文章编号：1001-1455(2014)05-0554-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)05-0554-06

风荷载对高烟囱爆破倾倒偏转角的影响*

韩 芳[1,2]，钟冬望[1,2]，韩新星[1]，曾翔龙[1]，唐玉成[1]，刘 莹[1]

(1.武汉科技大学理学院工程力学系，湖北 武汉 430081；
2.武汉科技大学冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室，湖北 武汉 430081)

摘要：从高烟囱余留支撑体截面的中性轴方程出发，推导顺风荷载与横风共振共同作用下，高烟囱定向爆破倾倒偏转角的修正公式，研究不同风级(4～6 级)、不同切口角(190°～220°)、不同风向角(0°～180°)对爆破倾倒偏转角的影响规律，并对最大偏转角的绝对值和产生条件进行讨论，最后以南昌电厂 210 m 高烟囱的爆破参数设计和触地防护过程为例进行验证。计算表明，对于高耸烟囱，考虑横风共振后倾倒偏转角显著增大，是顺风引起偏转角的 4～5 倍；风级一定的条件下，存在最不利风向角，致使烟囱产生最大偏转角；最大倾倒偏转角随着风力等级的增大而增大，随着切口角的增大而减小。

关键词：爆炸力学；横风共振；偏转角；定向爆破；高烟囱；风荷载

中图分类号：O389 **国标学科代码**：1303599 **文献标志码**：A

高烟囱在定向爆破中除了受到自身结构、材料、力学特性等内在因素的影响外，还受到爆破方案和参数、测量施工、风力风向等外在因素的影响[1]，这些因素的综合作用往往导致高烟囱实际倾倒方向与预定方向存在偏差，不利于爆破作业的安全实施。某些因素，比如结构材料力学性质，可以通过改进爆破方案或完善施工细节进行偏差控制，而自然界风荷载的影响却无法回避[2-3]。尽管 GB6722-2003《爆破安全规程》规定“当风力超过 6 级时，应停止爆破作业”，但实际上高烟囱在风力作用下，除了像一般结构一样受有顺风向风荷载外，还受到由于漩涡周期性脱落而引起的横风向共振[4]。在低于 6 级风的条件下，比如 4 级风作用下高烟囱也可能在某个高度区间发生一阶横向共振[5-6]。若爆破瞬间，横风共振和临界风速下顺风向响应的共同作用对烟囱起控制作用，那么仅计算顺风向响应会引起爆破倾倒角度偏差，甚至爆破失败。因此，系统研究风荷载对高烟囱定向倾倒的影响规律是必要的[7]。

本文中，将在结构材料力学性能、爆破方案和参数、施工测量等因素影响不变的假设下，仅讨论风荷载对高烟囱定向爆破倾倒方向的影响。从爆破余留支撑体截面的中性轴方程出发，推导顺风和横风共振条件下的高烟囱倾倒偏转角的修正公式，研究不同风级、不同切口角、不同风向角对爆破倾倒偏转角度的影响规律，并对最大偏转角进行定量讨论。

1 偏转角修正公式

当风以一定的速度吹向圆柱形物体，平行的气流在圆柱体背风面的两侧交替形成漩涡，漩涡的出现与消失引起柱体两侧压力的改变，迫使柱体发生垂直于风向的横向振动。对圆截面柱体结构，当发生漩涡脱落时，若脱落频率与结构自振频率相符，将出现横风共振[8]。建立风载作用下高烟囱爆破余留支撑体截面受力分析图，如图 1 所示，其中，ABC 为余留支撑体，x 轴正向为设计倾倒方向，O_1O_2 为余留支撑体的形心主轴，e 为其偏心距，Z_1Z_2 为风荷载作用下的余留支撑体截面中性轴，θ 为倾倒偏转角，切口弧长所对圆心角为 α，切口部位筒体内径为 R_2，外径为 R_1。风荷载作用下，假设顺风荷载沿着 OP 方

* **收稿日期**：2013-04-11；**修回日期**：2013-05-26
基金项目：国家自然科学基金项目(51108358,51174147)；
冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室基金项目(Y201304)；
武汉科技大学大学生科技创新基金项目(12ZRA075)
作者简介：韩 芳(1980—)，女，博士，副教授。

向，与 x 轴负向夹角为 β，若在特定条件下产生横风共振，则高烟囱将在垂直于烟囱柱体方向 P_1P_2 发生横风共振。

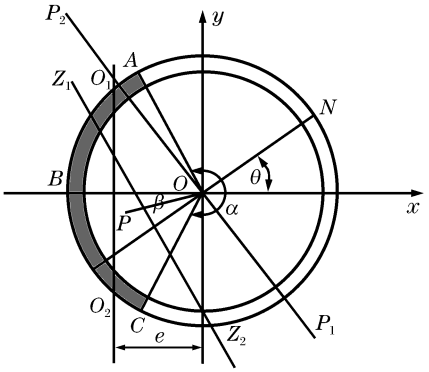

图 1 余留支撑体截面图

Fig. 1 The remained supporting section

1.1 余留支撑体受力分析

余留支撑体截面上由烟囱自重产生的压应力为 σ_1：

$$\sigma_1 = \frac{G}{S_z} \tag{1}$$

式中：G 为烟囱自重，S_z 为余留支撑体截面折算面积。

切口产生后，由偏心引起的应力为 σ_2：

$$\sigma_2 = \frac{Ge\,(x+e)}{I_1} \tag{2}$$

式中：x 为余留支撑体截面上任一点的坐标值，I_1 为余留截面对形心主轴 O_1O_2 的惯性矩。

由顺风荷载和横风共振引起的应力为 σ_3（OP_1 方向取“+”，OP_2 方向取“−”）：

$$\sigma_3 = \frac{-M_1\,(x+e)\cos\beta \pm M_2\,(x+e)\sin\beta}{I_1} - \frac{M_1 y\sin\beta \pm M_2 y\cos\beta}{I_2} \tag{3}$$

式中：I_2 为余留截面对 x 轴的惯性矩，M_1 为顺风荷载力矩，M_2 为横风荷载力矩。

余留支撑体截面上任意一点的总应力为：

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

将上式代入式(1)～(3)，令 $\sigma=0$，得到余留支撑体截面中性轴方程（OP_1 方向取“+”，OP_2 方向取“−”）：

$$\frac{G}{S_z} + \frac{Ge\,(x+e)}{I_1} + \frac{-M_1\,(x+e)\cos\beta \pm M_2\,(x+e)\sin\beta}{I_1} - \frac{M_1 y\sin\beta \pm M_2 y\cos\beta}{I_2} = 0 \tag{4}$$

可求得中性轴斜率：

$$\left.\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{OP_1} = \frac{[Ge - (M_1\cos\beta - M_2\sin\beta)\,]\,I_2}{(M_1\sin\beta + M_2\cos\beta)\,I_1} \tag{5}$$

$$\left.\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{OP_2} = \frac{[Ge - (M_1\cos\beta + M_2\sin\beta)\,]\,I_2}{(M_1\sin\beta - M_2\cos\beta)\,I_1} \tag{6}$$

设倾倒偏转角为 θ，倾倒中心线为 ON，则 $ON\perp Z_1Z_2$，即 $\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\tan\theta=-1$，求出偏转角 θ 的修正公式：

$$\theta|_{OP_1} = \arctan\frac{(M_1\sin\beta - M_2\cos\beta)\,I_1}{[Ge - (M_1\cos\beta - M_2\sin\beta)\,]\,I_2} \tag{7}$$

$$\theta|_{OP_2} = \arctan\frac{(-M_1\sin\beta + M_2\cos\beta)\,I_1}{[Ge - (M_1\cos\beta + M_2\sin\beta)\,]\,I_2} \tag{8}$$

1.2 最大偏转角计算公式

由式(7)～(8)可以看出，定向爆破倾倒偏转角 θ 与顺风荷载力矩 M_1、横风荷载力矩 M_2、烟囱自重 G、偏心矩 e、切口断面几何性质 I_1 与 I_2 有关。当爆破切口参数确定以后，倾倒偏转角 θ 是风向角 β 的函数。当风力一定，风向角 β 变化时存在一个最大的倾倒偏转角 $|\theta_{\max}|$（工程中更关心绝对值的大小）。要求这个最大偏转角，令 $\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}\beta}=0$，整理式(7)～(8)，简化计算后可以得到：

当 $\beta = \arcsin\dfrac{M_1}{\sqrt{M_1^2+M_2^2}} - \arcsin\left(\dfrac{\sqrt{M_1^2+M_2^2}}{Ge}\right)$ 时，$\theta \to \theta_{\max}|_{OP_1}$，则对应的

$$\theta_{\max}|_{OP_1} = \left|\arctan\frac{-I_1\sqrt{(M_1^2+M_2^2)}}{I_2\sqrt{G^2e^2-(M_1^2+M_2^2)}}\right|$$

当 $\beta=\arcsin\left(\dfrac{\sqrt{M_1^2+M_2^2}}{Ge}\right)-\arcsin\dfrac{M_1}{\sqrt{M_1^2+M_2^2}}$ 时，$\theta\to\theta_{\max}|_{OP_2}$，则对应的

$$\theta_{\max}|_{OP_2}=\left|\arctan\frac{I_1\sqrt{(M_1^2+M_2^2)}}{I_2\sqrt{G^2e^2-(M_1^2+M_2^2)}}\right|$$

若考虑顺风和横风的共同作用，则当风向角满足一定条件时，存在最大倾倒偏转角 $|\theta_{\max}|$：

$$|\theta_{\max}|=\left|\arctan\frac{I_1\sqrt{(M_1^2+M_2^2)}}{I_2\sqrt{G^2e^2-(M_1^2+M_2^2)}}\right| \tag{9}$$

$|\theta_{\max}|$ 的工程意义在于，可为高烟囱布置触地防护体系提供参考。

2 工程算例

2.1 工程背景

以南昌电厂 210 m 高钢筋混凝土烟囱的定向爆破工程实例[9]进行验证。烟囱底部外半径 9.24 m，内半径 8.62 m，壁厚 0.62 m，为双层钢筋网，烟囱顶部外半径 3.17 m，内半径 2.92 m，壁厚 0.25 m，烟囱重约为 9 398.69 T，重心高度为 72 m。采用正梯形爆破切口，切口圆心角 215°，切口弧长 34.58 m，切口高度 5.2 m，采用直角三角形定向窗，角度 30°，底边长 3.5 m，高 2.02 m。在爆破切口范围采用梅花形布置炮孔，一共 15 排炮孔，538 个孔。

初步计算表明，烟囱自振频率为 0.297 Hz，其共振频带在 4～6 级风的风振频率区域，具体来说，在 160～210 m 的高度区间，共振频率带位于风力 4 级范围内；在 110～160 m 的高度区间，共振频率带位于风力 5 级范围内；在 60～110 m 的高度区间，共振频率带位于风力 6 级范围内。因此，考查不同风级(4～6 级)、不同切口角(190°～220°)、不同风向角(0°～180°)对定向爆破倾倒偏转角 θ 的影响影响规律，将各项工程参数代入，采用式(11)的偏转角修正公式来计算横风共振条件下高烟囱定向爆破的倾倒角，采用 MATLAB 语言编写程序进行不同工况的计算。

2.2 结 果

计算风力等级分别为 4、5 和 6 级，切口角分别为 190°、195°、200°、205°、210°、215°和 220°条件下的爆破倾倒偏转角。工况 1 为顺风荷载、工况 2 为组合风载(顺风＋横风)。

当风向角为 30°时，偏转角变化规律如图 2 所示。图 2 中拟合曲线从上到下分别表示 6、5 和 4 级顺风加横风(实心点)，以及 6、5 和 4 级顺风(空心点)。若风向角一定，2 种工况下爆破偏转角随着切口角的增大而逐渐减小；相对顺风荷载，横风对偏转角的影响程度更大；随着风力等级的增加，横风对偏转角的影响更为显著。不同切口角条件下，横风共振效应引起的倾倒偏转角是顺风引起偏转角的 4～5 倍。

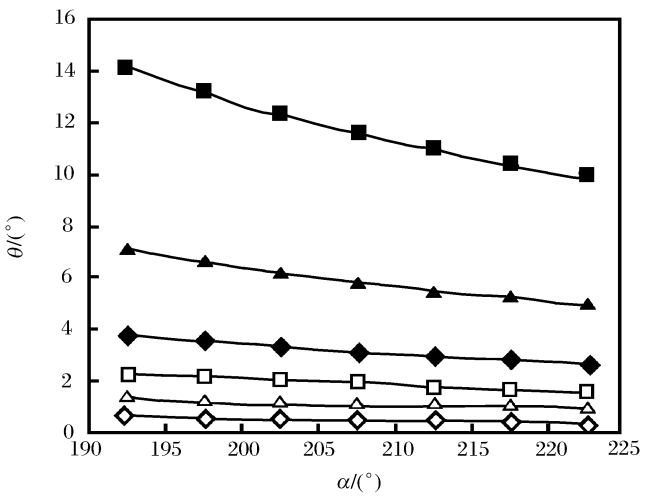

图 2 不同切口角条件下偏转角变化曲线

Fig. 2 Variation of the deflection angle with different blasting incision angles

表 1 所示为不同切口角条件下对应的偏转角和顶部位移的偏差，表中 θ_1 表示顺风条件下的偏转角，θ_2 表示顺风加横风条件下的偏转角，Δ 表示顶部位移偏差。

从 0°～180°范围内变化风向角，当切口角由 190°增加到 220°时，计算不同工况下最大倾倒偏转角及其对应的风向角的变化规律，如表 2 所示，表 2 中 $\theta_{2,\max}$ 表示在顺风加横风条件下的最大偏转角，β_2 表示

在顺风加横风条件下的风向角。

表 1 不同切口角条件下对应的偏转角和位移偏差

Table 1 Variation of the deflection angle and displacement with different blasting incision angles

风级	θ_1/(°)		θ_2/(°)		$(\theta_2-\theta_1)$/(°)		Δ/m	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
4	0.45	0.64	2.65	3.80	2.20	3.16	8.06	11.58
5	0.94	1.35	4.94	7.08	4.00	5.73	14.65	20.99
6	1.59	2.30	9.93	14.08	8.34	11.78	30.55	43.15

表 2 不同切口角条件下最大偏转角和风向角变化规律

Table 2 Variation of maximum deflection angle and wind direction angle with different blasting incision angles

α/(°)	$\theta_{2,\max}$/(°)	β_2/(°)	$\theta_{2,\max}$/(°)	β_2/(°)	$\theta_{2,\max}$/(°)	β_2/(°)
	4 级		5 级		6 级	
190	3.91	16.69	7.27	16.90	15.12	7.77
195	3.64	16.75	6.77	17.00	14.12	7.99
200	3.40	16.80	6.34	17.10	13.22	8.19
205	3.19	16.85	5.95	17.19	12.43	8.39
210	3.01	16.89	5.60	17.27	11.73	8.56
215	2.85	16.93	5.31	17.35	11.12	8.73
220	2.72	16.97	5.06	17.42	10.60	8.89

由表 2 可知，相同切口角条件下，随着风力等级的增加，最大偏转角逐渐增大；相同风力等级条件下，随着切口角的增大，最大偏转角逐渐减小。当切口角为 215°时，计算最大偏转角随风向角的变化曲线如图 3 所示，图中的实心点从上到下分别表示 6、5 和 4 级顺风加横风的情况，相应的空心点表示顺风的情况。由图 3 可知，(1)若仅考虑顺风工况，随着风向角的增加，最大偏转角由零增至最大再减至零，曲线近似对称，即当风向与倾倒方向重合时，风荷载仅起到加速或阻碍烟囱倒塌的作用，若风向与倾倒方向垂直，则最大偏转角达到最大。(2)若同时考虑顺风加横风，随着风向角的增加，最大偏转角先增大后减小，然后再增大，整个过程存在一个极大值点。对于实际工程，这个最大偏转角的极大值更有参考意义，可以该值为标准进行触地防护体系设计。

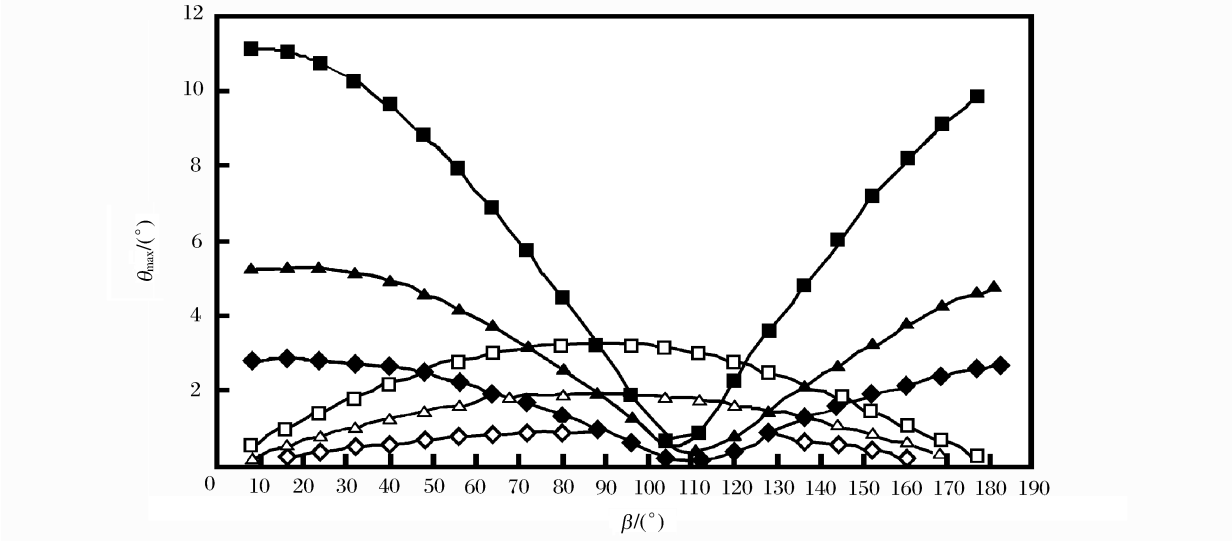

图 3 最大偏转角随风向角的变化曲线

Fig. 3 Variation of the maximum deflection angle with wind direction angle

2.3 工程验证

2012 年 2 月 12 日上午 10:30,南昌发电厂 210 m 高烟囱准时爆破,天气预报显示“微风(3 级风)、无持续风向”,根据烟囱周围复杂环境及现场测量的要求,烟囱拆除采用地面以上 0.5 m 开爆破切口南偏西 4°定向倒塌爆破方案。为减小烟囱倒塌时的触地振动和飞石飞溅,在烟囱倾倒中心线±6°范围内、距烟囱根部中心 90～224 m 内垂直倾倒中心线堆筑 8 道缓冲堤坝,在倒塌正前方 245 m 处修筑一道高 4 m 宽 6 m 的防冲墙,采用高速电子摄影仪对爆破瞬间以及倒塌过程进行全程监测[10]。记录表明,高烟囱最终在南偏西 6°倾倒,虽然比设计倾倒中心线偏西 2°,但由于前期考虑了风荷载的不利影响,因此倾倒偏转角还在预定倾倒设计范围内,为爆破作业的安全有效进行提供了保证。

3 结 论

风荷载是影响高烟囱定向爆破、准确倾倒的重要因素之一,柔度大、周期长的高烟囱更容易发生横向共振。通过推导顺风和横风综合作用下倾倒偏转角的修正公式,研究不同因素对偏转角的影响规律,可以得到以下结论:

(1)风级一定条件下,当风向角变化时存在最大倾倒偏转角,该角度与顺风弯矩、横风弯矩、余留支撑体截面的几何性质(惯性矩、偏心矩)、高烟囱重力等因素有关;最大倾倒偏转角随风力等级的增大而增大,随爆破切口角的增大而减小。

(2)横风共振效应引起的倾倒偏转角是顺风引起偏转角的 4～5 倍,为避免风荷载对定向爆破的不利影响,应尽量选择无风或风力较小(3 级风以下)、无雷电时起爆;对于特大型高耸烟囱,在设计爆破参数和布置触地防护体系时要充分考虑横风共振引起的最大偏转角。

参考文献:

[1] 言志信,叶振辉,刘培林. 烟囱定向爆破拆除倒塌过程[J],爆炸与冲击. 2010,30(6):607-613.
Yan Zhi-xin, Ye Zhen-hui, Liu Pei-lin. Collapsing process of chimney demolition by directional blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(6):607-613.

[2] 王斌,唐海. 高耸建筑物爆破定向倾倒运动风载计算分析[J]. 力学与实践,2010,32(5):36-40.
Wang Bin, Tang Hai. Calculation and analysis of motion wind load caused by directional collapse of the blasting high building[J]. Mechanics in Engineering, 2010,32(5):36-40.

[3] 武宏博,程康,孙亚飞. 风荷载对高烟囱爆破拆除倾倒方向的影响[J]. 爆破,2008,25(3):29-31.
Wu Hong-bo,Cheng Kang, Sun Ya-fei. Influence of wind loading to collapsing orientation in high smoke stack blasting demolition[J]. Blasting, 2008,25(3):29-31.

[4] 王红梅,楼文娟. 梯度风场中高耸结构涡致振动响应时程分析[J]. 工程力学,2004,21(5):52-56.
Wang Hong-mei, Lou Wen-juan. Analysis of vortex-induced vibration response of tall cylindrical structures in gradient wind field using the time-marching approach[J]. Engineering Mechanics, 2004,21(5):52-56.

[5] 刘亚琦. 圆截面高耸结构的横风向风振研究[D]. 武汉:武汉大学,2004.

[6] 韩芳,钟冬望,龚相超. 横风向共振对高烟囱爆破倾倒方向的影响[J]. 爆破,2012,29(4):10-13.
Han Fang, Zhong Dong-wang, Gong Xiang-chao. Effect of across-wind resonance acted on collapse direction of high chimney blasting[J]. Blasting, 2012,29(4):10-13.

[7] 费鸿禄,段宝福. 风载对筒形高耸建筑物定向爆破倾倒过程影响的研究[J]. 爆炸与冲击,2000,20(1):92-96.
Fei Hong-lu, Duan Bao-fu. Study on the effect of wind power acted on the collapsing process of tubular tall building in directional blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(1):92-96.

[8] 江见鲸. 防灾减灾工程学[M]. 北京:机械工业出版社,2005:243-246.

[9] 陈德志,丁帮勤,何国敏,等. 复杂环境下 210m 烟囱定向爆破拆除[J]. 爆破,2012,29(2):72-76.
Chen De-zhi, Ding Bang-qin, He Guo-min, et al. Directional demolition blast of 210 m high chimney under complex conditions[J]. Blasting, 2012,29(2):72-76.

[10] 武汉科技大学工程力学测试中心. 南昌发电厂 210 m 钢筋混凝土烟囱爆破振动监测成果报告[R]. 2012.

Influence of wind load acted on tall chimney in directional blasting*

Han Fang[1,2], Zhong Dong-wang[1,2], Han Xin-xing[1],
Zeng Xiang-long[1], Tang Yu-cheng[1], Liu Ying[1]
(1. *Department of Engineering Mechanics, School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430033, *Hubei, China*;
2. *Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430033, *Hubei, China*)

Abstract: The deflection angle formula was derived based on the neutral axis equation with the tall chimney blasting cut section under the action of both along-wind load and across-wind resonance. Then a series of wind load cases were considered as follows: different wind Beaufort scales (grade 4—grade 6), different blasting incision angles (190°—220°) and different wind load directions (0°—180°). Their influences were achieved on the directional blasting demolition. In addition, the maximum deflection angle of the tall chimney and its existence condition were discussed. The corresponding conclusion was verified by taking the 210m high chimney in Nanchang power plant as an example. The results showed that the deflection angle considering the across-wind resonance was 4—6 times as big as that considering the along-wind load. Furthermore, there existed the most unfavorable wind direction angle which would cause the maximum deflection angle under certain conditions. The maximum deflection angle would increase with the increasing wind Beaufort scale and would decrease with the decreasing blasting incision angle.

Key words: mechanics of explosion; across-wind resonance; deflection angle; directional blasting; wind load; tall chimney

* Received 11 April 2013; Revised 26 May 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51108358; 51174147)
Corresponding author: Han Fang, hanfang522@163.com

（责任编辑　王易难）

《爆炸与冲击》第八届编委会第 2 次会议召开

2014 年 7 月 27 日，借助第十届全国爆炸力学学术会议，在贵州省贵阳市召开了《爆炸与冲击》第八届编委会第 2 次会议。参加此次编委会的有编委、编辑等 22 人。编辑部就稿件与出版、收录与评价、机遇与挑战、期刊的发展等方面做了工作汇报。编委们就提高来稿质量、确保审稿质量、杜绝学术不端、采用奖励机制、缩短出版周期、加强网站建设、提高期刊显示度等展开了热烈讨论。会议一致认为：1. 关注热点问题，组约高质量研究论文和综述性文章，提高稿源质量；2. 适度扩刊、缩短审稿流程、借助 DOI 改变出版模式，缩短出版周期；3. 明确学术不端范畴，借助高效学术不端检测工具，遏制学术不端；4. 评选优秀论文，激励年青作者成长。

（供稿　《爆炸与冲击》编辑部）
2014 年 8 月 15 日