

车辆舱环境空气含氧量的通风计算分析

方 敏¹, 陈红超², 沈恒根³, 王 吉², 蔡 云¹

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 中国舰船研究设计中心, 上海 201620;
3. 东华大学 环境科学与工程学院 上海 201620)

摘要: 针对车辆运转耗氧导致登陆舰车辆舱内含氧量低, 计算柴油车辆发动机耗氧, 并基于全面通风计算方法, 考虑送风、排风温差对全面通风方程影响, 建立内有强热源的车辆舱环境空气含氧量的理论计算模型。并结合某车辆舱实况, 采用该含氧量模型计算在无通风、有通风条件下, 车辆舱内空气含氧量、空气温度随时间变化规律, 并对比分析温差修正前后的计算结果。研究表明: 在已知送风参数条件下, 计算得到了人员在车辆舱内安全工作时所需的通风量; 风量一定情况下的车辆舱内含氧量变化规律; 以及在不同风量下温差修正的系数、而且温差修正系数随着温差增大而不断增大。为分析及防止车辆舱内工作人员缺氧提供了理论计算参考。

关键词: 登陆舰; 车辆舱; 含氧量; 通风计算; 柴油车辆

中图分类号: TU834.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0735-06

Ventilation calculation and analysis on oxygen concentration inside the vehicle hold of landing platform dock

FANG Min¹, CHEN Hongchao², SHEN Henggen³, WANG Ji², CAI Yun¹

(1. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2. China Ship Research and Design Center, Shanghai 201620, China;
3. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Vehicle hold of landing platform dock (LPD) is the cabin to hold vehicles such as tanks, armored vehicles, and other engineering vehicles. As engines of vehicles started, oxygen inside the vehicle hold is heavily consumed, and vehicle emissions are released. In order to ensure adequate oxygen supplied, first the vehicle oxygen consume was analyzed first, and then the calculation model of oxygen concentration was built to analyze the oxygen content inside the vehicle hold of LPD based on the general ventilation equation. The temperature difference between supply air and exhaust air was considered in building the calculation model. Furthermore, a case was analyzed by this model. The results showed the law that ventilation rate or temperature varies by time, and that the coefficient of temperature correction varies with different ventilation rate. The result is much helpful and valuable for human safety protection by preventing hypoxia inside the vehicle hold.

Key words: landing platform dock; vehicle hold; oxygen concentration; ventilation calculation; diesel vehicles

环境空气温度高低、气压大小、某些气体成分增加或减少都会造成环境空气的含氧量变化。车辆舱内停放的坦克、装甲车等车辆运转工作时将消耗舱内环境空气中所含的氧气, 排出的尾气又造成车辆舱内环境空气氧气体积含量下降。环境空气中含氧量不足将影响到车辆驾驶人员及士兵的作战能力下降; 甚至将影响到车辆的正常工作。伴随着战舰装备升级, 车辆运转消耗氧气大量增加、产生大量烟气, 将危害人身安全。随着

环境空气中氧气含量的降低, 人会逐渐出现头痛恶心、集中力下降($<16\%$), 浑身无力、目眩($<12\%$), 面色苍白、意识混乱($<10\%$)等症状^[1]。国家标准《缺氧危险作业安全规程》GB8959规定缺氧危险作业氧气浓度为 19.5% ^[2]。

国内外针对以停放车辆污染的研究主要集中在地下停车场的空气品质及污染物控制研究。Tomas G 等^[3]利用归纳统计法和理论分析法对某停车场的车辆排放尾气各组分进行了计算, 给出

了通风计算并与给与出现有计算方法的差异性,减小了在城市停车场内的通风量并优化了通风系统. Demir A 对城市多层地上及地下车库的停车场内空气品质进行了实验测试研究,并给出了改善意见^[4]. 王西丁^[5]对登陆舰坦克大舱的设计提出了通风量的计算和设计方法,并实际测量通风系统的控制效果. 高举红^[6]等对船舶货仓内车辆排气的通风进行了分析,给出了船舱内车辆开启时不同运行工况下的污染物排气量取值范围,并用于船舱通风量计算. 李强民^[7]等对地下车库不同排风方式下(顶部排风、下部排风及顶部与下部同时排风),利用气体示踪法进行实验,得到了汽车尾气的羽流上升、扩散及发展的整个过程,并给出了分析理由. Pspskonstantinou K. 等^[8]采用数值计算方法分析了一个地下车库内不同工况下的空气污染状况. Duci A. 等^[9]用数值模拟计算方法研究了密闭车库环境污染物 CO 的浓度分布. Zhao 等^[10]对地下车库车辆排气颗粒物扩散进行了数值模拟研究,得到了车辆先开启后关闭工况下的颗粒物在车库内的分布. 可以看出,对于车辆停放及工作空间的环境空气品质研究,主要集中在以污染物为核心的通风计算、颗粒物扩散及分布、有害气体扩散及分布等方面的研究,而对于大功率车辆大量消耗氧气,车辆停放空间内的氧气含量变化的分析较少. 目前关于全面通风的计算^[11]是建立在进风与排风的温差不大的条件下,然而由于车辆舱内温升较大,需要考虑空气密度变化对车辆舱全面通风计算的影响.

因此,针对登陆舰车辆舱内重型柴油车辆耗氧需求、人员安全工作的氧量保证,讨论车辆舱内车辆运转耗氧量,基于车辆舱的全面通风方程,建立车辆舱含氧量计算模型,并结合某车辆舱实况进行应用计算.

1 计算原理

1.1 物理模型及工况

登陆舰车辆舱为长方体,舱内可搭载战车、工程车、战士等作战力量. 图1为某登陆舰的登陆舰舱剖面示意图.

某车辆舱长 66 m、宽 32.6 m、高 5 m. 舱内停放车辆情况见表 1. 车辆在舱内的布置见图 2. 下层车辆舱停放了大功率的重型柴油战车. 上层车辆舱内主要停放的是作战辅助车辆,选取重型战车所在的下层车辆舱为研究对象.

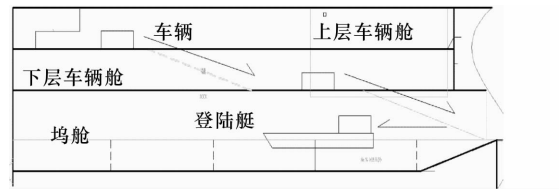


图1 登陆舰纵向剖面示意图

Fig. 1 Cross section profile of a LPD

表1 车辆舱的车辆情况

Tab. 1 Vehicle parameters in a vehicle hold

船舱	设备	数量/台	功率/kW
下层车辆舱	A型战车	28	300
	B型战车	8	1 103
上层车辆舱	大型运输车辆	2	350
	小型运输车辆	42	200

车辆在车辆舱内主要有两种状态:(1)进舱. 在码头时,车辆直接驶入坞舱. 在海滩时,车辆经登陆艇载入坞舱;后通过液压升降坡道依次驶入车辆舱下层、车辆舱上层并落入车位.(2)出舱. 登陆前半小时内,车辆分批动车检查,准备出舱. 舱内人员耗氧量与车辆运转相比不在同一量级,可忽略不计. 可以看出,的车辆出舱时车辆舱内车辆启动数量较多,是最不利工况,因此研究下层车辆舱下的空气含氧量的变化.



图2 下层车辆舱的车辆布置

Fig. 2 Car distributions in the vehicle hold

1.2 计算假设

工业通风^[11]中关于全面通风方程式推导做了如下假设:

(1)氧气消耗量是按整个空间氧量的均匀消耗,即按整个空间氧气平均浓度表征整个空间某时刻的含氧量.

(2)已知送风状态参数,且送风中含氧量瞬间与室内空气混合,供氧量瞬间均匀到整个空间环境空气中.

对于车辆舱环境空间,车辆工作排放高温尾气,使舱内温度升高,需要考虑温度引起的空气密度变化,做如下假设:

(3)车辆舱内车辆工作时,通风量大,因此忽

略因燃油燃烧导致的室内空气组分变化引起的空气密度变化,仅考虑温度变化引起的空气密度变化。

1.3 计算原理

车辆舱内的余热一部分被排风带走,另一部分使室内温度上升,并最终达到平衡状态。因此,得到车辆舱的热平衡方程,见式(1)。

$$c_p L_p \rho_p (T_p - T_s) d\tau + c_p \rho_p V_c dT_p = Q_c d\tau \quad (1)$$

式中: c_p 为空气比热, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$; L_p 为排风量, m^3/s ; V_c 为舱室体积, m^3 ; ρ_p 为排风空气密度, kg/m^3 ; T_s 、 T_p 分别为送风温度、排风温度, K ; Q_c 为室内余热, kW ; τ 为时间, s ; $d\tau$ 为某一微小时段, s 。

(2) 氧气及污染物组分质量平衡

在某一微小时间段内,舱室送风含氧量与舱室内耗氧量及舱室排风含氧量之差等于室内氧气含量的变化量。舱内氧气含量随时间变化的关系式见式(2)。

$$L_s y_s d\tau - G_c d\tau - L_p y_p d\tau = V_c dy \quad (2)$$

式中: L_s 为送风量, m^3/s ; y 为舱室内氧气浓度, g/m^3 ; G_c 为舱室内耗氧量, kg/s ; y_s 、 y_p 分别为送风氧气浓度、排风氧气浓度, g/m^3 。

(3) 舱室风量平衡, 见式(3)。

$$m_c + L_s \rho_s = L_p \rho_p + V_c \rho' \quad (3)$$

式中: m_c 为舱室内空气质量增量, kg/s ; ρ_s 为送风空气密度, kg/m^3 ; ρ 与 ρ' 为舱室内空气密度及其变化率, kg/m^3 。

车辆舱排风质量流量等于送风质量流量与污染源质量(即燃油消耗)之和。车辆舱内空气质量增加为车辆燃油消耗,由于车辆舱通风量大,其占总通风量的比例很小(10次换气次数约为4‰),即 $m_c \ll L_s \rho_s$, 可认为

$$L_s \rho_s = L_p \rho_p \quad (4)$$

(4) 理想气体状态方程

$$\rho_p = \frac{\rho_0 T_0}{T_p} \quad (5)$$

式中: ρ_0 为标况下空气密度, kg/m^3 ; T_0 为标况下空气温度, K 。

2 计算模型

2.1 车辆舱耗氧量计算

某一车辆柴油机耗氧量由式(6)计算^[12]:

$$G_{ci} = \frac{Q_i}{q_0} \quad (6)$$

式中: G_{ci} 为某种车辆柴油机耗氧量, kg/s ; Q_i 为某种车辆柴油机总热量; q_0 消耗单位质量的氧气所释放出来的热量,通常为 $13.1 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ 。

柴油机燃烧柴油放热,根据柴油消耗率与柴油低位燃烧热计算某种车辆的总热量:

$$Q_i = \frac{c_i N_e b_{ei} q_{dw}}{3600} = q_e + q_c + q_r + q_s \quad (7)$$

式中: N_e 为柴油机的额定功率, kW ; b_{ei} 为燃料消耗率, $\text{kg/kW} \cdot \text{h}$; c_i 为柴油车辆运行时功率占额定功率的比例,%,根据军方统计数据,车辆舱内动车的功率系数通常在0.2~0.6之间;为柴油的低位燃烧热 q_{dw} , 约 $44.8 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ ^[13]; q_e 为有效功, kW ; q_c 为传给冷却液的热量, kW ; q_r 为随尾气排入室内的热量, kW ; q_s 为辐射散热及不完全燃烧等余项热损失, kW 。

柴油机有效功通常占总热量的30%~42%;冷却热占15%~35%,尾气热量占25%~30%,余项损失约占2%~6%^[14]。对于舱室而言,冷却热量及尾气热量占到总热量的60%以内,冷却热量大则尾气热量小,反之亦然。显然这与发动机冷却系统结构设计有关,实际测量难度较大,故取尾气热量及冷却热量各占30%计算。

车辆舱内车辆总耗氧量则为所有已启动车辆耗氧之和,由式(8)计算:

$$G_c = \sum_{i=1}^m \zeta_i G_{ci} = \sum_{i=1}^m \frac{\zeta_i c_i N_e b_{ei} q_{dw} \times 10^{-3}}{q_0} \quad (8)$$

由式(8)可知,舰舱内车辆的耗氧量是随时间变化的,影响车辆舱内耗氧量的主要因素为车辆的性能、工作状态和环境空气等参数。车辆在舱内怠速运转检查时,可认为是在恒定功率下工作,产热量与耗氧量为某一常数。某车辆舱内载有A型战车、B型战车等车辆,车辆参数见表2。

表2 车辆性能参数表

Tab. 2 Performances of Vehicles

柴油机型号	冲程数	增压比	缸径×行程/排气量 /(mm×mm·L ⁻¹)	额定功率/kW	标定转速/rpm	燃油消耗率 /g·(kW·h) ⁻¹
A型战车	2	2.5	98.5×144/6.90	294	2800	240/224
B型战车	4	2.2	170×175/47.64	1103	2600	288.5/244.8

由于在登舰、出舰、动车检查中属于低功率运行, 动车系数 c_i 取 0.2, 尾气热及冷却热各取 30%, 计算结果见表 3.

表 3 车辆余热计算结果

Tab. 3 The heat release of vehicle

热排放参数	B 型战车	A 型战车
总燃烧热/kW	753.57	167.38
冷却热/kW	226.07	50.21
尾气热/kW	226.07	50.21

车辆舱动车分批检查, 柴油车辆运转工作. 所有车辆分批启动时, 每批启动数量相等 A 型战车及 B 型战车 (第三批略多). 以第一批 (9 辆 A 型车, 3 辆 B 型车) 为例, 可由式 (7) 与式 (8) 计算得到这一批次启动时的车辆耗氧量与车辆舱内余热分别为: 0.287 kg/s, 1 080 kW.

2.2 温度随时间的变化

在送风参数已知条件下, 有 c_p , L_s , ρ_s , T_s , Q_c , V_c 都为常数. 将式 (4), (5) 代入 (1), 有

$$c_p L_s \rho_s (T_p - T_s) d\tau + c_p \frac{\rho_0 T_0}{T_p} V_c dT_p = Q_c d\tau \quad (9)$$

对式 (9) 分离变量 有

$$\frac{dT_p}{T_p^2 - \left(\frac{Q_c}{c_p L_s \rho_s} + T_s \right) T_p} = - \frac{L_s}{T_s V_c} d\tau \quad (10)$$

两边积分, 解得

$$\frac{1}{\left(\frac{Q_c}{c_p L_s \rho_s} + T_s \right)} \ln \left| \frac{T_p - \left(\frac{Q_c}{c_p L_s \rho_s} + T_s \right)}{T_p} \right| + C = - \frac{L_s \tau}{T_s V_c} \quad (11)$$

上式为在通风量一定的情况下, 舱室内有常热源时温度随时间的变化关系. 绝对值号中为负数. $\tau \rightarrow \infty$, 定义 $\bar{\Delta}_t$ 为车辆舱内通风达到稳态时的温升.

$$\bar{\Delta}_t = \frac{Q_c}{c_p L_s \rho_s}, (\tau \rightarrow \infty) \quad (12)$$

将式 (12) 代入到式 (11) 中, 并求解得:

$$T_p = \frac{(\bar{\Delta}_t + T_s)}{1 + ce^{-\frac{L_s (\bar{\Delta}_t + T_s)}{T_s V_c} \tau}} \quad (13)$$

2.3 氧气随时间的变化

根据计算模型的基本假设, 将式 (4), (5) 代入到式 (2) 中, 有

$$L_s y_s d\tau - G_c d\tau - \frac{L_s \rho_s}{\rho_p} y d\tau = V_c dy \quad (14)$$

设送风氧气含量为 y_0 , 对式 (14) 两边同时除以 $d\tau$, 移项有

$$\frac{dy}{d\tau} + \frac{L_s \rho_s}{\rho_p V_c} y = \frac{L_s}{V_c} y_0 - \frac{r}{V_c} \quad (15)$$

式中, 令 $\sigma = \frac{\rho_s}{\rho_p} = \frac{T_p}{T_s}$, 有

$$\frac{dy}{d\tau} + \frac{L_s \sigma}{V_c} y = \frac{L_s}{V_c} y_0 - \frac{r}{V_c} \quad (16)$$

式 (16) 为非齐次一阶线性微分方程, 通过常数变易法求其通解. 其通解形式为

$$y = C \exp \left(- \int \frac{L_s \sigma}{V_c} d\tau \right) + \exp \left(- \int \frac{L_s \sigma}{V_c} d\tau \right) \int \left(\frac{L_s}{V_c} y_0 - \frac{r}{V_c} \right) \exp \left(\int \frac{L_s \sigma}{V_c} d\tau \right) d\tau \quad (17)$$

由式 (17) 可知, 在通风条件一定的情况下, 车辆舱氧气质量浓度的变化取决于车辆舱内总的耗氧量 G_c .

3 计算结果与分析

已知送风参数, 送风温度 T_s 为 303 K; 空气比热 c_p 为 1.01 kJ/kg · K; 舱室体积可计算得为 10 758 m³.

3.1 不通风工况

不通风工况下 (即 $L_s = L_p = 0$), 由式 (15) 积分得式 (18):

$$y_2 = y_1 - \frac{r\tau}{V_c} \quad (18)$$

式 (18) 表明车辆舱氧气含量与时间成反比关系, 总车辆耗氧越大 G_c , 斜率的绝对值也越大, 见图 3. 750 秒后, 舱内氧气浓度降低到人工作安全值以下 (体积浓度 19.5%, 质量浓度 0.250 9 kg/m³).

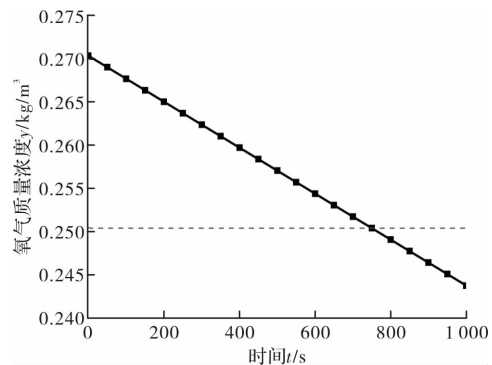


图 3 不通风情况下氧气浓度随时间变化

Fig. 3 Oxygen concentration varies law without ventilation

3.2 通风工况

由式 (13) 计算, 得到不同通风量条件下温度随时间的变化曲线. 图 4 为在通风量分别取 5 次, 10 次, 15 次及 20 次换气次数条件下, 车辆舱内温度随时间的变化. 由图可知, 对于通风量一定情况下, 温度逐渐升高, 且升高的速率先快后慢, 最终

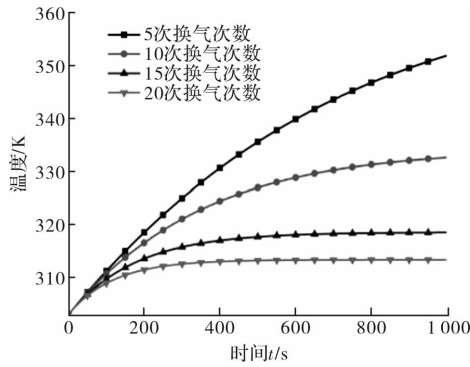


图4 车辆舱温度随时间的变化

Fig. 4 Temperature raise inside the vehicle hold

趋于稳定. 不同风量下, 随着通风量的增加, 温度升高速率下降, 平衡温度也越低, 所需时间也越短. 20次通风换气次数下, 只需400 s就接近平衡. 而15次换气次数在750 s后接近平衡. 而10次气数, 5次换气次数通风量条件下则需要更长的时间.

将排风温度随时间的变化式(13)代入式(16), 并求解方程式, 得到解析解. 结果得到通风量20次, 15次, 10次, 5次换气次数条件下, 舱室内氧气含量随时间的变化关系式, 分别用 y_a , y_b , y_c 及 y_d 表示, 见式(19)~式(22).

$$y_a = \frac{313.19 \times 390 + 0.252785 \times (506.8\tau + 10000e^{0.00583714\tau})}{506.8 + 10000e^{0.00583714\tau}} \quad (19)$$

$$y_b = \frac{413.87516 + 0.247286 \times (675.8\tau + 10000e^{0.00444825\tau})}{675.8 + 10000e^{0.00444825\tau}} \quad (20)$$

$$y_c = \frac{610.17576 + 0.236792 \times (1013.7\tau + 10000e^{0.00305936\tau})}{1013.7 + 10000e^{0.00305936\tau}} \quad (21)$$

$$y_d = \frac{1163.7016 + 0.217410 \times (2027.4\tau + 10000e^{0.00167047\tau})}{2027.4 + 10000e^{0.00167047\tau}} \quad (22)$$

$$y_1 = y_0 \exp\left(-\frac{\tau L_s}{V_c}\right) + \left(y_0 - \frac{G_c}{L_s}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau L_s}{V_c}\right)\right] \quad (23)$$

因此, 当 $\tau \rightarrow \infty$, 含氧量极限为式中括号前的值. 即当通风达到稳态时, 车辆舱内氧气浓度分别是 0.252785 kg/m^3 , 0.247286 kg/m^3 , 0.236792 kg/m^3 及 0.217410 kg/m^3 . 图5为车辆舱内氧气含量在不同通风换气次数下随时间的变化图. 换气次数越大, 达到平衡状态的时间越短, 舱室内氧气含量越高.

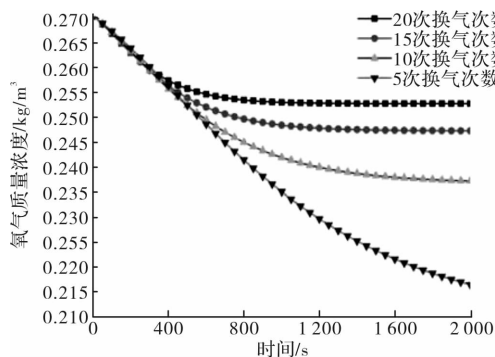
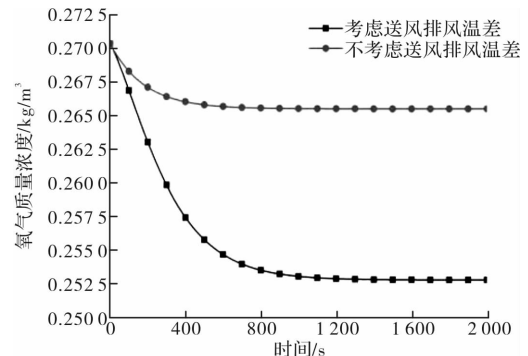


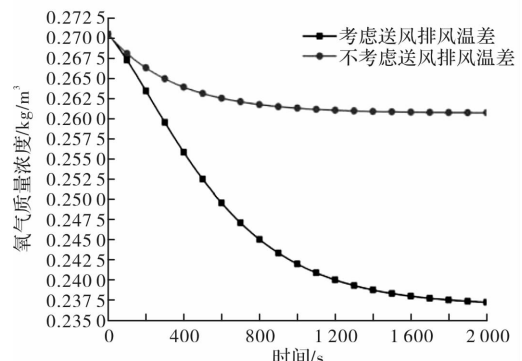
图5 车辆舱氧气浓度随时间变化图

Fig. 5 Oxygen concentration varies law

现有的计算方法忽略温度对含氧量空间分布的影响, 氧气浓度结果用式(23)计算. 与考虑温度变化对舱内氧气含量影响时对比, 分别用20次, 10次换气次数作对比, 结果见图6. 考虑温差修正后的模型计算结果与现有方式的计算结果相差3.25%及4.88%. 并且随着温度差别变大而增大.



(a) 20次换气次数比较



(b) 10次换气次数比较

图6 计算模型对比

Fig. 6 Calculation results comparison with various models

4 结论

针对车辆运转耗氧及人员需氧问题, 考虑空

气密度变化对全面通风方程的影响,建立车辆舱内环境空间含氧量计算模型,结合某登陆舰实况进行计算,计算结果表明:

(1)车辆运转工况,不通风条件下750 s后舱内氧气浓度降低到人工作安全值以下。

(2)不同风量下,随着通风量的增加,温度升高速率下降,平衡温度也越低,所需时间也越短。20次通风换气次数下,需400 s就接近平衡状态。而10次换气次数在1800 s后接近平衡状态。将20和10次换气次数下温差修正后模型与不考虑温差影响模型的氧气浓度计算结果对比,修正百分比分别为3.25%及4.88%,并且随着温度差别逐渐增大。

参考文献 References

- [1] 魏少征. 氧气与人体健康[J]. 职业与健康, 1995(2): 11-12.
WEI Shaozheng. Oxygen and human health[J]. Career & Health, 1995(2): 11-12.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 缺氧危险作业安全规程:GB 8958-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 3-4.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety regulation for working under hazardous condition: GB 8958-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006: 3-4.
- [3] TOMAS G, AGUSTIN S, CARMEN G. Energy, environmental and economic analysis of the ventilation system of enclosed parking garages: Discrepancies with the current regulations[J]. Applied Energy, 2014 (113): 622-630.
- [4] DEMIR A. Investigation of air quality in the underground and aboveground multi-storey car parks in terms of exhaust emissions[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2015, 195: 2601-2611.
- [5] 王西丁. 登陆舰坦克车辆大舱通风设计[J]. 船舶, 1992(4): 50-54.
WANG Xiding. Ventilation design of vehicles cabin in landing platform dock[J]. Ship & Boat, 1992(4): 50-54.
- [6] 高举红. 内有内燃机车辆工作的货舱的通风设计[J]. 船舶, 1994(2): 37-40.
GAO Juhong. Ventilation design of cargo spaces where internal combustion engine vehicles[J]. Ship & Boat, 1994(2): 37-40.
- [7] 李强民, 邓伟鹏, 赵晓辉, 等. 汽车尾气烟羽的形成及地下车库排风方式[J]. 暖通空调, 2004, 34(3): 6-9.
LI Qiangmin, DENG Weipeng, ZHAO Xiaohui. Formation of automobile emission plume and air exhaust mode of underground parking garages[J]. HV&AC, 2004, 34(3): 6-9.
- [8] PAPAKONSTANTINO K, CHALOULAKOU A, VLACHAKIS N, et al. Air quality in an underground garage: computational and experimental investigation of ventilation effectiveness [J]. Energy and Buildings, 2003(35): 934-940.
- [9] DUCI A, PAPAKONSTANTINO K, CHALOULAKOU A, et al. Numerical approach of carbon monoxide concentration dispersion in an enclosed garage [J]. Building and Environment, 2004(39): 1044-1048.
- [10] ZHAO Yu, ZHAO Jianing. Numerical assessment of particle dispersion and exposure risk in an underground parking lot[J]. Energy and Buildings, 2016, 33: 96-103.
- [11] 孙一坚, 沈恒根. 工业通风[M]. 第4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 15-18.
SUN Yijian, SHEN Henggen. Industrial ventilation [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 15-18.
- [12] PRETREL H, AUDOUIN L. New developments in data regression methods for the characterization of thermal stratification due to fire[J]. Fire Safety Journal, 2015, 76: 55-64.
- [13] 毛宏雨. 基于示功图的船用柴油机燃烧过程的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
MAO Hongyu. Study on the combustion process of marine diesel engine based on the indicator diagram [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010: 12-15.
- [14] 谷操, 张敏, 卫继新. 装甲车辆发动机尾气余热发电的一种新思路[J]. 车辆与动力技术, 2007, 3: 49-51.
GU Cao, ZHANG Min, WEI Jixin. A new design method for waste heat electric - power generation of armeal vehicle engine[J]. Vehicle & Power Technology, 2007, 3: 49-51.

(编辑 沈 波)