

# 高原高寒地域中重型车辆进气预热 起动辅助装置研究

岳巍强<sup>1</sup>, 王朔<sup>1</sup>, 刘炳均<sup>1</sup>, 刘峰运<sup>2</sup>

(1.军事交通运输研究所, 天津 300161; 2.北京京威汽车设备有限公司, 北京 100022)

**摘要:** **目的** 解决高海拔地域中重型越野车辆的起动困难问题。**方法** 从进气温度对车辆起动的影响因素入手, 系统地研究几种典型进气预热型式的优缺点。针对中型和重型两台越野车的具体情况, 设计选型集中加热的电阻型格栅式进气预热器。经设计计算和反复测试, 确定两型加热器的尺寸和功率等主要参数和控制策略, 计算分析与车载蓄电池的匹配关系。**结果** 对两型进气预热器进行实车安装后, 分别经过实验室试验和野外现场验证, 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 实验室常压环境和 $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高原环境条件下, 两型车辆均能在3 min内顺利起动。**结论** 在高原高寒地域, 格栅式电阻进气预热器可有效解决 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温度范围的起动困难问题。该装置结构简单、安装方便、可靠性高, 便于中重型车辆加装使用, 为该类问题提供了有效的技术解决途径。

**关键词:** 高原高寒; 进气温度; 集中预热; 电阻格栅

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.10.008

**中图分类号:** TJ07; TK427

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)10-0041-06

## Engine Starting Auxiliary Device for Air Intake Preheating of Medium & Heavy Duty Vehicles in Plateau and Cold Area

YUE Wei-qiang<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1</sup>, LIU Bing-jun<sup>1</sup>, LIU Feng-yun<sup>2</sup>

(1.Military Traffic Institute, Tianjin 300161, China; 2.Beijing Jingwei Vehicle Equipment Co., Ltd, Beijing 100022, China)

**ABSTRACT: Objective** To overcome the engine starting difficulty of medium and heavy duty off-road vehicles at plateau and cold area. **Methods** Influences of intake air temperature on engine starting was proceeded to study advantages and disadvantages of several typical air intake preheating methods. Based on the real substance of two off-road vehicles, the gridiron centralized resistance preheater was designed. Main parameters such as the power the size and the control strategy by calculate and testing were confirmed and the matching relationship of the cell and the preheater was also analyzed. **Results** Preheater was installed on the vehicles to make some test in the natural pressure lab and the real plateau condition. Vehicles can be started in 3 minutes with the assistance of the preheaters at  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  in lab and  $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$  in real plateau environment. **Conclusion** The method can effectively settle the problem of the engine starting at plateau zone where the temperature is above  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The equipment is easy to install and has high reliability, is applicable to the off-road vehicles, and also gives an effective way to solve such problems.

**KEY WORDS:** plateau and cold zone; intake air temperature; centralized preheating; gridiron resistance

高原气候环境具有大气压力低、气温低和昼夜温差大等特点。在高原环境下, 海拔每升高 1000 m,

大气压力下降 9%, 同时温度下降  $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。海拔越高, 年低温期也越长, 海拔 4000 m 以上的地区为常年固

定冷区,年平均气温在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,冷期大于5个月,极端最低气温低至 $-27\sim-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。青藏线两个节点

地域近10年的温度统计情况见表1。

特殊的地理环境和气候特点导致高原地域车辆

表1 青藏线五道梁和沱沱河地区近10年气温情况

$^{\circ}\text{C}$

月份	五道梁地区				沱沱河地区			
	最高	最低	平均	极端最低	最高	最低	平均	极端最低
1	-7.05	-22.29	-15.12	-30.3	-5.23	-23.35	-15.07	-32.9
2	-4.79	-19.41	-13.25	-32.1	-4.38	-20.98	-12.44	-36.3
3	-1.2	-17.36	-9.76	-30.8	1.04	-16.29	-7.94	-26.0
4	3.95	-11.15	-4.36	-22.3	6.03	-11.07	-2.9	-21.2
5	6.62	-5.86	-0.35	-16.8	9.41	-5.16	1.54	-14.9
6	10.06	-0.7	3.49	-7.1	12.52	0.42	5.73	-6.7
7	13.44	1.51	6.11	-6.9	15.36	3.05	8.25	-2.9
8	12.28	1.14	5.89	-5.8	14.33	3.04	7.97	-5.2
9	9.43	-1.98	3.18	-8.8	11.65	-0.75	4.47	-8.5
10	2.98	-8.99	-4.25	-20	5.07	-8.56	-2.78	-30.1
11	-2.32	-17.23	-10.95	-25.6	-1.2	-18.55	-10.98	-34.5
12	-6.23	-21	-14.51	-30	-4.49	-21.61	-14.7	-37.0

起动困难成为普遍性问题,给车辆装备的使用带来极大不便。低温起动性能作为越野车辆的重要指标,受进气温度、冷却液温度、机油温度、燃油特性、喷雾特性、蓄电池低温放电性能等多种因素影响,一直是业内的难题<sup>[2-3]</sup>。归结起来,越野车柴油机冷起动困难的根本原因:发动机运转的阻力参数和燃烧动力参数不相匹配,也就是当活塞达到上止点附近时,燃烧室内没有形成足够数量的可燃混合气对外做功,并克服外界阻力<sup>[4]</sup>。文中针对高原高寒地域车辆起动困难问题,以中型和重型两台越野车辆为主要研究载体,分别从进气预热、发动机预热和蓄电池加热等方面着手研究,探索相关措施对车辆起动的辅助作用,为该问题的解决提供技术途径。

柴油机的着火条件是压缩终点压力达到 $3\text{ MPa}$ ,并且温度达到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[5]</sup>。在高原高寒地域,由于多数时间气温低,进入气缸的空气温度偏低,导致混合气温度过低,并且发动机机体过冷,燃烧室周边机件散热快,导致柴油雾化质量差,混合气着火滞后期延长,缸内环境不容易达到柴油着火温度条件,造成起动困难。当进入柴油机的空气温度低到一定程度,就会因压缩终点温度过低而使柴油机不具备着火条件,从而致使起动失败<sup>[6]</sup>。柴油机进气温度和压缩温度的关系可用式(1)表示:

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \quad (1)$$

式中: $T_1$ 为进气温度, K;  $T_2$ 为压缩空气温度, K;  $V_1$ 为压缩前燃烧室容积, L;  $V_2$ 为压缩后燃烧室容积, L;  $n$ 为压缩过程多变指数。

由式(1)可知,燃烧室容积一定则压缩比不变,因此若要提高发动机的压缩混合空气温度,必须提高

进气温度。

## 1 车用发动机进气预热研究现状

发动机进气预热是从柴油机低温起动困难的源头着手,用辅助发热装置对进气进行加热以提高混合气温度,使发动机能在较低环境温度条件下顺利起动。多年来,国内外同行业在相关领域进行了广泛研究<sup>[7-8]</sup>,如文献[7]开展了柴油机冷起动现状的研究,文献[8]为研究柴油机高原环境适应性的专著。通过不断的发展和实践,相继开发了多种进气预热装置<sup>[9-11]</sup>,从发热原理到结构形式都各有不同。

### 1.1 常用进气预热方式

以进气预热方式分,一般有集中式加热和分缸式加热两种。前者一般利用加热装置在进气总管部位对进气进行加热,优点是结构相对简单,易于控制并加热效率高;缺点是加热部位距离气缸相对较远,空气经过温度较低的进气歧管后会有部分热量损失。后者一般是将多个加热装置并联布置到进气口附近,分别对每个气缸的进气进行加热,优点是加热效果更好,同时也不可避免存在结构相对复杂,故障点较多等缺点。

### 1.2 常用进气预热器结构

从进气预热器的结构型式上分,一般有点热式加热器和通过式加热器两种。前者一般采用预热塞式结构,利用一个或几个预热塞加热进气口周边空气。其优点是结构相对简单,易于安装且布置灵活;缺点是靠热辐射方式传导热量,加热面积小,加热效果相对较差。通过式加热装置一般采用在进气道上设置的栅格式结构,使通过的冷空气边流动边加热,优点是与

空气接触表面大，加热效率更高，预热效果更好；缺点是安装相对复杂，并且由于栅格作用，对进气量可能产生一定影响。

### 1.3 常用进气预热器材质

从材质角度分，目前常用且技术相对成熟的进气预热装置有三种：电阻式进气预热器、火焰式预热器及热敏陶瓷进气预热器（常称 PTC 进气预热器）。

1) 电阻式进气预热器。电阻式进气预热器结构简单，主要是依靠车载蓄电池使电阻元件发热，对发动机进气进行加热。主要由电阻元件、壳体、绝缘体和接线端子等组成。电阻元件一般采用镍铬合金材料制成，以保证在高温情况下的安全可靠。其优点是寿命长，不易断裂，不易脱皮，短路时收熔性好，不会发生因短路或疲劳所产生的大块脱落物被吸进气缸造成发动机损坏的现象。缺点是需要消耗一部分蓄电池的电能，对于低温条件下本就电量供应相对吃紧的情况来说，有一定的影响。

2) 火焰式进气预热器。火焰式进气预热器是通过预热塞使柴油在进气管内燃烧，从而加热进气的辅助装置。一般形式为在进气管中设置丝状电阻，工作时使电阻丝加热燃油形成火焰，利用火焰直接加热发动机进气。它的优点是消耗的电能相对少，通常所需功率约 250 W 左右，起动一次耗电量不足 0.5 Ah，并且对进气的加热温度较高；缺点是需要消耗进气道中的一部分氧气并且产生部分废气，导致发动机功率损失。

3) PTC 进气预热器。PTC 进气预热器是采用正温度系数的热敏陶瓷作为加热体的装置。以储热热交换方式工作，结构一般为同心分布多级串联散热片形式。正温度系数的 PTC 电热陶瓷材料属铁钛酸钡类半导体，其电阻值可随温度变化而改变。当外界温度为 20 ℃ 时，其电阻仅为 0.2~0.4 Ω。电路接通后瞬时加热电流很大，其表面温度迅速升高，1 min 即可达到 60~80 ℃，3 min 内即可达到 200 ℃ 左右。此后电阻值趋向无穷大，电流趋于 0，加热体温度不再升高，电路几乎切断，从而达到自动控温的效果<sup>[12-13]</sup>。

相比前两种预热器，PTC 预热器具有热效率高、

自动恒温等项优点，但是由于目前 PTC 陶瓷进气预热器均为一体式，安装于发动机进气管口，其内部结构决定它的外形较大，对于发动机舱室布置相对紧凑的车辆无法安装。另外由 PTC 陶瓷材料的性质所决定，在低温起动过程中，高速低温进气与 PTC 材料进行热交换后 PTC 材料温度迅速下降，为了保持温度需迅速恢复加热工作，PTC 材料消耗功率会急剧上升，对蓄电池低温放电能力要求高，对后续的发动机起动造成不利影响。

表 2 是电阻式进气预热器、火焰式进气预热器和 PTC 进气预热器相关性能的比较，通过对比可见，三种进气预热器各有所长，适合的对象和使用环境也不尽相同。

表 2 三种进气预热器性能比较

项目	电阻式	火焰式	PTC
体积	较小	较小	较大
热效率	高	较高	高
耗电量	较高	较低	较高
制造成本	低	较低	较高
可靠性	好	较差	较好
是否消耗氧气	否	是	否
有效温度范围/℃	0~-30	0~-30	0~-35

## 2 高原高寒地域中重型车辆进气预热器设计选型

根据上述分析，结合本研究主要内容即中型和重型越野车辆在高原高寒地域起动困难的问题，下面以重型越野车为主探讨采用进气预热技术型式的设计选型。

### 2.1 结构选型设计

两型越野车辆均使用六缸直列水冷发动机，具体参数见表 3。由表 3 可见，两车发动机均较大，起动所需进气量大，对于冷起动所需加热的要求更高。经进一步研究发现，其进气歧管为外置结构且腔体较大，额外加装进气预热装置较为容易。

表 3 两型越野车发动机主要参数表

	重型	中型
发动机型号	WD615.77	6BT5.9
发动机型式	六缸，直列，水冷，四冲程，直喷增压中冷柴油机	六缸，直列，水冷，四冲程，增压柴油机
气缸直径/mm	126	102
活塞行程/mm	130	120
排量/L	9.726	5.88
压缩比	16:1	17.5:1
额定功率/(kW·r <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	206/2400	118/2800
最大扭矩/(N·m·r <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	1070/1400~1500	546/1700
质量/kg	850	490

经拆解该重型越野车发动机后,发现原机装配了2只火焰预热装置,分别位于进气管入口附近和中部位置。实验室起动效果表明,该预热装置辅助效果并不理想,分析其原因归结于加热功率不足所致。另外,考虑火焰预热方式需要消耗部分氧气,高原地域空气相对稀薄,该方式对起动不利因素较多,为此项目组认为火焰预热方式不适合本研究需要。考虑该越野车与发动机的布置结构和较大的进气预热需求,PTC 预热器体积较大,不容易进行改装布置。同时,PTC 进气预热器受材质本身加热原理制约,存在对蓄电池放电能力的较高要求和本身最高温度受限制等问题,也不适合本研究对象使用需要。

根据进气量大、进气歧管腔体大、散热快等特点,经反复论证和实验比对,确定两型越野车辆进气预热装置选用大功率电阻式进气预热器,安装位置在发动机进气总管口,采用栅格式结构进行通过型进气加热,容易获得最好的预热效果。设计产品时,在满足加热功率的前提下,充分考虑了安装位置和空间,对产品的尺寸进行了合理设计。该集中加热式电阻型格栅进气预热器外形及安装如图1所示,其长度和宽度依据发动机进气管口部尺寸进行设计,厚度依据进气导流管与进气总管口部之间可附加的尺寸和加热器本身结构需要进行设计。根据两型车实际情况,设计选型的进气加热器尺寸(长×宽×厚)如下:重型为120 mm×120 mm×40 mm,中型为85 mm×85 mm×25 mm。

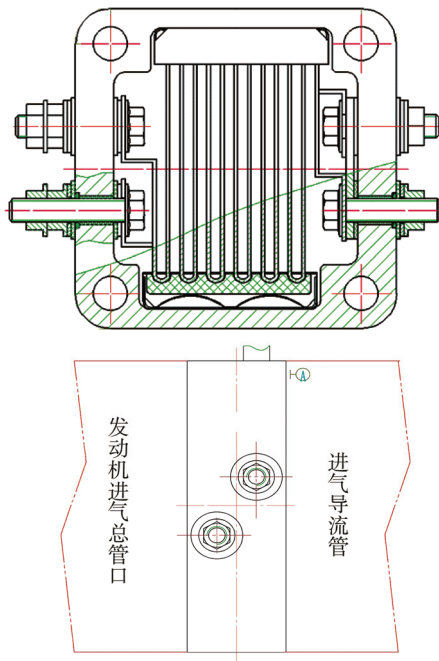


图1 集中加热式电阻型格栅进气预热器外形及安装

## 2.2 加热功率设计选型

柴油机顺利起动所需进气加热量计算过程为:

$$n_1 = \frac{\lg\left(\frac{P_{cc}}{P_{ca}}\right)}{\lg \varepsilon_{cc}} \quad (2)$$

$$T_{ca} = \frac{T_{cc}}{\varepsilon_{cc}^{(n_1-1)}} \quad (3)$$

$$T_d = 273.15 + k(T_{ca} - 273.15) \quad (4)$$

$$G_{s2} = \varphi_c \frac{P_d \cdot V_s \cdot i \cdot n \cdot t}{R \cdot T_d} \cdot \eta_s \quad (5)$$

$$Q_1 = C_p \cdot G_{s2} (T_d - T_a) \quad (6)$$

式中:  $n_1$  为压缩多变指数;  $P_{ca}$  为气缸进气压力,  $P_{ca} = (0.8 \sim 0.9) P_d$ , MPa;  $P_d$  为进气管进气压力, MPa;  $P_{cc}$  为气缸压缩终点压力, MPa;  $\varepsilon_{cc}$  为有效压缩比,  $\varepsilon_{cc} = (0.8 \sim 0.9) \varepsilon_c$ ;  $\varepsilon_c$  为压缩比;  $T_{ca}$  为压缩起点温度, K;  $T_{cc}$  为压缩终点温度, K;  $T_d$  为柴油机进气系统温度, K;  $k$  为热利用系数, 依据经验取 1.5~2;  $G_{s2}$  为柴油机进气量, kg;  $\varphi_c$  为充气系数, 取 0.75;  $V_s$  为气缸工作容积, L;  $i$  为汽缸数;  $n$  为发动机转速, r/min;  $R$  为空气气体常数,  $R = 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\eta_s$  为柴油机扫气系数, 取  $\eta_s = 1$ ;  $t$  为起动时间, s;  $Q_1$  为进气所需加热量, kJ;  $C_p$  为空气质量定压热容,  $-21 \sim -50 \text{ }^\circ\text{C}$  时;  $C_p = 1.013 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_a$  为环境温度, K。

由于进气管无保温隔热材料,因此进气预热器产生的热量除了加热进气管内的空气外,还通过管壁以自由流动换热方式向周围散热。假设发动机进气经预热后,进气管内温度和各缸温度平均升高了  $\Delta T$ ,则电阻式进气预热器所需提供的总热量  $Q$  为:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (7)$$

$$Q_2 = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\delta} \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

式中:  $\lambda$  为进气管导热率,材料为铸铁,取  $\lambda = 39.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $A$  为进气管内表面积,  $\text{m}^2$ ;  $\delta$  为进气管壁厚,取 0.01 m;  $\Delta T$  为缸内、管内平均升高温度, K;  $t$  为起动时间,取 30 s。

根据公式(2)~(8),同时考虑一定的设计裕量,确定两台发动机用进气预热器功率为(重型)2.2 kW和(中型)1.0 kW。

## 2.3 控制参数设计

蓄电池电量是电预热低温起动的关键因素,因此在设计时需考虑加热过程中造成的蓄电池压降因素。以该重型越野车为例:其车载蓄电池为两块 195Ah 蓄电池。经查在常温下单块蓄电池内阻为 3 mΩ,两块蓄电池内阻共 6 mΩ。低温状态 0 °C 以下,温度每下降 10 °C,内阻约增大 15%,则在 -30 °C 时,内阻约增大 45%,即 -30 °C 时蓄电池内阻为 8.7 mΩ。2.2 kW 的电加热器额定电流为 92 A,则当 -30 °C 环境使用该电预热器时,蓄电池压降为 0.8 V。即环境温度 -30 °C 时,该蓄电池压降 0.8 V,约为 3%,能满足

该加热器工作需求。

上述设计计算完成后,需确定预热控制关键控制参数。电阻式进气预热器的结构相对简单,其重要的控制参数为加热时间和起动时机的确定。经核算蓄电池电量、预热器加热能力和发动机起动需求并反复实验测试后,确定了控制参数和控制过程如下:当进气预热器接通电源后,由控制器控制预热器工作,加热时间确定为60 s,然后对驾驶员进行起动发动机的操作指示,同时为对补充进气进行加热,加热器继续工作30 s。

### 3 进气预热器实车安装测试

完成以上设计后,分别进行了两型进气预热器的选型和安装,其中重型越野车进气预热器实车安装如图2所示。

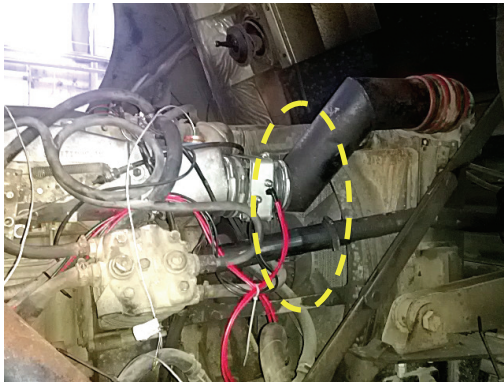


图2 重型越野车进气预热器安装

#### 3.1 进气预热器实车实验室测试

实车安装调试完成后,首先进行了实验室测试,测试现场如图3所示。



图3 重型越野车实验室测试现场

1) 测试方案。测试车辆更换低温用燃油、润滑油和齿轮油,使用两块低温型蓄电池,在发动机底壳和变速箱内分别安装了温度传感器,测试润滑油和齿轮油温度。试验车辆置于低温实验室内,当实验室温度和发动机润滑油温度均达到测试温度点后进行实

车发动机起动试验,分别在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两个温度点进行了测试。

2) 测试结果。在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度条件下,重型越野车辆在进气预热器加热30 s后进行起动试验,两次测试均能顺利起动成功;在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度条件下,该重型越野车辆在进气预热器加热60 s后进行起动试验,两次测试均起动成功。

#### 3.2 进气预热器实车实地测试

经实车实验室验证后,项目组进行了3900 m高海拔寒冷地域的实地测试。

1) 测试方案。测试车辆保持良好状态,更换符合当地使用环境的油、液和蓄电池,在野外环境静置一夜。测试时间选择为凌晨6:00左右当地最低气温时间,现场记录试验时环境温度为 $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,分别对两台样车进行了起动测试。

2) 测试结果。中型车辆一次起动成功,从开始预热到起动成功共历时130 s;重型车辆两次起动成功,从开始预热到起动成功共历时160 s。

### 4 结语

文中针对中型和重型两台越野汽车在高原高寒地域起动困难问题,从进气温度角度考虑,综合参考了不同进气预热装置的型式、材质,结合车辆实际情况,兼顾安装和电源等因素,设计选型了合适的进气预热器,经理论计算和实验室测试验证,确定了预热时间和起动时机等控制参数。实验室测试和高原地域实车测试结果表明,在环境温度接近 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,该辅助装置能够满足对车辆起动有明显的辅助效果。该方式结构简单、可靠性高,便于中重型车辆的加装使用。该研究为高原高寒地域一定范围内车辆起动困难问题提供了有效的解决办法,同时为此类问题提出了较为系统的分析思路和解决方案。

#### 参考文献:

- [1] 姚永慧,张百平. 青藏高原气温空间分布规律及其生态意义[J]. 地理研究, 2015, 11(24): 2086-2090.
- [2] 陈家瑞. 汽车构造(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 308-312.
- [3] 董素荣,许翔,周广猛,等. 车用柴油机高原性能提升技术研究现状与发展[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 68-70.
- [4] LIU H, HENEIN N A, BRYZIK W. Simulation of Diesel Engines Cold Start[J]. SAE Transactions, 2003, 112(3): 354-370.

- [5] 魏春源, 张卫正, 葛蕴珊. 高等内燃机学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 37-45.
- [6] 张怡军, 段春霞. 进气预热对柴油机低温启动影响的研究[J]. 内燃机与动力装备, 2008(3): 10-12.
- [7] 何西常, 张众杰, 张云飞, 等. 柴油机冷启动研究现状[J]. 柴油机, 2012(4): 1-4.
- [8] 刘瑞林. 柴油机高原环境适应性研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 1-8.
- [9] 李德桃. 柴油机冷启动的基础研究和改善措施[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 26-35.
- [10] 胡玉贵, 栗彦辉. 柴油机低温启动的影响因素和改善措施[J]. 移动电源与车辆, 2004(1): 29-32.
- [11] 刘瑞林, 靳尚杰, 孙武全, 等. 提高柴油机低温启动性能的冷启动辅助措施[J]. 汽车技术, 2007(6): 5-8.
- [12] SHROUT R, MOFFATT D, HUEBNER W. Composite PTCR Thermistors Utilizing Conducting Borides, Silicides and Carbide Powders[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26: 145-150.
- [13] ZHI C L, BERGMAN B. Thermal Cycle Characteristics of PTCR Ceramic Thermistors[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 118: 92-97.