第20卷第1期 硅酸盐学报 Vol.20,No.1
1992年2月 JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY February,1992

爆炸预处理锆英砂的试验研究*

张登霞 刘小苹 马成辉 马宗魁**

(中国科学院力学研究所)

摘 要

研究了锆英砂($ZrSiO_4$)的爆炸预处理工艺。试验结果给出:(1)经爆炸处理的锆英砂,颗粒内部的微应变和微观缺陷显著增加;(2)经爆炸处理的锆英砂所需的研磨时间显著缩短;(3)经爆炸处理的锆英砂,化学活性和烧结活性均有增加。这些结果表明,爆炸预处理陶瓷粉末技术是一项有发展前途的新工艺。

关键词:爆炸预处理,锆英砂

一、引 言

随着工业的发展,对陶瓷制品质量的严格要求促使了陶瓷加工工艺进一步发展。特别是粉末材料的制备工艺更被人们重视。一些材料科学和爆炸力学研究人员正在把爆炸技术引入制备陶瓷粉末的加工工艺中。

60年代 Bergmann 等人[1]报道了经爆炸处理得到的陶瓷粉末,其烧结活性和粉碎效果均明显优于未经爆炸处理者。随后,许多研究[2-5]表明,陶瓷粉末受爆炸载荷作用后将产生3种主要效应:(1)粉末颗粒度减小;(2)晶粒度减小;(3)微应变和晶格缺陷增加。对于离子键材料(例如:MgO、Al_2O_3),经爆炸处理后粉末颗粒内部微应变明显增加。对于共价键材料(例如B_4C、SiC),经爆炸处理后主要效应为晶粒度减小。Hankey 等人[6]还研究了经爆炸处理的ZrO_2化学活性的变化规律。

我们初步研究了锆英砂陶瓷粉末经爆炸处理后的粉碎效果及烧结活性。

二、确定爆炸预处理工艺参数的简化力学模型

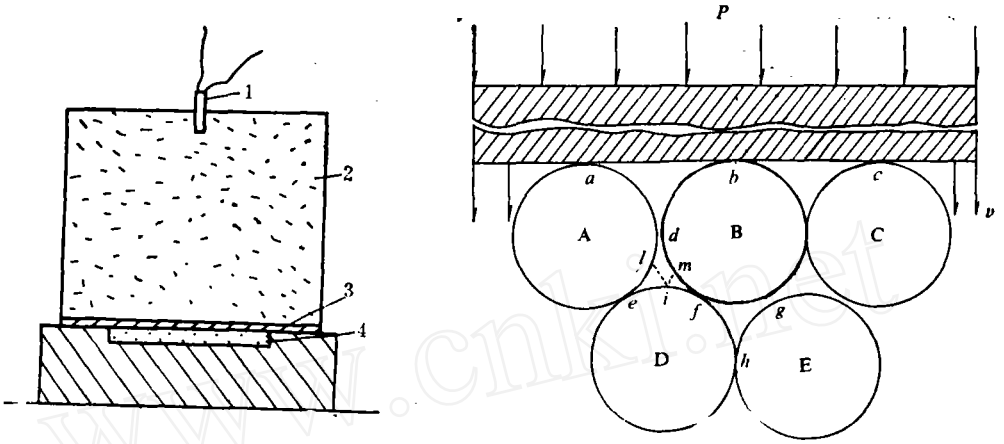
爆炸预处理陶瓷粉末的物理过程是很复杂的。迄今为止,对这一过程尚无统一的理论描述和较满意的计算方法。这里以平面装置(图1a)为例,说明我们的粗浅看法,并在此基础上提出计算工艺参数的简化力学模型。

在实际中,粉末材料按一定的粒度分布充填在包套内。为了便于分析,假设粉末颗粒为

* 1990年5月3日收到。
** 中国科学院力学研究所爆炸场工作的同志在试验中给予了帮助,该所史杰荣同志在设计加工中做了不少工作,在此一并致谢。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

均匀的小球，按图1b所示规律排列在包套内。由图1b可见，包套与粉末颗粒除了在a、b、c三点接触外，在其它部位二者均有一定的间隙。粉末颗粒之间的间隙大致可以分为两类：一类是A、B、D颗粒围成的def区，另一类是B、D、E颗粒围成的fgh区。



(a) Assembly
1——Detonator; 2——Explosive;
3——Container; 4——Powder

(b) Diagram of mechanism
P——Explosive pressure;
v——Move velocity of container

图1 爆炸预处理物理过程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the explosive pretreatment process

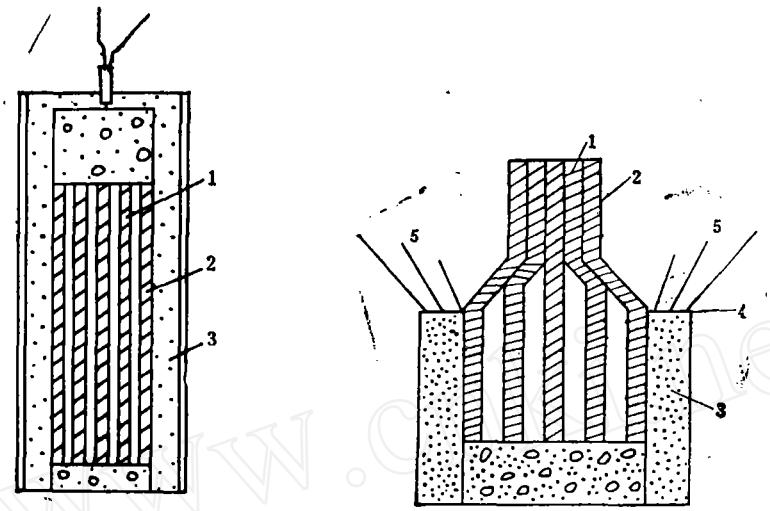
首先讨论包套与第一层粉末颗粒之间的相互作用。炸药爆轰后，爆轰压力以平面激波的形式在包套内传播，当激波到达下表面时，在包套与粉末颗粒的接触点a、b、c等处，激波按一定的匹配关系进入粉末颗粒内部；在其余部位，因为包套与粉末颗粒之间有一定的间隙，所以到达包套下表面的激波只能按自由面的反射规律在包套内反向传播。在这种激波作用下，包套的下表面以一定的速度向下运动，向下运动的包套与粉末颗粒相遇后发生非对称倾斜碰撞，在碰撞点处产生碰撞高压，碰撞高压以激波的形式向颗粒内部传播。本文称各碰撞点产生的激波为子激波。各子激波干涉的结果，引起颗粒内部微应变和微观缺陷增加，同时粉末颗粒也产生了宏观变形和运动。由于作用在包套上的爆轰压力是均匀分布的，所以碰撞引起这一层内每个颗粒的运动和变形也是相同的。颗粒之间不会发生相对滚动和滑动。关于粉末颗粒之间的相互作用：在图1b所示的dlm区域内，高速变形和运动的颗粒A与B发生对称倾斜碰撞；在$mif(lei)$区域内，D颗粒处于静止的和未变形的状态，B(A)颗粒处于高速变形和运动的状态，B(A)颗粒与D颗粒之间属于非对称倾斜碰撞；在fgh区域内，高速运动和变形的B颗粒与静止的且无变形的D、E颗粒属于非对称倾斜碰撞。

综上所述，爆炸预处理陶瓷粉末材料的物理过程是：在爆轰压力作用下，包套与粉末颗粒、粉末颗粒之间碰撞产生了子激波，各子激波相互干涉引起颗粒内部微应变和微观缺陷增加，从而导致粉末材料变脆和活性增加。

设计工艺参数时，首先根据$\rho v^2/\sigma_B$＝常数[7]确定粉末颗粒的碰撞速度，式中ρ是被爆炸处理粉末材料的理论密度，σ_B是被爆炸处理的粉末材料的强度，常数取25—70[7]。其次，根据碰撞速度估算炸药量。本文采用如下的简化力学模型估算包套和粉末颗粒的碰撞速度：假设包套内填充着同轴陶瓷薄壁管，薄壁管之间有一定的间隙，薄壁管材料与被处理的陶瓷粉

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

末材料相同，密度为该粉末材料的理论密度。薄壁管之间保持相等的间隙，间隙的大小根据粉末材料的松装密度确定(图 2)。根据邵丙璜等[8]给出估算速度的公式：



(a) Before detonation　　(b) During detonation

图 2　计算模型

Fig. 2　Calculated model

1——Thin-wall tube; 2——Container; 3——Explosive; 4——Detonation front; 5——Detonation product

微分方程：

$$d(\sin\alpha)=\frac{m_e}{m_c(1+\gamma_H)}\left\{\cos\left(\sqrt{\frac{\gamma_o-1}{\gamma_o+1}}\tan^{-1}\frac{y}{h_e}\right)-\frac{\gamma_o-1}{2}\cdot\frac{\Delta q}{C_H}\right\}^{\frac{2\gamma_o}{\gamma_o-1}}d\left(\frac{y}{h_e}\right)\quad(1)$$

式中：m_e 是沿包套轴向单位长度炸药质量；m_c 是单位长度包套的质量；γ_H 是炸药的多方指数；γ_o 是爆炸产物的有效多方指数；$\Delta q/C_H$ 是稀疏效应；y 是沿包套轴向距离；h_e 是炸药厚度。

$$\frac{\Delta q}{C_H}=\sqrt{\frac{\gamma_o+1}{\gamma_o-1}}\left\{1-\frac{2}{\gamma_o+1}\cos^2\left[\sqrt{\frac{\gamma_o-1}{\gamma_o+1}}\tan^{-1}\frac{y}{h_e}\right]\right\}^{1/2}\cdot$$

$$\cdot\left\{\cos\left[\tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{\gamma_o+1}{\gamma_o-1}}\tan\left(\sqrt{\frac{\gamma_o-1}{\gamma_o+1}}\tan^{-1}\frac{y}{h_e}\right)\right)+\tan^{-1}\frac{h_e}{y}\right]+\sin\alpha\right\}\quad(2)$$

$$v=2v_D\sin(\alpha/2)\quad(3)$$

第一层的边界条件是：

$$y/h_e=0,\ \alpha=0\quad(4)$$

其余各层的边界条件是：

$$y/h_e=y_i/h_e,\ \alpha=\tan^{-1}\left[\frac{\sum_1^{i-1}m_i\sin\alpha_{i-1}}{m_i+\sum_1^{i-1}m_i\cos\alpha_{i-1}}\right]\quad(5)$$

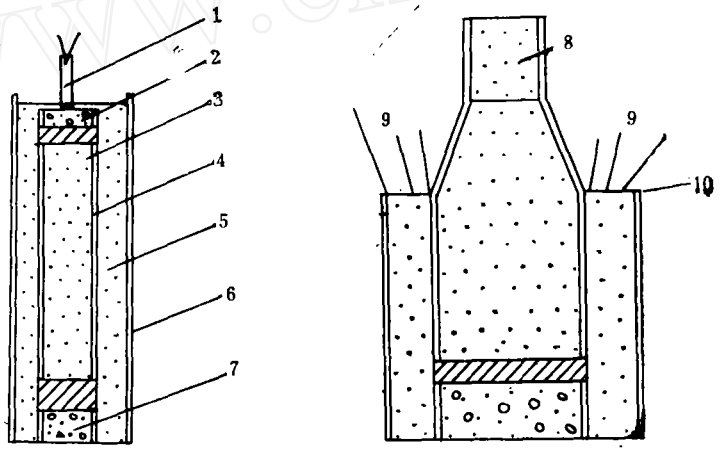
本文给出的简化力学模型是一种工程计算办法，计算所得的工艺参数值仅能作参考，还

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

要通过多次试验才能逼近最后的数值。

三、实　　验

试验用的材料为锆英砂，粒度小于125μm。图3a是试验用装置示意图。试验时把锆英砂充填在包套内，充填密度为锆英砂理论密度的60%。试验用的炸药为铵油炸药加适量黑索金。炸药装入围在包套外面的纸筒内，雷管插在轴心处。雷管引爆炸药后，爆轰波沿包套轴向传播。在爆轰压力作用下，粉末颗粒高速碰撞使颗粒内部产生微观缺陷和微应变。图3b是爆炸过程示意图。爆炸结束后，把粉末材料从包套内取出，在扫描电镜下观察了粉末颗粒的形貌。借助ПМТ-3型显微硬度计测量了粉末材料的硬度。借助X射线衍射仪分析了锆英砂的相组成和颗粒内部的微应变及晶粒度。然后用常规方法在球磨机内研磨，最后用SA-CP3型粒度分析仪测定粒度随研磨时间的变化规律。



(a) Before detonation　　(b) During detonation

图3　试验装置

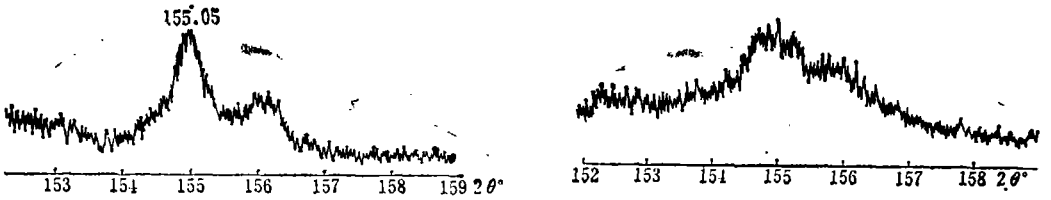
Fig. 3　Experiment set-up

1——Detonator; 2——Upper pad; 3——Uncompacted powder; 4——Container; 5——Explosive; 6——Cardboard tube; 7——Lower pad; 8——Compacted powder; 9——Detonation products; 10——Detonation front

四、试验结果及分析

测量结果，原砂的平均硬度约为15317MPa，压痕处有微细裂纹。经爆炸处理的粉末硬度值略低于原砂。分析其主要原因是，经爆炸处理后的粉末，颗粒内部有微细裂纹，多数颗粒不完整。X射线衍射分析未发现$ZrSiO_4$热解的产物ZrO_2和SiO_2。这表明在我们所采用的试验参数范围内，经爆炸处理的粉末颗粒边界温度低于1600℃。为研究晶格畸变，采用了高角度X射线衍射。经爆炸处理的$ZrSiO_4$的X射线衍射线形成相当漫散的“馒头峰”(图4b)，同原砂的衍射峰(图4a)形成了明显的对照。这就是说，在爆炸过程中锆英砂发生了严重的晶格畸变和晶粒尺寸细化。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

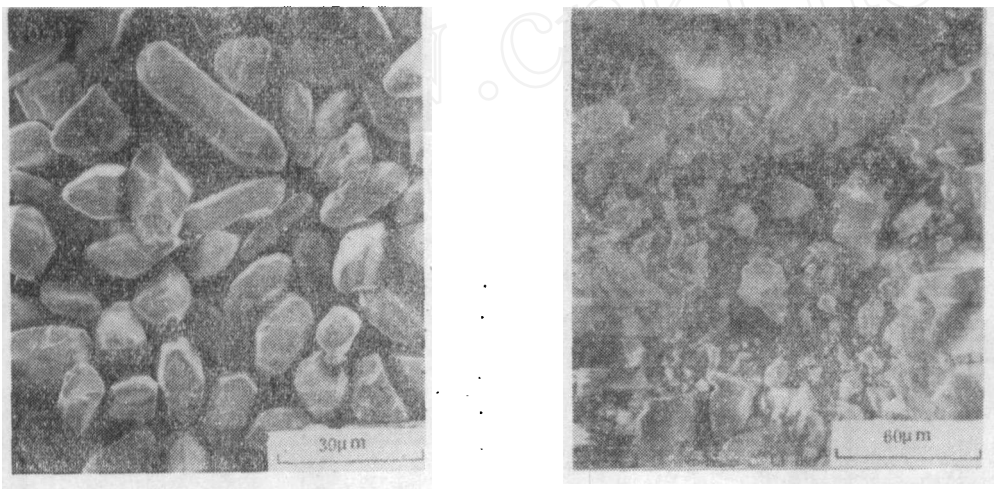


(a) Original powder (b) Explosive pretreatment powder

图 4 $ZrSiO_4$粉末的X射线衍射图

Fig. 4 X-ray diffraction patterns of $ZrSiO_4$

由图 5 可见，经爆炸处理后，粉末颗粒明显变小，形状也发生了很大变化，另外也观察到一些粉末颗粒的团聚体。



(a) Original powder (b) Explosive pretreatment powder

图 5 $ZrSiO_4$粉末颗粒的SEM照片

Fig.5 SEM photos of $ZrSiO_4$ powder

下表中给出研磨后粉末颗粒度重量百分比含量。图 6 是不同颗粒度粉末重量百分比含量随研磨时间的变化规律。从图 6 所示的 4 组曲线可见，在制备超细陶瓷粉末过程中，爆炸预处理技术是一种有发展前途的新工艺。

$ZrSiO_4$颗粒度

Particle size of $ZrSiO_4$

Material	Grinding time (h)	Median diameter (μm)	<3.0μm (wt%)	<2.0μm (wt%)	<1.0μm (wt%)	<0.5μm (wt%)
Original powder	216	1.12	81.6	66.4	46.8	24.3
	320	0.89	91.8	78.7	56.4	23.5
Explosive pretreatment powder	50	1.42	73.4	58.4	40.4	17.5
	70	1.13	82.0	66.8	46.8	21.0
	90	0.79	88.7	74.3	59.5	29.5

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为研究经爆炸处理后粉末材料的活性，取适量的经爆炸处理后研磨50h的细粉（见表）和研磨320h的原砂细粉，用相同的工艺制成白釉料，在同等条件下烧成白瓷片，测得白度值各为$(W_{457})_{50}=81.96$和$(W_{457})_{320}=76.70$。虽然前一种粉末的粒度大于后者，但白度值却是前者大于后者，这一结果可以定性地说明经爆炸处理的粉末材料化学活性和烧结活性均优于原粉。

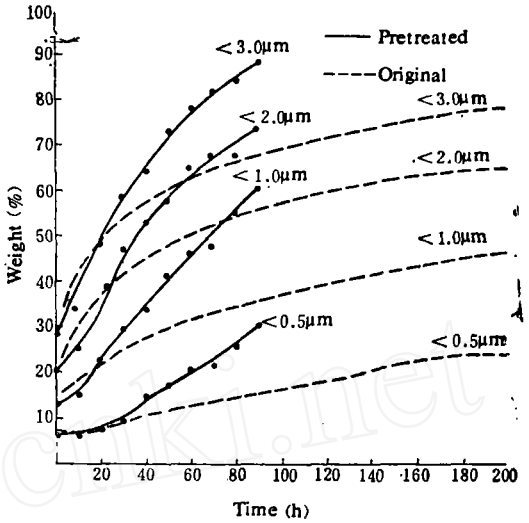


图6 $ZrSiO_4$粉末颗粒度随研磨时间的变化规律

Fig. 6 Relationship between the particle size of $ZrSiO_4$ and grinding time

五、结　　语

锆英砂的试验结果表明

1. 用原粉经爆炸预处理再机械研磨这种工艺流程制备超细陶瓷粉末(粒度小于0.5μm)是一种有发展前途的新工艺。

2. 经爆炸预处理所得的细粉活性优于原粉。

参　考　文　献

[1] O.R. Bergmann and J. Barrington, *J. Amer. Ceram. Soc.*, **49** (1966)502.
[2] M.J. Klein and P.S. Rudman, *Phil. Mag.*, **14** (1966) 1199.
[3] R.W. Heckel and J.L. Youngblood, *J. Amer. Ceram. Soc.*, **51** (1968) 398.
[4] M. Mitomo and Setaka, *J. Mat. Sci.*, **16** (1981) 851.
[5] A. Sawaoka, S. Soga, and K. Kondo, *J. Mat. Sci. Letters*, **1** (1982) 347.
[6] D.L. Hankey, R.A. Graham, W.F. Hammetter, et al., *J. Mat. Sci. Letters*, **1** (1982) 445.
[7] 张登霞，李国豪，邵丙璜等，力学学报，1(1984) 73.
[8] 邵丙璜，张登霞，李国豪等，爆炸与冲击，3(1985) 1.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE EXPLOSIVE PRETREATMENT OF ZIRCON POWDER

Zhang Dengxia　*Liu Xiaoping*　*Ma Chenghui*　*Ma Zongkui*

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

Explosive pretreatment technology for zircon powder was investigated. Zircon powder is packed into a collapsible steel tube, and explosive, also in powder form, is placed in a concentrically assembled cardboard tube to give a uniform layer around the steel tube. Detonation of the explosive from one end causes a pressure front to travel along the steel tube so as to cause progressive radial compaction of the powder. The investigation demonstrates that the zircon powder, subjected to shock loading, possesses the following properties: 1. increase of micro-strain and defects; 2. decrease by three times of grinding time; 3. increase of chemical and sintering activity.

Key words: explosive pretreatment, zircon powder

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net