

汽车余热驱动的回质型吸附空调系统的理论研究

黄婷婷, 赵孝保, 郭燕雯, 张志伟, 张 凡, 焦 睿, 施耀明, 罗倩妮

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对传统蒸汽压缩式汽车空调的不足, 分析比较了几种常见余热制冷技术在汽车节能领域中的应用, 其中固体吸附式制冷空调被认为较有优势. 设计了一种新型汽车余热驱动的回质型固体吸附空调系统, 分别利用热管式换热器回收高温尾气余热和相变蓄热换热装置贮存发动机循环冷却水余热驱动回质型吸附制冷空调系统运转, 有效提高了燃料利用率和发动机性能, 改善了车内热舒适性. 经计算, 与传统压缩式空调相比, 采用本系统后汽车百千米省油0.76 L, 节能减排效果明显, 经济效益显著.

[关键词] 汽车余热, 吸附式空调, 回质, 热管换热器, 相变蓄热

[中图分类号] Tk11*5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)04-0027-05

Theoretical Study of Mass Recovery Adsorption Refrigeration Driving by Vehicle Waste Heat

Huang Tingting, Zhao Xiaobao, Guo Yanwen, Zhang Zhiwei, Zhang Fan,
Jiao Rui, Shi Yaoming, Luo Qianni

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The applications of several common waste heat-driven refrigeration technologies in the field of energy-saving for automobiles are analyzed and compared. It is concluded that solid adsorption refrigeration technology has advantages over other proposed cooling technologies. A novel solid adsorption automobile air-conditioning system with mass recovery is designed. It is driven by the waste heat of exhaust gas recovered by heat pipe and the waste heat of engine coolant stored by phase change materials, which can increase fuel efficiency, improve engine performance significantly, and ensure thermal comfort inside the vehicle. The calculated results indicate that compared with conventional vapor compression air-conditioning, utilization of this system will save 0.76 liters gasoline per one hundred kilometer for a vehicle. Thus, obvious energy-saving effects and significant economic benefits can be obtained.

Key words: vehicle waste heat, adsorption refrigeration, mass recovery, heat pipe, phase change materials

随着我国汽车工业的发展, 汽车能耗与日俱增, 其节能问题也越来越受关注, 而汽车空调作为高耗能产品更是成为节能研究的重中之重.

据调查发现, 目前汽车空调仍然普遍采用依靠发动机提供动力的传统机械式压缩制冷方式, 其中压缩机消耗功率约占发动机输出功率的5%~20%^[1], 这将使汽车发动机输出功率减少约10%~12%, 油耗增加约10%~20%^[2]. 因空调消耗的大量汽车动力势必降低启程的牵引力, 导致汽车动力性能降低. 此外, 研究显示, 汽车发动机消耗的能量中至少有51%转化成废热^[3]. 在这部分废热中30%以高温尾气形式排出车外, 70%则被发动机循环冷却水带走^[4], 排放的尾气温度最高可达600~700℃^[4], 造成巨大的经济损失和严重的环境污染, 违背了节能减排、低碳环保的理念.

因此, 降低汽车能耗和对汽车余热的高效利用成为汽车空调节能技术研究领域面临的两大难题. 利用发动机余热制冷, 不仅可以降低排入大气的尾气温度, 对环境起到更有效的保护作用, 而且可以大大减少汽车能耗, 降低碳排放.

收稿日期: 2014-04-24.

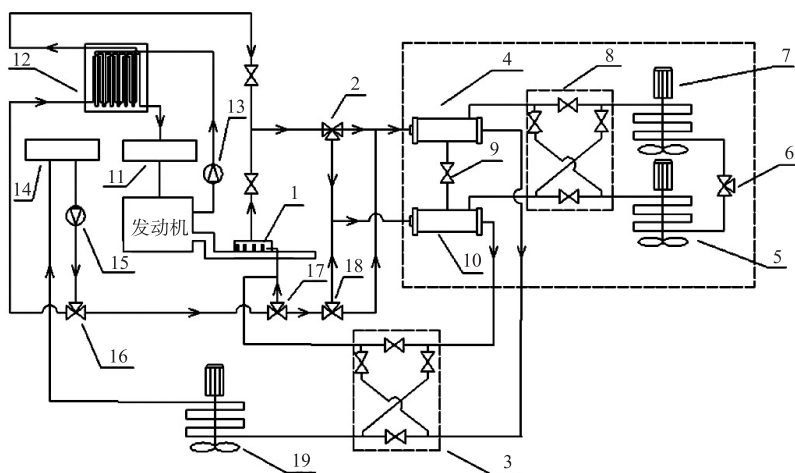
通讯联系人: 赵孝保, 博士, 教授, 研究方向: 多孔介质内汽液两相流动应用研究. E-mail: zhao@njjnu.edu.cn

1 现有余热制冷技术分析比较

目前研究较多的余热制冷空调形式主要包括:利用发动机冷却水余热和废气余热驱动溴化锂吸收式空调,通过计算表明所需换热面积小,完全可以满足汽车空调负荷要求^[5],但吸收式制冷系统复杂,造价高,且不适于在运动状态下、颠簸的汽车中使用,因此其推广应用受限;钟吉湘等人研究的余热与太阳能驱动汽车空调系统采用化学压缩制冷^[3],但因借助太阳能辅助使整套系统受气象因素限制较大,并不是利用低品位发动机余热的好途径;另有喷射式制冷系统,以喷射器代替压缩机,结构较为简单,造价低,但研究较少,技术远未成熟^[6]。相比之下,固体吸附式制冷系统运动部件少,可靠性高,其COP与吸收式系统相近^[7],具有抗振性能好、无泄漏、无噪声等优点^[8],可充分利用低品位余热,大大减轻了对环境的破坏,符合汽车空调绿色环保的发展趋势。Suzuki M^[9]论述了吸附式制冷系统在车辆上应用的可能性,重点阐述了技术的局限性,认为缩短循环周期和提高传热效率是关键技术之一。吸附式制冷作为环境友好的制冷方式和利用低品位能源的有效工具,已受到广泛重视,且在各国学者的不懈努力下,在制冷技术和方式上取得了重要进展^[10-17]。

2 余热驱动的固体吸附制冷空调系统理论研究

根据吸附式制冷方式在汽车余热利用领域的可行性,设计了一种汽车余热驱动的回质型固体吸附空调系统,如图1所示。该系统包括热源循环制备系统、连续回质型固体吸附制冷空调系统、相变蓄热换热系统以及循环水冷却系统。



1. 热管式换热器; 2. 三通阀a; 3. 换向器a; 4. 吸附床a; 5. 冷凝器; 6. 节流阀; 7. 蒸发器; 8. 换向器b; 9. 传质通道; 10. 吸附床b; 11. 冷却水箱a; 12. 相变蓄热换热装置; 13. 循环水泵a; 14. 冷却水箱b; 15. 循环水泵b; 16. 分水器; 17. 分水器b; 18. 三通阀b; 19. 散热器

图1 一种汽车余热驱动的固体吸附空调系统原理图

Fig.1 The schematic diagram of solid adsorption air conditioning system powered by automobile exhaust

2.1 行车时系统工作原理

当汽车正常运行时,如图2所示,利用热管优良的导热特性,实现尾气余热的高效回收。发动机产生的高温尾气经热管式换热器与冷却水箱b供应的冷水充分换热产生热水,作为吸附床a的热源。吸附床a受热,其中的活性炭温度升高,产生解吸作用。从活性炭中脱附出甲醇蒸汽,造成甲醇蒸汽压力不断上升达到饱和压力值,在冷凝器5中凝结,潜热被风机带走,凝结的液体甲醇贮存在蒸发器中。与此同时冷却水箱b在循环水泵b作用下向吸附床b供应冷水,其中的活性炭温度降低,吸附甲醇蒸汽的能力逐步提高,造成甲醇蒸汽压力降低,蒸发器中的液体甲醇不断蒸发出来,达到制冷的目的。在床a完全解吸和床b完全吸附后,打开传质通道9进行回质。回质结束后,通过切换控制阀方向,使两个吸附床切换工作状态,达到连续制冷,缩短循环周期^[18-19]的目的。

在行车过程中冷却水箱a中的循环水对发动机进

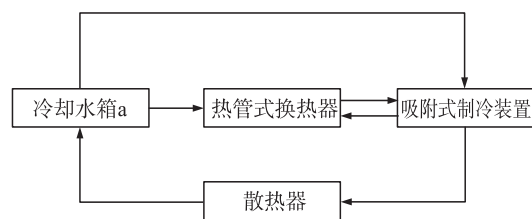


图2 行车时固体吸附制冷系统工作示意图

Fig.2 The schematic diagram of solid adsorption refrigeration system while driving

行冷却作用,如图3所示,产生的高温水通过相变蓄热装置,使微胶囊中的石蜡吸热液化,达到蓄热的目的。

2.2 停车状态下系统工作原理

当汽车停止运行时,如图4所示,发动机不再产生尾气,热源循环制备系统停止运行。冷却水箱b在循环水泵b作用下向相变蓄热装置提供冷水,使微胶囊中液态石蜡凝固放热,产生的热水作为停车时吸附床a的热源,使固体吸附式空调系统能在停车时继续运行。运行过程与汽车正常运行时相同。

3 系统理论计算

3.1 可行性分析

以排量为1.6 L,发动机最大功率为85 kW的小轿车为例进行分析,汽油燃烧热值为46 000 kJ/kg,排气比热为 $c_p=1.06 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,排气阀出口气体温度为500 ℃,排出车外温度为180 ℃。

3.1.1 平均制冷负荷

设行车时间为20 min,前10 min制冷负荷为5 kW,后10 min制冷负荷为1.67 kW,则平均所需的制冷负荷为 $Q_{\text{cool}}=3.33 \text{ kW}$ 。^[20]

3.1.2 排气热量

汽车在部分负载51 kW下行驶时,燃烧总热量约为185 kW,则需汽油 $4.02\times 10^{-3} \text{ kg/s}$ 。取过量空气系数 $\alpha=1$,需要的空气量为0.06 kg/s,排出气体量为0.064 02 kg/s,因而可利用的发动机排气热量为 $Q_{\text{wt}}=21.72 \text{ kW}$ 。由此可见,只要余热制冷系数WCOP达到0.15即可满足制冷要求。

3.1.3 吸附式制冷循环热力计算

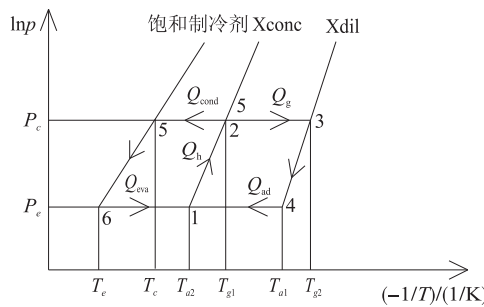
吸附式制冷循环的运动参数如表1所示。已知 t_{a2} 、 t_{g2} 、 P_c 、 P_e ,利用YKAC—甲醇的 p - t - x 图确定出循环吸附率 Δx 约为0.06 kg/kg。相关热物性参数的计算公式^[21]如表2所示。吸附率 x 的计算采用 D - A 方程的简略形式^[22-23],即

$$x = x(T, T_s) = x_0 \exp \left[-k \left(\frac{T}{T_s} - 1 \right)^n \right],$$

式中,方程的系数^[21]为 $x_0=0.284$, $k=10.21$, $n=1.39$ 。每个吸附床加热阶段要解析出的甲醇的质量 $m_r = Q_{\text{cool}} \times \tau_{\text{heating}} / L(T_e) = 0.808 \text{ kg}$,则每个吸附床中活性炭的质量 M_a 可计算为:

$$M_a = \frac{m_r}{t_{\text{heating}}} = 13.5 \text{ kg}.$$

连续回质型吸附制冷系统是在基本两床连续循环系统基础之上增加了一个回质过程,可有效缩短循环周期,提高制冷量。为简化计算,此处以基本吸附式制冷循环为例进行计算,如图5、表3所示。



Q_a 为吸附床等容升压过程中吸收的显热(图上过程1-2); Q_d 为解析过程中吸收的热量(图上过程2-3); Q_c 为冷却吸附床带走的显热(图上过程3-4); Q_{ad} 为吸附过程中带走的热量(图上过程4-1); Q_{de} 为制热量; Q_{cond} 为冷凝过程放出的热量(图上过程2-5); Q_{eva} 为液态制冷剂从 T_c 降至 T_e 放出的显热(图上过程5-6)

图5 基本吸附式制冷循环图

Fig.5 The diagram of basic absorption refrigeration cycle

表 1 吸附式制冷循环的运行参数

Table 1 The operating parameters of absorption refrigeration cycle

蒸发状态	冷凝状态
蒸发温度 $t_e=10\text{ }^{\circ}\text{C}$	冷凝温度 $t_c=40\text{ }^{\circ}\text{C}$
吸附温度 $t_{a2}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$	解析温度 $t_{g2}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$
初始解析温度 $t_{g1}=73\text{ }^{\circ}\text{C}$	初始吸附温度 $t_{a1}=46\text{ }^{\circ}\text{C}$
蒸发压力 $P_e=7\text{ }293\text{ Pa}$	冷凝压力 $P_c=34730\text{ Pa}$
循环时间 $\tau_{\text{cycle}}=10\text{ min}$	单床加热、冷却时间 $\tau_{\text{heating}}=\tau_{\text{cooling}}=5\text{ min}$

表 2 相关热物性参数计算公式

Table 2 The associated formulas of thermal parameters

热物理参数	计算公式
液体甲醇的比热容(kJ/(kg·K))	$c_{Tc}=c_{pc}=0.780\text{ }19+0.005\text{ }862T$
气体甲醇的比热容(kJ/(kg·K))	$c_{pg}=0.66+0.221\times10^{-2}T+0.807\times10^{-6}T^2-0.89\times10^{-9}T^3$
甲醇的汽化潜热(kJ/kg)	$L=1\text{ }252.43-1.595\text{ }93t-0.008\text{ }815\text{ }5t^2$
YK 活性炭的比热容(kJ/(kg·K))	$c_{sa}=c_{ps}=0.805+0.002\text{ }11T$

表 3 基本吸附式制冷循环热量计算结果

Fig.3 The calculations of heat in basic absorption refrigeration cycle

						kW
Q_h	Q_g	Q_c	Q_{ad}	Q_{ref}	Q_{cond}	Q_{eva}
6.3	6.2	6.3	5.9	3.34	3.2	0.2

因此,吸附式制冷循环的性能系数可计算为:

$$\text{COP}=\frac{Q_{ref}}{Q_h+Q_g}\approx0.27.$$

余热制冷系数可计算为:

$$\text{WCOP}=\frac{Q_{ref}}{Q_{\text{wst}}}\approx0.154.$$

单位质量吸附剂的制冷功率可计算为:

$$\text{SCP}=\frac{L(T_e)\Delta x}{\tau_{\text{cycle}}}=123.6\text{ W/kg}.$$

由以上可知,基本型吸附制冷系统总制冷功率 $Q_{\text{cooltotal}}=\text{SCP}\times\text{Ma}\times2=3.337\text{ }2\text{ kW}$,可满足制冷需求. 因此,引入回质过程后在缩短循环时间的同时制冷功率亦可满足制冷需求.

3.2 能耗分析

与采用传统压缩式空调系统的汽车相比,虽然使用吸附式空调系统后车重增加了 $96\text{ kg}^{[20]}$,造成燃油里程下降约 $(96/1\text{ }050)\times60\%=5.5\%$,但由于吸附式空调系统取代机械压缩式空调系统后避免了压缩机对燃料的消耗,又使燃油里程增加约 $18\%^{[20]}$. 综合这两方面的影响,采用吸附式空调制冷系统后汽车百千米油耗为 $7.24\text{ L}/100\text{ km}$,与传统采用压缩式汽车空调百千米油耗为 $8\text{ L}/100\text{ km}^{[20]}$ 相比,相当于每百千米省油 0.76 L .

以我国民用轿车保有量为 $7\text{ }126$ 万辆,平均每年行驶里程为 $12\text{ }000\text{ km}$ 计,假设只有 7、8 月份使用空调制冷,将减少的油耗折算成污染物排放量,则采用本系统后每年可减排 $\text{CO }1.3\text{ 万 t}$,碳氢化合物 $1\text{ }353\text{ t}$, $\text{NO}_x\text{ }1\text{ }083\text{ t}$, $\text{CO}_2\text{ }169\text{ 万 t}$, $\text{PM }338\text{ t}$. 取 93 号汽油价格按 7.5 元/L ,则每年共可节省燃油 $108\text{ }315\text{ 万 L}$,可节省燃料费用 81 亿元 ,具有显著的经济效益.

4 结论

(1)余热制冷技术是降低汽车空调高能耗的主要手段,其中吸附式制冷方式在车辆上应用的可行性较好;

(2)本系统中采用热管换热器大幅提高传热效率,实现了尾气余热的高效回收;同时引入回质过程,可有效提高制冷量,缩短循环周期;

(3)设计的汽车余热驱动的固体吸附制冷空调系统,经理论计算,COP 可达 0.27 ,SCP 为 123.6 W/kg ,每百千米可以省油 0.76 L ,在满足制冷需求的同时具有较好的经济效益.

[参考文献](References)

- [1] 崔选盟. 汽车空调节能降耗途径探讨[J]. 农业装备与车辆工程, 2008(9):44-45.
CUI X M. Investigation on ways of saving energy and reducing consumption for air conditione [J]. Agricultural equipment & vehicle engeineering, 2008(9):44-45.(in Chinese)
- [2] 张立志. 固体吸附制冷汽车空调的研制[J]. 能源研究与利用, 1998, 1(11):11-14.
ZHANG L Z. Development of solid adsorption refrigeration in automobilier air conditioning[J]. Energy research and utilization, 1998, 1(11):11-14.(in Chinese)
- [3] 钟吉湘. 余热与太阳能驱动汽车空调系统[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(8):138.
ZHONG J X. Air-conditioning system driven by waste heat and solar energy [J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2010, 30(8):138.(in Chinese)
- [4] 韩玉敏. 排放控制系统[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
HAN Y M. Emission control system [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2005.(in Chinese)
- [5] 周东一, 石楚平. 利用汽车发动机余热的溴化锂吸收式制冷研究[J]. 节能, 2008(6):23-26.
ZHOU D Y, SHI C P. Research on LiBr absorption refrigeration system using automotive exhausted heat[J]. Energy conservation, 2008(6):23-26.(in Chinese)
- [6] 张秀丽. 利用汽车冷却废热驱动的喷射式空调器及其制冷工质的研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
ZHANG X L. Resrarch on the jet-type refrigeration system and the refrigeration working substance taking the automobile cooling waste heat as the actuation [D]. Xi'an:Chang'an University, 2008.(in Chinese)
- [7] MEUNIER F. Adsorption heat pump technology: possibilities and limits [C]//Proc Int Sorption Heat Pump Conf. Munich, 1999:25-35.
- [8] 马刚, 李戡洪. 固体吸附式制冷技术在汽车空调中应用的可行性及前景分析[J]. 制冷, 2004, 23(1):23-26.
MA G, LI J H. The application of solid adsorption refrigeration in automobile air-conditioning[J]. Refrigeration, 2004, 23(1):23-26.(in Chinese)
- [9] SUZUKI M. Application of adsorption cooling systems to automobiles [J]. Heat recovery systems & CHP, 1993, 13(4):335-340.
- [10] OLIVEIRA R G, SILVEIRA V Jr, WANG R Z. Experimental study of mass recovery adsorption cycles for ice making at low generation temperature[J]. Appl Therm Eng, 2006, 26:303-311.
- [11] ZHONG Y, CRITOPH R E, THORPE R N, et al. Isothermal sorption characteristics of the BaCl₂-NH₃ pair in a vermiculite host matrix[J]. Appl Therm Eng, 2007, 27:2 455-2 462.
- [12] AIDOUN Z, TERNAN M. Salt impregnated carbon fibres as the reactive medium in a chemical heat pump: the NH₃-CoCl₂ system[J]. Appl Therm Eng, 2002, 22:1 163-1 173.
- [13] YANG G Z, XIA Z Z, WANG R Z, et al. Research on a compact adsorption room air conditioner[J]. Encyclopedia of energy, 2006, 47:2 167-2 177.
- [14] PONS M, POYELLE F. Adsorptive machines with advanced cycles for heat pumping or cooling application[J]. International journal of refrigeration, 1999, 22(1):27-77.
- [15] SUN L M, FENG Y, PONS M. Numerical investigation of adsorption heat pump system with thermal wave heat regeneration under uniform-pressure conditions[J]. Heat mass transfer, 1997, 40(2):281-293.
- [16] BEN A N, SUN L M, MEUNIER F. Numerical analysis of adsorptive temperature wave regenerative heat pump [J]. Appl Therm Eng, 1996, 16(5):405- 418.
- [17] AKAHIRA A, ALAM K C A, HAMAMOTO Y, et al. Experimental investigation of mass recovery adsorption refrigeration cycle[J]. International journal of refrigeration, 2005, 20(3):225-234.
- [18] QU T F, et al. Study on heat and mass recovery in adsorption refrigeration cycles[J]. Appl Therm Eng, 2001, 21(4):439-452.
- [19] SZARZYNSKI S, FENG Y, PONS M. Study of different internal vapor transports for adsorption cycles with heat regeneration[J]. International journal of refrigeration, 1997, 20(6):390-401.
- [20] JONES B J, LAMBERT M A. Automotive adsorption heat pump: WO2006135871 A2[P]. 2006-12-21.
- [21] 王如竹, 吴静怡, 代彦军, 等. 吸附式制冷[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
WANG R Z, WU J Y, DAI Y J. Adsorption refrigeration [M]. Beijing:Machinery Industry Press, 2002.(in Chinese)
- [22] CRITOPH R E. Performance limitations of adsorption cycles for solar cooling[J]. Solar Energy, 1988, 41(1):21-31.
- [23] TAMAINOT-TELTO Z, CRITOPH R E. Adsorption refrigerator using monolithic carbon-ammonia pair[J]. International journal of refrigeration, 1997, 20(2):146-155.

[责任编辑:严海琳]