

文章编号: 1006-9941(2009)06-0726-05

密闭爆发器实验过程中的热散失修正研究

赵 军, 廖 昕, 王泽山

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对密闭爆发器实验过程中压力迅速变化的特点, 提出考虑压力因素的热流密度方程, 建立密闭爆发器实验中内壁传热的一维半无限大传热模型, 推导出实验过程中的传热表达式, 并使用该模型对双芳-3(SF-3)、太根(TG)及含黑索今 5%(TD-15)和含黑索今 30%(TD-30)的三基发射药密闭爆发器实验结果进行了实例验证。结果显示该模型修正出的总热散失与理论值的误差在 10% 以内, 对双芳-3 发射药修正得到的燃速压力指数(0.9864)接近该发射药的期望值(1)。

关键词:材料学; 三基发射药; 密闭爆发器; 传热; 热散失

中图分类号: TJ55; TQ021.3

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.020

1 引 言

密闭爆发器实验时测试压力范围大, 燃烧环境与火炮相似, 是内弹道研究中测试发射药线性燃速的常规方法^[1-2]。实验过程中燃气向壁面的传热导致测试结果仅为热散失后的表现值, 同时热散失的能量最高可达实验总能量的 10%^[3], 导致密闭爆发器实验结果不能准确描述发射药的燃烧性能及进行内弹道模拟。

早期美国陆军弹道研究所^[2-5]在对密闭爆发器实验的热散失修正时, 认为实验时热散失与发射药燃烧掉的质量成比例, 并认为该比例为因热散失降低的压力与理论压力的比值。但是由于实验点火不同时及药柱偏孔等原因, 会导致燃烧结束前质量燃速迅速降低到零, 因此该方法修正的最后阶段热散失迅速降低至零, 显然不符合传热的基本理论。文献[6]对热散失修正时使用了包含壁厚的热流密度表达式。实际上发射药在密闭爆发器内部燃烧时间短(毫秒级), 该时间内热量仅能在爆发器本体内传播有限的距离, 因此实验时的热流密度应该与壁厚无关。文献[7]使用计算平衡状态的半无限大非稳态传热模型对该实验的热散失进行了估算。但密闭爆发器实验过程中压力从常压迅速上升到数百兆帕, 显然实验为非平衡状态, 目前尚未提出有效描述变压力传热过程的数学模型。因此, 针对密闭爆发器实验过程中压力变化较大的特点, 需要建立考虑压力因素的更符合实际传热情况的模型对

热散失进行修正。

密闭爆发器实验过程中的传热为半无限大非稳态传热过程, 实验时的传热量与燃气的状态、实验的时间以及密闭爆发器本体的初始温度和导热特性有关。本文提出了用于计算密闭爆发器实验过程中内壁传热的一维半无限大传热模型, 并使用该模型结合实例对实验过程中的热散失进行了修正。

2 考虑压力因素的密闭爆发器实验传热模型

2.1 考虑压力因素的热流密度方程

发射药在密闭爆发器中燃烧时的传热如图 1 所示, 任意 τ 时刻燃气压力为 p_τ , 燃气与密闭爆发器壁面间的传热有辐射传热和对流传热两种方式。一般火炮中仅计算对流传热^[8-9], 文献[10]也将辐射传热处理成对流形式, 但是上述文献都没有考虑压力对传热的影响。辐射传热热流密度描述如下:

$$\sum_{i=1}^n q_{r,\tau} = \sum_{i=1}^n p_i \varepsilon_i \sigma (T_m^4 - T_\tau^4) \quad r = r_0 \quad (1)$$

式中, $q_{r,\tau}$ 为辐射传热热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; p_i 为辐射气体的分压力, MPa; ε_i 为发射率; σ 为黑体辐射常数; T_m 为燃气温度, K; T_τ 为密闭爆发器内壁面温度, K; r 为密闭爆发器半径; r_0 为密闭爆发器半径内壁面半径。由于密闭爆发器内压力因发射药的燃烧逐渐增加, 且各种辐射气体的分压力与总压力成正比, 则式(1)辐射传热热流密度可以表示为:

$$q_{r,\tau} = k p_\tau \varepsilon \sigma (T_m^4 - T_\tau^4) \quad r = r_0 \quad (2)$$

式中, k 为系数。由于燃气温度很高且燃烧过程中变化不大, 因此辐射换热热流密度可以表达为对流传热形式:

收稿日期: 2009-03-09; 修回日期: 2009-05-27

基金项目: 国家“973”项目

作者简介: 赵军(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事含能材料及装药研究。e-mail: zhaojun331@gmail.com

$$q_{r,\tau} = p_\tau h_r (T_m - T_\tau) \quad r = r_0 \quad (3)$$

式中, h_r 为辐射传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot MPa^{-1}$ 。

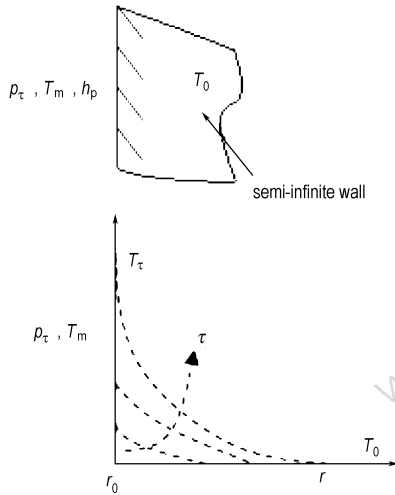


图 1 密闭爆发器内壁面传热示意图

Fig. 1 Schematic map of heat transfer on closed bomb wall

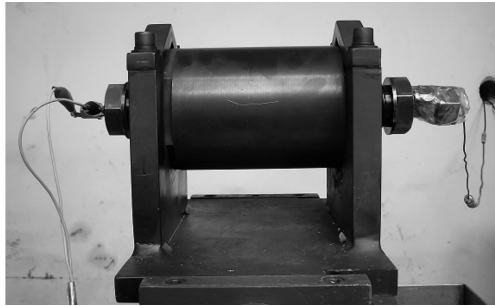


图 2 密闭爆发器实验装置

Fig. 2 Experimental set-up of closed bomb

密闭爆发器(图 2)实验时燃气压力从常压迅速上升到数百兆帕,因此传热计算中需要考虑压力的影响。对流换热是热传导和热对流两种传热方式联合作用的结果,燃气内部通过热对流交换热量,传热过程中燃气与壁面之间仍通过热传导交换热量,热传导是一种依赖直接接触的传热方式,根据分子运动学理论,单位时间内碰到单位器壁面积上分子的摩尔数(z)与压力成正比,因此随压力的上升单位时间内燃气分子与壁面的传热系数为 $p_\tau h_w$,由于实验时内壁面积不变,则任意 τ 时刻燃气热量导向壁面的速率为 $q_g = p_\tau h_w T_m$,壁面热量导向燃气的速率为 $q_b = p_\tau h_w T_\tau$,因此任意时刻边界上微元面的热流密度如下:

$$q_{w,\tau} = q_g - q_b = p_\tau h_w (T_m - T_\tau) \quad r = r_0 \quad (4)$$

式中, $q_{w,\tau}$ 为对流传热热流密度, $W \cdot m^{-2}$; h_w 为对流传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot MPa^{-1}$ 。综合式(3)和式(4),密闭爆发器实验过程中燃气与壁面的热流密度如下:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_\tau = q_{r,\tau} + q_{w,\tau} = p_\tau h_s (T_m - T_\tau) \quad r = r_0 \quad (5)$$

式中, $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_\tau$ 为热流密度; λ 为密闭爆发器金属导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; $h_s = h_r + h_w$ 为总传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot MPa^{-1}$ 。

2.2 壁面导热微分方程

实验过程中本体不产生热量,根据能量守恒原理,导入微元体的总热量等于微元体导出的热量加上微元体热能的增加量,同时实验时圆周方向上的导热是对称的,因此密闭爆发器实验时壁面的能量平衡方程可以由一维半无限大非稳态传热的微分方程描述^[11]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (6)$$

式中, α 是本体的导温系数, $\alpha = \lambda / (\rho \cdot c)$, $m^2 \cdot s^{-1}$; ρ 为本体材料的密度, $kg \cdot m^{-3}$; c 为本体材料的比热容, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

2.3 考虑压力因素的半无限大非稳态传热模型

密闭爆发器初始温度为室温(T_0),实验时与状态为 $f(p_\tau, T_m)$ 的燃气对流换热,根据导热微分方程与考虑压力因素的热流密度方程,实验时传热的数学模型表达如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}, & r_0 < r < \infty, \tau > 0 \\ T = T_0, & r_0 < r < \infty, \tau > 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_\tau = p_\tau h_s (T_m - T_\tau) & r = r_0, \tau > 0 \\ T = T_0, & r \rightarrow \infty, \tau > 0 \end{cases} \quad (7)$$

对上式进行 laplace 变换并解常微分方程得到实验时密闭爆发器内壁面的温度方程:

$$T_\tau = T_0 + (T_m - T_0) \times (1 - \exp(\frac{p_\tau^2 h_s^2 \alpha \tau}{\lambda^2}) \operatorname{erfc}(\frac{p_\tau h_s \sqrt{\alpha \tau}}{\lambda})) \quad (8)$$

式中, $\operatorname{erfc}()$ 为余误差函数,由壁面温度和式(5)得到实验过程中壁面的热流密度,对热流密度积分可得到实验过程中燃气向壁面的传热量 $Q_{\text{loss},\tau}$,即

$$Q_{\text{loss},\tau} = \int_0^\tau p_\tau h_s S (T_m - T_\tau) d\tau \quad (9)$$

式中, S 为内壁面面积,单位为 m^2 。

3 密闭爆发器实验压力的修正方法

3.1 密闭爆发器实验过程压力的修正方法

燃气向壁面的传热增加了本体金属原子的平均平

动能,降低了燃气的做功能力,因此燃气向壁面的传热量等于燃气降低的做功能力,即:

$$Q_{\text{loss},\tau} = W_{\text{loss},\tau} \quad (10)$$

式中, $W_{\text{loss},\tau}$ 为发射药燃烧到 τ 时燃气降低的做功能力, J。密闭爆发器实验过程中发射药燃烧到 ψ 时燃气压力与做功能力的状态方程如下^[12]:

$$p_{\psi} = \frac{fm\Psi}{v - \frac{m}{\delta} - (\beta - \frac{1}{\delta})m\Psi} \quad (11)$$

式中, ψ 为发射药燃烧掉的质量分数; p_{ψ} 为发射药燃烧到 ψ 时测得的压力, MPa; f 为发射药火药力, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; m 为发射药质量, g; v 为爆发器容积, cm^3 ; β 为发射药余容 $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$; 方程右边分子为燃气的做功能力, 分母为燃烧室的自由容积。由于热散失的存在, 密闭爆发器实验时测试压力 ($p_{\text{act},\psi}$) 与燃气的实际做功能力 ($W_{\text{act},\psi}$) 有如下关系:

$$p_{\text{act},\psi} = \frac{W_{\text{act},\psi}}{v - \frac{m}{\delta} - (\beta - \frac{1}{\delta})m\Psi} \quad (12)$$

式中, $p_{\text{act},\psi} = p_{\psi} - p_{\text{loss},\psi}$; $W_{\text{act},\psi} = fm\Psi - W_{\text{loss},\psi}$; $p_{\text{loss},\psi}$ 、 $W_{\text{loss},\psi}$ 分别为发射药燃烧到 ψ 时燃气因热散失降低的压力和减少的做功能力。结合式(11)、式(12)可以得到发射药燃烧到 ψ 时燃气压力和做功能力的关系:

$$\frac{fm\Psi}{p_{\psi}} = \frac{W_{\text{act},\psi}}{p_{\text{act},\psi}} = \frac{W_{\text{loss},\psi}}{p_{\text{loss},\psi}} = v - \frac{m}{\delta} - (\beta - \frac{1}{\delta})m\Psi \quad (13)$$

式(15)表明发射药燃烧过程中热散失降低的做功能力和由此降低的压力成正比, 即发射药燃烧到 τ 时燃气降低的做功能力与降低的压力 ($p_{\text{loss},\tau}$) 成正比, 根据实验结束时损失的总压力和实验过程中的热散失可以对实验过程中的压力进行修正, 关系式如下:

$$p_{\text{loss},\tau} = \frac{W_{\text{loss},\tau}}{W_{\text{loss}}} p_{\text{loss}} \quad (14)$$

式中, W_{loss} 、 p_{loss} 分别为实验结束时热散失的总热量和因此降低的压力。

3.2 密闭爆发器实验终点压力的修正

根据状态方程(12)发射药燃烧结束时 ($\psi = 1$) 燃气做功能力与压力的关系如下:

$$W_{\text{act}} = p_{\text{act}}(v - \beta m) \quad (15)$$

由压力与做功能力的关系及式(9)计算得到的实验结束时刻的热散失可以计算出实验降低的总压力 (p_{loss}):

$$p_{\text{loss}} = \frac{Q_{\text{loss}}}{v - \beta m} \quad (16)$$

此时可以根据实验热散失降低的总压力和过程中的热

散失由式(14)对实验过程中降低的压力进行修正。

4 实验结果及分析

4.1 实验结果

根据上述传热模型, 选用太根(TG)、双芳-3(SF-3)双基发射药, 含黑索今 15%(TD-15)和 30%(TD-30)的三基发射药按照国军标(GJB770B-2005, 703.1)进行了密闭爆发器实验, 使用实验结果对模型进行了验证, 实验及修正结果见表 1。

表 1 密闭爆发器实验及修正结果

Table 1 Experimental and corrected results of closed bomb test

gun propellant	W/J			p/MPa			error /%
	W_{act}	W_{tho}	W_{loss}	p_{act}	p_{tho}	p_{loss}	
TG	21614	22564	1015	244.76	255.46	11.49	6.78
SF-3	24716	25751	1024	285.81	297.78	11.84	-1.09
TD-15	19934	20713	796	249.04	258.78	9.94	2.05
TD-30	21585	22435	814	259.87	270.11	9.80	-4.30

Note: W_{tho} and p_{tho} represent the energy and pressure without heat loss.

表 1 显示, 使用考虑压力因素的传热模型修正的总热散失与理论热散失的误差在 10% 以内, 表明该模型可以有效修正密闭爆发器实验的热散失。

4.2 实验结果分析

4.2.1 实验热流密度分析

图 3 为文献[2-5]热散失修正方法计算的热散失曲线, 采用定比例修正出的热散失曲线与密闭爆发器实验的压力时间曲线相似, 图 4 为该修正时的热流密度曲线, 由于偏孔和点火等原因, 发射药不会同时燃尽, 导致压力的微分曲线存在一个最大值 (dp_{max}), 使得该修正方法计算出的热流密度在即将燃尽时逐渐降低为零, 显然这不符合传热的基本理论。图 5 为文献[7]中使用平衡状态传热模型计算的密闭爆发器热散失修正曲线, 该模型不考虑实验的压力变化情况, 由于实验时间短, 爆发器内壁温度变化幅度较小, 因此计算的热流密度变化不大, 导致修正出的热散失曲线近似为直线; 图 6 为本文使用考虑压力因素的传热模型对密闭爆发器实验热散失的修正曲线, 由于实验压力随实验的进行迅速上升, 燃气分子与壁面撞击的次数迅速增加, 因此热散失也随实验的进行迅速增加, 显然考虑压力因素的传热模型对密闭爆发器实验热散失修正的结果更符合实际传热状况。

4.2.2 燃速压力指数修正结果

双芳-3 发射药制造工艺成熟、产品均匀性好, 大量实验恒压密闭爆发器试验表明其燃速压力指数期望

值为 1,是标准发射药。以双芳-3 发射药为例对以上修正方法进行比较,结果见表 2。

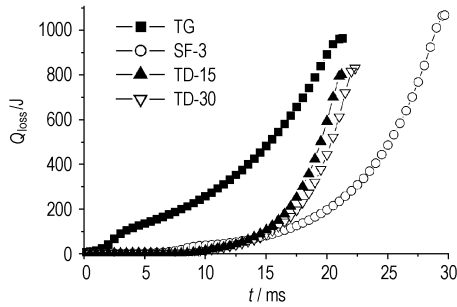


图 3 定比例法热散失修正曲线^[2-5]

Fig.3 Corrected curves of heat loss with constant-proportion method

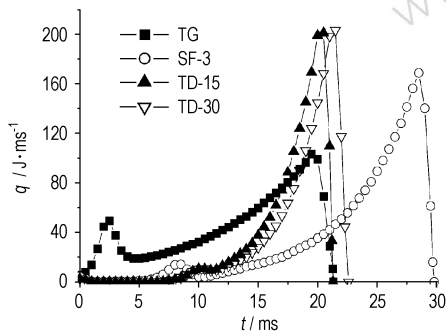


图 4 定比例法修正的热流密度^[2-5]

Fig.4 Corrected curves of heat flux with constant-proportion method

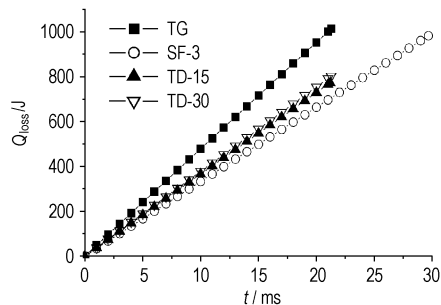


图 5 平衡态传热模型修正的热散失曲线^[7]

Fig.5 Corrected curves of heat loss with model of equilibrium heat transfer

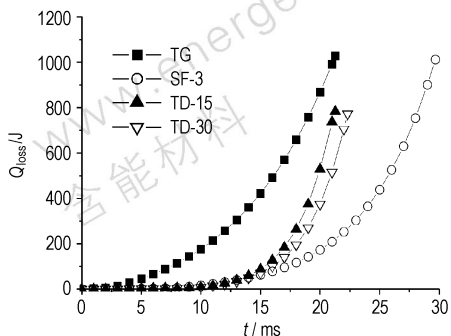


图 6 考虑压力因素传热模型修正的热散失曲线

Fig.6 Corrected curves of heat loss with model of heat transfer considering pressure factor

表 2 不同方法修正的 SF-3 发射药燃速压力指数

Table 2 Burning rate pressure exponents of SF-3 propellant with different corrected methods

gun propellant	u_1 /mm · s ⁻¹ · MPa ⁻¹	n	correlation coefficient	remark
	0.4557	0.9784	0.9995	uncorrected
SF-3	0.4559	0.9771	0.9995	directly proportional correction mentioned in [2-5]
	0.4720	1.0407	0.9992	semi-empirical heat transfer model mentioned in [7]
	0.4076	0.9864	0.9994	one-dimensional semi-infinite model indicated in this article

Note: n is burning rate pressure index; u_1 is burning rate coefficient.

表 2 显示,密闭爆发器实验不进行热散失修正时,其测得的发射药燃速压力指数(0.9784)明显低于期望值;由于定比例法修正方法修正的热散失曲线与实测压力~时间曲线相似,导致该方法计算的燃速压力指数(0.9771)接近未修正的值;平衡状态传热模型计算热散失时不考虑实验的压力变化情况,修正出的热散失曲线近似为直线,导致该方法修正的燃速压力指数(1.0407)较高;本文建立的传热模型考虑了实验的压力因素,修正的热散失符合实验的实际传热状况,通过比较表明,该模型修正出的燃速压力指数(0.9864)能够更好地接近发射药的期望值(1)。

5 结 论

对密闭爆发器实验的传热过程进行分析,针对密闭爆发器实验过程中压力迅速变化的特点,提出考虑压力变化因素的热流密度方程,建立密闭爆发器实验中内壁传热的一维半无限大传热模型,推导出了实验过程中的传热表达式,并使用该模型对密闭爆发器实验热散失进行了修正,修正结果与理论值基本一致,得到的燃速压力指数接近发射药的期望值。由于该模型考虑了实验过程中压力变化较大的特点,因此使用本模型对发射药密闭爆发器实验热散失修正的结果更符合实验的实际传热状况,从而使密闭爆发器实验能够准确测试发射药的燃烧性能及进行内弹道模拟。

参考文献:

[1] Robert E Tompkins, Roger E bowman, Arpad A juhasz. A study on the effects of variable surface area to volume ratio on closed bomb burn rates[R]. US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. October,1985. AD-A161826.
[2] Frederick W Robbins, Franz R Lynn. Analytic solutions to the closed bomb[R]. US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving

- Ground, MD. March, 1988. AD-A194691.
- [3] William F Oberle, Douglas EKooker. BRLCB: A closed-chamber data analysis program. part 1. Theory and user's manual [R]. US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. January, 1993. AD-A260493.
- [4] William F Oberle, Douglas E Kooker. RLCB: A closed chamber data analysis program with provisions for deturred and layered propellants [R]. US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. April 1991. AD-A235618.
- [5] Barrie E Homan, Arpad A Juhasz. XLCB: A new closed bomb data acquisition and reduction program [R]. US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. May, 2001. AD-A391803.
- [6] 王普法, 官汉章. 密闭爆发器压力损失及其修正方法 [J]. 弹道学报, 1992, (1): 15 - 20.
WANG Pu-fa, GUAN Han-zhang. The correcting method for pressure loss in closed bomb [J]. *Journal of Ballistics*, 1992, (1): 15 - 20.
- [7] Hobin S Lee. Estimating heat losses in pyrotechnic devices [C] // 41st, AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 10 - 13 July 2005, Tucson, Arizona. AIAA 2005 - 3837.
- [8] Nathan Gerber, Mark L Bundy. Heating of a tank gun barrel: Numerical study [R]. US Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. August, 1991. AD-A241136.
- [9] 彭志国, 周彦煌, 陈桂东. 火炮身管热散失模型及其冷炮对弹丸初速的影响 [J]. 火炮发射与控制学报, 2008(2): 1 - 5.
PENG Zhi-guo, ZHOU Yan-huang, CHEN Gui-dong. Heat loss model of gun bore and influence of cold bore on projectile muzzle velocity [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2008(2): 1 - 5.
- [10] WU Bin, CHEN Gang, XIA Wei. Heat transfer in a 155 mm compound gun barrel with full length integral midwall cooling channels [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008(28): 881 - 888.
- [11] 贾力, 方肇洪, 钱兴华. 高等传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 5 - 11.
- [12] 华东工学院 103 教研室. 内弹道学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1978: 34 - 43.

Heat Loss Correction in Closed Bomb Tests

ZHAO Jun, LIAO Xin, WANG Ze-shan

(Department of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the fast change of pressure in closed bomb tests, a heat flux equation focused on pressure factor was deduced. A one-dimensional semi-infinite model of calculating inwall heat transfer in closed bomb tests was established and the expression of heat transfer was obtained. The model was validated by double base aromatic-3 (SF-3), TEGDN (TG) propellant and triple-base propellant. The results show that the error between corrected whole heat loss and theoretical whole heat loss is less than 10%, and the burning rate pressure index of SF-3 propellant obtained is close to the expected value.

Key words: materials science; triple-base propellant; closed bomb; heat transfer; heat loss

※ 读者·作者·编者 ※

向作者致谢

近年,《含能材料》得到了广大作者的大力支持,为表达我们深深的谢意,特向 2008 ~ 2009 两年来发表两篇以上论文的作者(第一作者)赠送 2010 年全年《含能材料》。本刊期望在新的一年里能得到广大作者更多的关心! 欢迎赐稿!

霸书红	成健	崔庆忠	代晓淦	董海平	堵平	方东	高大元	韩勇	何志伟
洪东跑	胡荣祖	管晓霞	蒋新广	敬仕明	兰琼	李江存	李敬明	李如江	李晓刚
李秀丽	李正莉	梁华琼	梁逸群	刘晶如	刘俊伟	刘丽荣	钱新明	强洪夫	乔小晶
邵自强	盛涤伦	宋晓庆	孙成辉	唐维	田勇	王伯周	王广海	王晶禹	王军
王鹏	王平	谢明召	辛春亮	胥会祥	杨利	杨毅	易建坤	郁卫飞	张腊莹
张丽娜	张伟	张伟斌	张文超	张兴高	周文静				

《含能材料》编辑部
二〇〇九年十二月