

低温对聚乙烯发泡材料动态缓冲性能的影响

杨帅, 康勇刚, 齐菲

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要:目的 在低温环境条件下,测试与分析2种冲击高度(61,76 cm)下聚乙烯发泡材料的动态缓冲性能。方法 参考实际包装件流通环境的温度范围,分别在23,0,-15,-30℃等4种温度条件下进行聚乙烯发泡材料的动态冲击试验。结果 在低温环境条件下的EPE动态冲击曲线中,对应于最小加速度处的静应力较常温条件下的增加0.9~2.5 kPa,加速度值降低约7~8 g。结论 低温环境下,缓冲材料动态载荷能力增加,其最小加速度值低于常温条件下相同受力状态下的数值。在实际包装设计中,应结合实际流通环境温度进行缓冲设计。

关键词: 发泡聚乙烯; 低温; 动态缓冲

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)07-0021-05

Effect of Low Temperature upon Dynamic Cushioning Properties of EPE Foam Material

YANG Shuai, KANG Yong-gang, QI Fei

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: Dynamic cushioning properties of Expanded Polyethylene (EPE) under low temperature conditions were tested and analyzed at drop heights of 61 cm and 76 cm, respectively. Dynamic shock tests of EPE foam material specimens at 23, 0, -15, and -30 °C were conducted according to the temperature range of the practical distribution. Compared with the ambient temperature, the static loading ability of the dynamic cushioning curves at low temperature was increased by about 0.9 to 2 kPa while the amplitude of acceleration was reduced by about 7 g to 8 g. In low temperature conditions, the loading ability of the EPE specimens increased while the minimum acceleration level was lower than that under the same force at the ambient temperature. It was recommended that the real temperature in distribution should be taken into account during the design of cushioned packages.

KEY WORDS: expanded polyethylene; low temperature; dynamic cushioning properties

聚乙烯泡沫塑料(EPE)主要是由聚乙烯树脂加入发泡剂、交联剂和其他添加剂制作而成,主要用于精密仪器仪表、家用电器、玻璃和陶瓷制品、贵重物品等的缓冲包装,其应用十分广泛^[1]。多年来,EPE动态冲击性能在常温条件下已得到广泛的研究^[2-4]。常温条件下无论是对EPE自身的泡孔、尺寸、结构,还是跌落环境、跌落高度对EPE动态冲击性能的影响均得到了充分研究^[5-8]。一些学者针对EPE的静态压缩和动态冲击建立了含温度因素的本构模型^[9-11],但是,对在极

端温度环境条件下的EPE缓冲性能的研究较少,主要难点在于动态冲击过程中实时温度的控制。环境温度是影响缓冲包装性能的重要因素。常温条件下的EPE动态缓冲性能比较容易得到,但在实际物流过程中,运输包装件所处的环境温度并不都是常温。在《太阳辐射下汽车的停放实验及安全警示》中,通过实验证明太阳辐射下停放1 h,车内的平均气温可以达到55℃^[12];联邦快递对产品在全球运输过程中经历的环境温度进行了统计,认为在冬季车内温度可以达

收稿日期: 2014-09-23

作者简介: 杨帅(1989—),女,天津人,天津科技大学硕士生,主攻运输包装材料及技术应用。

通讯作者: 康勇刚(1957—),男,辽宁人,博士,天津科技大学教授,主要研究方向为运输包装材料及技术应用。

到 $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$,在夏季车内温度则可以达到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;美国军方估计的最恶劣的物流环境范围为 $-62\sim 71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当外界环境温度发生变化时,缓冲包装材料的性能也会随之发生变化,这会影响整个缓冲包装体系的可靠性,从而造成产品的损坏^[13-14]。对EPE材料在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行动态冲击测试,结果表明随着温度升高,材料的动态载荷能力下降^[15]。在已有的研究中,选取了4个温度点,即 $-17, 3, 23$ 和 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$,对EPE进行冲击测试,结果表明最大加速度-静应力曲线的最低点随着温度的降低向右下方偏移。需要注意的是,标准的动态冲击实验每块试样需进行5次冲击,由于难以监控后4次冲击的实时温度,该实验仅记录了首次冲击的数据^[16]。研究缓冲材料在低温环境下的性能变化,能够更加全面地验证缓冲材料的有效性和可靠性,以便更好地保护产品和节约资源。

文中研究运输流通环境温度的变化对聚乙烯发泡包装材料缓冲性能的影响程度,特别是低温条件下缓冲性能的变化,以作为确定聚乙烯塑料发泡包装材料在温度变化条件下缓冲设计的依据。

1 实验

1.1 材料

实验材料:EPE,公称密度为 18 kg/m^3 ,实测平均密度为 17.1 kg/m^3 (平均上、下偏差均在 0.59),天津中天塑料制品有限公司。试样的尺寸规格为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚),每组5个试样。在动态冲击实验中,实验样品均由单层厚度为 5 mm 的EPE经表面加热层合而成,其受力方向垂直于EPE热合层方向。

1.2 设备

实验设备:高低温循环槽, HK8102-R70, 杭州三浦精密仪器有限公司;冲击试验机, DY-2, 陕西科技大学;加速度采集系统, TP3, Lansmont(美国);激光位移传感器, LK-G400, 基恩士有限公司;点温计, TM902C, 通博电子仪表有限公司。

1.3 测试方法

参照 GB 8167—08《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》及 ISTA-1A 进行动态冲击试验。以 61 cm 和 76 cm 的跌落高度对同种规格尺寸的EPE样品,在低

温测试箱(自制设备)内完成动态冲击测试过程,并记录测试数据。参考国内外相关研究和物流过程中被包装产品可能经受的环境温度范围,将试样温度确定为 $23, 0, -15$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。文中采用动态冲击测试与性能表征方法,以研究环境温度对发泡塑料缓冲包装保护作用的影响。因EPE不是湿敏感性材料,所以未对实验的湿度环境进行控制。

1.3.1 低温箱的设计与制作

为了在每次动态冲击过程中,获得试验样品所需的低温环境,自制2个低温箱,即预处理低温箱和测试低温箱。2个低温箱原理相同,均由紫铜管环绕四壁,冷媒介质通过时,使箱内温度得到控制,箱盖和箱体由XPS挤塑板(导热系数为 $0.028\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)加工制成,见图1。测试低温箱底部放置厚度为 5 cm 的发泡水泥,用来隔热的同时保证承受动态载荷底部的刚性。实验前EPE样品在预处理低温箱中放置 24 h 以上,测试时通过“测试低温箱”的温控系统,保证试样在所需的温度环境条件下进行测试。

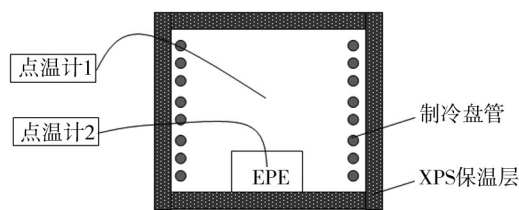


图1 低温箱可靠性测试示意

Fig.1 The schematic of reliability test in low-temperature box

1.3.2 低温箱可靠性测试

动态冲击实验前,首先对低温箱的可靠性和稳定性进行测试。由于低温条件下温度越低,温度保持稳定的难度越高,因此以试验温度中最低的 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例介绍实验过程。将1块EPE试样放入预处理低温箱中,用2个经过标定后的点温计分别监控预处理低温箱内和试样中心的实时温度(见图1)。在制冷系统为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作条件下(考虑热交换损失),实验开始于 60 min 时打开循环开关, 30 min 后预处理低温箱内温度和试样中心温度均稳定 $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ (点温计误差为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$)。实验进行到 205 min 时开箱检查 30 s ,而后将盖子盖上(模拟取样过程),环境温度立刻上升 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,重新封盖, 8 min 后箱内和试样中心温度再次回到原温度,测试结果见图2。

测试低温箱的温度稳定性采用相同的评价方法,试验样品由预处理低温箱取出,并在 2 s 内放入测试

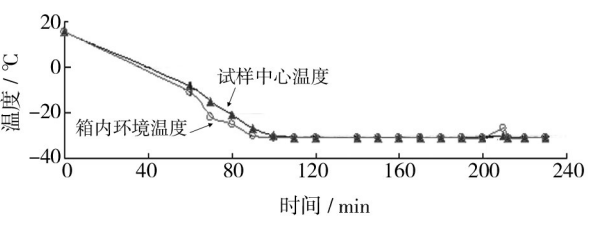


图2 预处理低温箱及试样中心温度稳定性测试结果

Fig.2 Test results for stability in pre-conditioning, low-temperature box and the central temperature of EPE specimen

低温箱,5 min后箱内温度和试样中心温度均稳定在-30 ℃,符合实验要求。

1.4 步骤

按照 GB 8167—08《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》,对试样进行编号、称量,并测量长宽厚的尺寸,计算表观密度。实验前将样品在 23, 0, -15, -30 ℃(以位于测试低温箱中心的传感器达到实验温度为准)预处理 24 h,低温条件下待测样品置于低温预处理箱内,并放置在冲击试验机旁。将试样从预处理低温箱中取出后,2 s内放置到温度已经稳定的测试低温箱内,盖上箱盖,待温度平衡后打开上盖开始冲击试验,每次冲击后迅速封闭测试低温箱的上盖,待温度稳定后继续下次动态冲击试验。动态冲击试验装置(低温)见图 3。

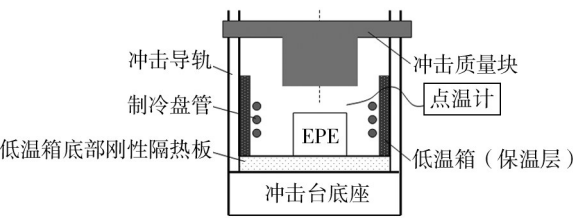


图3 低温动态冲击试验装置

Fig.3 Schematic of dynamic shock test installation at low temperature

2 结果与分析

厚度为 50 mm 的 EPE 试样在冲击高度为 61 cm 和 76 cm,温度分别为 23,0,-15,-30 ℃的条件下,其动态冲击试验结果见图 4。每条曲线由至少 5 个数据点组成,每个点均为一个试样的 5 次冲击中后 4 次冲击的最大加速度的平均值。动态缓冲曲线(最大加速度-静应力)能够直观地反映在特定高度下不同静应力对应的加速度,它已被证明是描述缓冲包装材料冲击能

量吸收特性最贴近实际、最经典的曲线^[17]。

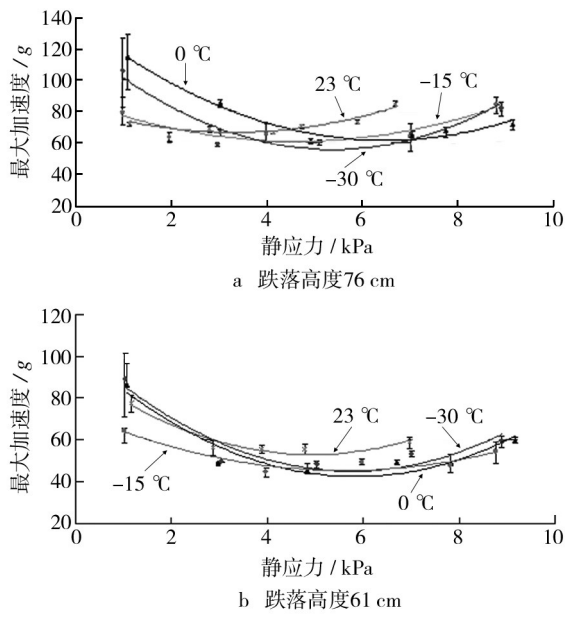


图4 EPE最大冲击加速度-静应力曲线

Fig.4 Peak acceleration vs. static stress curves of EPE at different drop heights

从图 4 可知,低温条件下 EPE 动态曲线的趋势和常温一样,都是开口向上的 U 形曲线,即随着静应力的增加,最大加速度呈先减小后增大的趋势。整体来看,随着温度的降低,曲线变化更加平缓。动态冲击曲线的最低点是该曲线上缓冲效率最大的点,常作为缓冲包装的设计依据。同种材料在同一跌落高度、不同温度条件下得到的动态缓冲曲线,23, 0, -15 和 -30 ℃的曲线最低点对应的最大加速度分别为 66, 62, 60, 55 g,其对应的静应力分别为 3, 6, 5 和 5.5 kPa,说明随着温度的降低,最低点的最大加速度数值逐渐减小,对应的静应力呈增大的趋势。不同的跌落高度呈现相似的规律,相较于常温,低温曲线整体向右下方偏移。由此可知,随着温度的降低,EPE 发泡材料的动态载荷能力升高,最高缓冲效率对应的静应力变小,更适合重载。

从 EPE 的缓冲机理来看,一方面,随着温度的降低,发泡材料中聚合物基质变硬,抗压能力增强;另一方面,由于 EPE 是非交联闭孔结构,低温下气孔内的气体会收缩,在受到外力冲击获得能量的情况下,气体膨胀对冲击形成反作用,从而提高了动态冲击强度。EPE 在加工成形过程中存在一定量的晶区,对低密度聚乙烯进行差示扫描显热法分析,结果表明温度从 40 ℃降低至 -40 ℃,PE 结晶度由 35%提高至 45%,韧性增加,从而提高了 EPE 的载荷性能;DSC 的结果

可以看到,0℃附近出现明显的拐点,说明材料在0℃附近结构发生变化,验证了文中实验0℃曲线出现跳动的结果^[18]。

同类型的EPE材料在跌落高度为76 cm的条件下,当静应力为2 kPa时,23,0,-15,-30℃对应的最大加速度分别为69,100,70,85 g;当静应力为6 kPa时,23,0,-15,-30℃对应的最大加速度分别为75,65,65,58 g。结果说明,当静应力为1~4 kPa时,低温下曲线对应的最大加速度高于常温的45%,此时如果依然使用常温曲线进行设计,那么在低温条件下使用此缓冲包装时,EPE的缓冲性能会降低;当静应力大于4 kPa时,低温条件下的缓冲曲线对应的最大加速度均低于常温,较常温降低了22%。

与常温曲线相比,综合跌落高度为61 cm的低温环境下的实验结果表明,静应力小于3.5 kPa时,EPE的缓冲性能降低;当静应力大于3.5 kPa,EPE的缓冲性能增强,其对应的最大加速度值均低于常温。

3 结语

文中通过自制预处理低温箱和实验低温箱及温控装置,保证了在预处理和试验过程中的低温环境,得到了低温条件下(0,-15,-30℃)的动态缓冲曲线,并与常温情况做对比。结果表明,对于76 cm和61 cm的跌落高度,低温环境条件下的EPE动态冲击曲线,由于EPE发泡材料硬化,EPE发泡材料的动态载荷能力升高,静应力较常温增加0.9~2.5 kPa;低温环境下,缓冲材料动态载荷能力增加,其最小加速度值低于常温条件下相同受力状态下的数值,加速度值降低了约7~8 g。在缓冲包装设计中,如果盲目使用常温试验得到的曲线用于低温环境的包装设计,会使包装设计不当。实验结果表明,在实际流通过程中,随着环境温度的变化,EPE的动态缓冲性能会发生变化,因此在实际包装设计中,应结合实际流通环境温度进行缓冲设计,以减少温度变化对缓冲性能带来的不良影响。

参考文献:

- [1] 刘乘,任亚东.几种常用缓冲材料性能的研究[J].包装工程,2010,31(7):117—119.
LIU Cheng, REN Ya-dong. Research on Properties of Several Cushion Materials[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 117—119.
- [2] 李俊.发泡聚乙烯缓冲性能的研究[D].杭州:浙江大学,2010.
LI Jun. Cushioning Properties of EPE[D]. Hangzhou: Zhenjiang University, 2010.
- [3] 张粉娟,计宏伟,张思盟.电脑主机缓冲包装结构缓冲效果的高速摄像评价[J].包装工程,2013,34(21):1—5.
ZHANG Fen-juan, JI Hong-wei, ZHANG Si-meng. Evaluation of Structural Effect for Cushioned Package of Mainframe Computers via High-speed Camera[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 1—5.
- [4] 廖华勇,陶国良.高密度/低密度聚乙烯共混材料的模压发泡[J].高分子材料科学与工程,2013(7):131—134.
LIAO Hua-yong, TAO Guo-liang. Molded Foams of HDPE/LDPE Blend Material[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013(7): 131—134.
- [5] 高德,卢富德.聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J].振动与冲击,2012,31(3):69—72.
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of MDOF Polyethylene Cushioning System[J]. Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69—72.
- [6] 计宏伟,王怀文.基于高速图像测量技术的缓冲材料缓冲性能表征[J].振动与冲击,2011,30(9):216—220.
JI Hong-wei, WANG Huai-wen. Characterization of Dynamic Cushioning Property of Cushioning Material Based on High-speed Image Measurement Technology[J]. Vibration and Shock, 2011, 30(9): 216—220.
- [7] MILLS N J, MASSO-MOREU Y. Finite Element Analysis (FEA) Applied to Polyethylene Foam Cushions in Package Drop Tests[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(1):29—38.
- [8] 叶晨炫,王志伟.EPE和EVA发泡缓冲材料吸能特性表征[J].包装工程,2012,33(1):40—45.
YE Chen-xuan, WANG Zhi-wei. Characterization of EPE and EVA Foamed Cushioning Material Properties[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 40—45.
- [9] 高德,王瑜,卢福德.基于发泡聚乙烯本构模型的物品缓冲包装设计[C]//第十三届全国包装工程学术会议论文集,2010.
GAO De, WANG Yu, LU Fu-de. Cushioning Packaging Design of Article Based on Polyethylene Foam Constitutive Model [C]// The 13th National Packaging Academic Conference Proceedings, 2010.
- [10] 李俊,高德,王振林.低密度聚乙烯泡沫塑料压缩本构关系的研究[J].包装工程,2008,29(12):25—27.
LI Jun, GAO De, WANG Zhen-lin. Study of the Constitutive Relation of Low Density Polyethylene Foam under Compression[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 25—27.

- [11] 奚德昌,高德. 缓冲包装材料的本构建模研究进展[J]. 包装技术与工程,2011(1):1—4.
XI De-chang, GAO De. The Review on Constitutive Modeling of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Technology and Engineering, 2011(1):1—4.
- [12] 龙恩深,王勇,彭世尼,等. 太阳辐射下汽车的停放实验及安全警示[J]. 北京汽车,2003(4):14—16.
LONG En-shen, WANG Yong, PENG Shi-ni, et al. Parking Test and Safety Warning of Cars under Sun Radiation[J]. Beijing Automotive Engineering, 2003(4):14—16.
- [13] JORGE M, KAYO H, JENNIFER G, et al. Effect of Temperature on the Cushioning Properties of some Foamed Plastic Materials[J]. Packaging Technology and Science, 2003(33):56—64.
- [14] AVALLE M, BELINGARDI G, MONTANINI R. Characterization of Polymeric Structural Foams under Compressive Impact Loading by Means of Energy-absorption Diagram[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001(12):128—135.
- [15] 方婷,康勇刚,杨帅. 环境温度对聚乙烯发泡材料动态缓冲性能的影响[J]. 包装工程,2012,33(2):41—44.
FANG Ting, KANG Yong-gang, YANG Shuai. Dynamic Cushioning Property of EPE in Different Temperatures[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(2):41—44.
- [16] JORGE M, KAYO H. Effect of Temperature on the Cushioning Properties of Some Foamed Plastic Materials[J]. Packaging Technology and Science, 2003(16):69—76.
- [17] GUO Yan-feng, ZHANG Jing-hui. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paper-board[J]. Shock and Vibration, 2004(11):521—531.
- [18] 解云川,张乾,范晓东. 调制式DSC测定聚乙烯的结晶度[J]. 高分子材料科学与工程,2004(5):179—182.
XIE Yun-chuan, ZHANG Qian, FAN Xiao-dong. Crystalline Test of PE by MDSC[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2004(5):179—182.

(上接第4页)

- the Next Generation in Female Mice: A Preliminary Study[J]. Reproductive Toxicology, 2010, 29(4):452—457.
- [5] LAMB J C, GULATI D K, RUSSELL V S, et al. Reproductive Toxicity of Ethylene Glycol Monoethyl Ether Tested by Continuous Breeding of CD-1 Mice[J]. Environmental Health Perspectives, 1984, 57:85—90.
- [6] KRAUL H, JAHN F, BRAMNICH H. Nephrotoxic Effects Diethylene Glycol (DEG) in Rats[J]. Exp Pathol, 1991, 42(1):27—32.
- [7] ECHA. Candidate List of Substances of Very High Concern for Authorisation[EB/OL]. [2012-12-19]. <http://echa.europa.eu/web/guest/candidate-list-table>.
- [8] SEO Y K, BAEK S O. Determination of Glycol Ethers in Ambient Air by Adsorption Sampling and Thermal Desorption with GC/MS Analysis: Performance Evaluation and Field Application[J]. E J Chem, 2012, 9(2):970—979.
- [9] SHIN H S, JUNG D G. Determination of Icing Inhibitors (Ethylene Glycol Monomethyl Ether and Diethylene Glycol Monomethyl Ether) in Ground Water by Gas Chromatography-Mass Spectrometry[J]. Bull Korean Chem Soc, 2004, 25(6):806—808.
- [10] 周宇艳,程欲晓,陈潜,等. 气相色谱-质谱法同时测定水性涂料中五种乙二醇醚及其酯类化合物[J]. 环境化学, 2013, 32(10):1999—2001.
ZHOU Yu-yan, CHENG Yu-xiao, CHEN Qian, et al. Simultaneous Determination of 5 Kinds of Glycol Ethers and Their Esters in Water Based Coatings Using Gas Chromatography/Mass Spectrometer[J]. Environment Chemistry, 2013, 32(10):1999—2001.
- [11] 郑建国,王瓚,余雯静. 用负APCI源的液相色谱-质谱联用法测定牙膏中二甘醇的方法研究[J]. 检验检疫学刊, 2011, 21(1):45—47.
ZHENG Jian-guo, WANG Zan, YU Wen-jing. Study of the Method of Determination of DEG in Teeth Paste by Negative APCI Source LC/MS/MS[J]. Inspection and Quarantine Science, 2011, 21(1):45—47.
- [12] MARIANI E, VILLA C, NEUHOFF C, et al. Derivatization Procedure and HPLC Determination of 2-ethoxyethanol in Cosmetic Samples[J]. Int J Cosmet Sci, 1999, 21(3):199—205.
- [13] 杜碧莹. 气相色谱法测定依托泊苷注射液中乙二醇与二甘醇的量[J]. 中国药业, 2010, 19(1):29—30.
DU Bi-ying. Determination of Ethylene Glycol and Diethylene Glycol in Etoposide Injection by GC[J]. China Pharma Ceuticals, 2010, 19(1):29—30.
- [14] WILLIAMS R H, SHAH S M, MAGGIORE J A. Simultaneous Detection and Quantitation of Diethylene Glycol, Ethylene Glycol, and the Toxic Alcohols in Serum Using Capillary Column Gas Chromatography[J]. J Anal Toxicol, 2000, 24(10):621—626.
- [15] HONG S, JUN H, JAE S, et al. Determination of Urinary Metabolites of Alkyl Cellosolves by Solid Phase Extraction and GC/FID[J]. Journal Occupational Health, 2004, 46:260—265.