DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202506056

不同海拔下中冷温度对柴油机热平衡的影响

王正江[1]，杨　瑞[1]，王晓辉[2]，姚国仲[1]
（1. 昆明理工大学云南省内燃机重点实验室，昆明 650500；2. 广西玉柴机器股份有限公司，玉林 537005）

摘要：针对柴油机高原环境下的高效热管理问题，研究了柴油机各项热量随海拔和中冷温度变化的主导因素及变化规律. 结果表明：中冷带走热量和冷却液带走热量的主导因素是温度差；排气带走热量的主导因素在中冷温度变化时是进/排气温差，而在海拔变化时是排气质量流量. 在同一海拔下，中冷温度每升高 10 ℃，柴油机有效功率、中冷带走热量和杂项损失热量占比分别平均减小 0.08%、0.79% 和 0.23%，排气带走热量和冷却液带走热量占比平均增加 0.48%、0.62%，更多的燃料热量向排气和冷却液带走热量转移，导致冷却系统的负担加大. 同一中冷温度下，海拔每升高 1 000 m，柴油机有效功率和排气带走热量占比平均减小 0.44%、1.37%，中冷带走热量、冷却液带走热量及杂项损失热量占比分别平均增加 0.93%、0.25% 及 0.62%，表明更多的热量向增压中冷和冷却液带走热量转移，因而中冷系统和冷却系统的匹配应具备足够的柴油机高原运行散热裕度.

关键词：柴油机；热平衡；海拔；中冷温度
中图分类号：TK427　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909(2025)06-0500-10

Effect of intercooler temperature on the thermal balance of diesel engine at different altitudes

Wang Zhengjiang[1]，Yang Rui[1]，Wang Xiaohui[2]，Yao Guozhong[1]
（1. Yunnan Key Laboratory of Internal Combustion Engine，Kunming University of Science and Technology，Kunming 650500，China；2. Guangxi Yuchai Machinery Company Limited，Yulin 537005，China）

Abstract：This study investigated the dominant factors and patterns of change in heat flow variations of diesel engine with respect to altitude and intercooler temperature，with the aim of addressing the issue of efficient thermal management of diesel engine in high-altitude environments. The results indicate that the dominant factors for the heat removed by the intercooler and coolant are temperature differences，while the heat removed by the exhaust is mainly affected by intake/exhaust temperature difference during intercooler temperature changes，and by exhaust mass flow during altitude changes. At a constant altitude，for every 10 ℃ increase in intercooler temperature，the effective power of the diesel engine，the heat removed by intercooler，and the proportion of miscellaneous heat losses decrease by an average of 0.08%，0.79%，and 0.23%，respectively. Conversely，the proportion of heat removed by the exhaust and the coolant increases by an average of 0.48% and 0.62%，respectively，indicating the more fuel heat is transferred to exhaust and coolant，increasing the cooling load. At a constant intercooler temperature，for every 1 000 m increase in altitude，the effective power of the diesel engine and the proportion of heat removed by exhaust decrease by an average of 0.44% and 1.37%，respectively. Meanwhile，the proportion of heat removed by intercooler，coolant，and miscellaneous heat losses increases by an average of 0.93%，0.25%，and 0.62%，respectively. This indicates a greater heat transfer toward the intercooler and coolant，suggesting that the intercooler and cooling systems should provide sufficient thermal margin for diesel engine operation at high altitudes.

Keywords：diesel engine；thermal balance；altitudes；intercooler temperature

收稿日期：2025-02-12；**修回日期**：2025-05-17.
基金项目：云南省重大科技专项计划资助项目(202302AC080002).
作者简介：王正江，博士，实验师，wangzhengjiang@kust.edu.cn.
通信作者：王晓辉，学士，高级工程师，wangxiaohui@yuchai.cn.

随着交通运输、国防安全及低空经济等领域的发展，各领域对发动机的环境适应性提出了更高的要求. 发动机需要在高海拔、高湿度以及极寒等极端环境下实现安全可靠的运行. 随着海拔升高，大气压力降低，空气氧含量降低，导致发动机在高海拔下燃烧恶化、输出转矩和功率下降[1-2]且发动机的热负荷增加[3-6]. 现代发动机通常采用增压中冷技术解决高海拔进气不足的问题，以提高柴油机热效率和实现高海拔动力恢复. 为了避免因增压气体温度过高而导致发动机进气充量降低、功率下降及排放恶化的问题[7-8]，增压中冷器能够将增压后的高温气体冷却至一定的温度，即中冷温度. 中冷温度不仅对发动机运行性能有重要影响，还对发动机的热能分配起关键作用，因而研究不同海拔下中冷温度对发动机热平衡的影响有重要意义.

国内外学者通过仿真[9]与试验相结合的方法，从特殊机型[10]、发动机结构[11]、替代燃料[12]及余热回收[13]等方面进行了发动机热平衡研究，获得了具有实际应用价值的理论和成果. 针对不同海拔下柴油机的热平衡问题，当前研究主要集中于试验系统设计、海拔对发动机热平衡的影响、冷却系统优化匹配及其他技术在不同海拔下对发动机热平衡的影响等方面. 刘楠等[14]设计了集成高海拔模拟系统、冷却液恒温系统和冷却液流量调节系统的柴油机高海拔热平衡模拟试验系统，研究柴油机在高海拔下的热平衡状况. 杨春浩等[15]基于自主设计的高海拔模拟柴油机热平衡试验系统，研究了海拔对二级可调增压柴油机热平衡的影响，发现二级增压技术可显著恢复柴油机高原性能，尤其在中、高转速下热效率的恢复明显优于低速工况. Rao 等[16]通过进/排气模拟系统研究了柴油机在海拔为 0 ~ 4 500 m 条件下的热平衡，结果表明：随着海拔升高，发动机热效率从 37.8% 降为 33.9%，而冷却水热损失基本保持为 22% ~ 24%. 王旭东等[6]通过进/排气模拟系统研究了高原环境下柴油机燃用–35 号柴油和聚甲氧基二丁基醚型含氧燃料的热平衡，发现该含氧燃料可有效缓解高原环境下柴油机后燃严重和热负荷加剧的问题，显著降低冷却水和排气带走的热量，提高热效率.

由于发动机在高原地区工作时，冷却水易出现“开锅”的问题[17]，不同海拔下冷却液对发动机热平衡的影响受到了广泛关注. 杨春浩等[18]研究了变海拔条件下冷却系统控制参数对整机热平衡的影响，优化标定了不同海拔下的最佳冷却液流量. 周磊等[19]研究了不同海拔下冷却液温度对柴油机热量分配的影响，结果表明：在不同海拔下，随冷却液温度升高，排气散热量、有效功热量及杂项损失均增加，而冷却液散热量减少. 张博等[20]研究了冷却液流量对柴油机热平衡的影响，发现柴油机在中、低负荷下适当减小冷却液流量可降低燃油消耗率、提升有效功率；在标定负荷时，随着冷却液流量的减少，有效功率占总放热量比例先增大、后减小；适当降低冷却液流量可提高发动机的动力性和经济性.

进气状态参数是影响发动机燃烧优化与热效率提升的关键参数，对发动机热平衡同样有重要影响. Chen 等[21]研究发现，进气湿度对各项能量损失均有不同程度的影响，其中排气损失和传热损失明显减少，而泵送损失和摩擦损失则有一定程度的增加. Halis 等[22]研究了进气温度对柴油机热平衡的影响，发现进气温度升高会使发动机热效率和㶲效率提高. Ma 等[23]研究了进气温度对柴油-甲醇双燃料（DMDF）发动机的热平衡影响，进气温度从 35 ℃升至 65 ℃时，DMDF 燃烧的制动热效率显著提高，中冷器的热量损失和杂项损失迅速减小，进气温度升高对降低 DMDF 发动机替代率的影响最大. 综上可知，进气状态参数对发动机的热平衡十分关键，但目前关于发动机热平衡的研究中，不同海拔下中冷温度对柴油机热平衡的影响鲜见报道.

基于此，笔者通过一台高压共轨增压柴油机，在发动机标定转速为 3 200 r/min、70% 负荷工况进行不同海拔（0、1 000 和 2 000 m）条件下的热平衡试验，研究不同海拔下中冷温度对柴油机进气质量流量、中冷前温度及排气温度等参数的影响，并分析中冷温度对柴油机各项热量的影响.

针对温度与流量耦合变化的问题，提出一种基于温度因子和流量因子的热量变化分析方法，分析柴油机各项热量变化的主导因素. 最后，分析柴油机各项热量在不同海拔下随中冷温度变化的热流分配规律，以期为柴油机高原环境下冷却系统的优化匹配及实现高效热管理提供参考.

1　试验设备与方案

1.1　试验设备

图 1 为试验台架布置示意. 试验用发动机是一台增压中冷、直列 4 缸柴油机，表 1 为发动机主要技术参数，表 2 为试验设备及参数. 除上述设备外，试验台架还使用温度传感器和压力传感器分别测量柴油机冷却液进/出口温度、中冷前、后温度、排气温度、环境温度以及柴油机的进/排气压力.

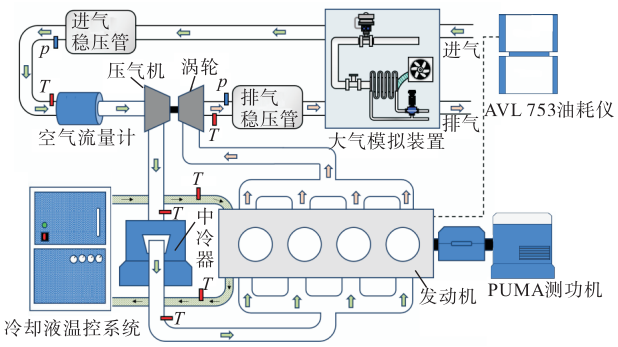


图 1 试验台架布置示意

Fig.1 Schematic of the test bench arrangement

表 1 发动机主要技术参数

Tab.1 Engine specifications

参数	数值
型式	高压共轨，缸内直喷，增压中冷
气缸数	4
缸径/mm	95
活塞行程/mm	105
排量/L	2.977
标定功率/kW	130
最大转矩/(N · m)	400

表 2 试验设备及参数

Tab.2 Test equipment and parameters

设备名称	型号	精度
测功机	AVL PUMA	转速 ± 1 r/min；转矩 ± 0.2%
大气模拟装置	自制设备	压力 ± 0.5 kPa
冷却液温控系统	AVL 533	温度 ± 2.5 ℃
中冷器	AVL ConsysBoost(C-1400)	温度 ± 1 ℃
空气流量计	AVL Flowsonix Air	质量流量 ± 0.25%
油耗仪	AVL 753	小时油耗 ± 0.05%

1.2 试验方案

中冷温度试验在发动机标定转速(3 200 r/min)下进行，由于标定工况的排气温度已接近发动机排气温度极限，为了防止中冷温度升高导致排气温度超出发动机热负荷极限，选择标定转速、70% 负荷工况进行试验. 试验时，测控系统采用转速-油门模式，确保循环喷油量保持不变，保证不同海拔和不同中冷温度下的燃料总能量相同.

由于实验室当地海拔为 2 000 m，对应大气压力为 80 kPa，因而笔者通过大气压力模拟系统模拟发动机在海拔为 0 m 和 1 000 m 下的进/排气压力(分别为 100 kPa 和 90 kPa)，以研究不同海拔下中冷温度对柴油机热平衡的影响.

发动机完成热机后，通过操控台架的 PUMA 测控系统，控制柴油机运行在指定的工况，并通过中冷控制系统设置中冷温度为 50、60、70、80 和 90 ℃，在中冷温度达到设定温度并稳定后，测量发动机性能参数与温度参数. 每个试验进行 3 次，取 3 次试验的平均值作为各参数的试验结果.

1.3 柴油机热平衡计算与影响因子

根据热力学第一定律，在柴油机工作过程中，单位时间内燃料在柴油机气缸内燃烧所产生的总热量，一部分转化为曲轴对外输出的有效功，一部分随排气排出，一部分传递给冷却液，一部分传递给中冷器，其余未计入以上各项的热量统称为杂项损失. 柴油机的热平衡[24]表达式可描述为

$$Q_{\mathrm{f}} = W_{\mathrm{e}} + Q_{\mathrm{c}} + Q_{\mathrm{ic}} + Q_{\mathrm{ex}} + Q_{\mathrm{misc}} \tag{1}$$

式中：Q_{f}、W_{e}、Q_{c}、Q_{ic}、Q_{ex} 和 Q_{misc} 分别为单位时间内燃料在柴油机气缸内燃烧所产生的总热量、有效功、冷却液带走热量、中冷带走热量、排气带走热量与杂项损失.

$$Q_{\mathrm{f}} = m_{\mathrm{f}} H_{\mathrm{u}} / 3\,600 \tag{2}$$

$$W_{\mathrm{e}} = P_{\mathrm{e}} \tag{3}$$

$$Q_{\mathrm{c}} = m_{\mathrm{c}} c_{p,\mathrm{c}} \left(T_{\mathrm{c,out}} - T_{\mathrm{c,in}}\right) / 60 \tag{4}$$

$$Q_{\mathrm{ic}} = m_{\mathrm{a}} c_{p,\mathrm{a}} (T_{\mathrm{ic,b}} - T_{\mathrm{ic,a}}) / 3\,600 \tag{5}$$

$$Q_{\mathrm{ex}} = \left(m_{\mathrm{a}} + m_{\mathrm{f}}\right) c_{p,\mathrm{ex}} (T_{\mathrm{ex}} - T_{\mathrm{a}}) / 3\,600 \tag{6}$$

$$Q_{\mathrm{misc}} = Q_{\mathrm{f}} - W_{\mathrm{e}} - Q_{\mathrm{c}} - Q_{\mathrm{ic}} - Q_{\mathrm{ex}} \tag{7}$$

式中：m_{f} 为单位时间燃油消耗量；H_{u} 为柴油的低热值；P_{e} 为柴油机功率；m_{c} 为冷却液质量流量；m_{a} 为进气质量流量；$c_{p,\mathrm{c}}$、$c_{p,\mathrm{a}}$ 和 $c_{p,\mathrm{ex}}$ 分别为冷却液比热容、进气比热容和排气比热容，分别取值为 3.67、1.00 和 1.09 kJ/(kg · ℃)[25]；$T_{\mathrm{c,out}}$、$T_{\mathrm{c,in}}$、$T_{\mathrm{ic,b}}$、$T_{\mathrm{ic,a}}$、T_{ex} 及 T_{a} 分别为冷却液出口温度、冷却液进口温度、中冷前温度、中冷后温度、排气温度和环境温度.

由式(4) ~ 式(6)可知，各项热量的计算均与载热体(冷却液、进气及排气)的质量流量和温度有关. 令质量流量项为 M_x，温度项为 T_x，下标 x 为 c、ic 或 ex，则各项热量的计算可简化为

$$Q_x = M_x C_x T_x \tag{8}$$

设质量流量项变化率和温度项的变化率分别为 k_{m} 和 k_{T}，则各项能量为

$$Q'_x = (1 + k_{\mathrm{m}}) M_x C_x (1 + k_{\mathrm{T}}) T_x \tag{9}$$

结合式(8)，将式(9)整理为

$$Q'_x = Q_x + (k_{\mathrm{m}} + k_{\mathrm{T}} + k_{\mathrm{m}} k_{\mathrm{T}}) Q_x \tag{10}$$

因此，各项热量的变化与质量流量项和温度项的变化率有关. 当 $0 \leqslant |k_{\mathrm{m}}| \leqslant 1$ 且 $0 \leqslant |k_{\mathrm{T}}| \leqslant 1$ 时，则有 $|k_{\mathrm{m}}| > |k_{\mathrm{m}} k_{\mathrm{T}}|$、$|k_{\mathrm{T}}| > |k_{\mathrm{m}} k_{\mathrm{T}}|$，因而 $2|k_{\mathrm{m}}| > |k_{\mathrm{m}}| + |k_{\mathrm{m}} k_{\mathrm{T}}|$，$2|k_{\mathrm{T}}| > |k_{\mathrm{T}}| + |k_{\mathrm{m}} k_{\mathrm{T}}|$. 当 $|k_{\mathrm{m}}| \geqslant 2|k_{\mathrm{T}}|$ 时，则 $|k_{\mathrm{m}}| > |k_{\mathrm{T}}| +$

$|k_m k_T|$，Q'_x 的变化主要由 $|k_m|$ 决定，其主要的影响因素是质量流量；当 $|k_T| \geqslant 2|k_m|$ 时，则有 $|k_T| > |k_m| + |k_m k_T|$，$Q'_x$ 的变化主要由 $|k_T|$ 决定，其主要影响因素是温度. 综上可知，当满足 $0 \leqslant |k_m| \leqslant 1$、$0 \leqslant |k_T| \leqslant 1$，且 $|k_m| \geqslant 2|k_T|$ 或 $|k_T| \geqslant 2|k_m|$ 条件时，各项热量变化的影响因素可根据 $|k_m|$ 和 $|k_T|$ 进行定性分析.

为了便于分析质量流量项和温度项对各项热量中冷温度变化的影响，定义质量流量影响因子 β_x 和温度影响因子 γ_x，有

$$\beta_x = |k_m|_x = \left| \frac{M_x^i - M_x^{ref}}{M_x^{ref}} \right| \tag{11}$$

$$\gamma_x = |k_T|_x = \left| \frac{T_x^i - T_x^{ref}}{T_x^{ref}} \right| \tag{12}$$

式中：i 为试验条件；ref 为参考试验条件. 当对同一海拔、不同中冷温度的试验进行分析时，i 为不同中冷温度（50、60、70、80 和 90 ℃），ref 为 50 ℃；当对同一中冷温度、不同海拔下的试验进行分析时，i 为不同海拔（0、1 000 和 2 000 m），ref 为 0 m.

根据影响因子计算方法，笔者计算了不同试验条件下的质量流量因子和温度影响因子，见表 3、表 4.

由分析可知，除参考试验条件的影响因子外，试验数据均满足 $0 \leqslant \beta_x \leqslant 1$、$0 \leqslant \gamma_x \leqslant 1$，且满足 $\beta_x > 2\gamma_x$ 或 $\gamma_x > 2\beta_x$ 的条件，因而可以通过 β_x 和 γ_x 的大小反映质量流量项和温度项对相关热量的影响程度.

表 3　不同中冷温度下的影响因子

Tab.3　Influence factors under different intercooler temperatures

参数	温度/℃	海拔/m					
		0		1 000		2 000	
		β_x	γ_x	β_x	γ_x	β_x	γ_x
中冷器	50	0	0	0.	0	0	0
	60	0.015	0.094	0.011	0.088	0.009	0.069
	70	0.028	0.198	0.022	0.176	0.017	0.132
	80	0.042	0.287	0.036	0.256	0.026	0.206
	90	0.054	0.384	0.052	0.359	0.037	0.282
排气	50	0	0	0	0	0	0
	60	0.014	0.042	0.010	0.037	0.008	0.046
	70	0.027	0.075	0.021	0.066	0.017	0.074
	80	0.040	0.102	0.035	0.098	0.025	0.097
	90	0.052	0.122	0.050	0.120	0.036	0.123
冷却液	50	0	0	0	0	0	0
	60	0.014	0.070	0.022	0.068	0.015	0.043
	70	0.035	0.116	0.043	0.136	0.037	0.109
	80	0.061	0.186	0.063	0.182	0.067	0.174
	90	0.096	0.279	0.113	0.295	0.111	0.261

表 4　不同海拔下的影响因子

Tab.4　Influence factors under different altitudes

参数	海拔/m	温度/℃									
		50		60		70		80		90	
		β_x	γ_x	β_x	γ_x	β_x	γ_x	β_x	γ_x	β_x	γ_x
中冷器	0	0	0	0.	0	0	0	0	0	0	0
	1 000	0.052	0.151	0.048	0.158	0.046	0.184	0.046	0.201	0.050	0.197
	2 000	0.121	0.398	0.116	0.436	0.112	0.514	0.106	0.557	0.105	0.628
排气	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1 000	0.050	0.016	0.046	0.011	0.045	0.008	0.045	0.012	0	0.048
	2 000	0.117	0.037	0.112	0.040	0.108	0.036	0.103	0.032	0.102	0.037
冷却液	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1 000	0.002	0.023	0.009	0.022	0.009	0.042	0.003	0.020	0.021	0.036
	2 000	0.016	0.070	0.018	0.043	0.019	0.063	0.023	0.059	0.032	0.055

2　试验结果及分析

2.1　不同海拔下中冷温度对柴油机关键参数的影响

进气质量流量和中冷前、后温差是影响柴油机中冷带走热量的关键因素. 图 2 为柴油机进气质量流量随海拔的变化. 在同一海拔下，中冷后温度升高导致进气密度降低，柴油机的进气质量流量逐渐减少；在同一中冷后温度下，随着海拔升高，柴油机进气质量流量也减少.

图 3 为柴油机中冷前温度及中冷前、后温差变化. 在相同海拔下，随中冷温度的升高，柴油机中冷前的进气温度变化较小，但中冷后温度升高导致增压中冷前、后温差减小；在相同中冷温度条件下，随着海拔升高，涡轮膨胀比增加，涡轮机功率升高，因而涡轮增压器的压气机转速增加，使柴油机中冷前温度升高[26]，导致中冷前、后温差增大.

排气质量流量和进/排气温差是影响排气带走热量的关键参数. 排气质量流量等于进气质量流量与燃油质量流量之和. 由于试验过程中喷油量保持不变，因而排气质量流量的变化由进气质量流量的变化决定，即排气质量流量的变化与进气质量流量的变化

规律一致(图 2). 进/排气温差为排气温度与大气温度之差. 试验过程中大气温度不变,因而进/排气温差的变化主要由排气温度决定. 图 4 为柴油机排气温度及进/排气温差的变化. 在相同海拔下,随着中冷温度升高,进入到气缸内的空气温度也升高,一方面,

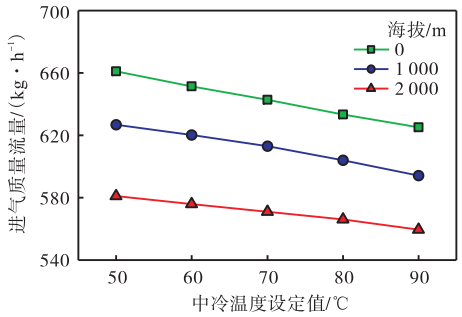


图 2 柴油机进气质量流量随海拔的变化

Fig.2 Variation of intake mass flow of the diesel engine with altitudes

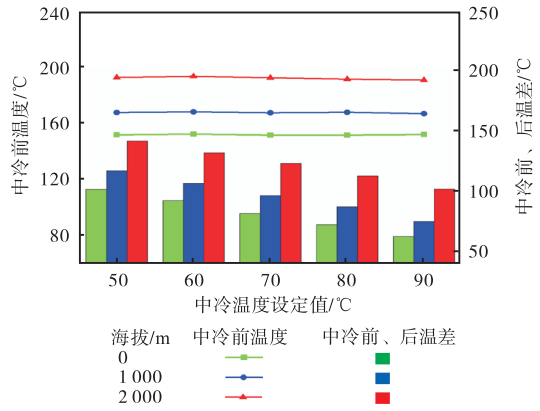


图 3 柴油机中冷前温度及中冷前、后温差随海拔的变化

Fig.3 Variation of temperature before the intercooler and the temperature difference before and after the intercooler of the diesel engine with altitudes

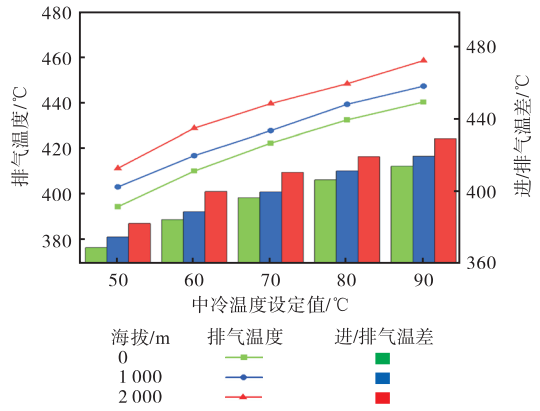


图 4 柴油机排气温度及进/排气温差随海拔的变化

Fig.4 Variation of exhaust temperature and the intake/exhaust temperature difference of the diesel engine with altitudes

直接提高了燃烧工质的初始温度;另一方面,导致进气量减少,空燃比降低,燃烧持续期延长,柴油机热转化效率降低[27],因而柴油机排气温度升高;在相同中冷温度下,随着海拔升高,柴油机气缸内进气量减少,同样导致排气温度升高.

冷却液流量和冷却液进/出口温差是冷却液带走热量的关键参数. 图 5 为柴油机冷却液流量随海拔的变化. 在相同海拔下,随着中冷温度升高,柴油机冷却液流量逐渐减少;在相同中冷温度下,随着海拔升高,柴油机冷却液流量减少幅度较小. 图 6 为柴油机冷却液进/出口温度及冷却液进/出口温差随海拔的变化. 在相同海拔下,随着中冷温度升高,柴油机冷却液进/出口温度均呈增加的趋势,且冷却液进/出口温差增加,因而冷却液流量减少;在相同中冷温度下,随着海拔升高,柴油机冷却液进/出口温差有较小幅度的增大,冷却液流量呈小幅度减少.

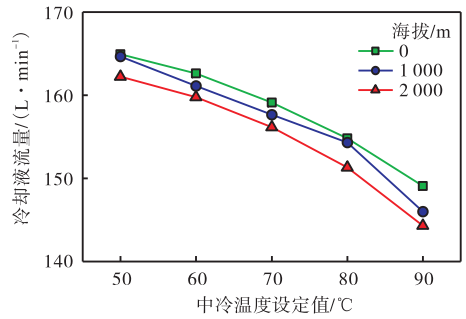


图 5 柴油机冷却液流量随海拔的变化

Fig.5 Variation of the coolant flow of the diesel engine with altitudes

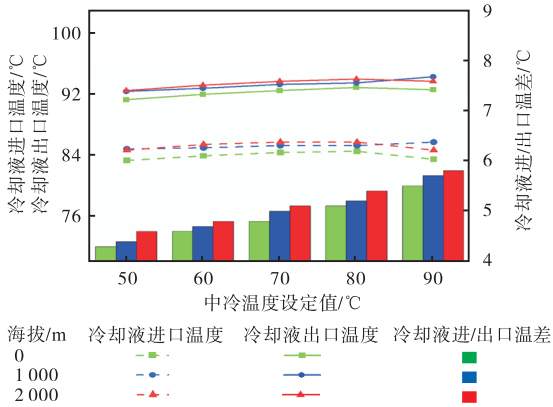


图 6 柴油机冷却液进/出口温度及冷却液进/出口温差随海拔的变化

Fig.6 Variation of the coolant inlet and outlet temperature and the coolant inlet and outlet temperature difference of the diesel engine with altitudes

2.2 不同海拔下中冷温度对柴油机各项热量的影响

燃料在柴油机气缸内燃烧所产生的热量主要转

化为曲轴对外输出的有效功. 图 7 为柴油机空燃比随海拔的变化. 在相同海拔下，随着中冷温度升高，柴油机进气量减少，进而导致柴油机空燃比减小，使得燃烧在一定程度上变差. 但随着中冷温度升高，又会在一定程度上促进燃烧. 在相同中冷温度下，随着海拔升高，柴油机空燃比减小，使得柴油机的燃烧进一步变差，因而燃料燃烧后转化为有效功的热量减少. 图 8 为柴油机有效功率随海拔的变化. 在同一海拔下，中冷温度变化对柴油机有效功率的影响较小. 在相同中冷温度下，随着海拔升高，柴油机有效功率降低. 海拔从 0 m 升至 1 000 m 和 2 000 m，柴油机有效功率分别平均下降 0.59% 和 1.53%.

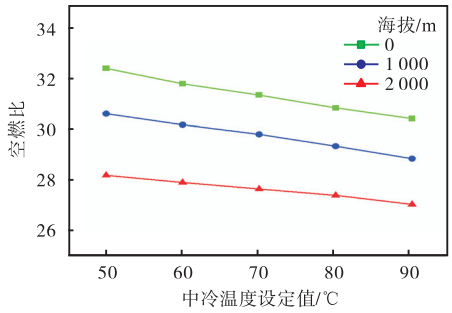


图 7　柴油机空燃比随海拔的变化

Fig.7　Variation of air-fuel ratio of the diesel engine with altitudes

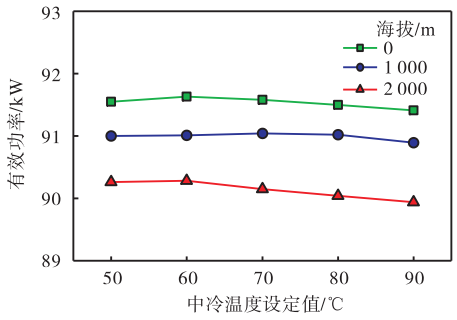


图 8　柴油机有效功率随海拔的变化

Fig.8　Variation of effective power of the diesel engine with altitudes

图 9 为柴油机中冷带走热量随海拔的变化. 在海拔为 0、1 000 和 2 000 m 条件下，中冷温度从 50 ℃升至 90 ℃，中冷带走热量分别减少了 41.72%、39.26% 和 30.90%，平均中冷温度每升高 10 ℃，进气中冷带走的热量分别减少 10.43%、9.82% 和 7.72%. 在相同中冷温度下，随着海拔升高，柴油机进气中冷带走的热量逐渐增加. 海拔从 0 m 升至 1 000 m 和 2 000 m 时，柴油机中冷带走的热量分别平均增加 12.12%、33.81%.

图 10 为中冷带走热量的影响因子关系. 在相同海拔下，温度影响因子大于质量流量因子，因而随着中冷温度变化，温差是中冷带走热量的主要原因. 由于相同海拔下，随着中冷温度增加，中冷温差减小，同时进气流量也减小，因而中冷带走热量在相同海拔下随着中冷温度增加而减小. 在相同中冷温度、不同海拔下，温度影响因子大于质量流量因子，因而中冷前、后温差仍是中冷带走热量的主要因素. 随着海拔增加，虽然进气流量减小，但中冷进气的温差增加，导致中冷带走热量随着海拔增加而增加.

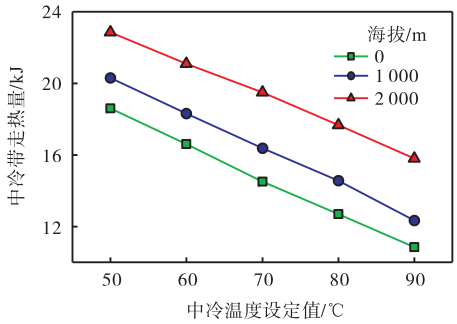
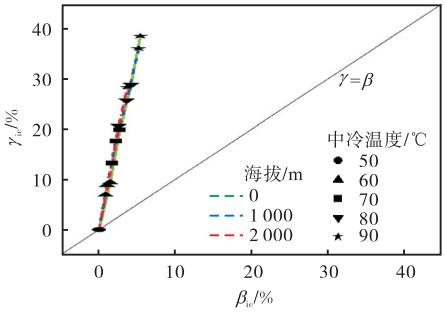
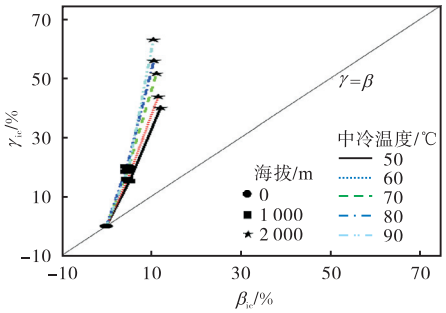


图 9　柴油机中冷带走热量随海拔的变化

Fig.9　Variation of heat removed by the intercooler of the diesel engine with altitudes



（a）中冷温度变化的因子关系



（b）海拔变化的因子关系

图 10　中冷带走热量的影响因子关系

Fig.10　Relationship between the influencing factors of the heat removed by the intercooler

图 11 为柴油机排气带走热量随海拔的变化. 在相同海拔下，随着中冷温度升高，排气带走热量增加. 中冷温度从 50 ℃升至 90 ℃，海拔为 0、1 000 和

2 000 m 时，排气带走热量分别增加了 6.37%、6.35% 和 8.28%，平均中冷温度每升高 10 ℃，排气带走热量分别增加 1.59%、1.59% 和 2.07%. 在相同中冷温度下，随着海拔升高，柴油机排气带走热量逐渐减少. 海拔从 0 m 升至 1 000 m 和 2 000 m，柴油机排气带走热量分别平均减少 3.53% 和 7.60%.

图 12 为排气带走热量的影响因子关系. 在相同海拔下，随着中冷温度的变化，排气带走热量的温度因子均大于质量流量因子，因而排气温差是相同海拔下排气带走热量的主要因素. 在相同海拔下，虽然随着中冷温度增加，进气流量减小，从而导致排气质量流量减小. 但随着中冷温度增加，排气温度增加，排气温差导致排气带走的热量增加.

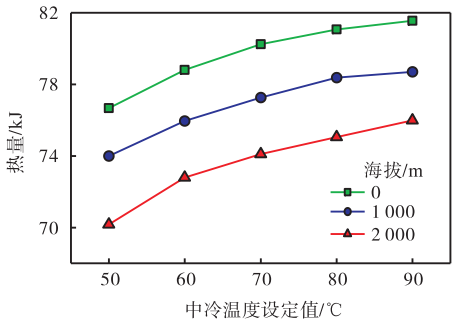
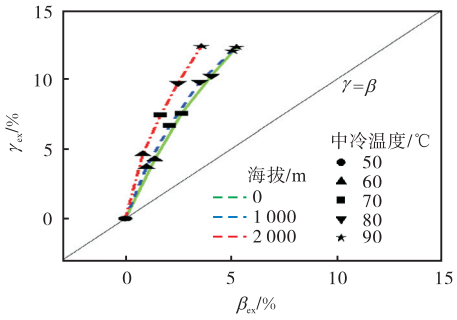
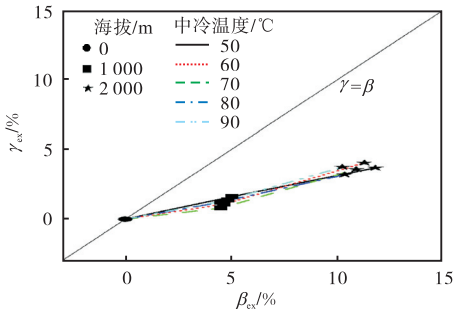


图 11 不同海拔下排气带走热量随中冷温度的变化

Fig.11 Variation of the heat removed by the exhaust with intercooler temperature under different altitudes



（a）中冷温度变化的因子关系



（b）海拔变化的因子关系

图 12 排气带走热量的影响因子关系

Fig.12 Relationship between the influencing factors of the heat removed by the exhaust

在相同中冷温度下，随着海拔升高，质量流量因子大于温度因子，因而质量流量变化是相同中冷温度下排气带走热量随海拔升高的主要影响因素. 因此，随着海拔升高，虽然排气温度也升高，但排气流量减小. 排气流量减小导致排气带走热量随着海拔升高而减小.

图 13 为柴油机冷却液带走热量随海拔的变化. 在相同海拔下，柴油机冷却液带走热量随着中冷温度升高逐渐增加. 中冷温度从 50 ℃升至 90 ℃，海拔为 0、1 000 和 2 000 m 条件下，冷却液带走热量分别增加了 15.61%、14.85% 和 12.14%，平均中冷温度每升高 10 ℃，冷却液带走热量分别增加 3.90%、3.71% 和 3.03%. 在相同中冷温度下，随着海拔升高，柴油机冷却液带走热量均增加. 海拔从 0 m 升至 1 000 m、2 000 m，柴油机冷却液带走热量分别平均增加 1.94%、3.52%.

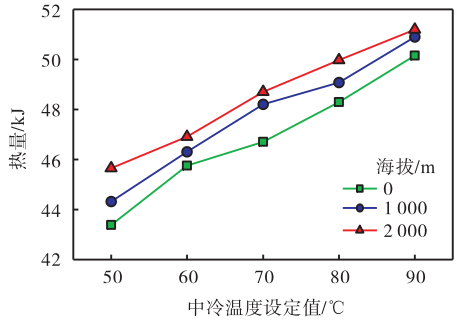


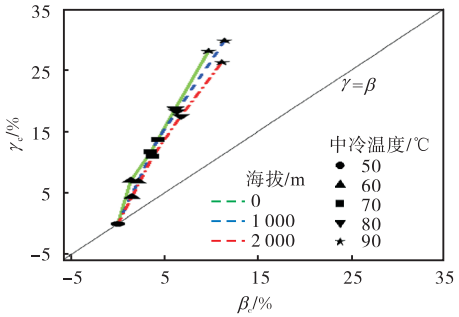
图 13 不同海拔下冷却液带走热量随中冷温度的变化

Fig.13 Variation of the heat removed by the coolant with intercooler temperature under different altitudes

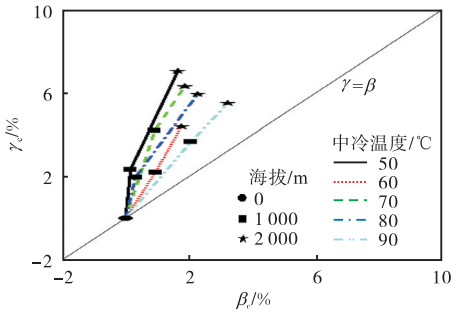
图 14 为冷却液带走热量的影响因子关系. 随着中冷温度和海拔的变化，冷却液温度因子均大于质量流量因子，因而无论是海拔变化还是中冷温度变化，冷却液进/出口温差均是冷却液带走热量变化的主导因素. 可知，随着中冷温度升高或海拔升高，冷却液带走热量均增加.

图 15 为柴油机杂项损失随海拔的变化. 在相同海拔下，随着中冷温度升高，柴油机杂项损失均有减小的趋势. 虽然在中冷温度升高的过程中，中冷带走热量减小，但更多的燃料热量向冷却液带走热量和排气带走热量转移，因而杂项损失逐渐减小. 当冷却液带走热量和排气带走热量相对于中冷带走热量最大时，杂项损失最小. 在相同中冷温度下，随着海拔升高，有效功与排气带走热量的减小量大于冷却液与进

气中冷带走热量的增加量，柴油机杂项损失增加. 海拔从 0 m 升至 1 000 m 和 2 000 m，柴油机杂项损失分别平均增加 13.96%、28.67%.



（a）中冷温度变化的因子关系



（b）海拔变化的因子关系

图 14　冷却液带走热量的影响因子关系

Fig.14　Relationship between the influencing factors of the heat removed by the coolant

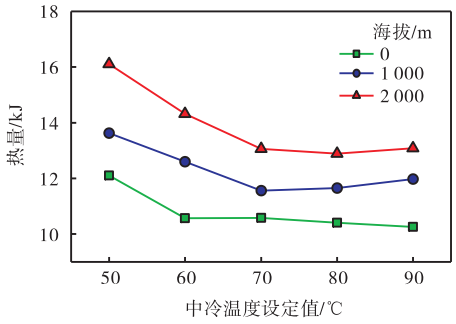


图 15　柴油机杂项损失随海拔的变化

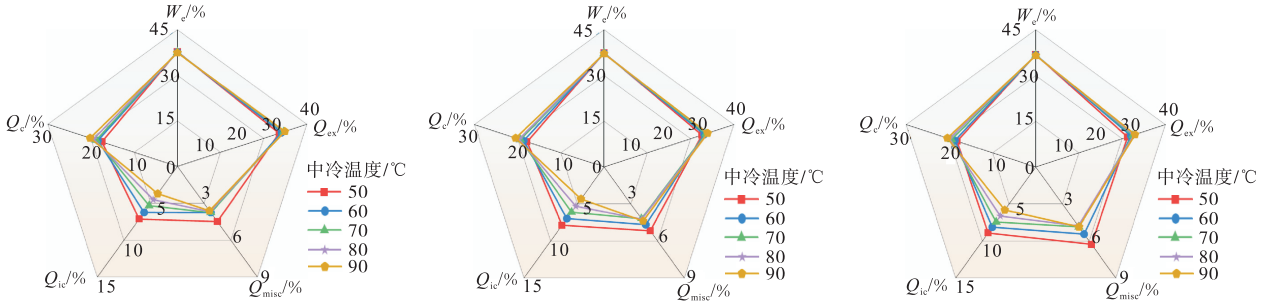
Fig.15　Variation of miscellaneous heat loss of the diesel engine with altitudes

2.3　柴油机不同海拔下的热量分配

图 16 为柴油机各项热量占比在不同海拔下随中冷温度的变化. 图 17 为柴油机各项热量占比在不同中冷温度下随海拔的变化.

由图 16 可知，在中冷温度从 50 ℃升至 90 ℃、海拔为 0、1 000 和 2 000 m 条件下，有效功率占比分别减小 0.35%、0.28% 和 0.27%，中冷带走热量占比分别减小 3.24%、3.31% 和 2.91%，杂项损失热量占比分别减小 0.79%、0.71% 和 1.26%，排气带走热量占比分别增加 1.75%、1.73% 和 2.25%，冷却液带走热量占比分别增加 2.63%、2.57% 和 2.18%. 中冷温度每升高 10 ℃，柴油机有效功率、中冷带走热量和杂项损失热量占比分别平均减小 0.08%、0.79% 和 0.23%，排气带走热量和冷却液带走热量占比平均增加 0.48% 和 0.62%. 在相同海拔下，有效功率受中冷温度变化的影响不显著. 但随着中冷温度升高，中冷带走热量的占比减小，更多的能量向排气和冷却液中转移，排气和冷却液带走热量的占比均增大，杂项损失热量变小. 可见，中冷温度升高会增加冷却系统的负荷，因而中冷系统需与冷却系统进行耦合匹配.

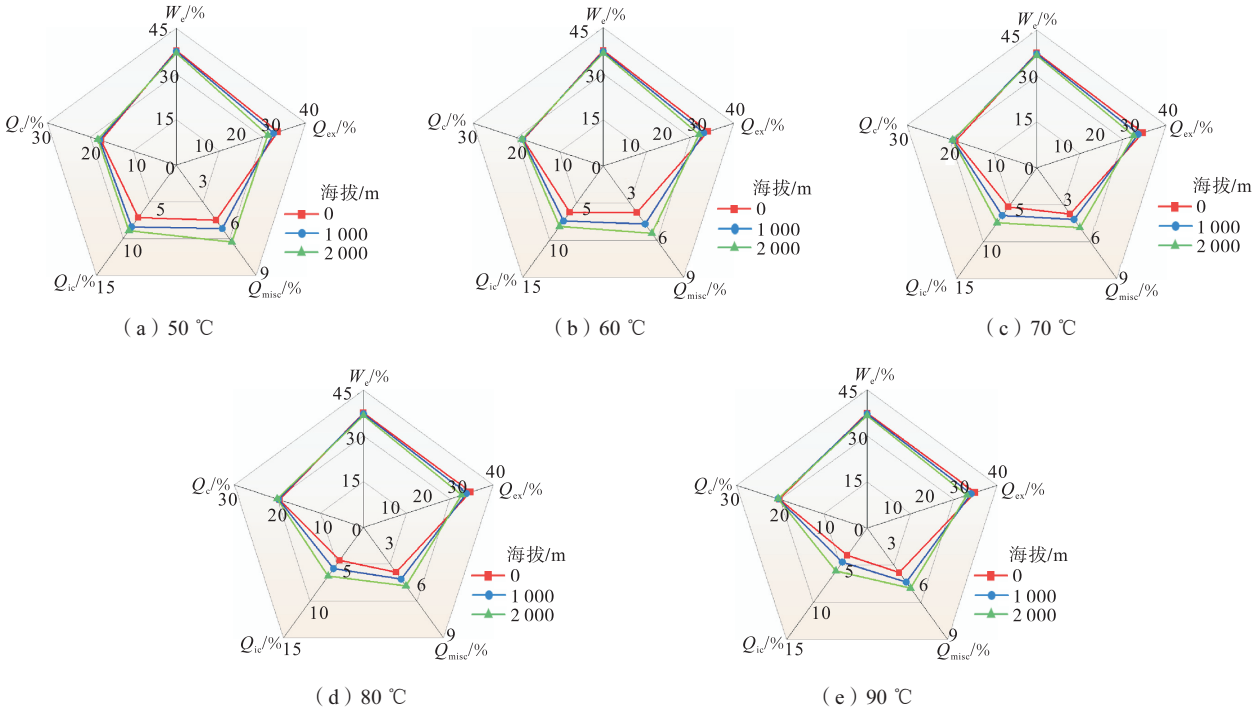
由图 17 可知，海拔从 0 m 升至 2 000 m，中冷温度为 50、60、70、80 和 90 ℃时，柴油机有效功率带走热量的占比分别减小 0.95%、0.86%、0.87%、0.85% 和 0.87%，排气带走热量占比分别减小 3.01%、2.72%、2.76%、2.68% 和 2.50%，冷却液带走热量占比分别增加 0.73%、0.31%、0.67%、0.55% 和 0.28%，中冷带走热量的占比分别增加 1.65%、1.77%、1.99%、1.99% 和 1.98%，杂项损失带走热量占比分别增加 1.58%、1.49%、0.98%、0.98% 和 1.12%. 海拔每升高 1 000 m，柴油机有效功率和排气带走热量占比平均减小 0.44% 和 1.37%，中冷带走热量、冷却液带走热量和杂项损失热量占比分别平均增加 0.93%、0.25% 和



（a）海拔为 0 m　　（b）海拔为 1 000 m　　（c）海拔为 2 000 m

图 16　不同海拔下各项热量占比随中冷温度的变化

Fig.16　Variation of heat proportion with intercooler temperature under different altitudes



（a）50 ℃　（b）60 ℃　（c）70 ℃

（d）80 ℃　（e）90 ℃

图 17　不同中冷温度下各项热量占比分布随海拔的变化

Fig.17　Variation of heat proportion distribution with altitudes under different intercooler temperatures

0.62%. 在相同中冷温度下，随着海拔升高，柴油机的有效功率降低，排气带走热量降低，更多的能量向增压中冷器、冷却液以及杂项损失转移，且转移到中冷器的能量占比最大. 因此，中冷器以及冷却系统的匹配应该考虑高原环境运行需求，为发动机在高海拔条件下运行预留足够的散热裕度.

3　结　论

（1）随着中冷温度升高，中冷带走热量减小，但会导致柴油机排气和冷却液带走热量增加，中冷系统需要与发动机冷却系统进行耦合匹配；随着海拔升高，排气带走热量减少，但会导致中冷带走热量和冷却液带走热量增加；中冷系统和冷却系统的散热能力需要为柴油机在高原环境运行预留足够的裕度.

（2）随着中冷温度或海拔变化，温差始终是中冷带走热量和冷却液带走热量变化的主导因素，而对于排气带走热量，随着中冷温度变化时，进/排气温差是其变化的主导因素，随着海拔变化，排气质量流量是其变化的主导因素.

（3）在相同海拔下，中冷温度每升高 10 ℃，柴油机有效功率、中冷带走热量和杂项损失热量占比分别平均减小 0.08%、0.79% 和 0.23%，排气带走热量和冷却液带走热量占比平均增加 0.48%、0.62%；中冷温度升高使得中冷带走热量减小，更多的热量向排气和冷却液中转移，但对功率的影响不显著；在相同中冷温度下，海拔每升高 1 000 m，柴油机有效功率和排气带走热量占比平均减小 0.44% 和 1.37%，中冷带走热量、冷却液带走热量及杂项损失热量占比分别平均增加 0.93%、0.25% 和 0.62%；随着海拔升高，柴油机的功率和排气带走热量均降低，更多的热量向增压中冷器和冷却液及杂项损失转移，且转移到中冷器的能量占比最大.

参考文献：

[1] 刘应材，雷基林，申立中，等. 柴油机高原适应性研究及压气机流场分析[J]. 内燃机工程，2021，42(5)：1-7.

[2] Maloney B，Ge Y W，Petersen R C，el a1. Experimental investigation of the impact of biodiesel on the combustion and emission characteristics of a heavy duty diesel engine at various altitudes[J]. Fuel，2014，115(1)：220-226.

[3] 黄润伍，黄荣华，代辉，等. 海拔高度对柴油机活塞温度及热负荷的影响[J]. 内燃机学报，2019，37(3)：280-287.

[4] 许翔，王丹，徐俊芳，等. 车辆冷却系统高原热平衡性能研究[J]. 装备环境工程，2021，18(2)：1-5.

[5] 许翔，刘双喜，牟连嵩，等. 集成排气歧管 GDI 发动机热平衡试验研究[J]. 汽车工程，2020，42(6)：741-745.

[6] 王旭东，熊春华，鲁长波，等. 高原环境下柴油机燃

用聚醚型含氧燃料热平衡试验研究[J]. 兵工学报，2018，39(8)：1473-1478.

[7] 王成东，李冰林，魏民祥，等. 二冲程航空活塞发动机电动增压匹配与实验研究[J]. 推进技术，2025，46(5)：1-9.

[8] 黄粉莲，雷基林，宋国富，等. 非道路涡轮增压柴油机高原适应性研究[J]. 内燃机工程，2020，41(4)：46-53，62.

[9] Yao Z M，Qian Z Q，Li R，et al. Energy efficiency analysis of marine high-powered medium-speed diesel engine base on energy balance and exergy[J]. Energy，2019，176：991-1006.

[10] 马富康，苏铁熊，赵振峰，等. 对置活塞二冲程柴油机热平衡和余热可用能分析[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2017，38(4)：433-438，445.

[11] Benajes J，Olmeda P，Martín J，et al. Evaluation of swirl effect on the global energy balance of a HSDI diesel engine[J]. Energy，2017，122：168-181.

[12] Zhao Y W，Xie Y J，Wang X C，et al. Energy balance analysis，combustion characteristics，and particulate number concentration-NO_x trade-off of a heavy-duty diesel engine fueled with various $PODE_n$/diesel blends[J]. Energy Conversion and Management，2020，225：113489.

[13] Ezzitouni S，Fernández-Yáñez P，Sánchez L，et al. Global energy balance in a diesel engine with a thermoelectric generator[J]. Applied Energy，2020，269：115139.

[14] 刘楠，周磊，张文建，等. 柴油机高海拔热平衡模拟试验系统开发[J]. 热科学与技术，2016，15(2)：129-134.

[15] 杨春浩，刘瑞林，焦宇飞，等. 二级可调增压柴油机变海拔热平衡试验[J]. 热科学与技术，2020，19(3)：276-282.

[16] Rao X X，Huang R H，Huang R W，et al. Effect of altitude on thermal balance of a heavy-duty diesel engine[J]. IOP Conference Series：Earth and Environmental Science，2020，467(1)：1755-1315.

[17] 许翔，刘瑞林，刘刚，等. 大气压力对柴油机冷却系统热平衡影响的研究[J]. 汽车工程，2012，34(7)：592-595.

[18] 杨春浩，刘瑞林，刘楠，等. 基于冷却液控制参数的柴油机变海拔热平衡试验[J]. 工程热物理学报，2018，39(9)：2103-2111.

[19] 周磊，刘振明，刘瑞林，等. 基于冷却液温度的柴油机不同海拔热平衡试验研究[J]. 海军工程大学学报，2017，29(5)：67-72.

[20] 张博，张萍，郭旭，等. 基于热平衡试验分析冷却系统对高强化柴油机的影响[J]. 船海工程，2022，51(4)：59-66.

[21] Chen B，Zhang L，Han J L，et al. An investigation on the effect of intake air humidification on the thermal balance of a turbocharged gasoline direct injection engine[J]. Case Studies in Thermal Engineering，2020，21：100719.

[22] Halis S，Doğan B. Effects of intake air temperature on energy，exergy and sustainability analyses in an RCCI engine fueled with iso-propanol and *n*-heptane[J]. Energy，2023，284：129050.

[23] Ma B D，Yao A R，Yao C D，et al. Experimental study on energy balance of different parameters in diesel methanol dual fuel engine[J]. Applied Thermal Engineering，2019，159：113954.

[24] 刘圣华，周龙保. 内燃机学[M]. 4 版. 北京：机械工业出版社，2017：172-175.

[25] 祝先标. YC6MK375N-30 型天然气发动机热平衡系统建模与试验研究[D]. 武汉：武汉理工大学能源与动力工程学院，2013.

[26] Pucher H，Zinner K. 内燃机增压：基础、计算和设计[M]. 倪计民译. 北京：机械工业出版社，2018：222-231.

[27] 王建，曹政，张多军，等. 基于 DPF 主动再生温度需求的柴油机进气节流控制策略[J]. 农业工程学报，2018，34(2)：32-39.