

文章编号: 1006-9941(2009)06-0699-05

SCB 传热模型及点火能量验证

冯红艳, 朱顺官, 张 琳, 李 燕, 沈瑞琪

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 以电容放电的方式研究了半导体桥(SCB)点火过程与药剂之间可能存在的能量作用形式。设计了不同的点火实验, 有针对性地验证了等离子体对药剂的冲击作用和渗透热作用。从等离子体存在形式出发, 利用等离子体传热理论, 初步建立了等离子体传热模型。对斯蒂芬酸铅(LTNR)、叠氮胍镍(NHA)和硝酸胍镍(NHN)进行单颗粒球形传热模型的 Fourier 分析和数值模拟, 并对三种药剂进行了 SCB 点火实验。LTNR、NHA、NHN 三种药剂的最低点火电压分别为 11, 15, 39 V。点火实验结果表明, 药剂的导热系数影响 SCB 点火属性, 导热系数小的药剂对应的最低点火电压也小。结合模拟的结果得到了 SCB 等离子体点火中, 渗透热作用为主要能量作用形式的结论。

关键词: 军事化学与烟火技术; SCB 等离子体点火; 传热模型; 冲击能; 起爆药

中图分类号: TJ45

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.014

1 引 言

半导体桥(Semiconductor Bridge, SCB)等离子体的点火技术研究^[1-4], 涉及到形成等离子体的 SCB 结构、初始激励电能的条件、SCB 等离子体与药剂作用机理以及装药条件等内容, 其中 SCB 点火中与药剂相互作用的机理研究尤为重要。R. W. Bickes^[2,5] 等人曾详细分析了等离子体和药剂之间可能的能量作用形式, 包括热辐射、桥体和药剂之间的热传导, 药剂对等离子体产生的光特征吸收, 等离子体对药剂的冲击作用以及对流传热, 分析认为是微对流作用机理。M. J. Martinez^[6] 等人建立了两相流模型, 采用线性法格式, 对等离子体向炸药的微对流传热过程进行数值模拟, 但计算方法繁琐且计算时间长。周彬^[7] 等人对两相流模型进行了适当的简化, 采用 MacCormack 计算格式, 实现了在微机上快速方便地模拟计算等离子体向炸药扩散时的传热过程。把药剂颗粒看成平均分布在等离子体中的连续介质, 讨论了等离子体云半径、半导体桥厚度、空隙率和硅蒸汽在气相中的质量百分含量等因素对传热的影响。

文献[8-9]的研究表明, SCB 等离子体的温度为几千开尔文、电子密度为 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、存在时间为 100 μs 左右、二维空间尺寸均小于 2 mm 的硅电离气体。E. Bourdin^[10] 的研究表明, 等离子体温度小于

4000 K 时, 等离子体的热辐射作用可以忽略不计。由于在点火整个过程中, 桥体材料彻底汽化的时间为 1.5 μs 左右, 并且桥体表面很小(约 400 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$), 在桥体和与之接触的药剂之间不能形成有效的热传导。因此, 等离子体和药剂之间可能的能量作用形式为冲击作用和渗透热作用。

在上述成果基础上, 本研究选择了热导热系数相近的叠氮胍镍(NHA)和斯蒂芬酸铅(LTNR), 以及导热系数明显不同的硝酸胍镍(NHN)进行点火实验; 设计了 NHA 机械感度掺杂实验及桥体表面加膜实验, 验证了能量作用形式; 建立了球形单颗粒 SCB 等离子体的传热模型, 研究了颗粒部分受热的情况, 并与三种起爆药的点火实验结果进行了比较。

2 实 验

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。主要由三部分组成: 电源和电容组成电能输入装置部分; SCB 或 SCB 样品为点火装置部分; 示波器、光电二极管、信号调解器以及电压电流信号采集器组成信号采集部分。实验中所用能输入装置是由南京理工大学制造的 ALG-CN1 储能放电起爆仪, 当电容器充电完毕, 打开起爆器开关, 通过电容放电的方式向 SCB 释放能量。SCB 在电能激励下产生等离子体, 并点燃实验样品。SCB 或 SCB 样品起爆伴随剧烈声音和强光。爆炸后产生的光信号, 经过光电二极管、信号调解器, 将其连接到 Lecroy 公司生产的 44Xs、400 MHz 多通道数字示波器。同时通过示波器记录流过桥体两端的电压和电流信号。因

收稿日期: 2008-08-26; 修回日期: 2008-09-16

作者简介: 冯红艳(1978-), 女, 博士研究生, 从事等离子体点火机理和光谱分析研究。e-mail: wrbfhy@hotmail.com

通讯联系人: 朱顺官, e-mail: zhusg@mail.njust.edu.cn

此,从 SCB 两端电压上升开始到药剂产生发光信号的时间间隔称为药剂点火时间。

2.2 样品制备

图 2 为 SCB 实物、实验样品实物和装药结构图。因为装药量小,将起爆药装在截长为 1 cm 左右的 8 号铝制平底雷管壳里;在雷管壳底部打一小孔,以便实验时更好地采集光信号和降低爆炸威力;并在雷管壳内垫一纸垫片,防止药剂散落和疏松。实验中使用的 SCB 为陶瓷塞封装的 N 型 SCB,使用的主要起爆药剂为 NHN、NHA 和 LTNR 等单质起爆药,采用 12 mg 装药量,压药压力为 20 ~ 40 MPa。这种装药结构可以使药剂和 SCB 很好地接触,从而有利于点火。根据上述条件进行装药,得到实验所需的样品,以备实验。

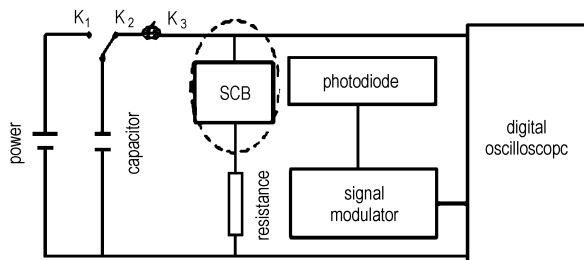


图 1 试验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental set-up

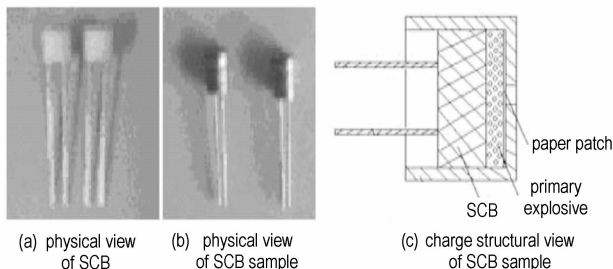


图 2 SCB、SCB 样品及装药结构示意图

Fig. 2 SCB, SCB sample and diagram of charge structure

2.3 实验结果

2.3.1 等离子体与药剂之间的冲击作用

点火条件: 250 ~ 300 目 NHA, 电容 68 μF , 压药压力 40 MPa, 装药量 12 mg。通过机械混合的方式向 NHA 中添加可以增加药剂机械感度的物质 200 目玻璃粉(5%) (No. 1) 和纳米金刚石(5%) (No. 2); 通过将膜直接固定在桥体的方式, 在药剂 NHA 和桥体之间加入 0.5 μm 左右的中孔纤维膜 (No. 3)。点火实验结果见表 1。

其中最低发火电压为 ALG-CN1 储能放电起爆仪可以使 SCB 样品发火的最低充电电压, 从表 1 可以看出, 未加膜时, 纯 NHA (No. 4) 可以在 68 μF 、13 V 条件

下实现点火, 掺入玻璃粉 (No. 1)、金刚石 (No. 2) 等增加机械感度的物质后, 最低的发火电压均没有降低。而加膜的点火实验结果表明, 在加膜时 68 μF 、60 V 纯 NHA (No. 3) 仍不能实现 SCB 样品发火, 可见膜的加入大大降低了等离子体感度。显然, 添加可以增加药剂机械感度的物质会影响等离子体的冲击作用, 加膜的方式不会影响等离子体对药柱的冲击作用, 而会减弱等离子体在药剂中的渗透, 所以等离子体点火中的冲击作用不是主要的能量作用形式。通过加膜实验结果发现等离子体在药剂中的渗透对点火的影响很重要。

表 1 SCB 等离子体冲击作用试验结果

Table 1 Experimental results of SCB plasma shock effect

No.	primary explosive and its adulterant	mixing method	lowest function voltage/V
1	NHA with 5% 200 sieve frosting	machine mix	13
2	NHA with 5% nano diamond	machine mix	13
3	NHA with fiber film	-	60 no fire
4	pure NHA	-	13

2.3.2 等离子体与药剂之间的热作用

为了验证等离子体和药剂之间的热作用, 选择导热系数相近的 NHA 和 LTNR, 以及导热系数明显不同的 NHN 进行点火实验, 比较它们的等离子体感度。为了尽量减小颗粒大小对点火结果的影响, 使用英国 Malvern 公司的 Mastersizer Microplus 激光粒度分析仪分析了不同粒度的三种起爆药的粒径, 最终取平均粒径在 300 目下 (50 ~ 60 μm) 的三种起爆药进行 SCB 点火实验, 装药量为 12 mg, 压药压力为 20 MPa。三种起爆药的导热系数和最低发火电压的实验结果列入表 2。结果表明, 在 SCB 等离子体的点火中, 药剂的导热系数影响 SCB 点火属性。导热系数小的药剂对应的最低点火电压也小, 而导热系数相近的药剂对应的点火电压的大小也相近。通过比较最低点火电压, 得出三种起爆药对等离子体的感度按依次降低的顺序为 LTNR > NHA > NHN, 与药剂导热系数由小至大的顺序相同。所以等离子体的热作用很重要, 结合加膜实验的结论, 等离子体点火中热作用体现为渗透热作用。

表 2 SCB 等离子体渗透热作用实验结果

Table 2 Experimental results of SCB plasma

heat permeability effect

primary explosive	LTNR	NHA	NHN
heat transfer coefficient/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.07713	0.09127	0.1464
lowest function voltage/V	11	15	39

3 SCB 等离子体传热模型

考虑到等离子体的尺寸(2 mm)小于药柱的尺寸(6 mm),所以药剂只能部分受到等离子体的加热作用,为了进一步验证等离子体的渗透热作用,初步建立了球形单颗粒的传热模型。

3.1 模型方程

一维坐标下球形颗粒的热传导模型为^[11]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2\alpha}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (1)$$

初始条件:
$$\begin{cases} T(r, t) |_{t=0} = T_0 \\ \frac{\partial T}{\partial t} |_{t=0} = 0 \end{cases}$$

边界条件:
$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} |_{r=r_p} = q_w = f(t) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} |_{r=0} = 0 \end{cases}$$

式中, α 为含能材料的热扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; λ 为导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; r 为药剂颗粒半径, μm ; τ 为弛豫时间, μs ; t 为时间, μs ; T 为等离子体温度, K ; T_0 为颗粒的初始温度, K ; T_1 为颗粒的表面温度, K ; q_w 为颗粒表面的外界的能流密度, $W \cdot m^{-2}$ 。求解传热方程的关键是边界条件的确定,取药剂半径为 r_w 、表面温度为 T_w 的球型颗粒,处于温度为 T_∞ 、尺寸比颗粒大得多的等离子体中,等离子体与颗粒间无宏观的相对速度,传热处于定常状态,则热传导方程可以写成^[12]:

$$Q_h = 4\pi r_w^2 k_{pla} \frac{dT}{dr} = 4\pi r_w^2 q_h$$

边界条件: $r = r_w, T = T_w$; $r \rightarrow \infty, T = T_\infty$

假设在整个过程中的等离子体的导热系数不变,则:

$$Q_h = 4\pi r_w^2 k_{pla} \frac{(T_\infty - T_w)}{r_w - 0} = 4\pi r_w k_{pla} (T_\infty - T_w) \quad (2)$$

由于 SCB 等离子体可以看成在大气压下为电离硅产生的等离子体,对于大气压下硅等离子体的研究还很少,现在还找不到理想的导热系数理论计算值,推导等离子体的导热系数的公式比较繁复,不同的简化模型和计算方法不同,得到的公式不同,本文选择斯必泽推导的完全电离等离子体传热系数的近似公式^[13]进行大致计算。

对于传热方程的定解问题可以借助于数值的求解才能更直观地得出有用的结论。数值求解的方法很多,常用的有差分法和有限元法,本模型采用有限差分法中的向后差分格式。

3.2 数值模拟结果

在点火条件为 22 μF 、60 V 条件下,得到的等离子体温度和存在时间(LTD)的实验数据如图 3 所示。为了简化计算,将等离子体的温度取平均值,再把其平均值和 LTD 分别作为模型的等离子体温度和药剂颗粒的加热时间。

取与点火实验相同的药剂(LTNR, NHA 和 NHN)进行模拟,其平均粒径为 50 μm ,采用方程(2)模拟得到三种药剂的表面能流密度的值如图 4 所示,结果表明在相同的点火条件下,三种药剂的表面能流密度明显不同,其中 NHN 明显大于 LTNR 和 NHA,而 NHA 和 LTNR 的能流密度相近。

三种药剂的表面温度随时间变化的模拟结果如图 5 所示。结果表明,表面能流密度相近的 LTNR 和 NHA,其表面温度变化结果也相近,而能流密度最大的 NHN,表面温度反而最小。

为了更好地分析在相同的等离子体条件、粒径为 50 μm 的三种不同药剂的加热效果,利用方程(1)模拟得到颗粒温度在整个过程中温度的时空分布,如图 6 至图 8 所示。

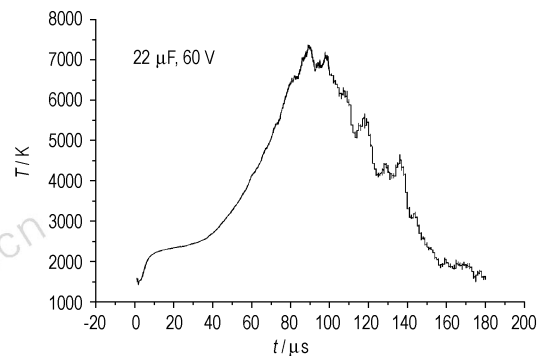


图 3 等离子体温度随时间的变化

Fig. 3 Curve of SCB plasma temperature vs time

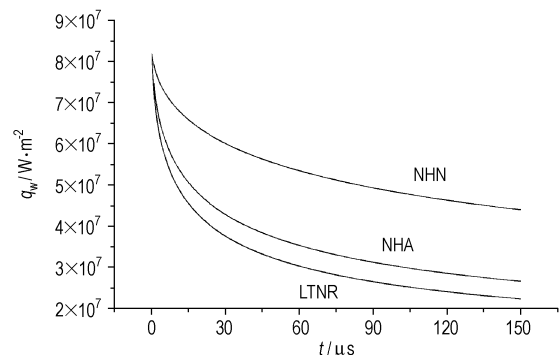


图 4 药剂颗粒表面的能流密度随时间的变化

Fig. 4 Curve of particle surface specific heat flux vs time

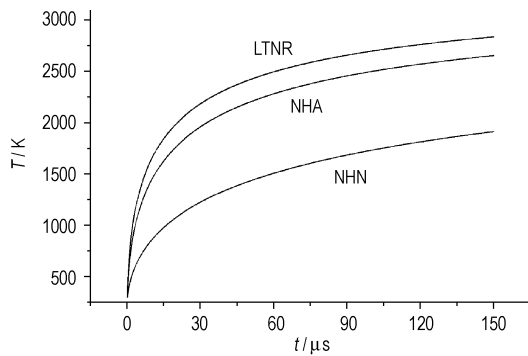


图5 药剂颗粒表面温度随时间的变化

Fig. 5 Curves of particle surface temperature vs time

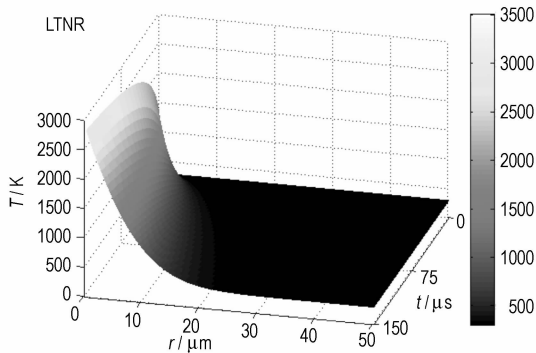


图6 LTNR 颗粒温度分布

Fig. 6 The spatio-temporal temperature distribution of LTNR particle

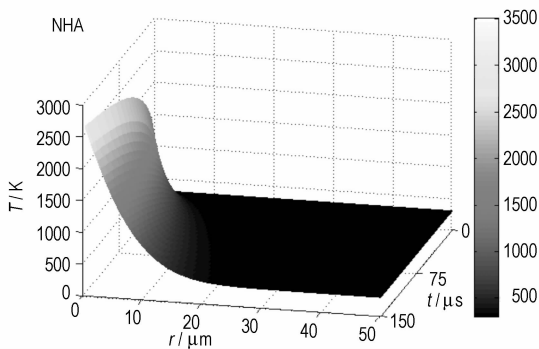


图7 NHA 颗粒温度分布

Fig. 7 The spatio-temporal temperature distribution of NHA particle

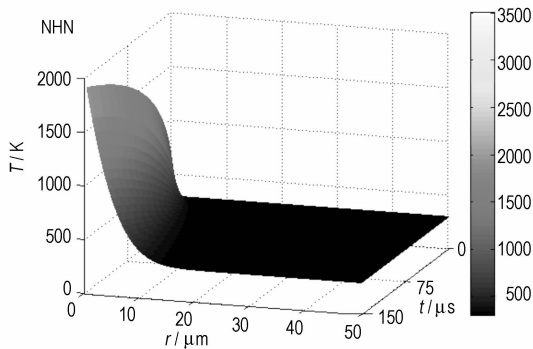


图8 NHN 颗粒温度分布

Fig. 8 The spatio-temporal temperature distribution of NHN particle

二维曲面为在整个等离子体的 LTD 时间范围内 ($150 \mu\text{s}$), 颗粒表面到球心的 $50 \mu\text{m}$ 不同加热位置的温度变化。结果表明, 相同的实验条件下 LTNR 和 NHA 颗粒的加热效果相近, 而 NHN 颗粒的温度变化和加热深度远小于 LTNR 和 NHA。

模拟结果只能反映在相同的 SCB 点火条件下, 不同起爆药的加热情况, 并不能等同于等离子体的感度, 由于 NHA 和 NHN 都是比较新的起爆药, 它们的一些感度参数包括爆发点、分解速度、活化能等数据都不是很全面, 本文的模型仅尝试性地从药剂的导热系数这一侧面进行了分析。模拟结果和点火实验的等离子体感度相一致, 说明在 SCB 等离子点火中, 药剂的热性能参数是一个重要的影响因素。

4 结论

掺杂机械感度高的药剂及对桥体加膜的实验, 验证了等离子体在药剂中的渗透热作用十分重要, 相比较冲击作用相对要弱一些; 利用等离子体传热理论, 建立了单颗粒球形传热模型, 对 LTNR、NHA 和 NHN 进行 Fourier 分析和数值模拟和 SCB 点火实验, 结果表明在相同的实验条件下 LTNR 和 NHA 颗粒的加热效果相近, 而 NHN 颗粒的温度变化和加热深度远小于 LTNR 和 NHA。模拟的结论与三种药剂的点火等离子体感度结果相同, 说明在 SCB 等离子点火中, 药剂的导热系数是一个重要的影响因素, 为 SCB 点火技术中的药剂的选择和敏化提供了思路。

参考文献:

- [1] Benson D A, Larsen M E, Renfund A M, et al. Semiconductor bridge: a plasma generator for the ignition of explosive[J]. *J Appl Phys*, 1987, 62(5): 1622-1632.
- [2] Bickes R W Jr. Semiconductor bridge(SCB) development technology transfer symposium [R]. SAND86-2211. UC-13 (DE87005620): 1987.
- [3] Grubelich M C, Bickes R W Jr. Ignition and deflagration-to detonation characteristics of HMX and PENT columns ESCB I [R]. SAND95-2579C(DE96012949): 1996.
- [4] 王治平, 费三国, 龚宴青, 等. 半导体桥起爆药的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(4): 359-363.
WANG Zhi-ping, FEI San-guo, GONG Yan-qing, et al. The experimental research on the initiation of explosives by semiconductor bridge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(4): 359-363.
- [5] Bickes R W Jr, McCampbell C B. Semiconductor bridge (SCB) research and development[R]. SAND-91-0310C: 1991.
- [6] Martinez M J, Baer M R. Microconvective heating of granular explosive by a semiconductor bridge[R]. DE -90-005710: 1990.
- [7] 周彬. 半导体桥对粒状炸药的微对流加热机理研究[D]. 南京:

- 南京理工大学, 1994.
- [8] 冯红艳. SCB 点火技术中等离子体的电子密度的测量[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [9] 冯红艳, 朱顺官, 张琳, 等. 原子发射光谱双谱线法测量 SCB 等离子体温度[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 134 - 136.
- FENG Hong-yan, ZHU Shun-guan, ZHANG Lin, et al. Measurement of the semiconductor bridge(SCB) plasma temperature by the double line of atomic emission spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 134 - 136.
- [10] Bourdin E, Fauchais P. Transient heat conduction under plasma conditions[J]. *Int J Heat Mass Trans*, 1983, 26: 567 - 582.
- [11] 姜任秋. 热传导、质扩散与动量传递中的瞬态冲击效应[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 127.
- [12] Jog M A, Huang L. Transient heating and melting of particles plasma spray coating process[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1996, 118: 471 - 477.
- [13] L 斯必泽. 完全电离气体的物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1959: 23.

Validation of Energy Transfer and Continuum Heat Transfer Model for the SCB Plasma

FENG Hong-yan, ZHU Shun-guan, ZHANG Lin, LI Yan, SHEN Rui-qi

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

Abstract: The energy transfer mechanism between semiconductor bridge (SCB) plasma and the explosives was studied. The possible energy effect forms were mentioned and discussed by the mode of capacitor discharge. Some special ignition tests were designed and carried out to validate some energy transfer mechanisms including the thermal conduction between SCB and the explosive material, SCB plasma shock effect and permeability heat effect. A continuum model was developed to analyze the heat transfer from SCB plasma to explosive particles. The spherical heat transfer models of three primary explosive particles lead styphnate(LTNR), nickel hydrazine azide (NHA) and nickel hydrazine nitrate (NHN) were calculated by Fourier analysis and numerical simulation. The minimum ignition voltages of three explosive particles were 11 V, 15 V and 39 V respectively. The ignition tests show that heat transfer coefficients of medicaments affect ignition attributions of SCB. The smaller heat transfer coefficient is, the smaller minimum ignition voltage is. The simulated results show that the permeability heat effect is the main energy effect form in the SCB ignition tests.

Key words: military chemistry and pyrotechnics; SCB plasma ignition; heat transfer model; mechanical shock; primary explosive

读者·作者·编者

第十五届欧洲分析化学会议会讯

欧洲分析化学学术会议是由欧洲分析化学学会主办的面向全球的高水平学术会议,自 1972 年至今每两年举办一次,第 15 届欧洲分析化学会议于 2009 年 9 月 6 - 11 日在奥地利因斯布鲁克举办。本次会议参与协办的是奥地利科技研究发展协会和比利时参考物质和测量研究所,会议主席由奥地利林茨大学的 Wolfgang Buchberger 教授和维也纳大学的 Wolfgang Lindner 教授担任。会议主题为“分析化学对生活质量的冲击”,包括以下内容:先进的快速分析;纳米分析;过程分析技术;样品制备;传感技术;分离技术等。参会人员约千余人,多为欧洲、美国等国家的相关科研人员,亚洲国家人员主要来自日本、韩国两国,中国参会人员三人。会议共包括 8 个大会报告,三个分会场共 125 个口头报告,约 600 余个墙报。大会还代表欧洲分析化学学会对在分析化学领域做出杰出贡献的三位学者进行了颁奖,其中包括 EMICH PLAQUE 奖、PREGL 奖和由德国 Springer 颁发的 Robert Kellner 讲演奖。

欧洲分析化学会议代表了全球分析化学领域的最高水平,体现了化学、物理学、材料学、光学等多学科的融合,越来越关注于纳米分析技术、多功能联机系统、分子识别等先进的分析表征技术,同时重视分析化学在生物、食品、反恐、环境中的应用,各知名仪器商和德国 Springer 出版商每年都要随会参展。下一届欧洲分析化学学术会议将于 2011 年 9 月在塞尔维亚召开。