

静态破碎剂的轴向膨胀力学性能实验研究

戴星航¹, 张凤鹏¹, 邱兆国², 徐香新²

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对静态破碎剂轴向膨胀力学行为进行了深入研究,提出了测量静态破碎剂膨胀压的轴向输出法,设计了测试系统及核心钢筒组件.分别采用轴向输出法和外管法对静态破碎剂膨胀压进行了测试.通过对比在不同孔径条件下两种方法测得的膨胀压,分析了孔径大小对静态破碎剂轴向膨胀压及其输出率的影响.结果表明:轴向输出法能够可靠准确测得静态破碎剂膨胀压;在固定的高径比条件下,静态破碎剂轴向膨胀压随孔径尺寸增大而增加;孔径小于 50 mm 时,自封孔效应导致静态破碎剂输出轴向膨胀压的能力减弱;孔径大于 150 mm 时,轴向膨胀压与径向膨胀压趋于一致,轴压输出率达 100%.

关 键 词: 静态破碎剂;圆筒直径;膨胀压;轴向输出法;输出规律

中图分类号: TU 43 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)02-0248-05

Experimental Study on Axial Swelling Mechanical Properties of Static Cracking Agent

DAI Xing-hang¹, ZHANG Feng-peng¹, QIU Zhao-guo², XU Xiang-xin²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Feng-peng, E-mail: zhangfengpeng@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Focused on the axial swelling mechanical behavior of static cracking agent (SCA), an axial-output method was proposed to measure the swelling pressure of SCA and a measurement system and its core steel cylinder component were designed. The swelling pressure of SCA was measured using the axial-output method and the external pipe method respectively, and the effects of pipe diameter on axial swelling pressure and output rate were analyzed through the contrast of pressure on the condition of different pipe diameters. The result shows that the axial-output method is accurate for the measurement of swelling pressure. Under the fixed height-diameter ratio, the axial swelling pressure increases with the increase of the diameter size. The capacity of SCA axial-output decreases because of the self-sealing effect when the diameter is smaller than 50 mm, and the axial and radial swelling pressures are almost identical and the output rate of axial pressure is up to 100% when the diameter is larger than 150 mm.

Key words: static cracking agent; cylinder diameter; swelling pressure; axial-output method; output rules

静态破碎剂是 20 世纪 80 年代初国外研制成功的一种破碎岩石、混凝土等介质的材料^[1],其主要成分为 CaO ^[2],利用 CaO 与水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 所产生的体积膨胀来破碎其作用目标.应用静态破碎剂进行破碎的方法称为静态爆破^[3],

这种破碎方法是在被破碎体上钻孔,将与水按照一定比例混合均匀的静态破碎剂浆体注入孔中静置;随着水化反应的进行,静态破碎剂浆体体积膨胀产生的膨胀压作用于孔壁时,使钻孔周边产生环向拉应力,导致被破碎体沿钻孔布置方向开裂,

收稿日期: 2014-12-15

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAB02B01,2013BAB02B03);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120801002,N120701001).

作者简介: 戴星航(1981-),男,四川达州人,东北大学博士研究生;张凤鹏(1967-),男,辽宁葫芦岛人,东北大学教授.

使被破碎体产生裂缝达到破碎的目的^[4-5]。

静态爆破过程中钻孔的孔径普遍较小,一般在30~45 mm^[1],在此尺寸下,静态破碎剂破碎输出的膨胀压力较小。研究表明,膨胀压随着孔径增大而提高^[1]。但扩大钻孔孔径容易出现“喷孔”问题,游宝坤等^[1]通过改变静态破碎剂的成分和颗粒级配,研制出适用于45~80 mm孔径的静态破碎剂。目前对静态破碎剂的研究主要集中在提高径向膨胀压^[6]、膨胀机理^[7]和破岩机理^[8-9]等方面,对于静态破碎剂的轴向膨胀力学性能的研究和利用较少。

本文提出“轴向输出法”测试静态破碎剂轴向膨胀压,并与外管法^[10-11]测得的径向膨胀压进行对比,讨论了影响静态破碎剂轴向膨胀压的主要因素,对轴向与径向膨胀压在不同孔径条件下的关系进行了总结,为“轴向输出法”测试静态破碎剂真实膨胀压提供了相关依据,为有效防止“喷孔”现象提供了理论参考;同时为利用其轴向输出膨胀压作为动力源的轴向加载系统提供相关参考。

1 测试原理与实验装置

采用“外管法”和“轴向输出法”测试钢筒组件中静态破碎剂产生的膨胀压。

1.1 外管法测试原理

外管法基于弹性力学中的厚壁筒理论,依据圆筒在理想状态下受压时的应力分量表达式推导膨胀压计算公式^[12]。本文研究的主要内容为静态破碎剂在不同孔径下的轴向膨胀力学性能,因此以外管法测得的径向膨胀压为标准值,与轴向输出法测得的膨胀压值进行对比分析。外管法测试静态破碎剂膨胀压的计算公式如下:

$$P_r = \frac{E(K^2 - 1)}{2 - \mu} \varepsilon_0 \quad (1)$$

式中: P_r 为静态破碎剂产生的径向膨胀压,MPa; E 为钢筒的弹性模量,MPa; K 为钢筒外径与内径之比值; ε_0 为钢筒外壁产生的环向应变; μ 为钢筒泊松比,0.3。

1.2 轴向输出法测试原理及方法

轴向输出法是基于静态破碎剂膨胀压的液体压力特性^[10-11,13]及液压平衡原理^[14]的测试方法(见图1)。用具有一定壁厚的钢筒模拟钻孔,静态破碎剂在钢筒中的体积膨胀对钢筒壁产生径向膨胀压,同时在轴向也产生膨胀压,使其在钢筒中产生轴向位移^[9,14]。利用钢筒两端的活塞和电液伺

服压力试验机,对钢筒中的静态破碎剂进行轴向位移约束,通过压力试验机直接测得静态破碎剂在钢筒中产生的轴向力,通过换算可得出轴向膨胀压大小。

轴向输出法的测试方法^[15]为:首先将一定量静态破碎剂与水搅拌均匀后装入钢筒内,捣插密实平整,静态破碎剂位于上、下活塞之间;将装有静态破碎剂的钢筒组件放入压力试验机试验台,其下方为压力传感器;通过位移传感器调整压力机油缸及压头位置,使压头与上部活塞顶面接触但不产生压力;在静态破碎剂水化反应过程中,利用压头对钢筒内的静态破碎剂产生轴向位移约束,采用压力传感器记录静态破碎剂在钢筒组件中因水化反应体积膨胀产生的轴向膨胀力;最后按照式(2)计算静态破碎剂在钢筒中产生的轴向膨胀压。

$$P_z = 10 \cdot F_z / s \quad (2)$$

式中: P_z 为钢筒中输出的轴向膨胀压,MPa; F_z 为测得的轴向力,kN; s 为钢筒活塞横截面积,cm²。

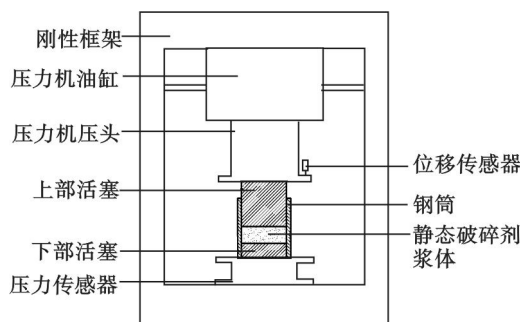


图1 轴向输出法示意图

Fig. 1 Schematic of axial-output method

1.3 实验装置

设计了4组不同尺寸的钢筒组件,钢筒内径分别为150,113,65和50 mm。每组装置由钢筒、上部活塞和下部活塞三部分组成。钢筒采用无缝钢管制成,活塞为钢质材料,活塞直径与钢筒内径相同,可在钢筒内上下滑动。装置组件尺寸见表1。

实验用静态破碎剂的成分(质量分数,%)为:CaO 81.97, SiO₂ 5.54, Fe₂O₃ 1.48, Al₂O₃ 3.54, MgO 1.98,其他5.49。研究表明^[14],钢筒中静态破碎剂浆体高径比为3:8时,轴向膨胀压受静态破碎剂浆体硬化而产生的封孔效应的影响较小,因此本文采用的静态破碎剂浆体高径比均为3:8,水灰比20%。每种钢筒填装的静态破碎剂浆体质量见表2。

表 1 四组钢筒尺寸				
Table 1	Dimensions for four kinds of cylinder			
尺寸	组件 1	组件 2	组件 3	组件 4
钢筒外径	177	133	80	65
钢筒内径	150	113	65	50
钢筒高度	200	150	100	100
活塞直径	150	113	65	50
下部活塞高度	50	40	30	25
上部活塞高度	150	110	70	75

表 2 静态破碎剂浆体的参数				
Table 2	Parameters of SCA slurry			
组件号	1	2	3	4
浆体质量/g	2 300	980	185	87
水灰比/%	20	20	20	20

2 实验结果分析

静态破碎剂轴向与径向膨胀压对比曲线如图 2 所示. 在不同孔径钢筒中产生的轴向膨胀压对

比曲线如图 3 所示.

静态破碎剂浆体在钢筒中径向和轴向均产生了膨胀压. 在反应初期, 膨胀压增长速率较快, 随着反应的进行, 膨胀压增长速率逐渐降低, 膨胀压趋于稳定值. 钢筒中静态破碎剂浆体产生的轴向膨胀压始终小于径向膨胀压.

随着孔径的减小, 轴向膨胀压的衰减率明显大于径向膨胀压的衰减率. 这是因为静态破碎剂水化过程中生成一种起胶结作用的组分, 能够控制 CaO 的水化速度^[1], 随着反应进行, 静态破碎剂在产生膨胀压的同时, 逐渐固化成具有一定弹性模量的硬化体^[10-11], 硬化体的黏结作用对钢筒中静态破碎剂浆体产生的轴向膨胀有约束作用, 可抑制喷孔. 孔径较大时, 硬化体的约束作用相对减弱, 轴向膨胀压逐渐增大, 与径向膨胀压趋于一致(图 2a); 孔径较小时, 硬化体对轴向膨胀的约束作用明显, 使轴向膨胀输出发生明显衰减(图 3), 进一步减小孔径, 直至硬化体的黏结作用能完全约束轴向膨胀, 此时静态破碎剂浆体发生自封孔现象, 轴向基本不产生膨胀压.

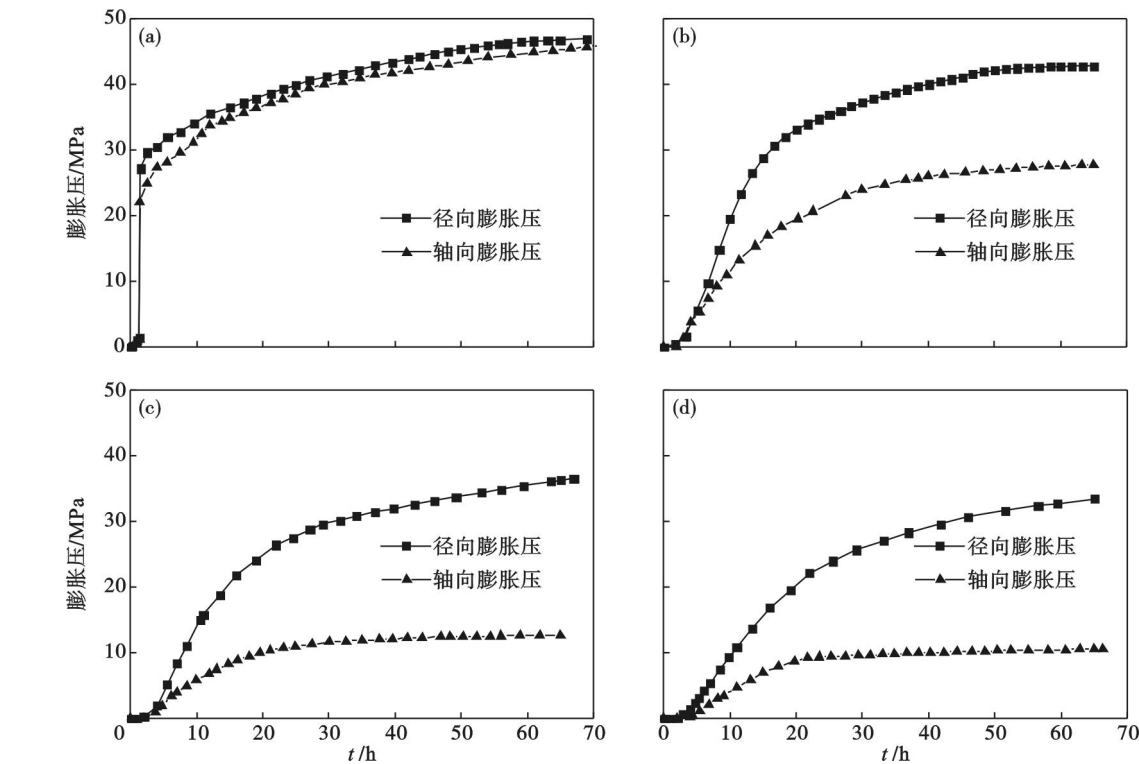


图 2 轴向与径向膨胀压对比图

Fig. 2 Comparison of axial and radial swelling pressure

(a)—组件 1(内径 150 mm); (b)—组件 2(内径 113 mm); (c)—组件 3(内径 65 mm); (d)—组件 4(内径 50 mm).

钢筒中膨胀压增长速率随着孔径增大而增加;当孔径为 150 mm 时,在反应初期出现了膨胀压近似直线上升的过程(图 2a,图 3).这是由于

固定高径比时,大孔径钢筒中静态破碎剂浆体体积增大,水化反应释放的热量散发较慢,热量集中在钢筒内,使静态破碎剂浆体升温较快,加快了水

化反应的速度. 这一特性可为研究以大孔径钢管轴向膨胀压作为动力源来实现对试件加载的轴向加载系统提供相关依据.

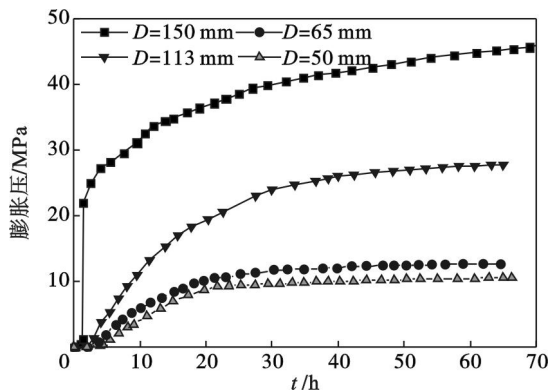


图3 不同孔径条件下的轴向膨胀压

Fig. 3 Axial swelling pressure with different diameters

将某一时刻轴向与径向膨胀压的比值定义为“轴向输出系数 S ”, 公式如下:

$$S = P_z / P_r. \quad (3)$$

式中: P_z 为钢管中输出的轴向膨胀压, MPa; P_r 为钢管中输出的径向膨胀压, MPa.

钢管内静态破碎剂水硬化体在轴向受到位移约束, 可认为是平面应变问题. 钢管只受内压力作用时, 厚壁筒中任意半径 ρ 处的径向应力 σ_r 的拉梅解为

$$\sigma_r = -P_r (R^2 / \rho^2 - 1) / (R^2 / r^2 - 1). \quad (4)$$

式中: r 为钢管内半径, mm; R 为钢管外半径, mm; P_r 为钢管内径向膨胀压, MPa. 当 $\rho = r$ 时,

$$\sigma_r = -P_r. \quad (5)$$

由钢管内静态破碎剂硬化体与钢管内壁接触的受力状态可知, 其径向应力 σ_{jr} 为

$$\sigma_{jr} = P_r. \quad (6)$$

对于静态破碎剂硬化体内任意一点 P , 有

$$\sigma_{jr} = \sigma_{j\theta} = P_r. \quad (7)$$

根据广义胡克定律:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_{jz} - \mu_j (\sigma_{j\theta} + \sigma_{jr})). \quad (8)$$

对于平面应变问题, $\varepsilon_z = 0$, 可知

$$\sigma_{jz} = \mu_j (\sigma_{j\theta} + \sigma_{jr}). \quad (9)$$

式中: σ_{jr} 为静态破碎剂硬化体内任意一点处的径向应力, MPa; $\sigma_{j\theta}$ 为其环向应力, MPa; σ_{jz} 为其轴向应力, MPa; μ_j 为静态破碎剂硬化体的泊松比.

由轴向输出系数的定义可知, 其理论值 S_L 为

$$S_L = \sigma_{jz} / \sigma_{jr} = 2\mu_j. \quad (10)$$

分别取 35, 45, 55 和 65 h 时间点上不同孔径钢管中轴向和径向膨胀压值, 计算出对应的轴向输出系数, 该系数与孔径的关系如图 4 所示.

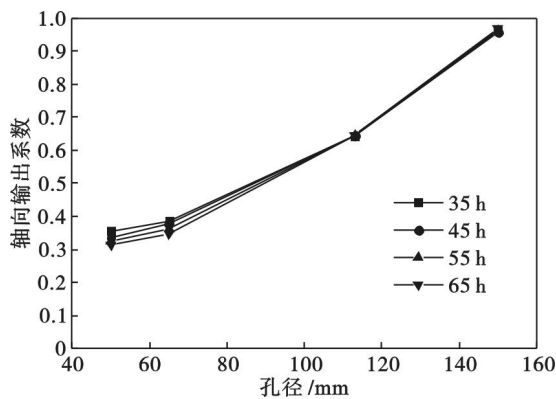


图4 轴向输出系数与孔径关系图

Fig. 4 Axial output coefficient vs diameter

轴向输出系数 S 在 50 ~ 150 mm 孔径范围内, 以近似线性的规律随孔径增大而变大, 当孔径为 150 mm 时, 该系数值接近 1 (图 4). 图中 4 条曲线趋势和数值基本一致, 说明静态破碎剂在固定孔径钢管中, 不同时间内的轴向输出系数稳定性较好, 因此该曲线可以用于 50 ~ 150 mm 孔径范围内任意孔径钢管的膨胀压测试, 即只需测得任意孔径钢管静态破碎剂产生的轴向膨胀压, 即可通过系数换算出静态破碎剂的真实膨胀压.

结合轴向输出系数 S 的物理意义, 孔径较大时, S 值接近 1.0, μ_j 接近 0.5, 此时静态破碎剂水化产物在钢管中处于流体状态, 钢管内壁仅有很小范围出现硬化约束轴向膨胀现象; 随着孔径减小, 自封孔效应明显, 大量水化产物在自封孔效应下固结为坚硬致密的硬化体, 仅有少量水化产物呈现流体状态, 表现出 μ_j 减小、 S 值减小的情况.

3 结 论

1) 提出了测量静态破碎剂膨胀压的轴向输出法, 开发了测试系统, 设计了核心组件. 结合轴向输出系数 S , 可通过轴向应力测定静态破碎剂膨胀压.

2) 静态破碎剂膨胀压的轴压输出率随着孔径增大而增加, 当孔径增加到 150 mm 时, 输出率接近 100%.

3) 受静态破碎剂浆体硬化黏结封孔作用的影响, 静态破碎剂输出的轴向膨胀压要低于径向膨胀压, 孔径越小, 影响越大. 增大孔径可以减弱水硬化物质的自封孔效应, 轴向膨胀压与径向膨胀压之间的差异逐渐消除.

4) 在大孔径条件下, 静态破碎剂浆体在钢管中可获得较高的轴向膨胀压输出; 利用该特性可实现对试件的轴向加载.

参考文献:

- [1] 游宝坤. 静态爆破技术——无声破碎剂及其应用[M]. 北京:中国建材工业出版社,2008:1-63.
(You Bao-kun. The static blasting technology—soundless cracking agent and its application [M]. Beijing: China Building Materials Press,2008:1-63.)
- [2] Fukui H, Tukada K. Static demolition agent by calcium oxide [J]. *Science and Technology of Energetic Materials*, 2003, 64(1):25-31.
- [3] Hayashi H, Soeda K, Hida T, et al. Non-expansive demolition agent in Japan [C]// Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Odense, 1993:231-242.
- [4] Gambatese J A. Controlled concrete demolition using expansive cracking agents [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2003, 129(1):98-104.
- [5] Tamaz A, Edgar M, Nikoloz C, et al. Investigation of new non-explosive demolition agent for use at underground mining of hard ores [C]// 8th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection. Albena, 2008:281-286.
- [6] Hinze J, Nelson A. Enhancing performance of soundless chemical demolition agent [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1996, 122(2):193-195.
- [7] Guo R P, Li G X. Silently controlling cracking technology [C]// 26th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Anaheim, 2000:209-216.
- [8] Tang L X, Zhang D, An Z T, et al. Research of soundless crack with different number drillholes [C]// 4th International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials. Haikou, 2014:689-692.
- [9] Fukui H, Matsumoto K, Tsukada K, et al. Stress analysis by finite element method around parallel holes occurred by static demolition agent [J]. *Science and Technology of Energetic Materials*, 2005, 66(1):255-259.
- [10] 邹俊兴. 静力破碎剂的压力特性 [J]. 湘潭矿业学院学报, 1993, 8(1):23-27.
(Zou Jun-xing. Pressure property of static demolition agent [J]. *Journal of Xiangtan Mining Institute*, 1993, 8(1):23-27.)
- [11] Seoda K, Harada T, Kanbayashi M, et al. Measuring method of expansive pressure of expansive demolition agent using flush diaphragm type pressure transducer [J]. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1993, 478:145-148.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JC506—2008 中华人民共和国建材行业标准(无声破碎剂) [S]. 北京:中国建材工业出版社, 2008.
(National Development and Reform Commission. JC506—2008 The People's Republic of China building materials industry standards (soundless cracking agent) [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2008.)
- [13] Hinze J, Brown J. Properties of soundless chemical demolition agents [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1994, 120(4):816-827.
- [14] 戴丽莱, 李庆宁. 静态破碎剂膨胀压测定方法的研究 [J]. 武汉工业大学学报, 1989(2):131-134.
(Dai Li-lai, Li Qing-ning. Study of expansion pressure determining of static crushing agent [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 1989(2):131-134.)
- [15] 冯夏庭, 戴星航, 张凤鹏, 等. 一种测量静态破碎剂膨胀压的测试系统及测试方法: ZL201310273047.0 [P]. 2014-12-10.
(Feng Xia-ting, Dai Xing-hang, Zhang Feng-peng, et al. A swelling pressure measuring system and method of the static cracking agent: ZL201310273047.0 [P]. 2014-12-10.)

(上接第 247 页)

- [8] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究阶段坝线选择工程地质勘察报告 [R]. 杭州:华东勘测设计研究院, 2008.
(HydroChina Huadong Engineering Corporation. Engineering geological investigation report of Baihetan hydropower station about the dam line selection in feasibility study stage [R]. Hangzhou: Huadong Engineering Corporation, 2008.)
- [9] Jin C Y, Yang C X, Fang D, et al. Study on the failure mechanism of basalts with columnar joints in the unloading process on the basis of an experimental cavity [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3):1275-1288.
- [10] Schultz R A. Limits on strength and deformation properties of jointed basaltic rock masses [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1995, 28(1):1-15.
- [11] Shan Z G, Di S J. Loading-unloading test analysis of anisotropic columnar jointed basalts [J]. *Journal of Zhejiang University, Science A: Applied Physics & Engineering*, 2013, 14(8):603-614.