

孔隙率对铌硅粉末混合物冲击反应的影响

凌绪玉 刘福生 汪贻高

Influence of Initial Porosity on Shock Chemical Reaction of Nibium-Silicon Powder Mixture

LING Xuyu, LIU Fusheng, WANG Yigao

引用本文:

凌绪玉, 刘福生, 汪贻高. 孔隙率对铌硅粉末混合物冲击反应的影响[J]. 高压物理学报, 2020, 34(3):034101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190851

LING Xuyu, LIU Fusheng, WANG Yigao. Influence of Initial Porosity on Shock Chemical Reaction of Nibium-Silicon Powder Mixture[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3):034101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190851

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190851

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于描述W-Cu粉末混合物冲击压缩行为的 p-α与p-λ模型适用性

p- and *p*- Model for Describing Shock Compressive Behavior of W-Cu Powder Mixture 高压物理学报. 2020, 34(1): 012101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190784

应变率和孔隙率对规则多孔钛压缩力学性能的影响

Effects of Strain Rate and Porosity on the Compressive Behavior of Porous Titanium with Regular Pores 高压物理学报. 2017, 31(4): 364 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.00.003

应变率和孔隙率对规则多孔钛压缩力学性能的影响

Effects of Strain Rate and Porosity on the Compressive Behavior of Porous Titanium with Regular Pores 高压物理学报. 2017, 31(4): 364 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.04.003

冲击引发Ti-Si活性粉体反应过程研究

Shock Induced Reaction Process of Ti-Si Reactive Powder 高压物理学报. 2017, 31(4): 478 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.04.017

环境温度对多相混合物爆炸特性影响的实验研究

Experimental Study on the Effects of Ambient Temperature on Explosion Characteristics of Multiphase Mixtures 高压物理学报. 2019, 33(4): 045202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180648

钝感炸药冲击起爆反应过程的PDV技术

PDV Technology of Shock Initiation Reaction Process of Insensitive Explosive 高压物理学报. 2020, 34(2): 023402 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190856 DOI: 10.11858/gywlxb.20190851

孔隙率对铌硅粉末混合物冲击反应的影响

凌绪玉1,2,刘福生1,汪贻高1

(1. 西南交通大学高温高压物理研究所,四川 成都 610031;2. 西南民族大学电气信息工程学院应用物理系,四川 成都 610041)

摘要:借助二级轻气炮加载平台和飞片撞击技术,在高冲击速度下实现不同初始孔隙率铌 硅粉末混合物的冲击回收。对回收产物进行表征分析并探讨高冲击速度下孔隙率对铌硅粉末冲 击化学反应的影响,实验结果表明:低孔隙率(10%)铌硅粉末混合物几乎不发生反应;20%孔隙率 铌硅粉末发生不完全化学反应并生成了NbSi₂;高孔隙率(35%)样品在相同冲击速度(飞片 速度约为2.35 km/s)下发生完全反应获得单组分Nb₅Si₃。在高孔隙率的粉末混合物中,孔隙崩 塌产生的高温是导致铌硅粉末反应物发生完全反应的主要原因。

关键词: 铌硅粉末混合物; 高冲击速度; 冲击回收; 孔隙率; 冲击反应

冲击波加载多孔固体介质过程中形成的极端高温高压条件可激活常规温压条件难以发生的化学 反应,为材料合成开辟了一条新途径,尤其是对合成条件苛刻的材料具有显著优势。然而,冲击波作用 导致粉末从初始状态至孔隙湮灭的过程中涉及多种机械、物理和化学变化,因而冲击波压缩下的反应 过程十分复杂^[1]。冲击诱导化学反应取决于外部加载条件和粉末混合物的初始状态等多种因素^[2-3], 反应物粉末的初始孔隙率是控制冲击反应热力学和动力学的一个非常重要因素^[4]。Cooper 等^[5]应用理 论模拟证实,冲击波和孔隙表面相互作用导致孔隙崩塌产生的大量能量集聚有利于激活化学反应,因 此探讨粉末初始孔隙率对诱发超快冲击化学反应的影响极为重要。

铌硅二元金属间化合物因具有低密度和优良的高温强度等物理特性,可作为潜在的高温结构材料和金属含能材料^[6-7]。根据铌-硅二元相图, 铌-硅系存在 Nb₅Si₃、Nb₃Si 和 NbSi₂ 共 3 种金属间化合物^[8]。 其中 Nb₅Si₃的熔点 (2 515 ℃) 最高,密度 (7.16 g/cm³) 相对较低,因其具有优良的高温性能受到关注^[9]。 这类材料的熔点高、晶体结构复杂,采用常规方法难以合成,但该类材料的合成反应能够放热,理论上 讲,一旦被激活便可自维持发生反应。由于该激活势垒高,传统方法难以达到激活条件,而冲击波加载 产生的极端高温高压对于激活该类反应具有一定优势。目前,已经开展了铌硅化合物的冲击合成工 作。Vecchio 等^[10]应用冲击波加载合成了 NbSi₂,发现其冲击诱导反应机制与传统固态反应机制不同; Meyers 等^[11] 也通过铌硅粉末混合物的冲击回收,发现塑性变形可以影响铌硅粉末间的反应。此外,还 有一些理论模拟研究对铌硅金属间化合物的冲击合成进行探讨^[12]。但是,所有铌硅粉末混合物的冲击 反应研究,无论是实验结果还是理论分析都仅局限于较低冲击强度条件(飞片速度在 2.0 km/s 以下),冲 击产物也仅获得了较低熔点的 NbSi₂,而且这些结果对于冲击化学反应的程度和机理解释存在分歧。 而且,高熔点金属间化合物(如 Nb₅Si₃)这类传统方法较难合成的材料在高冲击强度范围(飞片速度在 2.0 km/s 以上)的冲击合成及反应机制未有报道。

 ^{*} 收稿日期: 2019-10-30; 修回日期: 2019-11-15
 基金项目:国家自然科学基金(11574254)
 作者简介:凌绪玉(1974-),女,博士研究生,主要从事高压材料的合成研究.E-mail: lingxymx@163.com
 通信作者:刘福生(1966-),男,博士,研究员,主要从事凝聚态物理、冲击波技术研究. E-mail: fusheng 1@163.com

课题组前期开展了铌硅粉末混合物的冲击回收实验,通过高冲击强度下的冲击回收获得了高熔点 Nb₅Si₃化合物^[13],发现相同组分配比的铌硅粉末混合物在不同的冲击强度下合成了不同组成的铌硅化 合物,且反应特征不同。为更清楚地理解高冲击强度下铌硅粉末混合物的冲击合成及反应机制,在前 期工作基础上,本研究进一步对不同孔隙率的铌硅粉末混合物样品进行高冲击强度下回收,通过对冲 击回收产物进行表征分析,探讨不同初始孔隙率对铌硅混合物冲击反应的影响。

1 实验材料与方法

1.1 冲击样品制备

实验使用高纯 Nb(约 325 目, Alfa Aesar 公司)和 Si(约 325 目, Alfa Aesar 公司)粉末原料。将铌粉 和硅粉按原子比为 5:3 称量, V 型混料器中氩气气氛下将粉末混合 2 h, 通过不同压力将混合好的粉末 冷压成直径约为 12 mm、厚度约为 3 mm 的圆片状试样。冲击样品的准备过程(原料称量、混合前的真 空封装、压片和铜回收盒的真空封装)均在水氧监测氩气气氛保护的手套箱中完成。将装有样品的铜 制回收盒密封。样品孔隙率的计算方法参考文献 [14]。

1.2 冲击回收实验

应用二级轻气炮加载装置对样片进行冲击回收,装置示意图和实物如图1所示。将铜飞片(Ø24mm×3.0mm)粘在发射弹丸上,由磁测速系统测量飞片速度,在飞片速度约2.35km/s的最高冲击速度下进行冲击回收实验。利用质量平均法计算混合物样品的雨贡纽参数^[15-16],采用阻抗匹配法和疏松粉末状态 方程计算样品的冲击压力和温度^[15,17],表1列出了不同孔隙率粉末混合物的冲击回收实验参数和计算结果。



图 1 冲击回收实验装置示意图和实物

Fig. 1 Schematic and photographs of the assembly for the shock recovery experiment

Table 1 Shock loading conditions of Nb-Si powder mixtures with different porosity						
Sample	Flyer velocity/	Density/	Porosity/	Shock	Second shock	Shock
	$(\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	$(g \cdot cm^{-3})$	%	pressure/GPa	pressure/GPa	temperature/K
Nb-Si-P1	2.35 ± 0.02	5.505	10	45	60	1 173
Nb-Si-P2		4.895	20	39	60	1 625
Nb-Si-P3		3.980	35	29	60	2 256

表 1 不同孔隙度的粉末混合物的冲击回收实验参数 Table 1 Shock loading conditions of Nb-Si powder mixtures with different poros

1.3 冲击回收产物表征

图 2 显示了完整回收的铜回收盒在冲击前、后的外形变化。用机械切割方式从铜制回收盒中将回 收的冲击产物分离取出,切掉产物样品外围边缘的含铜部分,留下中心主体部分用于表征分析。将产 物样块逐级打磨,并清洗、干燥,储存在真空干燥箱中待表征。

使用 X 射线衍射仪 (丹东浩元仪器有限公司, DX-2700型) 对样品进行物相表征, 采用 CuKa 靶 (λ=0.154 06 nm) 射线, 衍射角 2θ为 20°~80°, 步长为 0.03°, 每步计数时间 1 s。使用日本电子公司 JSM-7001F 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观形貌观察, 并用 SEM 配备的能谱仪分析各物相的成

分。使用差示扫描量热计(DSC)测量冲击回收产物的热响应曲线(Ar气氛下,加热速率为10℃/min)。

2 结果和讨论

2.1 冲击回收产物的 XRD 结果分析

图 3 为不同孔隙率铌硅粉末冲击产物的 XRD 图谱。从图 3(a) 中 10% 孔隙率冲击样品的 XRD 结果可见,产物主要为 Nb 和 Si 的特征衍射 峰及较弱的 NbSi₂ 衍射峰,表明仍有大部分 Nb 和 Si 未发生反应,仅有极少部分 NbSi₂ 相生成。由



图 2 冲击回收前、后铜回收盒 Fig. 2 Copper capsule before and after shock loading

图 3(b)中 20% 孔隙率铌硅粉末冲击产物的 XRD 结果可见,该孔隙率产物中虽仍有部分未反应的 Nb 和 Si,但生成 NbSi₂相的程度有所提高,初始孔隙率提高后,冲击化学反应更易进行。此外,图 3(c)中 35% 孔隙率铌硅粉末混合物的冲击产物 XRD 图谱显示,其衍射峰仅由 Nb₅Si₃(包括α-Nb₅Si₃相和β-Nb₅Si₃相)的特征峰组成。与低孔隙率样品相比,在相同冲击强度下高孔隙率粉末样品更容易获得高熔点 Nb₅Si₃金属间化合物。因此,初始孔隙率对粉末混合物在冲击压缩下物相生成、固相化学反应的影响非常明显。参考表1估算的冲击平均温度也可看出,随着样品初始孔隙率增加,较高的冲击温度 (2 256 K)更有利于铌硅金属间化合物发生反应。





2.2 冲击回收产物的 SEM 结果分析

图 4 为 10% 初始孔隙率铌硅粉末冲击产物的 SEM 结果,其中图 4(b) 为图 4(a) 的局部放大图,图 4(c) 为样品 EDS 能谱分析结果,w 为质量分数。由图 4(a) 可以看出,样品在该冲击压力(约为 45 GPa)下铌 硅颗粒被明显压实,没有明显物相生成或发生化学反应。图 4(b) 中局部区域放大图显示,与初态未冲击样品相比,冲击后的粉末颗粒呈细粒化、等轴状,说明冲击加载作用导致颗粒发生崩裂和相互嵌合。EDS 能谱显示图 4(b) 中亮灰色细粒子的为 Nb,周围相对较暗细粒为 Si,可能由于 NbSi₂ 量极少,在图中未能明确分辨。在较小孔隙率即相对密实的混合反应物样品中,冲击波更多作用于粉末颗粒的机械和物理变形。由于孔隙率低,孔隙崩塌所致的能量贮集弱,极少能够激活并促发冲击化学反应。

图 5 为 20% 初始孔隙率铌硅粉末冲击回收产物的 SEM 结果,其中图 5(b) 为图 5(a) 的局部放大图, 图 5(c) 为样品 EDS 能谱分析结果。图 5(a) 中,经冲击加载后 20% 孔隙率回收产物与 10% 孔隙率回收 产物明显不同,随着冲击作用下温度不断升高,由于 Si 的熔点较低,而 Nb 的屈服强度和熔点较高, Si 会发生熔融,并分布于变形的 Nb 周围,与基体特征类似,并且其中弥散着新相。如图 5(b) 所示,对 富 Si 区域高倍放大观察可见, Si 基体中分布着球形、结节状粒子,表现出发生反应的微观特征。对图 5(b) 方框内粒子进行 EDS 元素分析发现,其化学组成与 NbSi₂ 化学式的原子个数比相符,与 XRD 结果中出 第34卷

现 NbSi₂ 衍射峰一致。由此可见,与 10% 孔隙率样品相比,在相同飞片速度冲击下,随着冲击温度升高,高初始孔隙率反应产物中的铌硅颗粒发生严重变形并伴随硅发生熔融,并且 NbSi₂ 产物增多,表明发生了明显的冲击化学反应。



图 4 10% 孔隙率铌硅粉末冲击回收产物的 SEM 结果和 EDS 分析

Fig. 4 SEM morphology and EDS spectra of the recycled samples of Nb-Si powder mixtures with the porosity of 10%



图 5 20% 孔隙率铌硅粉末冲击回收产物的 SEM 结果和 EDS 分析 Fig. 5 SEM morphology and EDS spectra of the recycled samples of Nb-Si powder mixtures with the porosity of 20%

图 6 为高孔隙率 (35%) 铌硅粉末混合物冲击回收样品的 SEM 结果。由图 6(a) 可知, 样品已转化为 相对均匀的单一微观组织结构, 表明该孔隙率样品在相同冲击速度下已发生完全反应形成新的相结 构。图 6(b) 为图 6(a) 中方框内区域局部放大图, 图中的新相为枝条状结构, 其间有微纳孔(孔隙率约为 4.7%, 孔隙尺寸介于 0.2~4 μm 之间)。EDS 能谱分析结果显示, 铌和硅的原子比约为 63.02: 36.98, 与 Nb₅Si₃ 化学式的原子个数比接近, 表明冲击反应生成物为 Nb₅Si₃ 化合物。35% 孔隙率样品中, 冲击加载 创造了极高的温度条件(估算冲击样品中的平均温度达 2 256 K), 相同冲击速度作用于铌硅粉末在物相 生成和反应程度上与前述低孔隙率样品相比显著提高, 并且其物相形态有明显不同。



图 6 35% 孔隙率铌硅粉末冲击回收产物的 SEM 结果和 EDS 分析

Fig. 6 SEM morphology and EDS spectra of the recycled samples of Nb-Si powder mixtures with the porosity of 35%

值得注意的是,高孔隙率样品在飞片速度约为2.35 km/s时就发生了完全反应,而前期对不同冲击 速度下反应行为的研究发现,较低孔隙率(20%)样品^[13]需要更高的冲击速度(飞片速度约为2.63 km/s) 才能发生完全反应。因此,高孔隙率样品崩塌所致的高能量贮集产生的高温是发生完全反应的重要条件。

2.3 冲击回收产物的 DSC 分析

图 7 为不同孔隙率铌硅粉末冲击产物的 DSC曲线。由图 7 可知,孔隙率为10%和20%冲 击产物的DSC曲线分别在720 ℃和810 ℃附近出 现了两个放热峰。结合冲击产物的XRD结果分 析可知,720 ℃放热峰可能是冲击产物中未反应 的Nb和Si之间进一步发生反应放热所致。可能 因为未发生完全化学反应的冲击产物中,未反应 的铌和硅粒子在比自蔓延燃烧反应开始温度低约 200 ℃时就开始发生化学反应^[18]。该异常是由于 冲击作用引起粒子粉末发生塑性流动和混合,表 面清洁以及样品自身缺陷导致在冲击压缩加载期 间粒子粉末被活化。而810 ℃放热峰可能是由于 冲击塑变的Nb颗粒发生再结晶。35%孔隙度冲





击回收产物的 DSC 结果呈现光滑的曲线, 在测试加热范围内未出现放热峰, 表明冲击回收产物为稳定的化合物。这与前述的物相表征和形貌分析结果一致, 也证实了 35% 孔隙度样品完全反应生成了 Nb₃Si₃ 金属间化合物。

粉末颗粒混合物的初始状态涵盖颗粒自身组成结构及混合颗粒间的相互接触等条件^[19-22]。冲击加载时,在冲击波的高压作用下,样品颗粒的变化不是孤立发生的,而受相互间直接作用和颗粒自身物理性质的限制,表现为样品内颗粒的整体协调变形及交互作用。这些作用对于颗粒的变形方式、变形程度和融合都会产生直接影响。更重要的是,不同变化方式和程度会导致不同的能量集聚,从而产生温度升高和局域热效应^[23],这些变化又反过来影响物质的扩散、相互渗透甚至激活化学反应。研究表明^[24-25],合适的孔隙率对于粉末颗粒反应物的冲击化学合成非常重要。

由表征分析结果可知, 孔隙率对于铌硅粉末混合物冲击反应的影响, 是导致其反应发生及反应机制变化的重要因素。20% 孔隙率冲击反应伴随着铌硅颗粒间强烈的相互作用、较低的相互约束以及大面积的孔隙塌陷或湮灭, 冲击加热效果显著提升, 不仅导致硅粒子发生熔化, 变形的铌粒子嵌入到熔融的硅中, 而且以铌粒子所在位置为形核中心, 铌与周围的硅粒子发生半"固-液"化学反应生成相应的铌硅化合物, 不过该激活程度仍处于仅能激发 NbSi₂反应物生成的条件。在更高孔隙率(35%)下, 铌硅颗粒交互作用、变形及孔隙塌陷引起的能量集聚很高, 使得样品内部急剧升温, 引发高熔点的铌熔化, 熔融的铌硅原子发生自由迁移, 在极高温度激活下, 铌硅间发生"液相"化学反应获得相应的铌硅化合物, 即全面激活了铌硅间的自维持反应, 并获得高熔点的 Nb₅Si₃ 金属间化合物且反应完全。值得注意的是, 过大孔隙率会在样品中留下微纳尺度孔隙, 可能会对样品的块体性能产生影响。此外, 实验研究发现, 若孔隙率过高, 孔隙崩塌产生的过高温度可能使冲击回收样品盒局部熔化, 出现破漏或样品内气体相较多导致回收盒爆裂, 从而导致冲击回收样品失败。

3 结 论

通过3种不同初始孔隙率(10%、20%和35%) 铌硅粉末混合物的冲击化学反应实验,对冲击回收 产物物相、微观形貌表征分析及冲击产物热响应行为进行研究分析,发现不同孔隙率铌硅粉末混合物 冲击反应的发生情况、产物特征及反应程度有所不同。低孔隙率(10%)样品几乎不发生反应;当孔隙 率提高至 20% 时, 铌硅粉末混合物发生不完全化学反应, 生成 NbSi₂ 化合物; 当孔隙率增大到 35% 时, 相同冲击速度下铌硅粉末混合物发生完全反应, 并获得与初始配比一致的 Nb₅Si₃ 化合物。实验结果证 实, 适当增大铌硅粉末的初始孔隙率有利于发生冲击化学反应。

参考文献:

- 乔良,张先锋,何勇. 颗粒金属材料冲击压缩细观数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2013, 27(6): 863-871.
 QIAO L, ZHANG X F, HE Y. Meso-scale numerical simulation of the shock compression of particle metal materials [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(6): 863-871.
- [2] EAKINS D E, THADHANI N N. Shock compression of reactive powder mixtures [J]. International Materials Reviews, 2013, 54(4): 181–213.
- [3] 崔乃夫, 陈鹏万, 周强. 冲击引发 Ti-Si 活性粉体反应过程研究 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(4): 478–485.
 CUI N F, CHEN P W, ZHOU Q. Shock induced reaction process of Ti-Si reactive powder [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(4): 478–485.
- [4] HERBOLD E B, THADHANI N N, JORDIN J L. Observation of a minimum reaction initiation threshold in ball-milled Ni+Al under high-rate mechanical loading [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(6): 66108.
- [5] COOPER S R, BENSON D J, NESTERENKO V F. A numerical exploration of the role of void geometry on void collapse and hot spot formation in ductile materials [J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16(5): 525–540.
- [6] SEIFERT M, SHEN Z, KRENKEL W. Nb(Si, C, N) composite materials densified by spark plasma sintering [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(12): 3319–3327.
- [7] WAN B, XIAO F, ZHANG Y. Theoretical study of structural characteristics, mechanical properties and electronic structure of metal (TM = V, Nb and Ta) silicides [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 681: 412–420.
- [8] SCHIESINGER M E, GOKHALE A B, ABBASCHIAN R. The Nb-Si (Niobium-Silicon) system [J]. Journal of Phase Equilibria, 1993, 14(4): 502–509.
- [9] SHI S, ZHU L, JIA L. Ab-initio study of alloying effects on structure stability and mechanical properties of α-Nb₃Si₃ [J]. Computational Materials Science, 2015, 108: 121–127.
- [10] VECCHIO K S, YU L H, MEYERS M A. Shock synthesis of silicides-I. experimentation and microtrural evolution [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(3): 701–714.
- [11] MEYERS M A, BATSANOV S S, GAVRILKIN S M. Effect of shock pressure and plastic strain on chemical reactions in Nb-Si and Mo-Si systems [J]. Materials Science and Engineering A, 1995, 201(1/2): 150–158.
- [12] PRASAD A V S S, BASU S. Numerical modelling of shock-induced chemical reactions (SICR) in reactive powder mixtures using smoothed particle hydrodynamics (SPH) [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2015, 23: 1–23.
- [13] LING X Y, LIU F S, ZHANG M J. Shock synthesis of niobium silicide (Nb₅Si₃) via the flyer plate impact technique with high impact velocities [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 1032–1036.
- [14] QIN L, HU J, CUI C. Effect of Al content on reaction laser sintering of Ni-Al powder [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 473(1/2): 227–230.
- [15] 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1999: 197–199, 204–207.
 JING F Q. Introduction to experimental equation of state [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1999: 197–199, 204–207.
- [16] 尹昊. 碳基纳米材料的爆炸合成及其机理研究 [D]. 北京. 北京理工大学, 2014: 13 16.
 YIN H. Study on the explosive synthesis and mechanism of carbon-based nanomaterials [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014: 13-16.
- [17] 汤文辉, 张若棋. 物态方程理论及计算概论 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 273-274.
 TANG W H, ZHANG R Q. Introduction to the theory of state of matter equations and calculations [M]. Changsha: National Defense Science and Technology University Press, 1999: 273-274.
- [18] MA C L, KASAMA A, TANAKA H. Microstructures and mechanical properties of Nb/Nb-silicide in-situ composites synthesized by reactive of ball milled powders [J]. Materials Transactions, 2000, 40(3): 444–451.

- [19] QIAO L, ZHANG X F, HE Y. Multiscale modelling on the shock-induced chemical reactions of multifunctional energetic structural materials [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113: 173513.
- [20] AYYAR A, CHAWLA N. Microstructure-based modeling of the influence of particle spatial distribution and fracture on crack growth in particle-reinforced composites [J]. Acta Materialia, 2007, 55(18): 6064–6073.
- [21] 张先锋, 赵晓宁, 乔良. 反应金属冲击反应过程的理论分析 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(2): 145–151.
 ZHANG X F, ZHAO X N, QIAO L. The theoretical analysis of metal shock reaction process [J]. Explosion and Shock waves, 2010, 30(2): 145–151.
- [22] BAER M R. Modeling heterogeneous energetic materials at the mesoscale [J]. Thermochimica Acta, 2002, 384(1): 351–367.
- [23] 陈俊祥, 耿华运. 多孔材料温压状态方程计算简要评述 [J]. 高压物理学报, 2019, 33(3): 030111.
 CHEN J X, GENG H Y. Review on evaluation of temperature-pressure equation of state of porous materials [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(3): 030111.
- [24] VREELAND T, MONTILLA K L, MUTZ A H. Shock wave initiation of the Ti₅Si₃ reaction in elemental powders [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(6): 2840–2844.
- [25] VOGLER T J, LEE M Y, GRADY D E. Static and dynamic compaction of ceramic powders [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(2): 636–658.

Influence of Initial Porosity on Shock Chemical Reaction of Nibium-Silicon Powder Mixture

LING Xuyu^{1,2}, LIU Fusheng¹, WANG Yigao¹

(1. Institute of High Pressure and High Temperature Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Department of Applied Physics, College of Electrical and Information Engineering, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: By employing the two-stage light gas gun and flyer impact technology, the impact recovery experiments of nibium-silicon powder mixtures with different initial porosity at high impact intensity were achieved. The recycled products were characterized to investigate the effect of porosity on the impact chemical reaction of nibium-silicon powder at high impact strength. The results showed that the sample with low porosity (10%) was hardly reacted; When the porosity is 20%, the nibium-silicon powder experienced a partial chemical reaction to form a NbSi₂ compound; As the porosity was increased to 35%, a complete reaction has occurred to generate a Nb₅Si₃ intermetallic compound under the same impact strength (the flyer velocity about 2.35 km/s). Such results have shown that the complete reaction in the powder reactant of high-porosity powder mixture is mainly due to the high temperature generated by the pore collapse.

Keywords: nibium-silicon powder mixtures; high impact velocity; shock recovery; porosity; shock reaction