

引文格式:彭志翔,常桂华,张艺舰,等.微爆性复合球体爆裂反应过程研究[J].中国有色冶金,2024,53(3):132-139.

PENG Zhixiang, CHANG Guihua, ZHANG Yijian, et al. Study on the burst reaction process of micro-explosive composite sphere[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(3): 132-139.

微爆性复合球体爆裂反应过程研究

彭志翔¹, 常桂华², 张艺舰³, 王晓峰¹

(1. 陕西科技大学, 陕西 西安 710021; 2. 鞍钢钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114000;

3. 燕山大学, 河北 秦皇岛 066000)

[摘要] 针对基于微细异相净化钢液技术生产稳定控制要求,以微爆性复合球体为研究对象进行试验和数值模拟研究,基于HJC模型研究复合球体爆裂反应时动能和等效应变的影响规律,分析起爆位置、复合球体各层尺寸及原料配比等因素对爆裂反应的影响,得到如下结论:制粉过程中CaCO₃粉末分布均匀时能够均匀起爆达到最佳效果;爆裂发生时产生的动能大小与质点的飞散距离成正比,相同尺寸和密度的复合球体多点均匀起爆时动能最大,弥散效果最佳,覆盖范围最广;复合球体的外层厚度越小反应效果越佳,中间层厚度为5 mm时反应产物飞散距离最远;复合球体CaCO₃与CaO的配比在1:10时反应产物分布最广泛。

[关键词] 洁净钢;复合球体;夹杂物;数值模拟;爆裂反应;球体结构

[中图分类号] TF03; TF114 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)02-0132-08

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.03.016

0 引言

近年来,伴随着钢铁行业的飞速发展,钢材的设计需求及应用技术的开发正面临着严峻的挑战,对于质量的要求越来越高^[1]。在钢液的制造过程中,钢的洁净度是影响产品质量最为重要的因素,而提高钢产品质量、生产洁净钢的关键在于控制钢中的夹杂物以及对钢液中细小夹杂物的有效利用^[2-3]。

钢液中的气泡可通过碰撞粘附或尾流携带夹杂物上浮达到去除夹杂物的目的,但在大规模连续生产过程中,仅靠自然上浮效率很低,无法满足实际生

产要求^[4],因此气泡碰撞粘附去除夹杂物的方法被更加深入地进行了讨论。目前在钢液中产生气泡使用最为广泛的方法是通过浸没在钢水中的透气砖或喷嘴喷吹气体(氩气或氮气等)获得气泡^[5]。基于对夹杂物去除方法的理论研究,形成了钢包长水口吹氩、中间包气幕挡墙、增压减压法、增氮析氮法、微小氢气泡法、超声空化法、反应诱发微小异相净化钢水^[6]等技术。

Turkdogan等^[7]的研究表明,通过在钢液中引入细小的碳酸钠颗粒,能够生成大量微小的气泡,可以通过气泡的捕捉和吸附作用去除夹杂物,如何在工业生产实践中均匀地向钢液中加入碳酸盐粉剂是获得微小气泡的关键。为此,唐复平等^[8]提出了反应诱发微小异相净化钢水技术,并研制了一种含有碳酸钙和氧化钙粉剂的复合球体,该球体在钢液中不但能够分解产生微小气泡,同时还能产生细小渣滴完成对于钢液中夹杂物的去除,相较于传统的除杂方式,该技术具有成本低、效率高、效果好的特点。采用该技术对钢液进行处理后,铸坯中氧化物夹杂的数量和尺寸明显减少,同时钢的全氧最低值能达

[收稿日期] 2023-12-16

[第一作者] 彭志翔(1999—),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要研究方向为3D打印用金属粉末制备。

[通信作者] 王晓峰(1976—),男,辽宁阜新人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为3D打印增材制造技术。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52174320),西安市重点产业链核心技术攻关项目(2022JH-ZCZC-0056),西安市科技计划项目(23ZDCYJSGG0043-2022)。

到 6×10^{-6} 。由于现有成果多侧重于生产实践过程中的工艺参数优化,复合球体的结构设计研究不够深入,为此本文通过试验与模拟研究相结合的方法分析起爆位置、复合球体的各层尺寸及原料配比等影响反应最佳状态因素的相互作用规律,确定复合球体的组成结构。

1 试验方法及过程

1.1 理论研究

碳酸盐分解过程存在外部热流向颗粒内部传热、热分解化学反应和分解产物 CO_2 向外扩散 3 个基本步骤。本文以 Narsimhan 提供的热分解模型为基础^[9],对于复合球体热分解反应过程进行计算,复合球体的组成如图 1 所示。 CaCO_3 颗粒为球体,在热分解成 CaO 的过程中体积不发生变化,同时在分解过程中,复合球体的表面温度恒定,分解面的热量全部用于 CaCO_3 颗粒分解反应吸收的热量,热传导为反应的主要传热过程。

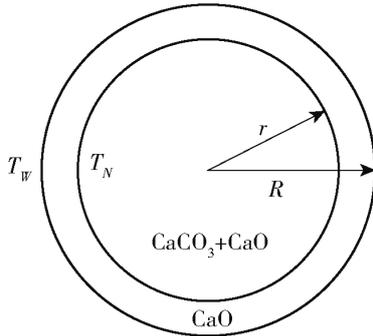


图 1 复合球体在恒温状态下的分解情况

Fig.1 Decomposition of composite spheres at constant temperature

在任意时刻 t , 半径为 r 的复合球体被厚度为 $R - r$ 的 CaO 壳体包围,则位于 r 处的 CaCO_3 分解面的温度是 T_d ,熔体通过 CaO 壳体到达分解表面 r 处相应的热流表达见式(1)。

$$q_t = \frac{4\pi K_e (T - T_N)}{\frac{1}{r} - \frac{1}{R}} \quad (1)$$

式中: K_e 为碳酸钙的物理性能常数; T_N 为碳酸钙分解面的温度,℃。

热量流过单个碳酸盐粉末颗粒时,熔体与球面之间的平均对流传热系数可用准数方程近似表示,见式(2)。

$$Nu = 2 + 0.016Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (2)$$

在计算过程中可以将传热模型进行简化,此时 $Nu = 2$,根据热量守恒得到 $Nu = ad/\lambda$,同时复合球体总体间的传热系数可视为定值 $a = \lambda/R$ 。

复合球体的分解速率根据前面所述模型近似条件,可得到如下热平衡方程,见式(3)。

$$q_t = -\Delta H_t \frac{dw}{M_r dt} \quad (3)$$

式中: $\Delta H_t \approx \Delta H_N + \int_{298}^{T_N} C_p dT$,这里忽略分解产物温度变化引起的热焓的变化,是考虑到试验中熔体温度 T_f 接近 $P_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$ 时的 CaCO_3 分解温度 T_d 。

由式(2)、(3),可得式(4)。

$$-\frac{\rho_{Ball} r^2}{M_r} \frac{dr}{dt} \Delta H_t = \frac{R\lambda (T_W - T_N) r^*}{r^* + (\lambda/K_e)(1 - r^*)} \quad (4)$$

令 $r^* = r/R$,对式(4)进行积分,得到复合球体分解至半径 r 处的时间,见式(5)。

$$t_r = \beta \left(\frac{1}{3} + \frac{\lambda}{6K_e} \right) - \beta \left[\frac{\lambda}{2K_e} r^{*2} + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\lambda}{K_e} \right) r^{*3} \right] \quad (5)$$

式中: $\beta = \rho_{Ball} \Delta H_t R^2 / (M_r \lambda (T_W - T_N))$, $\rho_{Ball} = \rho_{\text{CaO}} \omega_{\text{CaO}} + \rho_{\text{CaCO}_3} (1 - \omega_{\text{CaO}})$, ω_{CaO} 为复合球体中 CaO 所占的比例。

根据以上公式可以推测出传热传质过程与壳体尺寸、 CaCO_3 含量等因素有关,不同条件下的反应时间有所不同,因此需要规定相同的反应时间量化反应过程。

在数值模拟过程中将模型划分为了多个细小的网格,每一个小网格都被视为质点,以此来构成完整的系统,在不考虑重力的情况下,根据复合球体爆炸瞬间产生的动能能够推断出每个质点的速度。动能定理的表达式见式(6)。

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (6)$$

式中: E 代表物体运动产生的动能, J; m 是物体质量, kg; v 是运动速度, m/s。

质量与体积和密度有关表达式见式(7)。

$$m = \rho V \quad (7)$$

式中: ρ 是复合球体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 是指体积的大小, m^3 。

球体体积的表达式见式(8)。

$$V = \frac{4}{3} \pi (R_1^3 - R_2^3) \quad (8)$$

式中: R_1 是球体外半径长度, m; R_2 是球体内半径长度, m。

通过以上公式结合划分球体时的网格大小, 可以求得每一质点再经过加速后的速度大小, 从而求得飞散距离, 由此可以推测出球体爆炸过程中的爆炸极限距离。从式中可以看出, 爆裂发生时产生的动能与最终质点的飞散距离成正比。

1.2 数值模型的建立

复合球体热爆裂反应过程是一个气体发生聚合、膨胀, 从而使球体发生爆裂的过程, 基于 ANSYS/LSDYNA 有限元求解软件进行数值模拟。考虑到复合球体、炸药和空气的相互影响, 为了避免网格变形, 在实现各种材料网格之间的相互流动的情况下, 保证介质单元和结构单元之间保持各自独立, 因此采用流固耦合算法, 复合球体共分为三层, 球芯部分不做设定采用空心球, 中间层和外层都采用 Lagrange 算法, 炸药和空气采用 ALE 算法。复合球体的总直径在 12 ~ 25 mm 之间, 其中外层的厚度为 1 ~ 2 mm, 复合球体样式如图 2 所示, 炸药设置在复合球体中间层区域, 模拟膨胀爆炸过程, 挖出足够的空隙留给炸药起爆; 空气耦合区域的半径为 30 mm, 在空气表面设置非反射边界, 模拟无限区域的平面。

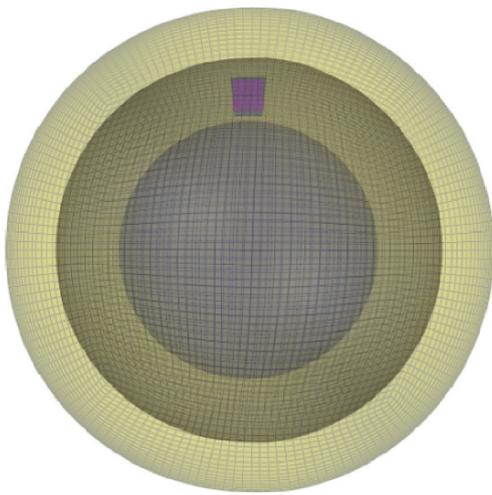


图 2 数值模拟计算模型

Fig. 2 Numerical simulation calculation model

1.3 材料本构模型的选择

由于复合球体是将一定比例的石灰石与生石灰粉料通过研磨制成, 在发生爆裂反应时起爆点处于大应变和高压, 依据此特点采用 HJC 模型^[10], 该模型包含极限面参数 A 、 B 、 N 和 S_{max} , 损伤参数 D_1 、 D_2 、 $EFMIN$ 和率效应系数 C , 压力参数 K_1 、 K_2 、 K_3 、

p_c 、 μ_c 、 p_l 和 μ_l 以及基本力学参数 f_c 、 G 、 T 和 ρ 共 19 个参数^[11]; 在模拟过程中选用石灰岩的参数进行小范围改进, 调整为试验过程中的材料参数性质。该模型针对岩石材料都有很好的适用性, 通过状态方程、屈服面方程和损伤演化方程来展现^[11], 石灰岩材料参与取自表 1。

表 1 石灰岩 HJC 模型参数

Table 1 Limestone HJC model parameters

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G / MPa	T / MPa	f_c / MPa	N
2 300	10 093	4	60	0.89
S_{max}	$EFMIN$	C	D_1	D_2
20	0.01	0.0097	0.04	1.00
p_c / MPa	μ_c	μ_l	A	B
20	0.001 25	0.174	0.55	1.23
p_l / MPa	K_1 / GPa	K_2 / GPa	K_3 / GPa	
2 000	39	-223	550	

用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高性能炸药材料模型, 模拟反应产物 CO_2 气体在短时间内聚合、膨胀, 使球体发生爆裂的过程。表达式见式(9)。

$$P = M \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + N \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (9)$$

式中: P 为爆轰波压力, MPa; V 为爆轰产物的相对体积, m^3 ; E_0 为初始比内能, GPa; M 、 N 、 R_1 、 R_2 、 ω 为与材料有关的常数^[12]。取参数: 密度 $\rho = 1\ 800 \text{ kg/m}^3$, 爆速 $D = 6\ 900 \text{ m/s}$, $A = 214.4 \text{ GPa}$, $B = 0.182 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.2$, $R_2 = 0.9$, $\omega = 0.152$, $E_0 = 4\ 190 \text{ MJ/m}^3$, $V = 1.0$ 。

1.4 试验方法

试验用的 $\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$ 球体分为 2 种: ① CaCO_3 与 CaO 质量比为 1:10 的复合球体在大气中暴露 45 d; ② CaCO_3 与 CaO 质量比为 1:8 的复合球体在大气中暴露 7 d。球体大小如图 3 所示。

将刚玉舟放入高温可视管式炉内加热。当温度升到 $1\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 打开炉门取出刚玉舟, 将 $\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$ 复合球体放置在刚玉舟上, 随后立即将刚玉舟推入炉体内, 确保复合球体应位于管式炉内恒温工作区间。试验过程中对开始放入时间、温度, 反应开始时间、温度以及反应结束时间、温

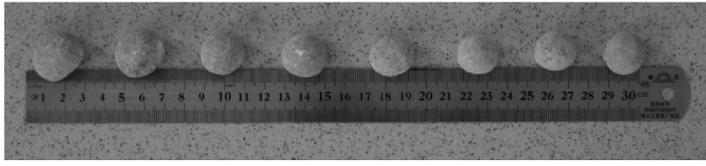


图3 用于热爆试验的 $\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$ 球体

Fig. 3 $\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$ spheres for thermal burst reaction tests

度进行了记录。

2 数值模拟与试验分析

2.1 爆裂反应等效应变速率及动能的影响

本模型中复合球体由于爆裂反应产生的外力远远大于球体的结合强度,导致复合球体反应过程中发生形变且不会恢复,只有在应力集中的情况下才会显示损伤,爆炸发生后节点之间不存在连接力,无法生成有效应力云图。但是在爆炸的过程中球体会发生塑性变形,因此等效应变速率可以用来描述复合球体的爆裂过程。图4为复合球体在高温爆裂反应后不同时刻等效应变速率的变化情况。

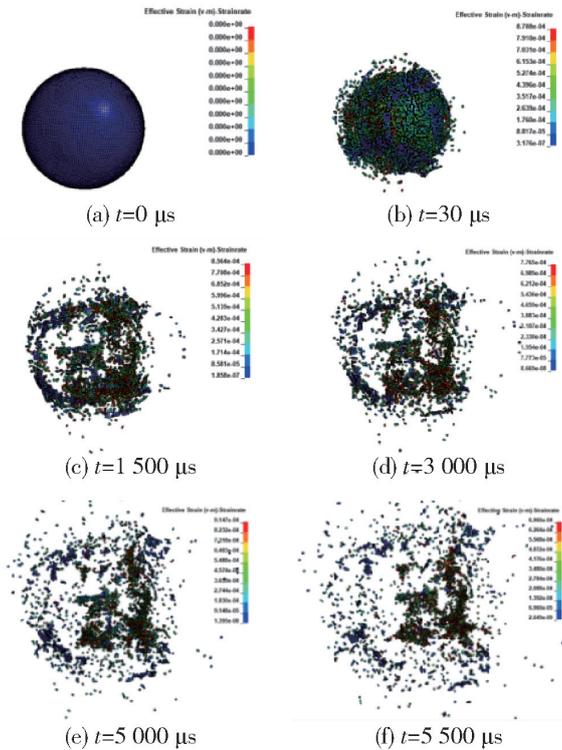


图4 等效应变速率随时间的变化关系

Fig. 4 Equivalent strain rate as a function of time

可见,随着时间的不断增加,复合球体的等效应变速率也随之增加,在 $5\,000\ \mu\text{s}$ 达到最大值后逐渐减小,在选取 $12 \sim 25\ \text{mm}$ 复合球体进行数值模拟的过程中,发现等效应变速率达到最大值的时间在

$4\,800 \sim 5\,400\ \mu\text{s}$ 之间,因此可以确定等效应变速率不仅取决于加载速率,还取决于试样的形状、尺寸和材料性质等因素。在进行数值模拟研究时需要规定统一的计算时间作为爆炸飞散的时间,以 $5\,000\ \mu\text{s}$ 为所有模型的反应结束时间。

复合球体发生爆炸产生的动能会使爆炸产物在飞散时具有一定的速度,可以得到最远的覆盖范围,由此推断复合球体是否为最佳组成结构,上图中3种复合球体热爆裂产物的动能如图5所示。

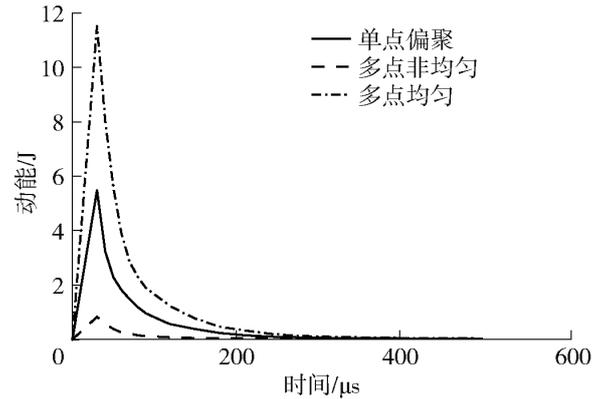


图5 复合球体热爆裂产物的动能

Fig. 5 Kinetic energy of thermal burst products of composite spheres

从图中可以看出多点均匀起爆时产生的动能最大,复合球体在第 $30\ \mu\text{s}$ 左右发生爆裂反应,产生巨大的动能并迅速消散,通过动能定理可以知道在此过程中爆炸产生的能量会转化为质点的速度。由于球体各质点具有粘结力,爆炸产生的动能不会使复合球体全部分散成细小颗粒,产物中会存在大块的 CaO ,研究颗粒飞散时要得到爆裂发生后复合球体的最远覆盖范围,3种反应的最终形态在 $0 \sim 5\,000\ \mu\text{s}$ 的最远飞散距离如图6所示。

单点偏聚起爆和多点均匀起爆都是在很短的时间内(大约 $30\ \mu\text{s}$)完成加速后匀速飞散;而多点非均匀起爆则是在相对较长的时间内完成加速后匀速飞散。对比飞散距离后可以发现,多点均匀起爆时的覆盖范围最广,说明在复合球体中 CaCO_3 粉末分布均匀时的爆裂效果最佳,反应产物更细小;单点偏聚起爆的覆盖范围相对较近,证明偏聚时的爆炸威力小于多处均匀爆炸;多点非均匀起爆的覆盖范围最近,在爆炸时能量从粘结薄弱处逸出,只有少部分 CaCO_3 粉末发生反应。

2.2 起爆点位对爆裂反应产物的影响

在采用石灰石与生石灰2种粉料制成复合球体

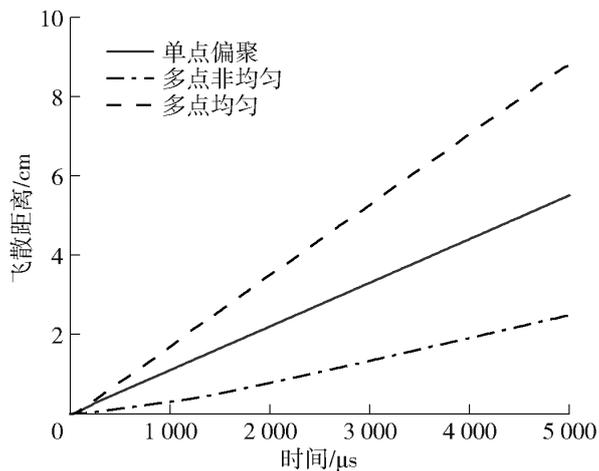


图6 不同形态爆裂产物的飞散距离

Fig. 6 Dispersion distance of different forms of burst products

的过程中,球体中 CaCO_3 粉末可能会因为分布不均匀影响爆裂结果,因此通过改变炸药位置和起爆点位,来模拟试验过程中复合球体爆裂与动能及粉末飞散距离的关系。对直径为 17 mm 的复合球体进行数值模拟,其中外层厚度为 1 mm,通过不同爆裂方式的有效应变速率云图能够展示反应产物的最终形态,如图 7 所示。

反应的最终形态大致分为 3 种,在设置四个炸药均匀起爆时,复合球体发生粉碎性爆裂,弥散效果最佳,分解成若干细小碎块,如图 7(a) 所示;当一个炸药单独起爆时,复合球体的一部分区域发生爆裂反应,球体表面产生裂纹,反应产物从中逸出,如图 7(b) 所示;当四个炸药非均匀起爆时,炸药会在粘结薄弱处率先爆炸,从而使球体表面产生裂纹并轻易贯穿复合球体,反应产物逸散,如图 7(c) 所示。

图 8 展示出复合球体在 1 600 °C 高温下的爆裂过程。可见,复合球体具有较高的热稳定性,当复合球体暴露在高温下时并不会立即发生爆裂反应,反应产物 CO_2 气体在短时间内将会发生聚合、膨胀,从而使球体发生爆裂,内部的碳酸钙粉末将会被释放出来,并继续进行分解反应,释放出大量 CO_2 。而另一产物细小的 CaO 在高温下长时间暴露后将会逐渐熔化,形成渣滴,如图 9 所示。

由于高温作用,热量自球体表面迅速传入球体内部,当球体处于高温时,内部的 CaCO_3 粉末很快进行反应并释放出 CO_2 气泡,当气泡膨胀的张力大于 CaO 粉末之间的粘合力时,球体表层发生炸裂,一些 CaO 粉末随着 CO_2 飞出,反应后产物为大块的 CaO

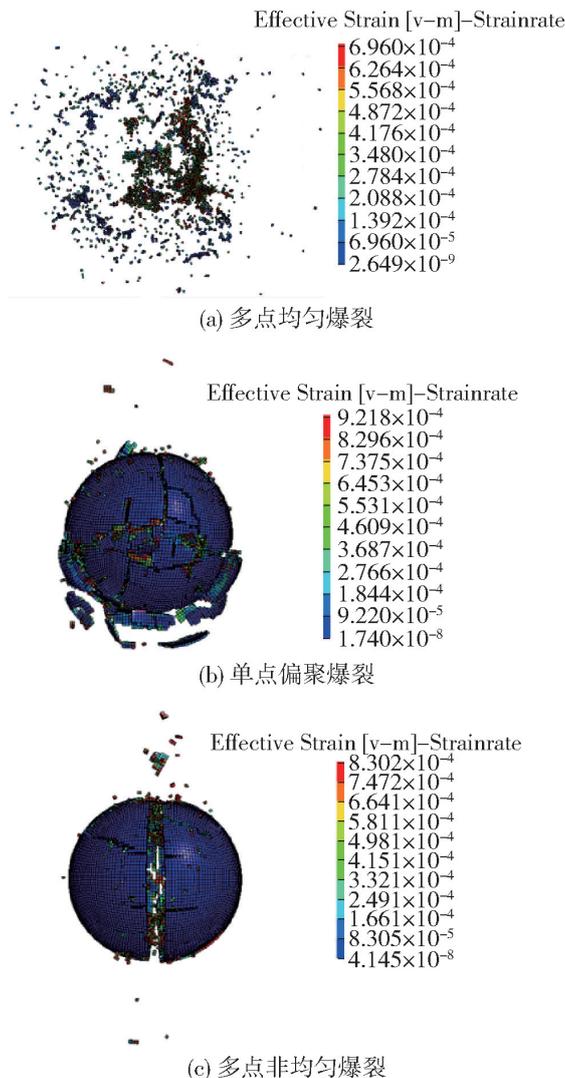


图7 复合球体热爆产物有效应变速率云图

Fig. 7 Composite sphere thermal explosion product effective strain rate cloud diagram

和若干细小碎块,如图 10(a) 所示。如果 CaO 粉末之间的粘合力大于气泡膨胀力,气泡无法从球体中排出时,大量 CO_2 气泡出现在球体的某一部位,当气体膨胀扩张的力大于复合球体基体的结合强度时,在气泡偏聚的区域发生爆裂,如图 10(b) 所示。此外,气泡在长大合并的过程中,可能沿着球体的粘结薄弱处膨胀析出,这将在球体表面形成纵横交错的裂纹,如图 10(c) 所示。将不同情况下复合球体发生爆裂反应的模拟结果与试验所得结果进行比对,发现试验能够验证模拟结果,由此可以确定本模型具有合理性,可以运用到实际生产过程。

2.3 材料物性参数对爆裂反应产物的影响

通过数值模拟发现复合球体在多点均匀起爆时的飞散效果最佳,反应产物满足试验需求,因此在后续研究中,选用能够多点起爆的复合球体对其组成结构进行分析,得到各组成因素间的相互作用规律。

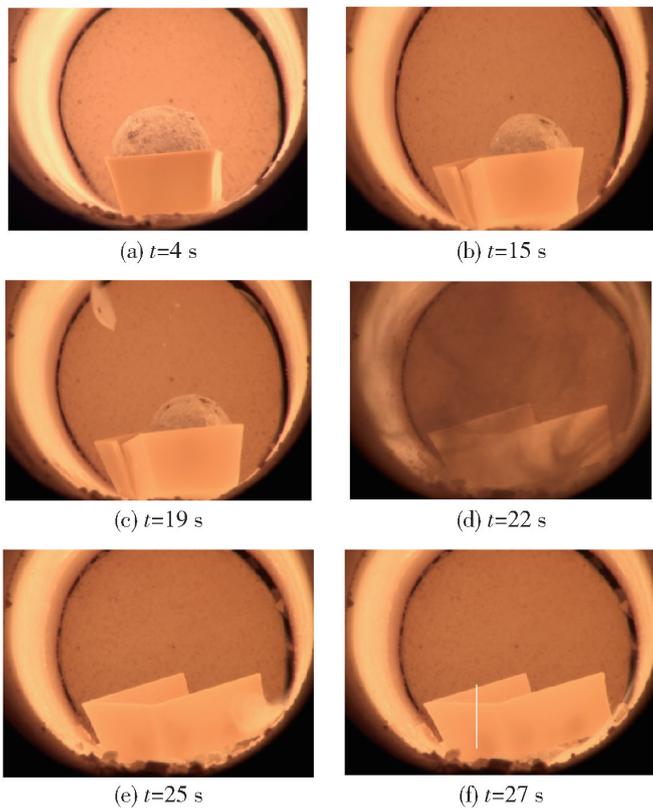


图8 复合球体在高温下的爆裂过程

Fig.8 Bursting process of composite spheres at high temperature

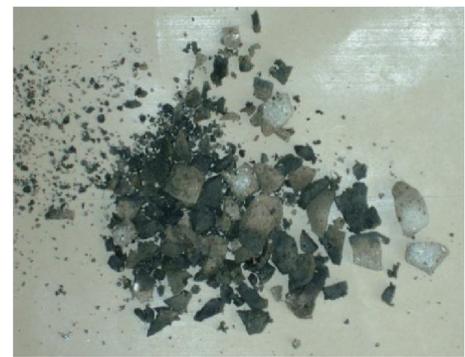


图9 反应结束后熔融的CaO渣滴

Fig.9 Molten CaO slag droplets at the end of the reaction

2.3.1 尺寸大小对于爆炸飞散效果的影响

复合球体的外层厚度与传热过程有关,外层厚度越小反应时间越短,过小的厚度会导致复合球体在未达到指定距离时已分解完毕,不满足反应需求;外层厚度越大反应时间越长,过大的厚度会导致复合球体不能及时发生分解反应甚至无法发生分解反应。通过热传导方程、热平衡方程等公式求得复合球体的直径与发生完全分解的时间有关,球体外层能够达到反应需求的最佳厚度应为1~2 mm,规定



(a) 完全爆裂反应产物



(b) 局部爆裂反应产物



(c) 裂解反应产物

图10 复合球体高温热爆试验产物

Fig.10 Composite sphere high temperature thermal explosion test products

内层空心球半径为4 mm,中间层厚度为3.5 mm,分别对1 mm、1.5 mm、2 mm外层厚度的复合球体进行数值模拟,得到它们最远的覆盖范围,如图11所示。

通过曲线看出复合球体的外层厚度越小,爆裂反应过程中的阻力越小,反应产物飞散的距离越远。由此可知复合球体的厚度越小,能够覆盖的范围越广,复合球体的外层厚度为1 mm时最合理,在保证反应的同时效果最佳。在规定外层厚度为1 mm的情况下,对中间层厚度为1 mm、3.5 mm、5 mm、7.5 mm的复合球体进行数值模拟,得到其最远的覆盖范围,如图12所示。

可以发现,在中间层厚度为5 mm时复合球体爆裂后覆盖的范围最广,复合球体越小反应后覆盖的范围越小,这与反应能量有关;球体尺寸超过一定

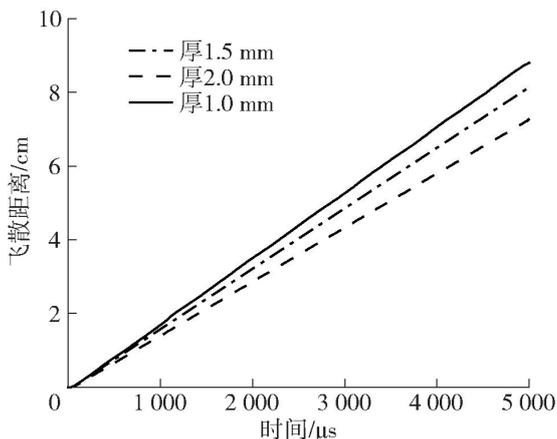


图 11 不同外层厚度球体爆裂反应产物的飞散距离

Fig. 11 Fly-away distance of the burst reaction products of spheres with different outer layer thicknesses

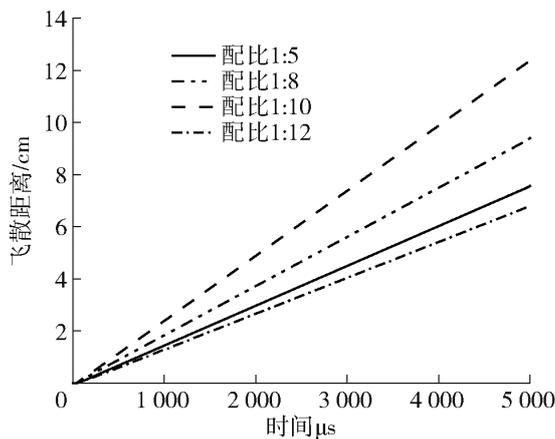


图 13 不同 CaCO₃/CaO 质量配比爆裂反应产物的飞散距离

Fig. 13 Fly-away distances of burst reaction products with different CaCO₃/CaO mass ratios

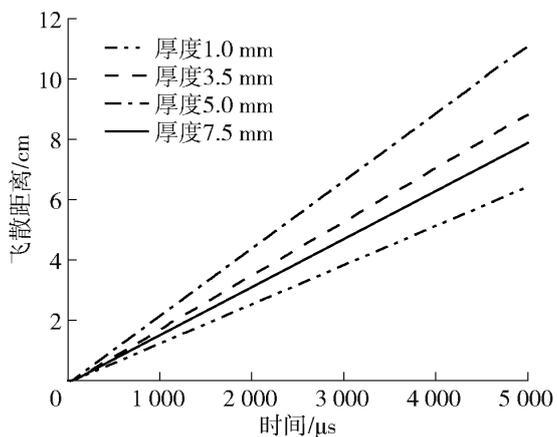


图 12 不同中间层厚度爆裂反应产物的飞散距离

Fig. 12 Fly-away distances of burst reaction products for different interlayer thicknesses

值时反应覆盖范围会减小,说明球体质量过大时无法充分反应,造成能量逸出,因此复合球体中间层的大小也与反应效果息息相关。

2.3.2 原料配比对于爆炸飞散效果的影响

改变 CaCO₃ 与 CaO 质量配比会影响复合球体分解反应时间和发生反应后细小颗粒的分布状况,不同配比情况下用于模拟的材料密度也随之改变。对内层半径为 4 mm,中间层厚度为 5 mm,外层厚 1 mm 的复合球体进行数值模拟。设定 CaCO₃ 与 CaO 的质量配比分别为 1:5、1:8、1:10、1:12,得到的飞散距离如图 13 所示。

图中可以看出,在 CaCO₃ 与 CaO 的质量配比为 1:10 时,反应产物的飞散距离最远,复合球体在 CaCO₃ 占比高时飞散效果不理想,这是由于反应产

物在扩散过程中相互碰撞的几率提高无法远距离飞散;而复合球体在 CaCO₃ 占比低时膨胀扩张的力过小,无法破碎成细小碎块,只有在配比合适时反应产物的效果才能达到最佳。

3 结论

通过数值模拟结果与试验比较分析,验证了计算模型的可靠性,以石灰石与生石灰为原料,对不同配比的复合球体进行试验,考察起爆位置、复合球体各层尺寸及原料配比等因素对爆裂反应的影响,分析爆裂反应产物的弥散分布规律,并得出以下结论。

1) 爆裂发生时产生的动能大小与质点的飞散距离成正比,相同尺寸的复合球体,由于炸药位置和起爆点位不同,反应的最终形态也不同,炸药在多点均匀起爆时弥散效果最佳,覆盖范围最广。

2) 复合球体的外层厚度越小反应效果越佳;中间层厚度为 5 mm 时反应产物飞散距离最远。中间层厚度与反应产物的飞散距离有关,只有在厚度适当时才能飞散到更远的距离。

3) 复合球体 CaCO₃ 与 CaO 的质量配比在 1:10 时反应产物分布最广泛,当复合球体中 CaCO₃ 含量低时,发生热爆裂反应产生的力无法使球体破碎成细小碎块;当复合球体中 CaCO₃ 含量过多时,产生的反应产物会在扩散过程中相互碰撞无法远距离飞散。

[参考文献]

[1] 刘中柱,蔡开科. 纯净钢生产技术[J]. 钢铁, 2000, 35(2): 64.
LIU Zhongzhu, CAI Kaike. Purity steel production technology

- [J]. *Iron & Steel*, 2000, 35(2): 64.
- [2] JI Y Q, LIU C Y, YUH X, et al. Oxygen transfer phenomenon between slag and molten steel for production of IF steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2020, 27(4): 402–408.
- [3] STENEHOLM K, ANDERSSON N A I, TILLIANDER A, et al. The role of process control on the steel cleanliness[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2018, 45(2): 114–124.
- [4] LEE T K, KIM H J, KANG B Y, et al. Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds[J]. *ISIJ International*, 2000, 40(12): 1260–1268.
- [5] ARAIL H, MATSUMOTO K, SHIMASAKI S I, et al. model experiment on inclusion removal by bubble flotation accompanied by particle coagulation in turbulent flow[J]. *ISIJ International*, 2009, 49(7): 965–974.
- [6] 王晓峰, 唐复平, 李镇, 等. 反应诱发微小异相净化钢水技术[J]. *钢铁*, 2014, 49(10): 18–23.
- WANG Xiaofeng, TANG Fuping, LI Zhen, et al. Technology of inducing dispersed in-situ phase by composite ball explosion reaction[J]. *Iron & Steel*, 2014, 49(10): 18–23.
- [7] Turkdogan E T. Novel concept of cleansing liquid steel of solid oxide inclusions by culet injection in ladle[J]. *Ironmaking & steelmaking*, 2004, 31(2): 131.
- [8] 唐复平, 李镇, 王晓峰, 等. 反应诱发微小异相净化钢水[J]. *北京科技大学学报*, 2009, 31(10): 1235–1238.
- TANG Fuping, LI Zhen, WANG Xiaofeng, et al. Purification of liquid steel with fine heterophases induced by explosive reaction in RH ladles[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(10): 1235–1238.
- [9] RANDOLPH H O, LARSON M A. Theory of particulate processes, analysis and techniques of continuous crystallization, 2nd edition[M]. London: Academic Press, 1988.
- [10] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjective to large strain, high strain rates, and high pressure [C] // *Proceedings of 11th International Symposium on Ballistic*. Quebec, 1993: 591–600.
- [11] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist–Johnson–Cook 模型参数的确定方法[J]. *工程力学*, 2014, 31(3): 197–204.
- FANG Qin, KONG Xiangzhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist–Johnson–Cook constitutive model parameters of rock. *Engineering Mechanics*[J]. 2014, 31(3): 197–204.
- [12] LIN B Q, ZHANG J Z, SHEN C M, et al. Permeability increasing mechanism of network slotting boreholes and application in crossing borehole gas drainage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(9): 1425–1430.

Study on the burst reaction process of micro-explosive composite sphere

PENG Zhixiang¹, CHANG Guihua², ZHANG Yijian³, WANG Xiaofeng¹

(1. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. Anshan Iron and Steel Research Institute, Anshan 114000, China; 3. Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Aiming at the stable control requirements of production and application based on micro heterogeneous purification technology of molten steel technology, the micro-explosive composite sphere is taken as the research object to carry out experimental and numerical simulation research. Based on the HJC model, the influence of kinetic energy and equivalent strain on the explosive reaction of composite sphere was studied, and the factors affecting the optimal state of the reaction, analysis of multi-point uniform detonation state of the composite sphere layer size and raw material ratios and other factors on the impact of the bursting reaction, to get the following conclusions: When the distribution of CaCO_3 powder is uniform in the process of powder preparation, the uniform initiation can achieve the best effect; The size of the kinetic energy generated when the burst is proportional to the dispersion distance of the mass, the same size and density of the composite sphere, multi-point homogeneous detonation of the kinetic energy is the largest, the dispersion effect is the best, the widest range of coverage; The smaller the thickness of the outer layer of the composite spheres, the better the reaction effect, and the middle layer thickness of 5 mm is the furthest away from the reaction products; The ratio of CaCO_3 to CaO is 1:10, the coverage is the most extensive.

Key words: clean steel; composite sphere; inclusions; numerical simulation; burst reaction; spherical structure