



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117907150 A

(43) 申请公布日 2024. 04. 19

(21) 申请号 202410319942.X

(22) 申请日 2024.03.20

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 戴兰宏 盛冬林 张洵菡 李统
陈艳 汪海英

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390
专利代理师 席卷

(51) Int. Cl.
G01N 7/14 (2006.01)

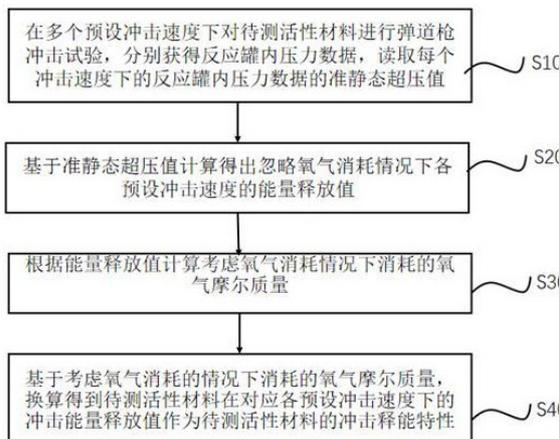
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种活性材料冲击释能特性获取方法

(57) 摘要

本发明涉及了一种活性材料冲击释能特性获取方法。一种活性材料冲击释能特性获取方法,包括:在多个预设冲击速度下对待测活性材料进行弹道枪冲击试验,分别获得反应罐内压力数据,读取每个冲击速度下的反应罐内压力数据的准静态超压值;基于准静态超压值计算得出忽略氧气消耗情况下各预设冲击速度的能量释放值;根据能量释放值计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量;基于考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量,换算得到待测活性材料在对应各预设冲击速度下的冲击能量释放值作为待测活性材料的冲击释能特性。本发明充分考虑了氧气消耗对超压数据的影响,能够低成本、高效、准确的获得活性材料冲击释能特性。



1. 一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于,包括:

在多个预设冲击速度下对待测活性材料进行弹道枪冲击试验,分别获得反应罐内压力数据,读取每个冲击速度下的所述反应罐内压力数据的准静态超压值;

基于所述准静态超压值计算得出忽略氧气消耗情况下各所述预设冲击速度的能量释放值;

根据所述能量释放值计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量;

基于所述考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量,换算得到所述待测活性材料在对应各所述预设冲击速度下的冲击能量释放值作为所述待测活性材料的冲击释能特性。

2. 根据权利要求1所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于:

所述在多个预设冲击速度下对待测活性材料进行弹道枪冲击试验,具体包括:分别在多个预设冲击速度下使用弹道枪将所述待测活性材料发射入所述弹道枪冲击试验的预设体积的反应罐,所述预设冲击速度大于等于600 m/s且小于等于1500 m/s。

3. 根据权利要求2所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于:多个所述预设冲击速度的相邻取值之间间隔的取值范围为大于等于100m/s且小于等于150m/s。

4. 根据权利要求2所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于:

所述基于所述准静态超压值计算得出忽略氧气消耗情况下各所述预设冲击速度的能量释放值,具体包括:

将所述准静态超压值 ΔP 代入 $\Delta P = \frac{\gamma-1}{V} \Delta E$ 得到 ΔE 作为忽略氧气消耗情况下所述预设冲击速度的能量释放值 ΔE_1 ,其中, γ 为空气比热比, V 为反应罐体积。

5. 根据权利要求2或4所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于:

所述根据所述能量释放值计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量,具体包括:

将所述忽略氧气消耗情况下所述预设冲击速度的能量释放值 ΔE_1 代入 $m_o = \frac{\Delta E_1}{\Delta H} \times M_{oxygen}$ 中计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量 m_o , M_{oxygen} 为氧气的摩尔质量,取32 g/mol, ΔH 为每摩尔氧气参与化学反应的生成焓,基于所述待测活性材料的成分得到。

6. 根据权利要求5所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于:

所述基于所述考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量换算得到所述待测活性材料在对应各所述预设冲击速度下的冲击能量释放值,具体包括:

将所述考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量 m_o 代入:

$\Delta P = \frac{\gamma-1}{V} \Delta E_2 - \frac{m_o R_g}{V} (\frac{\Delta E_2}{c_v m_1} + T_1)$,得到所述待测活性材料在对应所述预设冲击速度下的新的能量释放值 ΔE_2 ,其中, R_g 为空气气体常数,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $c_v = R_g / (\gamma-1)$ 为空气的定容比热, T_1 为环境温度,单位为 K , m_1 为反应前的反应罐内气体质量;

将所述预设冲击速度下的所述新的能量释放值 ΔE_2 代入公式 $m_o = \frac{\Delta E_{i-1}}{\Delta H} \times M_{oxygen}$ 得

到新的 m_0 ,将新的 m_0 代入 $\Delta P = \frac{\gamma-1}{V} \Delta E_i - \frac{m_0 R g}{V} \left(\frac{\Delta E_i}{c_v m_1} + T_1 \right)$ 中迭代,以得到第 i 代的能量释放值 ΔE_i ,其中 i 为大于等于3的自然数,预设收敛阈值,当迭代至第 i 代得到的能量释放值 ΔE_i 与第 $i-1$ 代得到的能量释放值 ΔE_{i-1} 比小于所述预设收敛阈值,则判定迭代结束,将 ΔE_i 作为某一所述预设冲击速度下活性材料能量释放值,基于本步骤计算得到的各所述预设冲击速度下的能量释放值作为所述待测活性材料的冲击释能特性。

7. 根据权利要求6所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于,所述预设收敛阈值小于或等于 1×10^{-3} 。

8. 根据权利要求7所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于,所述待测活性材料为高熵合金。

9. 根据权利要求8所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于,所述待测活性材料为TiZrHfNb高熵合金。

10. 根据权利要求2或9中所述的一种活性材料冲击释能特性获取方法,其特征在于,所述弹道枪冲击试验使用弹道枪将尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的所述待测活性材料发射入27L体积的反应罐,所述预设冲击速度包括: $746 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $874 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $996 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 $1160 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

一种活性材料冲击释能特性获取方法

技术领域

[0001] 本发明涉及材料动态行为及材料毁伤效果评估领域。尤其涉及一种活性材料冲击释能特性获取方法。

背景技术

[0002] 活性材料是一类特殊的含能结构材料,它在常温常压下表现出惰性,并且具有一定的强度,可以做成破片、弹芯等结构件;而在剧烈的冲击载荷下,它可以发生氧化还原反应,释放大量的化学能。活性材料在军事与工程上都有着重要的应用,与惰性材料相比它最大的优势在于冲击释能。因此,如何准确测定与评价活性材料的释能特性具有重要价值。

[0003] 传统的评价方式是由Ames于2005提出的直接弹道法冲击释能试验,主要步骤是:首先准备一个体积为27L的钢罐作为反应罐,由薄钢板盖住,然后把活性材料在一定速度下穿透薄钢板发生一定破碎,发射入钢罐中撞击引发化学反应,剧烈反应向整个反应罐传播,反应罐整体气压升高并喷出高焓气体,测量反应罐内的准静态压力。具体通过式(1)获得活性材料的能量释放值:

$$\Delta P = \frac{\gamma - 1}{V} \Delta E \quad (1)$$

其中 ΔP 为读取的准静态超压值, γ 为空气比热比, V 为反应罐体积。

[0004] 目前现有技术中也有针对反应罐外形等作出的改进,一定程度上对活性材料的冲击释能特性进行了评价。

[0005] 然而,原始方法推导出的式(1)要求反应罐体积足够大,这样才能忽略反应罐内氧气的消耗。而理论分析表明,活性材料能量释放的计算必须考虑氧气消耗,且相对误差并不依赖于反应罐的体积,因此原始方法存在根本上的问题,如何考虑氧气消耗情况下更精准的获取活性材料的释能特性,是亟需解决的问题。

发明内容

[0006] 本发明提供一种活性材料冲击释能特性获取方法,以解决现有的势能特性获取方法因未考虑氧气消耗导致的结果不够精准的技术问题。

[0007] 为实现上述目的,本发明提供一种活性材料冲击释能特性获取方法,包括:

在多个预设冲击速度下对待测活性材料进行弹道枪冲击试验,分别获得反应罐内压力数据,读取每个冲击速度下的所述反应罐内压力数据的准静态超压值;

基于所述准静态超压值计算得出忽略氧气消耗情况下各所述预设冲击速度的能量释放值;

根据所述能量释放值计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量;

基于所述考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量,换算得到所述待测活性材料在对应各所述预设冲击速度下的冲击能量释放值作为所述待测活性材料的冲击释能特性。

[0008] 优选的,所述在多个预设冲击速度下对待测活性材料进行弹道枪冲击试验,具体包括:分别在多个预设冲击速度下使用弹道枪将所述待测活性材料发射入所述弹道枪冲击试验的预设体积的反应罐,所述预设冲击速度大于等于600 m/s且小于等于1500 m/s。

[0009] 优选的,多个所述预设冲击速度的相邻取值之间间隔的取值范围为大于等于100m/s且小于等于150m/s。

[0010] 优选的,所述基于所述准静态超压值计算得出忽略氧气消耗情况下各所述预设冲击速度的能量释放值,具体包括:

将所述准静态超压值 ΔP 代入 $\Delta P = \frac{\gamma-1}{V} \Delta E$ 得到 ΔE 作为忽略氧气消耗情况下所述预设冲击速度的能量释放值 ΔE_1 , 其中, γ 为空气比热比, V 为反应罐体积。

[0011] 优选的,所述根据所述能量释放值计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量,具体包括:

将所述忽略氧气消耗情况下所述预设冲击速度的能量释放值 ΔE_1 代入 $m_o = \frac{\Delta E_1}{\Delta H} \times M_{oxygen}$ 中计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量 m_o , M_{oxygen} 为氧气的摩尔质量,取32 g/mol, ΔH 为每摩尔氧气参与化学反应的生成焓,基于所述待测活性材料的成分得到。

[0012] 优选的,所述基于所述考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量换算得到所述待测活性材料在对应各所述预设冲击速度下的冲击能量释放值,具体包括:

将所述考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量 m_o 代入:

$$\Delta P = \frac{\gamma-1}{V} \Delta E_2 - \frac{m_o R_g}{V} \left(\frac{\Delta E_2}{c_v m_1} + T_1 \right),$$

得到所述待测活性材料在对应所述预设冲击速度下的新的能量释放值 ΔE_2 , 其中, R_g 为空气气体常数,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $c_v = R_g / (\gamma - 1)$ 为空气的定容比热, T_1 为环境温度,单位为 K, m_1 为反应前的反应罐内气体质量;

将所述预设冲击速度下的所述新的能量释放值 ΔE_2 代入公式 $m_o = \frac{\Delta E_{i-1}}{\Delta H} \times M_{oxygen}$ 得到新的 m_o , 将新的 m_o 代入 $\Delta P = \frac{\gamma-1}{V} \Delta E_i - \frac{m_o R_g}{V} \left(\frac{\Delta E_i}{c_v m_1} + T_1 \right)$ 中迭代,以得到第 i 代的能量释放值 ΔE_i , 其中 i 为大于等于3的自然数,预设收敛阈值,当迭代至第 i 代得到的能量释放值 ΔE_i 与第 $i-1$ 代得到的能量释放值 ΔE_{i-1} 相比小于所述预设收敛阈值,则判定迭代结束,将 ΔE_i 作为某一所述预设冲击速度下活性材料能量释放值,基于本步骤计算得到的各所述预设冲击速度下的能量释放值作为所述待测活性材料的冲击释能特性。

[0013] 优选的,所述预设收敛阈值小于或等于 1×10^{-3} 。

[0014] 优选的,所述待测活性材料为高熵合金。

[0015] 优选的,所述待测活性材料为TiZrHfNb高熵合金。

[0016] 优选的,所述弹道枪冲击试验使用弹道枪将尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的所述待测活性材料发射入27L体积的反应罐,所述预设冲击速度包括: $746 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $874 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $996 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 $1160 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

[0017] 本发明涉及的一种活性材料冲击释能特性获取方法,相比于现有技术,有以下有

益效果：

本发明的活性材料冲击释能特性获取方法基于多种冲击速度下的超压试验数据，充分考虑了氧气消耗对超压数据的影响，不再对反应罐作出大体积的要求，能够低成本、高效、准确的获得活性材料冲击释能特性。

附图说明

[0018] 图1是本发明实施例一中一种活性材料冲击释能特性获取方法的方法流程图一；图2是本发明实施例一中一种活性材料冲击释能特性获取方法的方法流程图二。

具体实施方式

[0019] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明。可以理解的是，此处所描述的具体实施例仅仅用于解释本发明，而非对本发明的限定。另外还需要说明的是，为了便于描述，附图中仅示出了与本发明相关的部分而非全部结构。

实施例一

[0020] 一种活性材料冲击释能特性获取方法，请参阅图1-2，包括：

S10：在多个预设冲击速度下对待测活性材料进行弹道枪冲击试验，分别获得反应罐内压力数据，读取每个冲击速度下的反应罐内压力数据的准静态超压值。

[0021] 其中，在多个预设冲击速度下对待测活性材料进行弹道枪冲击试验，具体包括：分别在多个预设冲击速度下使用弹道枪将待测活性材料发射入弹道枪冲击试验的预设体积的反应罐，预设冲击速度大于等于600 m/s且小于等于1500 m/s。优选的实施例中，多个预设冲击速度的相邻取值之间间隔的取值范围为大于等于100m/s且小于等于150m/s。

[0022] 其中，获得反应罐内压力数据包括反应前反应罐压力 P_1 和反应后反应罐压力 P_2 。准静态超压值 ΔP 即为封闭反应罐中反应前后压力差可写作： $\Delta P = P_1 - P_2$ 。

[0023] S20：基于准静态超压值计算得出忽略氧气消耗情况下各预设冲击速度的能量释放值。

[0024] 在本实施例中，将准静态超压值 ΔP 代入 $\Delta P = \frac{\gamma - 1}{V} \Delta E$ 得到 ΔE 作为忽略氧气消耗情况下预设冲击速度的能量释放值 ΔE_1 ，其中， γ 为空气比热比，大小通常可取1.4， V 为反应罐体积。

[0025] S30：根据能量释放值计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量。

[0026] 本实施例中，将忽略氧气消耗情况下预设冲击速度的能量释放值 ΔE_1 代入公式： $m_o = \frac{\Delta E_1}{\Delta H} \times M_{oxygen}$ 中计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量 m_o ，其中 M_{oxygen} 为氧气的摩尔质量，取32 g/mol， ΔH 为每摩尔氧气参与化学反应的生成焓，基于待测活性材料的成分得到。

[0027] S40：基于考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量，换算得到待测活性材料在对应各预设冲击速度下的冲击能量释放值作为待测活性材料的冲击释能特性。

[0028] 本实例中包括S41-S42：

S41：将考虑氧气消耗的情况下消耗的氧气摩尔质量 m_o 代入：

$\Delta P = \frac{\gamma - 1}{V} \Delta E_2 - \frac{m_o R_g}{V} \left(\frac{\Delta E_2}{c_v m_1} + T_1 \right)$, 得到待测活性材料在对应预设冲击速度下的新的能量释放值 ΔE_2 , 其中, R_g 为空气气体常数, 单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, 具体可以取 $287 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $c_v = R_g / (\gamma - 1)$ 为空气的定容比热, T_1 为环境温度, 单位为 K , 通常可取 $300 K$, m_1 为反应前的反应罐内气体质量。

[0029] S42: 将预设冲击速度下的新的能量释放值 ΔE_2 代入公式 $m_0 = \frac{\Delta E_{i-1}}{\Delta H} \times M_{oxygen}$ 得到新的 m_0 , 将新的 m_0 代入 $\Delta P = \frac{\gamma - 1}{V} \Delta E_i - \frac{m_o R_g}{V} \left(\frac{\Delta E_i}{c_v m_1} + T_1 \right)$ 中迭代, 以得到第 i 代的能量释放值 ΔE_i , 其中 i 为大于等于 3 的自然数, 预设收敛阈值, 当迭代至第 i 代得到的能量释放值 ΔE_i 与第 $i-1$ 代得到的能量释放值 ΔE_{i-1} 相比小于预设收敛阈值, 则判定迭代结束, 将 ΔE_i 作为某一预设冲击速度下活性材料能量释放值, 基于本步骤计算得到的各预设冲击速度下的能量释放值作为待测活性材料的冲击释能特性。

[0030] 本实施例中, 预设收敛阈值小于或等于 1×10^{-3} , 具体可取 1×10^{-3} , 此时迭代至第 i 代得到的能量释放值 ΔE_i 与 $i-1$ 代 ΔE_{i-1} 相比小于 1×10^{-3} , 判定迭代结束, 得到某一预设冲击速度下活性材料能量释放值。

[0031] 下面通过理论分析可知, 活性材料能量释放的计算必须考虑氧气消耗, 且相对误差并不依赖于反应罐的体积, 因此原始方法存在根本上的问题。对于本发明的活性材料冲击释能特性获取方法, 充分考虑了氧气消耗对超压数据的影响, 不再对反应罐作出大体积的要求, 能够低成本、高效、准确的获得活性材料冲击释能特性, 具体推导如下:

其中准静态超压值 ΔP 即为封闭反应罐中反应前后压力差可写作:

$$P_2 - P_1 = \Delta P = R_g (\rho_2 T_2 - \rho_1 T_1) \quad (2)$$

R_g 为空气气体常数, T_1 为反应前温度, T_2 为反应后温度, ρ_1 为反应前空气密度, ρ_2 为反应后气体密度, P_1 为反应前反应罐压力, P_2 反应后反应罐压力。

[0032] ρ_2 反应后的气体密度可写作:

$$\rho_2 = \frac{m_1 - m_o}{V} \quad (3)$$

其中, m_1 为反应前的反应罐内气体质量, m_o 为参与反应的氧气质量。

[0033] 反应后温度与能量释放(全部看作热能)的关系可写作:

$$T_2 = T_1 + \frac{\Delta E}{m_1 c_v} \quad (4)$$

其中, c_v 是空气的比热。

[0034] 参与反应的氧气质量可写作:

$$m_o = \frac{\Delta E}{\Delta H} \times M_{oxygen} \quad (5)$$

其中, ΔH 为每摩尔氧气参与化学反应的生成焓, M_{oxygen} 为氧气的摩尔质量。

[0035] 将式 (3) 与 (4) 表示的反应后的密度与温度代入式 (2), 可得:

$$\Delta P = R_g \left(\frac{\Delta E}{c_v V} - \frac{m_o \times \Delta E}{c_v V m_1} - \frac{m_o}{V} T_1 \right) \quad (6)$$

结合热力学相关理论整理可得：

$$\Delta P = \frac{\gamma - 1}{V} \Delta E - \frac{m_o R_g}{V} \left(\frac{\Delta E}{c_v m_1} + T_1 \right) \quad (7)$$

其中， γ 为空气比热比，大小通常可取1.4。

[0036] 由式(7)可以发现，超压 ΔP 由两部分构成，第一部分是化学反应放出的热量使空气膨胀导致的压力增加部分，第二部分是化学反应消耗的氧气使得气体减少导致的压力降低部分。当氧气消耗量比空气质量到达极限 $m_o/m_1=0.2$ 时，由式(7)可知相同能量释放值对超压的误差影响达20%以上，从而由超压反算的能量释放特性误差大于25%。因此，式(7)可以在不要求反应罐体积足够大的情况充分考虑氧气消耗的影响，低成本、准确地评价材料的释能特性。

[0037] 下面通过一具体实验示例解释本发明的一种活性材料冲击释能特性获取方法：

高熵合金由于多主元的特性，在材料设计方面具有可调控的巨大优势，在含能结构材料领域具有广阔情景，受到越来越大的关注。然而，目前还缺少对高熵合金释能特性的研究。本发明可以低成本、高效、准确的解决这一问题。

[0038] 本实例所选材料为TiZrHfNb高熵合金。

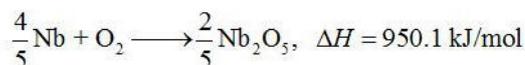
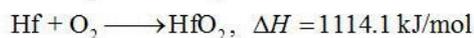
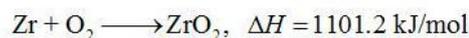
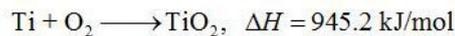
[0039] 随后使用弹道枪冲击试验将特定尺寸($\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)的待测活性材料发射入27L体积的反应罐，预设冲击速度包括： $746 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $874 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $996 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 $1160 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，分别获得反应罐内压力数据，读取每个冲击速度下的反应罐内压力数据的准静态超压值，如表所示：

材料	速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	超压 /MPa
TiZrHfNb高熵合金	746	0.03
TiZrHfNb高熵合金	874	0.08
TiZrHfNb高熵合金	996	0.24
TiZrHfNb高熵合金	1160	0.27

表1

首先使用公式 $\Delta P = \frac{\gamma - 1}{V} \Delta E$ ，得到 ΔE 作为忽略氧气消耗情况下预设冲击速度的能量释放值 ΔE_1 ，

其次将忽略氧气消耗情况下预设冲击速度的能量释放值 ΔE_1 代入 $m_o = \frac{\Delta E_1}{\Delta H} \times M_{\text{oxygen}}$ 中计算考虑氧气消耗情况下消耗的氧气摩尔质量 m_o ， M_{oxygen} 为氧气的摩尔质量，取32 g/mol， ΔH 为每摩尔氧气参与化学反应的生成焓，基于待测活性材料的成分得到，具体查阅各元素的化学反应焓：



[0040] 通过对成分计算分析，TiZrHfNb高熵合金每摩尔反应的生成焓为 $\Delta H = 1005.9 \text{ kJ/mol}$ 。

[0041] 再使用下述公式获得迭代第2次后的能量释放值 ΔE_2 ：

$$\Delta P = \frac{\gamma-1}{V} \Delta E_2 - \frac{m_0 R_g}{V} \left(\frac{\Delta E_2}{c_v m_1} + T_1 \right)$$

[0042] 其中, R_g 为空气气体常数, 单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, 具体取 $287 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $c_v = R_g / (\gamma - 1)$ 为空气的定容比热, T_1 为环境温度, 单位为 K, 取 $300 K$, m_1 为反应前的反应罐内气体质量。

[0043] 将预设冲击速度下的新的能量释放值 ΔE_2 代入公式 $m_0 = \frac{\Delta E_{i-1}}{\Delta H} \times M_{oxygen}$ 得到新的 m_0 , 将新的 m_0 代入 $\Delta P = \frac{\gamma-1}{V} \Delta E_i - \frac{m_0 R_g}{V} \left(\frac{\Delta E_i}{c_v m_1} + T_1 \right)$ 中迭代, 当迭代至第 i 代得到的能量释放值 ΔE_i 与第 $i-1$ 代得到的能量释放值 ΔE_{i-1} 相比小于预设收敛阈值 1×10^{-3} 时, 最终收敛后所求得各个预设冲击速度对应的能量释放值如表所示:

速度 / $m \cdot s^{-1}$	超压 / MPa	能量释放 / J
746	0.03	2042.78
874	0.08	5464.72
996	0.24	16564.02
1160	0.27	18671.27

表2

本发明构思合理, 基于多种冲击速度下的超压试验数据, 充分考虑了氧气消耗对超压数据的影响, 不再对反应罐作出大体积的要求, 能够低成本、高效、准确的获得活性材料冲击释能特性。

[0044] 需要说明的是, 在本文中, 术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含, 从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者装置不仅包括那些要素, 而且还包括没有明确列出的其他要素, 或者是还包括为这种过程、方法、物品或者装置所固有的要素。在没有更多限制的情况下, 由语句“包括一个……”限定的要素, 并不排除在包括该要素的过程、方法、物品或者装置中还存在另外的相同要素。

[0045] 以上仅为本发明的优选实施例, 并非因此限制本发明的专利范围, 凡是利用本发明说明书及附图内容所作的等效结构或等效流程变换, 或直接或间接运用在其他相关的技术领域, 均同理包括在本发明的专利保护范围内。

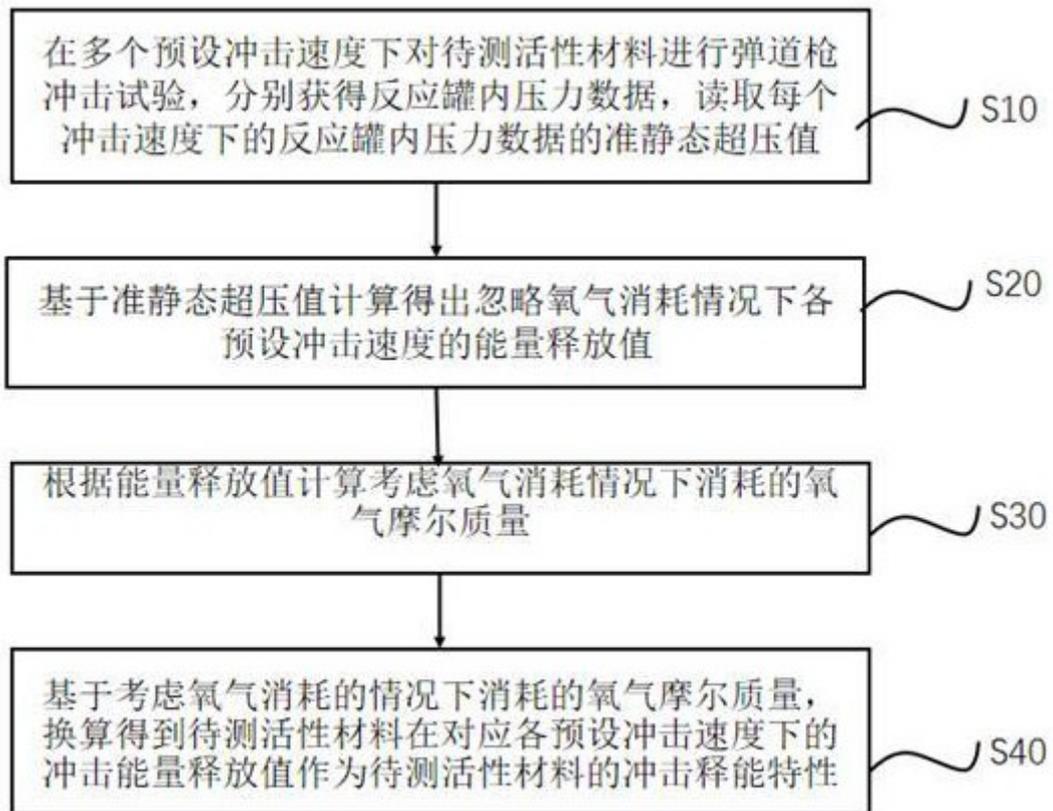


图 1

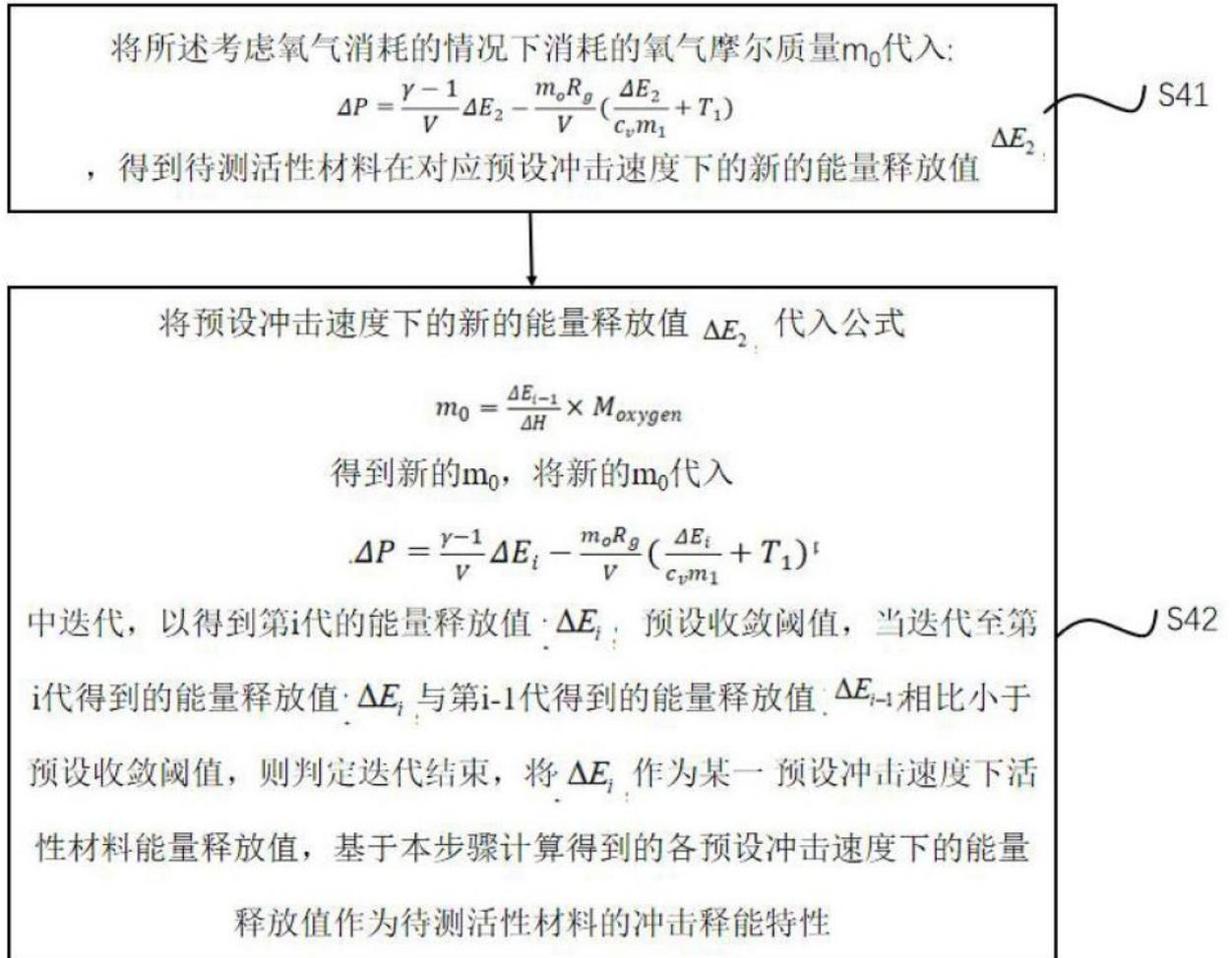


图 2