20 kPa、30 kPa、40 kPa、50 kPa 对应室内空气氧分压变化情况,如图 2 所示.例如在 5 000 m 海拔高度,当对室内空气进行加压时,室内空气压强(P)分别提升 10 kPa、20 kPa、30 kPa、40 kPa、50 kPa 时,室内空气氧分压(PO_2)分别为:13.4 kPa、15.5 kPa、17.6 kPa、19.7 kPa、21.8 kPa,表明采用室内加压的方式可有效提升室内氧分压.

为了更为直观地展示加压建筑促进人体氧气吸收利用的效果,引入等效海拔(H_E)的概念,其计算公式如式(2)所示.

$$H_E = 44329 - 44329 \times \left(\frac{P_z + \Delta P}{101325} \right)^{1/5.255876}, \quad (2)$$

式中, H_E 为等效海拔(m); P_z 为海拔 z 处当地大气压强(Pa); ΔP 为室内加压大小(Pa).

在空气中氧气体积分数(FO_2)不变的情况下,通过上式(1)和(2)计算出了不同海拔条件下(3 000 m, 4 000 m, 5 000 m)分别使室内压强提升 10 kPa、20 kPa、30 kPa、40 kPa、50 kPa 对应室内的等效海拔大小,如图 3 所示.可以看出,采用室内加压的方式可有效降低室内等效海拔.

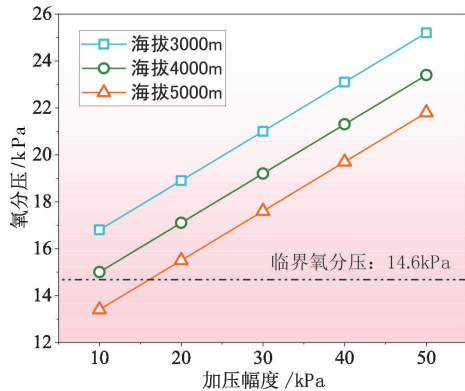


图 2 不同海拔室内空气氧分压随加压力度变化情况

Fig. 2 Changes of indoor oxygen partial pressure with pressure amplitude at different altitudes

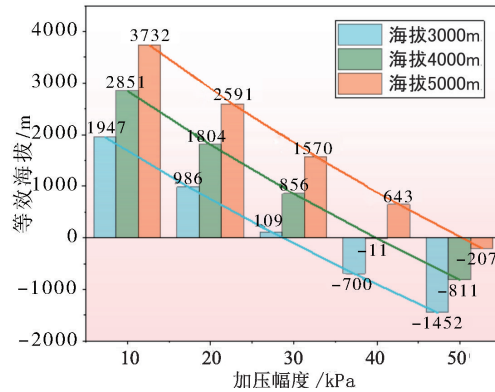


图 3 不同海拔室内等效海拔随加压力度变化情况

Fig. 3 Changes of indoor equivalent altitude with pressure amplitude at different altitudes

根据人体缺氧危险程度划分^[20],存在一个临界空气氧分压: $PO_2 = 14.6 \text{ kPa}$,约等于 3 000 m 海拔高度的大气空气氧分压值,当空气氧分压低于该值时,人体即会出现缺氧危险.根据上式(1),可以计算出不同海拔条件下(3 000 m,4 000 m,5 000 m),分别使加压建筑室内氧分压提升至临界氧分压时室内需要的加压力度,如表 1 所示.

表 1 不同海拔室内空气氧分压提升至 14.6 kPa 时室内需要的加压力度

Table 1 The pressure amplitude required to raising the indoor oxygen partial pressure to 14.6 kPa at different altitudes

海拔高度/m	加压力度/kPa
3 000	0
4 000	7.9
5 000	15.5

在室内空气压强(P)不变的情况下,通过上式(1)计算出了不同海拔条件下(3 000 m,4 000 m,5 000 m),分别使室内氧气体积分数(FO_2)提升 1%、2%、3%、4%、5% 对应室内空气氧分压变化情况,如图 4 所示.例如在 5 000 m 海拔高度,当对室内空间弥散供氧时,室内氧气体积分数(FO_2)分别提升 1%、2%、3%、4%、5% 时,室内空气氧分压(PO_2)分别为:13.4 kPa、15.5 kPa、17.6 kPa、19.7 kPa、21.8 kPa,表明采用室内增氧的方式也可有效提升室内氧分压.

同样地,在室内空气压强(P)不变的情况下,通过上式(1)和(2)计算出了不同海拔条件下(3 000 m,4 000 m,5 000 m)分别使室内氧气体积分数(FO_2)提升 1%、2%、3%、4%、5% 对应室内的等效海拔大小,如图 5 所示.可以看出,采用室内加压的方式可有效降低室内等效海拔.

1.2 增氧富“氧”原理

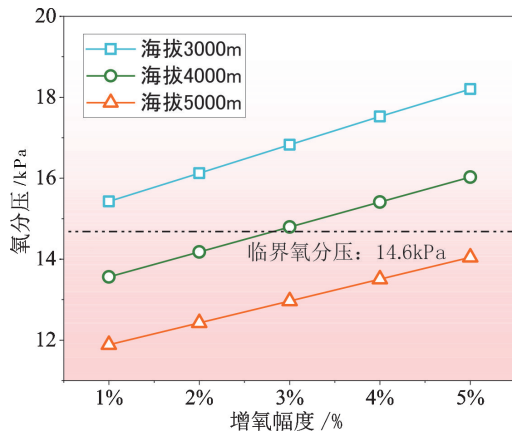


图 4 不同海拔室内空气氧分压随增氧幅度变化情况

Fig. 4 Changes of indoor oxygen partial pressure with oxygen increase amplitude at different altitudes

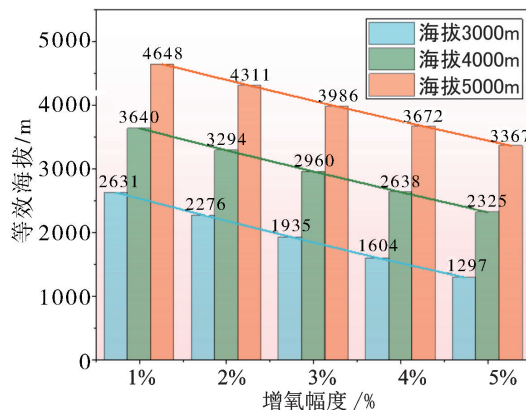


图 5 不同海拔室内等效海拔随增氧幅度变化情况

Fig. 5 Changes of indoor equivalent altitude with oxygen increase amplitude at different altitudes

同样根据上式(1),可以计算出不同海拔条件下(3 000 m,4 000 m,5 000 m)分别使加压建筑室内氧分压提升至临界氧分压时室内需要的增氧幅度,如表 2 所示.

表 2 不同海拔室内空气氧分压提升至 14.6 kPa 时室内需要的增氧幅度

Table 2 The oxygen increase amplitude required to raising the indoor oxygen partial pressure to 14.6 kPa at different altitudes

海拔高度/m	增氧幅度/%
3 000	0
4 000	2.7
5 000	6.0

2 加压富“氧”计算方法

加压富“氧”系统主要是通过风机不断向室内空间超压送风,借助送风、排风平衡稳定室内超压状态,该系统的计算依据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012)^[18]、《全国民用建筑工程设计技术措施-暖通空调·动力》(2009 年版)^[21]等标准规范.此外,为防止人员进出加压空间时泄压情况的发生,加压空间划分为加压间、过渡间两个区域,两个区域均包含加压送风、平衡排风、紧急泄压三个系统.

2.1 加压送风系统

当采用加压富“氧”时,对室内空间的密闭性要求较高,无法保证自然通风换气,依据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50736-2012)^[18],当室内空间作为办公、住宿使用时,每人所需最小新风量应达到 $30 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$,此时加压送风量可通过式(3)计算.

$$Q_{in} = 30 \times N, \quad (3)$$

式中, Q_{in} 为加压送风量(m^3/h); N 为室内空间人数.

风管产生的噪声是影响室内人员工作生活的重要因素,《全国民用建筑工程设计技术措施-暖通空调·动力》(2009 年版)^[21]规定了不同室内噪声级要求下主管风速、支管风速的允许范围,如表 3 所示.结合表 3 和加压送风量可计算出加压送风主管、支管的管径.

2.2 平衡排风系统

当室内空间完成充压后需保持超压、恒压状态稳

定运行,根据质量守恒定律可知,此时排风量等于送风量减去建筑漏风量,如下式(4).同样为避免排风管流速过快产生气动噪声,应根据表 3 计算排风管的管径.

$$Q_{out} = Q_{in} - Q_{lou} = 30 \times N - Q_{lou}, \quad (4)$$

式中, Q_{out} 为平衡排风量(m^3/h); Q_{in} 为加压送风量(m^3/h); N 为室内空间人数; Q_{lou} 为加压建筑漏风量(m^3/h).考虑到采用加压方式富氧时建筑内外压差较大,常规建筑已无法满足气密性需求,针对此类加压建筑应采用特定技术手段对结构形式、耐高压建筑材料、耐高压密封面进行处理,以满足高压条件下的气密要求,漏风量可参考《氧舱》(GB/T 12130-2020)^[22]中规定的 15%/h 泄漏率限值.

表 3 不同室内噪声级要求下主管风速、支管风速的允许范围

Table 3 Allowable range of main wind speed and branch wind speed under different indoor noise level requirements

室内允许噪声级/dB(A)	主管风速/m/s	支管风速/m/s
25 ~ 35	3 ~ 4	≤ 2
35 ~ 50	4 ~ 7	2 ~ 3
50 ~ 65	6 ~ 9	3 ~ 5
65 ~ 85	8 ~ 12	5 ~ 8

注:资料来源于《全国民用建筑工程设计技术措施-暖通空调·动力》(2009 年版)^[21].

2.3 紧急泄压系统

由于加压富“氧”空间始终保持超压状态,为保障内部人员的使用安全,需设置紧急泄压系统,在发生意外状况时能够实现室内快速泄压至外界大气压水平.参考流体力学亚声速可压缩气体节流小孔充放气系列公式(5)~(13),可计算出紧急泄压系统的泄流量、泄压管径等主要参数^[23].

$$Q_z = 3.9 \times 10^{-3} \times S \times \sqrt{(P_1 - P_0) \times P_1} \times \sqrt{\frac{273.16}{273.16 + T_1}}. \quad (5)$$

$$Q_z = Q_x \times \frac{P_1}{P_0}. \quad (6)$$

$$Q_x = \frac{\Delta m_x}{\rho_0 t_x \times 60}. \quad (7)$$

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4}. \quad (8)$$

$$P_1 = P_0 + \Delta P. \quad (9)$$

$$P_0 = 0.101325 \times \left(1 - \frac{0.0065 \times H_0}{288.15}\right)^{5.526}. \quad (10)$$

$$\rho_0 = \frac{1.293 \times P_0}{0.101325} \times \frac{273.16}{273.16 + T_0}. \quad (11)$$

$$\Delta m = \frac{\Delta P \times V \times M}{R \times (273.16 + T_1)} \times 10^3. \quad (12)$$

$$\Delta m_x = \Delta m - m_{lou}. \quad (13)$$

式中, Q_z 为自由空气流量 (m^3/s); Q_x 为泄压流量 (m^3/s); S 为泄压有效截面积 (mm^2); D 为管内径 (mm); P_1 为节流小孔上游绝对压力, 即室内压力 (MPa); P_0 为节流小孔下游绝对压力, 即室外大气压力 (MPa); ΔP 为节流小孔上下游绝对压力差, 即室内加压幅度 (MPa); H_0 为室内空间所处海拔高度 (m); T_1 为节流小孔上游热力学温度, 即室内温度 ($^\circ\text{C}$); T_0 为室外大气温度 ($^\circ\text{C}$); Δm 为补气质量 (kg); ρ_0 为室外当地空气密度 (kg/m^3); V 为室内空间体积 (m^3); R 为理想气体常数, 为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M 为空气的摩尔质量, 为 $28.96 \text{ g}/\text{mol}$; t_x 为泄压时间 (min), 参考《氧舱》(GB/T12130 - 2020)^[22] 取 1 min ; Δm_x 为泄压质量 (kg); m_{lou} 为漏气质量 (kg).

3 增氧富“氧”计算方法

增氧富“氧”主要是利用制供氧设备向室内空间弥散供氧, 达到提升室内氧气体积分数的目的. 该系统的计算依据《高原地区室内空间弥散供氧(氧调)要求》(GB/T 35414 - 2017)^[19]、《西藏自治区民用供氧工程设计标准》(DJB540004 - 2018)^[24]、《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》(GB/T 7106 - 2019)^[25]、《全国民用建筑工程设计技术措施 - 暖通空调·动力》(2009 年版)^[21] 等标准规范, 结合既有弥散富氧工程案例, 由于补充的氧气弥散分布于整个室内空间, 若采取机械通风手段会导致弥散氧气持续随排风排出室外, 造成氧气资源的持续浪费, 故普遍采取自然通风的手段, 弥散供氧期间门窗处于封闭状态且无机械送排风, 当内部 CO_2 等污染物升高时适时短暂开窗通风. 考虑到开窗通风为适时短暂行为(暂不考虑该时刻的室内氧浓度维持), 从制氧设备选型经济性出发, 弥散供氧期供氧量主要包括了空间富氧需氧量和人员耗氧量, 可通过下式(14)~(16)计算.

$$O_z = O_1 + O_2. \quad (14)$$

$$O_1 = \frac{V \times a\% \times K_1}{\eta}. \quad (15)$$

$$O_2 = \frac{O_R \times N}{\eta}. \quad (16)$$

式中, O_z 为增氧富“氧”空间所需供氧总流量 (m^3/h); O_1 为增氧富“氧”空间每小时氧气体积分数提升 $a\%$ 所需供氧流量 (m^3/h); O_2 为增氧富“氧”空间室内人员所需供氧流量 (m^3/h); V 为室内空间体积 (m^3); η 为制供氧设备出口氧气浓度, 参考分子筛制氧机出口浓度, 取 90% ; N 为室内空间人数; K_1 为房间密封性修正系数, 依据《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法》(GB/T7106 - 2019)^[25], 取 1.67 ; $a\%$ 为增氧富“氧”空间每小时氧气体积分数提升百分比, 参考《西藏自治区民用供氧工程设计标准》(DJB540004 - 2018)^[24], 取 1% ; O_R 为每人每小时耗氧量 ($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$), 参考《西藏自治区民用供氧工程设计标准》(DJB540004 - 2018)^[24] 中从事不同活动的人体耗氧量, 如表 4 所示.

表 4 从事不同活动的人体耗氧量

Table 4 The oxygen consumption of the human body in different activities

活动情况	耗氧量/NL/min
睡眠	0.24
卧位	0.26
办公或坐着休息	0.34
站立、放松	0.36
散步(5 km/h)	0.85
跑步(10 km/h)	2.80

注: 资料来源于《西藏自治区工程建设标准》(DBJ 540004 - 2018)^[24].

4 室内富“氧”空间计算案例

4.1 案例概况

以海拔 5000 m 处某建筑空间为例, 其富“氧”目标是达到临界空气氧分压: $PO_2 = 14.6 \text{ kPa}$ (等效海拔 3000 m), 根据表 1、表 2 可知, 对应加压幅度为 15.5 kPa , 增氧幅度为 6.0% . 该建筑空间的主要信息如表 5 所示. 考虑到加压富“氧”工况下, 密闭空间必须通过机械通风手段保证每人每小时 30 m^3 的新风量, 如果同时进行增氧富“氧”, 利用制供氧设备向室内空

间弥散供氧,会导致室内补充的氧气随排风排出,造成氧气资源的严重浪费.所以,针对本案例,分别进行独立加压富“氧”、独立增氧富“氧”的分析计算.

表 5 某建筑空间主要信息

Table 5 The main information of a building space

所处海拔/m	长(轴线)/m	宽(轴线)/m	层高/m	过渡间长(轴线)/m	墙体厚度/mm	人员数量/人	室内温度/℃	室外温度/℃
5 000	7.5	4.2	3.6	2.1	300(外) 150(内)	5	22	-10

4.2 独立加压富“氧”计算

风量为 $30 \times 5 = 150 \text{ m}^3/\text{h}$,《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736 - 2012)^[18]规定的建筑物内部建筑设备传播至主要功能房间室内的噪声限值如表 6 所示.

4.2.1 加压送风系统

(1) 加压间

依据式(3)可以计算出加压间加压送风系统的送

表 6 建筑物内部建筑设备传播至主要功能房间室内的噪声限值

Table 6 Noise limits for the transmission of construction equipment inside the building to the main function room

房间的使用功能	噪声限值(等效声级 $L_{Aeq,T}$, dB)
睡眠	33
日常生活	40
阅读、自学、思考	40
教学、医疗、办公、会议	45
人员密集的公共空间	55

注:资料来源于《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736 - 2012)^[18].

由于室内超压状态下,对加压管道的强度有一定要求,本案例选择无缝钢管作为加压送风、平衡排风和紧急泄压管道.其中加压间通过加压送风主管和支管从室外大气取气加压,结合表 3“不同室内噪声级

要求下主管风速、支管风速的允许范围”,可以计算出两类建筑用途(睡眠、办公)下加压间的加压送风系统管径,如表 7 所示.

表 7 两类建筑用途(睡眠、办公)下加压间加压送风系统计算表

Table 7 The calculation table of pressurized air supply system in the pressurizing room for two types of building use (sleep, office)

建筑用途	风量/ m^3/h	主管临界 风速/ m/s	支管临界 风速/ m/s	主管 管径/ mm	支管 数量/根	支管 管径/ mm	主管实际风速/ m/s	支管实际风速/ m/s
睡眠	150	4	2	125	5	80	3.4	1.7
办公	150	7	3	100	5	65	5.3	2.5

(2) 过渡间

过渡间通过加压送风管从加压间取气加压,同样按照送风量 $30 \times 5 = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 进行计算,结合表 3“不

同室内噪声级要求下主管风速、支管风速的允许范围”,可以计算出两类建筑用途(睡眠、办公)下过渡间的加压送风系统管径,如表 8 所示.

表 8 两类建筑用途(睡眠、办公)下过渡间加压送风系统计算表

Table 8 The calculation table of pressurized air supply system in the transition room for two types of building use (sleep, office)

建筑用途	风量/ m^3/h	临界风速/ m/s	管道数量/根	管道管径/ mm	实际风速/ m/s
睡眠	150	4	3	80	2.8
办公	150	7	2	80	4.1

4.2.2 平衡排风系统

(1) 加压间

依据上式(4)可以计算出加压间平衡排风系统的排风量为: $150 - 10.9 = 139.1 \text{ m}^3/\text{h}$,参考《民用建筑供

暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736 - 2012)^[18]规定的建筑物内部建筑设备传播至主要功能房间室内的噪声限值,见上表 6,结合表 3 可以计算出两类建筑用途(睡眠、办公)下加压间平衡排风系统排风管数

量及管径,如表 9 所示.

表 9 两类建筑用途(睡眠、办公)下加压间平衡排风系统计算表

Table 9 The calculation table of balanced exhaust system in the pressurizing room for two types of building use (sleep, office)

建筑用途	风量/m ³ /h	临界风速/m/s	排风管数量/根	排风管管径/mm	排风管实际流速/m/s
睡眠	139.1	4	3	80	2.6
办公	139.1	7	3	65	3.9

(2) 过渡间

过渡间在完成充压后,需进行排气泄压,将压力降至与外界大气压一致,在这个过程中,为避免出现明显的气动噪声,管道排气流速应满足表 3“不同室内噪声级要求下主管风速、支管风速的允许范围”的

要求.此时设定过渡间的排气时间与加压时间一致,反推可计算得出两类建筑用途(睡眠、办公)下过渡间平衡排风系统排风管数量及管径,其中,排气质量等于补气质量减去漏风质量,如表 10 所示.

表 10 两类建筑用途(睡眠、办公)下过渡间平衡排风系统计算表

Table 10 The calculation table of balanced exhaust system in the transition room for two types of building use (sleep, office)

建筑用途	排气泄压时间/min	排气质量/kg	临界风速/m/s	排风管数量/根	排风管管径/mm	排风管实际流速/m/s
睡眠	2.2	4.69	4	2	100	2.6
办公	2.2	4.69	7	1	100	5.2

4.2.3 紧急泄压系统

(1) 加压间

为保障内部人员的使用安全,本案例在加压间设置紧急泄压管 1 根,在发生意外状况时能够实现室内

快速泄压至外界大气压水平.根据流体力学亚声速可压缩气体节流小孔充放气系列公式(5)~(13),可计算出两类建筑用途(睡眠、办公)加压间紧急泄压系统的泄压流量、泄压管径等主要参数,如表 11 所示.

表 11 两类建筑用途(睡眠、办公)下加压间紧急泄压系统计算表

Table 11 The calculation table of emergency pressure relief system in the pressurizing room for two types of building use (sleep, office)

建筑用途	泄压质量/kg	室内空间体积/m ³	泄压流量/m ³ /s	泄压有效截面积/mm ²	泄压管管径/mm
睡眠	13.17	72.657	0.32	3 371.0	80
办公	13.17	72.657	0.32	3 371.0	80

(2) 过渡间

为保障内部人员的使用安全,本案例在过渡间设置紧急泄压管 1 根,在发生意外状况时能够实现室内快速泄压至外界大气压水平.根据流体力学亚声速可

压缩气体节流小孔充放气系列公式(5)~(13),可计算出两类建筑用途(睡眠、办公)过渡间紧急泄压系统的泄压流量、泄压管径等主要参数,如表 12 所示.

表 12 两类建筑用途(睡眠、办公)下过渡间紧急泄压系统计算表

Table 12 The calculation table of emergency pressure relief system in the transition room for two types of building use (sleep, office)

建筑用途	泄压质量/kg	室内空间体积/m ³	泄压流量/m ³ /s	泄压有效截面积/mm ²	泄压管管径/mm
睡眠	4.76	26.325	0.11	1 172.5	40
办公	4.76	26.325	0.11	1 172.5	40

4.2.4 加压效果分析

通过上述分析可最终确定本案例独立加压富“氧”系统示意图(办公用途)如图 6 所示,在实际工程设计中,应采用计算流体力学(CFD)数值模拟计算

开展室内空间气流组织设计,对送排风口的布置位置、开口大小等进行合理优化,以保证内部人员的整体舒适性.

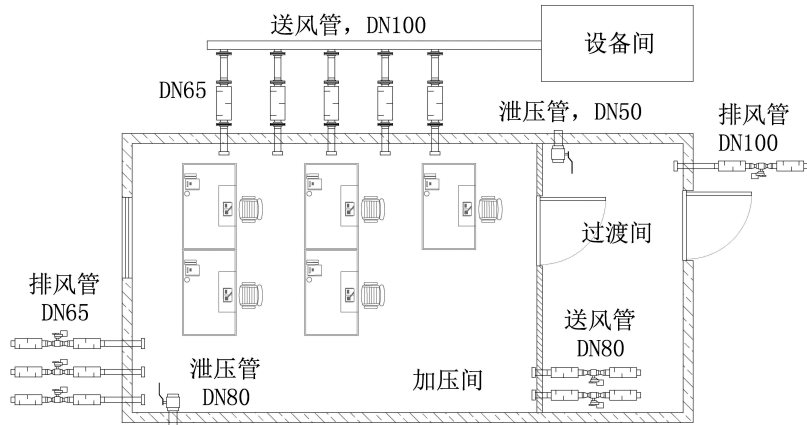


图 6 独立加压富“氧”系统示意图(办公用途)

Fig. 6 Schematic diagram of “oxygen rich” system by independent pressurized method (for office use)

重点针对加压间的加压效果进行分析,加压间加压送风系统的充压时间可通过式(5)~(13)进行计算,加压间的加压速率计算如式(17)所示.

$$v_c = \frac{\Delta P}{t_c} \times 10^3, \quad (17)$$

式中, v_c 为加压速率 (kPa/min); t_c 为加压间加压 15.5 kPa 所需要的时间 (min); ΔP 为加压幅度, 本案例取 0.015 5 MPa.

针对两类建筑用途(睡眠、办公),可计算出加压间在不同加压送风量条件下的室内空气压力变化情况

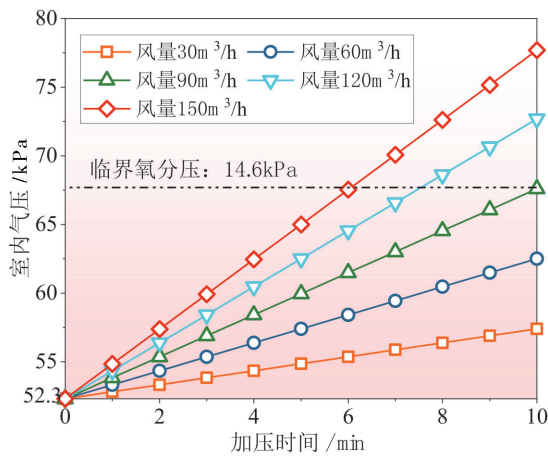


图 7 加压间在不同加压送风量条件下
的室内空气压力变化情况

Fig. 7 Changes of indoor air pressure in the pressurizing room with time under different pressurizing air supply volumes

4.3 独立增氧富“氧”计算

针对本案例海拔 5 000 m 处某建筑空间进行独立增氧富“氧”时,考虑到常驻人员使用空间为加压间,利用制供氧设备仅向加压间进行弥散增氧 6.0%.

况,如图 7、图 8 所示.可以看出,随着加压送风量的增加,室内气压增加速率变大,例如在全风量 150 m³/h 状态运行下,加压间可在 6.1 min 内迅速加压 15.5 kPa,达到预设的临界空气氧分压目标,相比小风量 30 m³/h 状态,所需加压时间缩短了约 79.9%.为此在实际工程应用中,为使室内空间快速充压到预设压力值,应尽量保持风机满风量运行,待完成充压后需保持超压、恒压状态稳定运行,可根据室内人员数量、空气污浊程度等实时调节风量大小.

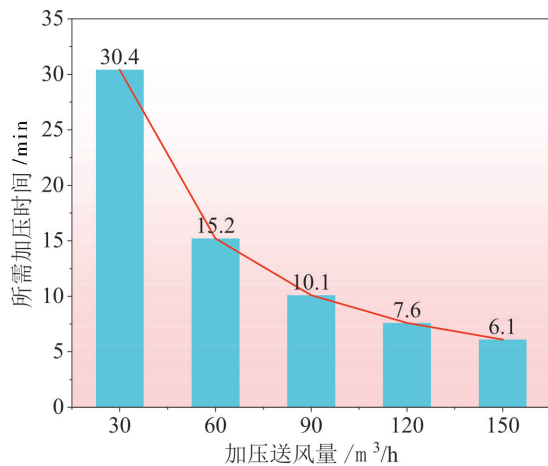


图 8 加压间在不同加压送风量条件
下加压 15.5 kPa 所需时间

Fig. 8 The time required to pressurize 15.5 kPa under different pressurizing air supply volumes in the pressurizing room

依据式(14)~(16)可计算出四类人员使用场景(睡眠、办公、散步、跑步)下加压间所需供氧总流量等主要参数,如表 13 所示.

表 13 四类人员使用场景(睡眠、办公、散步、跑步)下加压间所需供氧总流量计算表

Table 13 The calculation table of the total oxygen increase volume in the pressurizing room for four types of building use (sleep, office, walking, running)

使用场景	室内空间体积/ m ³	每人每小时耗氧量/ m ³ /(h·人)	人员所需供氧流量/ m ³ /h	空间所需供氧流量/ m ³ /h	所需供氧总流量/ m ³ /h
睡眠	72.657	0.014 4	0.08	1.35	1.43
办公	72.657	0.020 4	0.11	1.35	1.46
散步	72.657	0.051	0.28	1.35	1.63
跑步	72.657	0.168	0.93	1.35	2.28

通过上述分析可最终确定本案例独立增氧富“氧”系统示意图(办公用途)如图 9 所示,在实际工程设计中,应采用计算流体力学(CFD)数值模拟计算开展室内空间气流组织设计,对末端供氧口数量、位置等进行合理优化,以保证内部人员的整体舒适性。

依据上表 12,结合式(14)~(16),可推导得出弥散供氧过程中室内空间实时氧气体积分数的计算公式(18)所示。

$$FO_2' = \frac{V \times 21\% + O_z \times \tau \times 90\% - O_R \times N \times \tau}{V} \times 100\% \quad (18)$$

式中, FO_2' 为室内空间实时氧气体积分数(%); τ 为弥散供氧时间(h); V 为室内空间体积,加压间为 72.657 m³; O_z 为增氧富“氧”空间所需供氧总流量(m³/h); O_R 为每人每小时耗氧量(m³/(h·人)); N 为室内空间人数。

针对四类人员使用场景(睡眠、办公、散步、跑步),利用上式(18)可计算出加压间弥散供氧过程中氧气体积分数变化情况,如图 10、图 11 所示.由图可知,四类使用场景(睡眠、办公、散步、跑步)下室内氧气体积分数的变化情况保持一致,随时间呈线性增长,均可在 3.6 h 内补氧达到预设的临界空气氧分压目标。

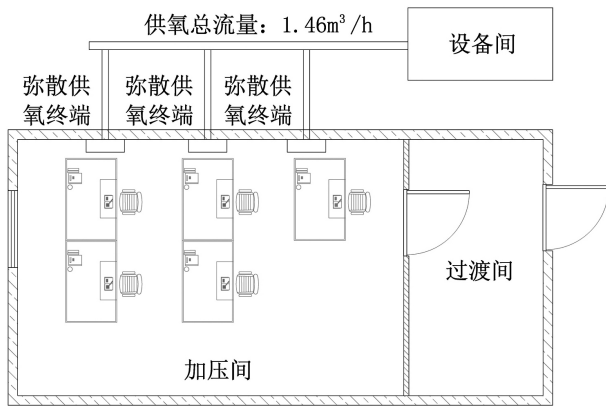


图 9 独立增氧富“氧”系统示意图(办公用途)

Fig. 9 Schematic diagram of “oxygen rich” system by independent oxygen enrichment method (for office use)

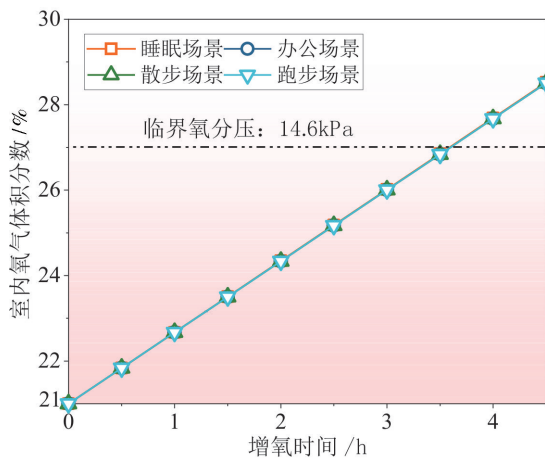


图 10 加压间在不同使用场景下的室内氧气体积分数变化情况

Fig. 10 Changes of indoor oxygen volume fraction with time in the pressurizing room under different use scenarios

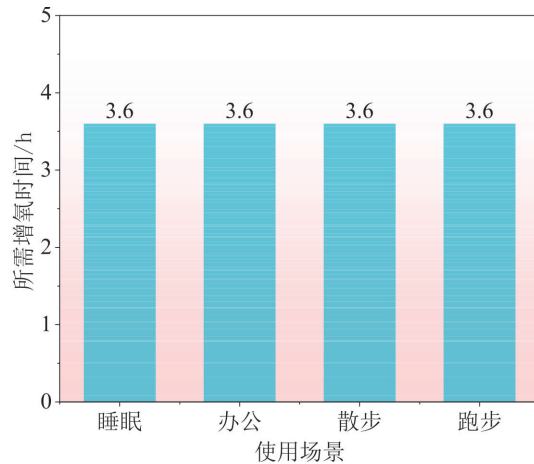


图 11 加压间在不同使用场景下的弥散增氧 6% 所需时间

Fig. 11 The time required to increase oxygen by 6% in the pressurizing room under different use scenarios

5 结论

针对高原地区空气稀薄、氧压环境恶劣、严重影响人员身体健康的现实问题,在传统弥散供氧创造富氧空间的基础上,提出了广义的富“氧”空间,即利用空气加压设备向室内空间加压、利用制供氧设备向室内空间弥散供氧两种方式相结合的手段提升室内空间氧分压,达到提升高原地区居住环境的目的。

基于空气氧分压和等效海拔的概念,从理论层面对加压富“氧”和增氧富“氧”的原理进行了分析计算,结果表明,通过空气加压、弥散供氧均可有效提升室内空气氧分压、降低等效海拔。分别给出了不同海拔室内空气氧分压提升至临界氧分压(14.6 kPa)时室内需要的加压幅度和增氧幅度。

基于暖通空调相关标准规范和流体力学理论,分别给出了加压富“氧”、增氧富“氧”系统的计算方法,并对各系统的设计计算和效果分析进行了分析和案例计算。案例计算结果表明,为使室内空间快速充压到预设压力值,应尽量保持风机满风量运行,待完成充压后,可根据室内人员数量、空气污浊程度等实时调节风量大小,为高原地区室内广义富“氧”空间氧压系统工程设计提供借鉴和参考。

参考文献

- [1]柳茵,丁绍祥.高原缺氧对人体损伤机制及防治研究进展[J].西部医学,2013,25(3):321-324.
- [2]李红,郑必海,郑建保,等.高原缺氧对急进高原个体胃肠动力激素及其粘膜屏障的影响[J].激光杂志,2010,31(3):78-79.
- [3]李冲.高原低氧对认知功能的损伤及干预措施[J].中国高科技,2024(4):152-153+156.
- [4]李广胜.青藏高原室内工作点位供氧、供湿及湿氧协同输送关键参数研究[D].西安:西安建筑科技大学,2023.
- [5]许帅.高原低氧对急进人群认知功能影响的研究[D].西安:中国人民解放军空军军医大学,2023.
- [6]方宇,吕小亮.高原地区室内空间弥散供氧量分析计算[J].暖通空调,2024,54(4):62-66.
- [7]LAI T,GAO R,LI H M, et al. Air distribution of oxygen supply through guardrail slot diffusers in high-altitude hypoxic areas[J]. Building and Environment, 2020, 179: 1-13.
- [8]刘艳峰,宋志远,宋聪,等.高海拔地区睡眠环境局部供氧方法及其富氧效果分析[J].暖通空调,2022,52(9):140-146.
- [9]LI H M,ZHANG Y,YANG C Q, et al. Sleep microenvironment improvement for the acute plateau entry population through a novel nasal oxygen supply system[J]. Building and Environment, 2024, 256: 1-14.
- [10]任万泽,骆发江,李鹏,等.高寒高海拔地区民用供氧系统设计与施工[J].施工技术,2020,49(S1):1631-1636.
- [11]王莹莹,李广胜,宋聪,等.高原建筑室内工作点位个性化供氧关键参数研究[J].暖通空调,2023,53(10):32-39+53.
- [12]冉庄,陈郁,谭超,等.基于新型住宿方舱的弥散供氧对移居高原人员生理学效应的影响[J].第三军医大学学报,2021,43(8):707-714.
- [13]王瑛,秦东,陈玉芝,等.携氧/释氧分析仪氧分压和血氧饱和度计量校准方法[J].化学分析计量,2024,33(3):105-109+128.
- [14]季永华,钱文霞,钱宇杰.动脉血氧分压和一氧化碳弥散量占预计值百分比对急性肺栓塞患者短期预后的预测价值[J].中国急救复苏与灾害医学杂志,2023,18(12):1615-1618.
- [15]闫小滨,赵冬太,王耀峰.双水平无创正压通气模式对AECOPD并发II型呼吸衰竭患者动脉血氧分压指标、肺功能及血清炎症因子水平的影响[J].中国卫生工程学,2022,21(4):619-621.
- [16]段冠因,宋聪,刘艳峰,等.低压缺氧环境是否会影响人体热舒适?——基于西藏实验结果分析(英文)[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(7): 2388-2402.
- [17]程相阁,常晓铁,文博,等.肺泡-动脉血氧分压差、动脉-ETCO₂差值、校正D二聚体对急性肺栓塞危险分层及短期预后的评估价值[J].中华灾害救援医学,2022,10(5):241-245+300.
- [18]中国建筑科学研究院.民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [19]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.高原地区室内空间弥散供氧(氧调)要求:GB/T 35414-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [20]吴秋军,于丽,王峰,等.高海拔特长隧道低压低氧环境施工控制技术——供氧技术标准、关键通风技术、施工人员组织、施工装备效率[J].隧道建设,2017,37(8):973-979.
- [21]住房和城乡建设部工程质量安全监管司,中国建筑标准设计研究院.全国民用建筑工程设计技术措施-暖通空调·动力[M].北京:中国计划出版社,2009:244.
- [22]国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.氧舱:GB/T 12130-2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [23]曹鹏飞.小孔节流气阻理论及气阻测量装置的研究[D].杭州:中国计量大学,2020.
- [24]西藏自治区住房和城乡建设厅.西藏自治区民用供氧工程设计标准:DBJ 540004-2018[S].拉萨:地方标准出版社,2018.
- [25]国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.建筑外门窗气密、水密、抗风压性能检测方法:GB/T 7106-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.

(责任编辑:张阳,殷锋,付强,和力新,肖丽;英文编辑:周序林,郑玉才)