

基于数值模拟优化的大尺寸 Ni-Al 含能结构材料爆炸烧结及力学性能*

王益华¹, 化昊展¹, 周一博², 胡启文¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 铜陵化工集团新桥矿业有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 针对现有 Ni-Al 含能结构材料的爆炸烧结研究多局限于 $\Phi 18\text{mm}$ 及以下小尺寸试样的问题, 为制备兼具高致密度与高反应活性的大尺寸 Ni-Al 含能结构材料, 并验证尺寸放大的可行性, 选用平均粒径 $19.8\mu\text{m}$ 的 Ni 粉与 $24.7\mu\text{m}$ 的 Al 粉, 按 Ni 与 Al 的摩尔比为 1:1 配制混合粉末; 利用 AUTODYN 有限元模拟 $\Phi 18\text{mm}$ 爆炸烧结过程, 并结合理论计算优化工艺参数, 通过爆炸烧结法制备 $\Phi 50\text{mm}$ Ni-Al 含能结构材料。采用密度测试、扫描电镜、X 射线衍射分别表征试样致密度、微观组织与物相组成, 并通过准静态压缩实验测试热处理后的材料力学性能。结果表明, 制备的 $\Phi 50\text{mm}$ 样品平均致密度达 99.1%, 微观组织与 $\Phi 18\text{mm}$ 试样无明显差异; 烧结后仅检测到单质 Ni、Al 衍射峰, 未生成 Ni-Al 金属间化合物, 有利于保留了材料的后续反应活性; Al 相连续分布, Ni 颗粒均匀分散于其中, 两相分布均匀; 热处理后 $\Phi 50\text{mm}$ 试样平均抗压强度为 281.5 MPa, 平均失效应变为 17.8%, 与 $\Phi 18\text{mm}$ 试样力学性能基本一致。基于数值模拟与理论计算优化工艺参数, 可实现 Ni-Al 含能结构材料的大尺寸爆炸烧结制备。

关键词: Ni-Al 含能结构材料; 爆炸烧结; 反应活性; 力学性能

中图分类号: O521.3; O389; O521.9

文献标识码: A

含能结构材料^[1] (Energetic Structural Materials, ESMs) 是一种兼具强度和反应活性双重功能的新型复合材料。这类材料通常由金属/金属、金属/含氟聚合物或金属/金属氧化物等体系组成。金属间化合物类 ESMs 体积能量密度较高, 其中 W-Al 和 Ta-Al 体系具有较高的密度, 在 Ni-Al 体系中摩尔比为 1:1 时具有最高的反应热, Ni-Al 体系的体积能量密度 ($7.14\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$) 高于 TNT ($6.22\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[2]。得益于这一高能量释放特性, Ni-Al 体系在含能破片^[6]、含能药型罩^{[3][4]}、战斗部壳体^{[5][6]}等军事工程领域具有重要应用潜力。

目前, ESMs 主要以混合粉末或层状板材形式制备, 混合粉末类常通过等静压和冷喷涂等方法制备, 对于层状结构的 ESMs 一般采用累积叠轧和物理气相沉积方法来制备。混合粉末类材料为避免组分间发生反应, 通常还需要采用低温烧结和添加粘结剂来提高组分之间的结合强度, 导致制备的样品强度低、孔隙度高、密度小, 难以作为结构材料使用。Li 团队通过等静压成型制备了 Al-PTFE^{[8]-[11]}, 并研究了其力学性能和反应特性, 制备样品的最大强度为 111.41MPa。Hunt 等^[12]通过等静压技术制备多种 ESMs, 但致密度基本分布在 40%至 80%之间。Zhang 等^[13]采用等静压技术制备了三种 ESMs, 其中 Ni-Al ESMs 的致密度为 94.3%。Zhao 等^[14], Dean 等^[15]通过冷喷涂技术制备了孔隙率小于 2%的高致密 Ni-Al ESMs; Bacciochini 等^[16]使用纳米级 Ni-Al 混合粉末并结合冷喷涂技术, 控制工作温度, 成功制备了没有金属间化合物生成的 Ni-Al ESMs。冷等静压技术易于控制, 制备的 Ni-Al ESMs 具有高能量释放特点, 但存在力学性能差、孔隙率高等局限性; 冷喷涂法可用

*收稿日期: 2025-07-14; 修回日期: 2026-09-11

基金项目: 云南省基础研究计划项目 (202401CF070087)

作者简介: 王益华 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程爆破研究. E-mail: 785828244@qq.com

通讯作者: 胡启文 (1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事爆炸加工、材料动态力学行为及工程爆破研究. E-mail: jianghu4592@126.com

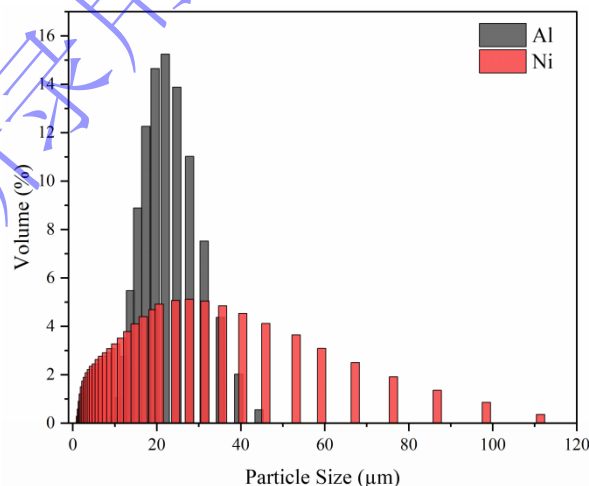
于复杂结构件的加工,但由于不同粉末之间的沉积效率不同,需要大量的实验来确定相关参数,增加了实验成本。此外,喷涂参数不当会出现涂层结构松散、粘附性差、孔洞率高等情况^{[17]-[20]}。

爆炸烧结又称为爆炸压实,利用炸药爆炸产生的瞬时高温高压效应,使粉末颗粒在瞬间处于高温和高压环境中,从而实现颗粒的烧结。在冲击波的作用下,粉末颗粒表面受到强烈的冲击和压缩,导致颗粒之间产生塑性变形并填充孔隙,颗粒间因绝热压缩形成的高温发生局部焊接,最终使颗粒以高致密度的形式聚合成致密块体^[21]。炸药爆炸过程中能量释放极快,使颗粒表面瞬间达到高温状态,但高温没有足够时间向颗粒内部扩散,主要作用于颗粒表层,内部仍可保持原始状态,因此该工艺适用于制备表层与内部组织差异较大的亚稳态材料。Zhou 等^[22]利用爆炸烧结方法,并通过调整混合粉末的初始密度、装药厚度和炸药爆速成功制备了致密度为 99% 的 Ni-Al ESMs,且组分间未发生金属间化合物反应。Du 等^{[23][24]}报道了爆炸烧结法制备了 Ni-Al, Ta-Al, Nb-Al, Mo-Al 和 W-Al 五种铝基金属间化合物类 ESMs,制备的材料接近完全致密,且在烧结过程中组分之间没有金属间化合物反应。本研究采用爆炸烧结工艺制备 Ni-Al ESMs。值得注意的是,当前关于 Ni-Al 体系等 ESMs 的爆炸烧结研究多集中于实验室级别的小尺寸试样(直径通常小于 20 mm)^{[25][25]},关于爆炸烧结制备更大尺寸 Ni-Al ESMs 的实验数据仍较少,而尺寸放大后的 ESMs 更接近含能破片、含能药型罩等国防工程应用需求。因此,确定大尺寸 ESMs 的爆炸烧结参数、阐明尺寸放大过程中的物理机制并评估其基本材料性质,具有明确研究意义。

本研究采用爆炸烧结方法制备 Ni-Al ESMs,通过数值模拟调节爆炸烧结参数,在不触发组分反应的前提下按几何比例放大烧结尺寸,制备高致密 $\Phi 50\text{ mm}$ 大直径样品;采用密度测试、X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)分别分析样品密度、物相组成和微观形貌;对烧结试样进行热处理并通过准静态压缩实验测试力学性能。

1 实验原料

实验选用的 Ni、Al 粉末的粒径分布通过激光粒度仪测试获得,每种粉末测试三次取平均值,用去离子水作为测试过程中的分散剂。经测试后, Ni 粉及 Al 粉的平均粒径分别为 $19.8\mu\text{m}$ 和 $24.7\mu\text{m}$,其粒径分布图如图 1(a)所示,未混合前的原始 Ni、Al 粉末分别如图 1(b)、(c)所示。混合粉末按照摩尔比 Ni:Al=1:1 进行配制。配制完成后,采用科晶 SFM-11 型 V 型混料机在 30r/min 的转速条件下混合 300min。



(a) Ni-Al particle size distribution diagram

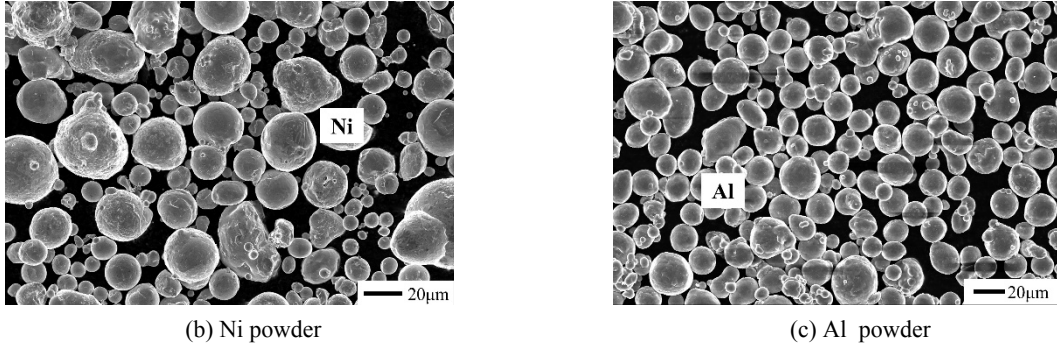


图 1 Ni、Al 粉末粒径分布及微观结构

Fig.1 Particle size distribution and microstructures of Ni and Al powders

2 实验与参数优化

2.1 $\Phi 18\text{mm}$ Ni-Al ESMs 的爆炸烧结实验

Zhou 等学者通过爆炸烧结制备了 $\Phi 18\text{mm}$ Ni-Al ESMs^[26]。将摩尔比 Ni:Al=1:1 的 Ni、Al 粉末混合均匀后,通过压力试验机压装在 $\Phi 18\text{mm}$ 的 45 号钢制样品管内,样品管端部用 45 号钢制堵头密封。随后将样品管放入 PVC 管中,并填充 ANFO 炸药,最后雷管引爆炸药使粉末固结。该实验所需器材包括: Ni-Al 粉末、45 号钢制样品管、铵油炸药、PVC 药筒、V 型混料机、雷管、压力试验机等。实验的相关参数信息如表 1 所示。

表1 $\Phi 18\text{mm}$ Ni-Al ESMs 爆炸烧结实验相关参数

Table 1 Experimental parameters for explosive sintering of $\Phi 18\text{mm}$ Ni-Al ESMs	
	Value
Particle size of Ni (μm)	20
Particle size of Al (μm)	25
Sample tube inner diameter (mm)	18
detonation velocity (m/s)	2300
Initial density (%)	60
Specimen relative density (%)	99.1
PVC tube inner diameter (mm)	70
PVC tube height (mm)	180

2.2 $\Phi 50\text{mm}$ Ni-Al ESMs 爆炸烧结过程模拟和实验参数优化

2.2.1 爆炸烧结 $\Phi 50\text{mm}$ Ni-Al ESMs 部分参数计算

Coker^[28]等通过柱面双管烧结的方法制备了 $\Phi 25\text{mm}$ 、 $\Phi 50\text{mm}$ 、 $\Phi 75\text{mm}$ 和 $\Phi 100\text{mm}$ 的圆柱形 Ti 合金粉末压实体。实验表明 $\Phi 100\text{mm}$ 压实体的微观组织结构与 $\Phi 25\text{mm}$ 压实体基本一致,说明爆炸烧结尺寸按比例放大具有可行性。结合现有实验条件,本研究将样品管直径定为 50 mm。根据轴对称爆炸烧结装置结构,容器/粉料系统单位体积的冲击能 E 由公式 (1)^[29]求得:

$$E = \frac{2\rho_m h_c d_m V_p^2}{d_c^2} \quad (1)$$

式中, ρ_m 为管状容器的密度, h_c 为容器的壁厚, d_m 为管状容器的平均直径, V_p 为容器的径向速度, d_c 为管状容器的内径。

基于能量和动量守恒导出的 Gurney 方程用以评估容器径向速度,由 Chadwick^[30]给出的修正的 Gurney 方程为:

$$V_p = \frac{V_D(0.612R)}{2+R} \quad (2)$$

式中, R 为炸药质量与容器质量之比, V_D 为炸药爆速。

以壁厚为 2mm、外径为 22mm 的 45 钢制样品管为例，用 ANFO 炸药起爆烧结，爆速为 $2300\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。设定 R 值为 0.77，由公式（2）估计 V_p 为 $391.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。结合相关参数 ρ_m 、 h_c 、 d_m 、 d_c 和 V_p ，利用公式（1）可得出容器—粉末系统单位体积的冲击能 E 为 $297.8\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。参数具体数值如表 2 所示。

表2 公式计算的相关参数及结果
Table 2 Parameters and calculated results

Parameter	Value	Formula
R	0.77	$V_p = \frac{V_D(0.612R)}{2+R}$
$V_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	391.3	
$\rho_m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7850	$E = \frac{2\rho_m h_c d_m V_p^2}{d_c^2}$
$h_c/(\text{m})$	2×10^{-3}	
$d_m/(\text{m})$	20×10^{-3}	
$d_c/(\text{m})$	18×10^{-3}	
$E/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$	297.8	

实验拟制备 $\Phi 50\text{ mm}$ Ni-Al ESMs，样品直径由 $\Phi 18\text{ mm}$ 放大至原来的 2.78 倍，相应 PVC 药筒尺寸同步放大。 $\Phi 50\text{mm}$ 的烧结炸药质量与容器质量之比沿用 $\Phi 18\text{mm}$ 的参数 $R=7.85$ ，实验选取相同爆速的炸药，最终计算得到 $\Phi 50\text{mm}$ 的样品管的壁厚为 5.3mm。

2. 2. 2 基于 $\Phi 18\text{mm}$ Ni-Al ESMs 模拟的参数优化

为验证上述参数的可行性并进一步优化 $\Phi 50\text{ mm}$ 烧结实验参数，本文以 $\Phi 18\text{mm}$ 的爆炸烧结数值模拟的结果作为参考标准，选用动力学有限元程序 AUTODYN 对 Ni-Al 混合粉末爆炸烧结的过程进行数值模拟，研究不同装药高度和装药厚度对粉体爆炸烧结过程中内部压力分布的影响。建立的有限元模型如图 2（a）所示，由外到内依次为空气、ANFO 炸药、样品管及 Ni-Al 混合粉末。空气、ANFO 炸药、样品管及 Ni-Al 混合粉末样品均采用 Euler 网格划分，选定网格尺寸为 0.5 mm。模型中观测点位分布如图 2（b）所示（沿混合粉末轴向依次分布），空气四周设置为流出边界。数值模拟中的空气、样品管和炸药选用模型和材料如表 3 所示。

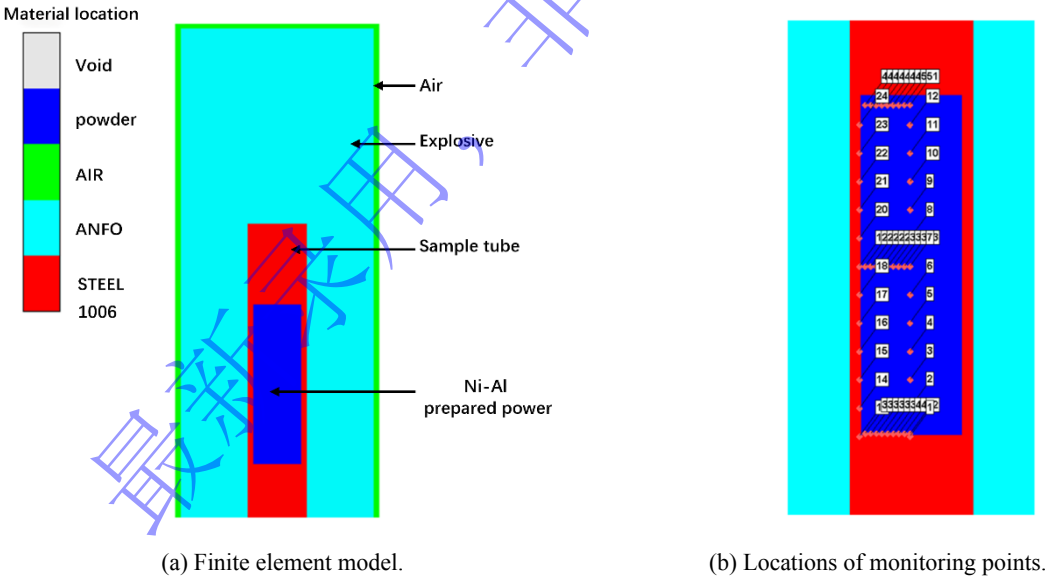


图 2 爆炸烧结 $\Phi 18\text{mm}$ Ni-Al ESMs 数值模拟

Fig.2 Numerical model for explosive sintering of the $\Phi 18\text{mm}$ Ni-Al ESMs

表3 爆炸烧结选用的材料模型

Table 3 Material models selected for explosive sintering

Material name	Equation of state	Constitutive model	Failure model
AIR	Ideal Gas	None	None
ANFO	JWL	None	None
STEEL1006	Shock	Johnson Cook	None

表 4 Ni-Al 混合粉末 P - α 模型参数

Table 4 Parameters of Ni-Al mixed powder model

$\rho_0/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$\rho_{\text{porous}}/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$C_0/$ ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	$P_E/$ (MPa)	$P_S/$ (GPa)	N	$K/$ (GPa)	$T_0/$ (K)	$C_V/$ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
5.79	2.22	4.33	57	5.8	4.63	109	293	547

Ni-Al 混合粉末的本构模型选用 P - α 模型，其材料参数^[31]如表 4 所示。 P - α 模型^{[32][33]}已经被广泛用来描述各向同性和各向异性粉末材料的弹性与塑性的压缩响应过程。模型中 α 代表粉末材料的膨胀系数， $\alpha=V/V_S$ ，其中 V 为多孔材料的体积， V_S 为在相同温度和压力条件下相对应的固体的体积。在此过程中，温度的作用往往被忽略，相应的参数都是在相同压力下做研究。

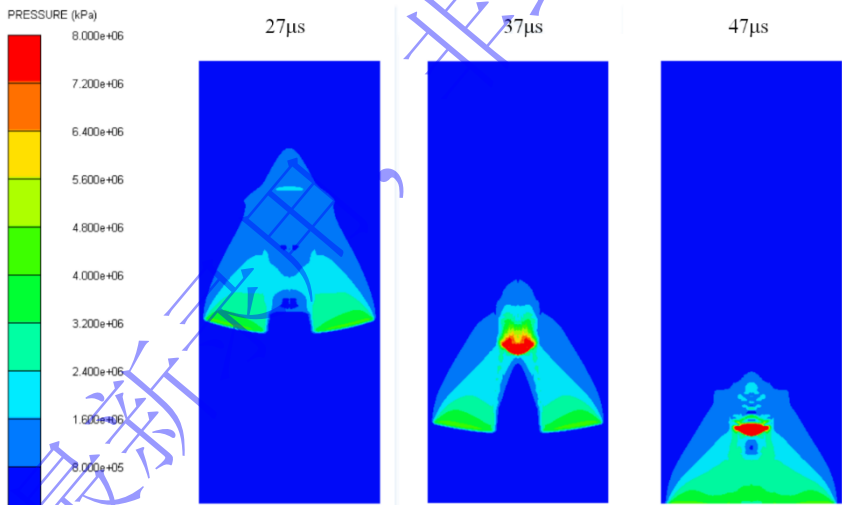
通常情况下爆炸烧结使用的是低爆速工业炸药，该种炸药的 JWL 参数大多通过理论估算获得，难以通过实验测定，可能引入模拟误差，因此本数值模拟均采用 AUTODYN 材料库自带的 ANFO 炸药参数，爆速为 4160m/s，如表 5 所示。计算得到的压力数据仅作为参考标准，不直接等同于烧结过程中 Ni-Al 混合粉末的真实压力状态。因此，本文主要将模拟结果用于比较不同装药方案下的相对压力水平，并以 $\Phi 18\text{ mm}$ 已验证工艺作为参数参照。

表5 ANFO炸药参数

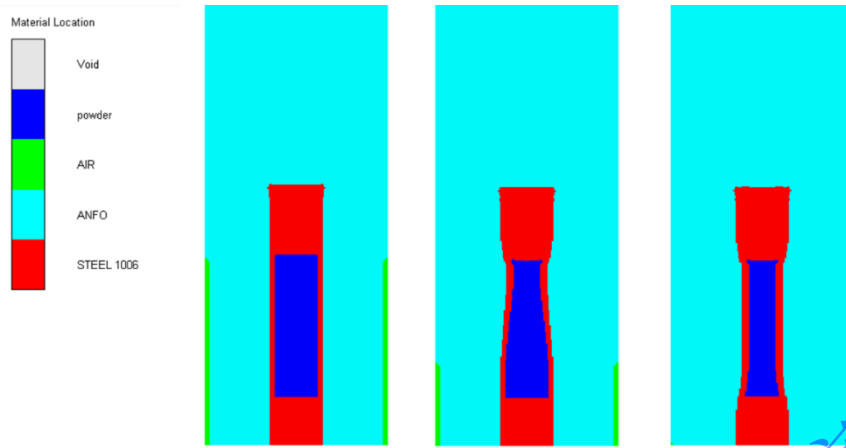
Table 5 Parameters of the ANFO explosive

	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$v_d/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$P_{\text{CJ}}/$ (GPa)	$A/$ (GPa)	$B/$ (GPa)	R_1	R_2	ω	$E_0/$ ($\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$)
ANFO	0.931	4160	5.15	49.46	1.891	3.907	1.118	0.3333	2.484

$\Phi 18\text{mm}$ 样品烧结过程的数值模拟如图 3 所示。从图 3 (a) 压力分布云图中可以看出，由于冲击波在混合粉末中的传播速度低于其在样品管中的传播速度，冲击波阵面在 Ni-Al 混合粉末中呈锥形传播。当 $t=27\mu\text{s}$ 时，爆轰波开始从两侧透射进入样品管； $t=37\mu\text{s}$ 时，从粉体两侧进入的爆轰波在中心处发生交汇，在中心形成高压区域； $t=47\mu\text{s}$ 时，粉体中爆轰波传播到底部，并在底部中心区域汇聚形成最高压区域，且粉体已基本完成压实。此外，模拟实验过程中材料变形如图 3 (b) 所示。



(a) Pressure distribution during sintering

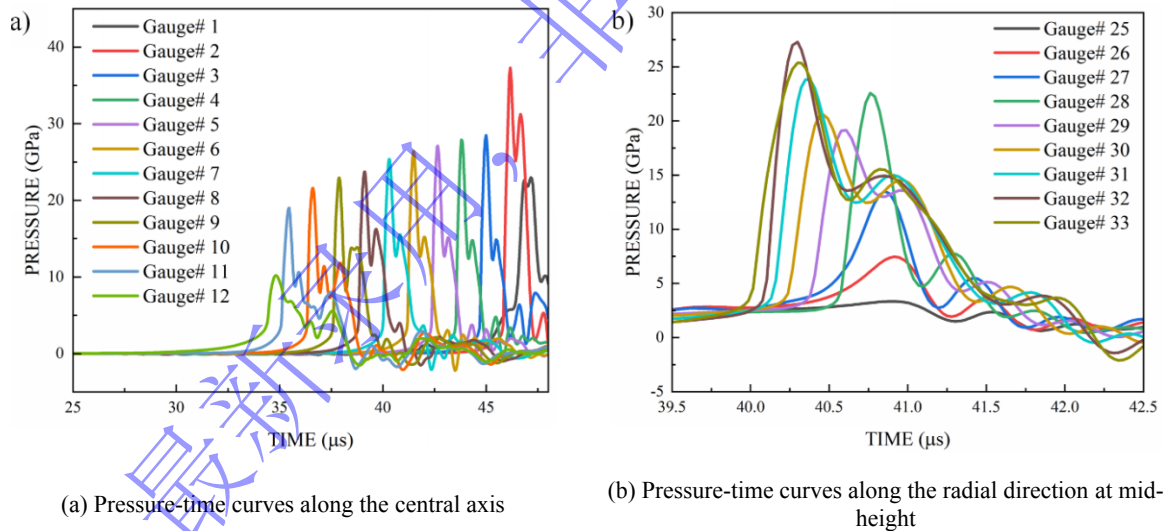


(b) Material deformation process

图 3 $\Phi 18\text{mm}$ 样品烧结过程的数值模拟

Fig.3 Numerical simulation of explosive sintering of the $\Phi 18\text{mm}$ sample

为采集混合粉末不同位置的压力数据，在混合粉末内部布置如图 2 (b) 所示观测点。当冲击波加载过后，读取混合粉末中心轴向和中间高度的横向观测点的数据，并绘制成如图 4 所示压力-时间曲线。从图 4 (a) 可以看出，在轴向方向上，混合粉末中心位置从高到低的压力曲线逐渐增加，压力从 10.1GPa 增加到 37GPa，平均压力为 24.3GPa。其中，由于观测点 2 位于粉末样品和钢制堵头的接触位置，受阻抗失配影响，其压力值高于其他观测点。在混合粉末中间高度的横向方向上，由于冲击波的汇聚作用，使粉体从外表到中心位置，压力呈现出逐渐增加趋势。从图 4 (b) 可以看出，在径向方向上，也是在冲击波汇聚作用的影响下，粉末从外向中心方向压力逐渐增加，在中心位置压力达到最大值。



(a) Pressure-time curves along the central axis

(b) Pressure-time curves along the radial direction at mid-height

图 4 $\Phi 18\text{mm}$ 样品烧结过程中各位置处观测点的压力-时间曲线

Fig. 4 Pressure-time curves at different monitoring points during explosive sintering of the $\Phi 18\text{mm}$ sample

通过式 (1) 计算得到 $\Phi 50\text{mm}$ 的样品管的壁厚为 5.3mm，为了后续实验的易操作性，样品管的装粉高度设计为 100mm。炸药质量与容器质量之比为 7.85，从而计算得到装药质量为 11341.7g。药筒尺寸选取内径 204mm，高度 397mm。根据计算得到的参数建立 $\Phi 50\text{mm}$ 的样品烧结有限元模型及模型中的观测点分布如图 5 所示。

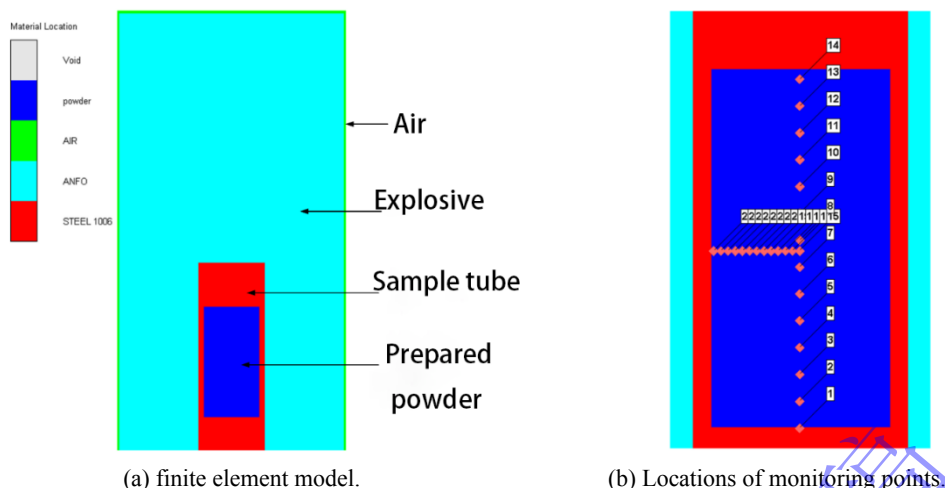


图 5 爆炸烧结 Φ50mm 的 Ni-Al ESMs 数值模拟

Fig. 5 Numerical model for explosive sintering of the Φ50 mm Ni-Al ESMs

图 6 展示了混合粉末中心轴向和中间高度的横向观测点的压力-时间曲线。如图 6 (a) 所示, 剔除阻抗失配导致的高压力值, Ni-Al 混合粉末中心的压力范围为 24GPa~68.7GPa, 平均压力为 43.9GPa。约为 Φ18 mm 压力水平的两倍。在爆炸烧结过程中, 过高的压力会导致混合粉末中心冲击波的汇聚作用超过冲击波的耗散作用, 从而出现过压实的情况并形成马赫孔, 甚至样品管内的 Ni-Al 混合粉末全部发生反应。因此, 可通过减小装药高度削弱冲击波汇聚作用, 样品管上部装药高度由原来的 227 mm 降低到 120 mm。

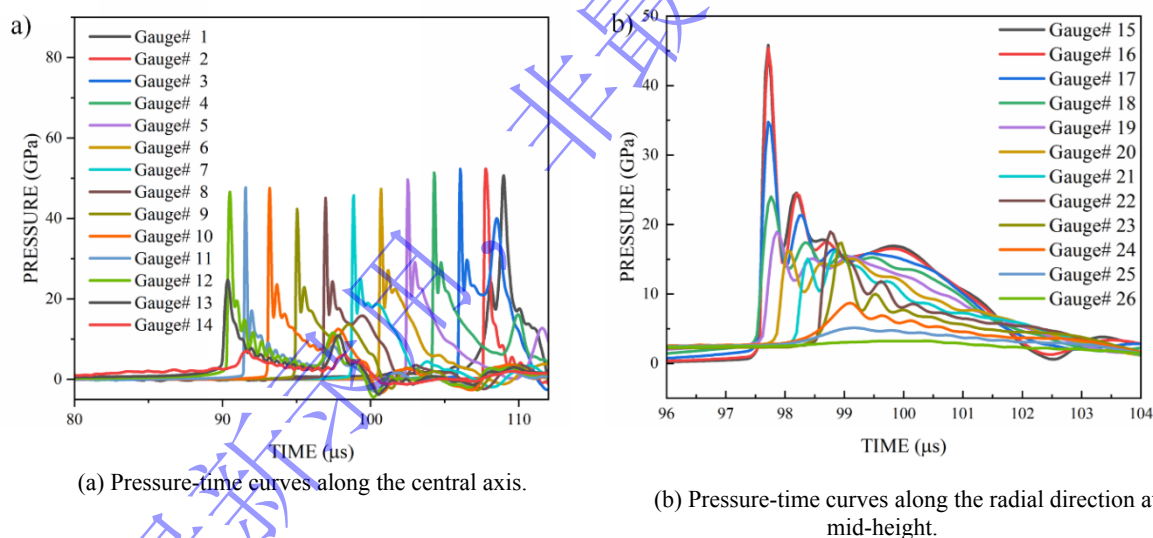


图 6 Φ50mm 的 Ni-Al ESMs 烧结过程中各位置处观测点的压力-时间曲线

Fig. 6 Pressure-time curves at different monitoring points during explosive sintering of the Φ50mm Ni-Al ESMs

2.2.3 Φ50mm Ni-Al ESMs 爆炸烧结模拟及实验参数确定

优化参数后的 Φ50mmNi-Al ESMs 爆炸烧结有限元模型及观测点如图 7 (a) 所示, 由图 7 (b) 可知优化后的 Φ50mmNi-Al ESMs 样品管中混合粉末中心位置的的压力范围为 10 GPa~29.6 GPa, 平均压力为 25.6 GPa, 与 Φ18mmNi-Al ESMs 样品管压力水平基本一致。

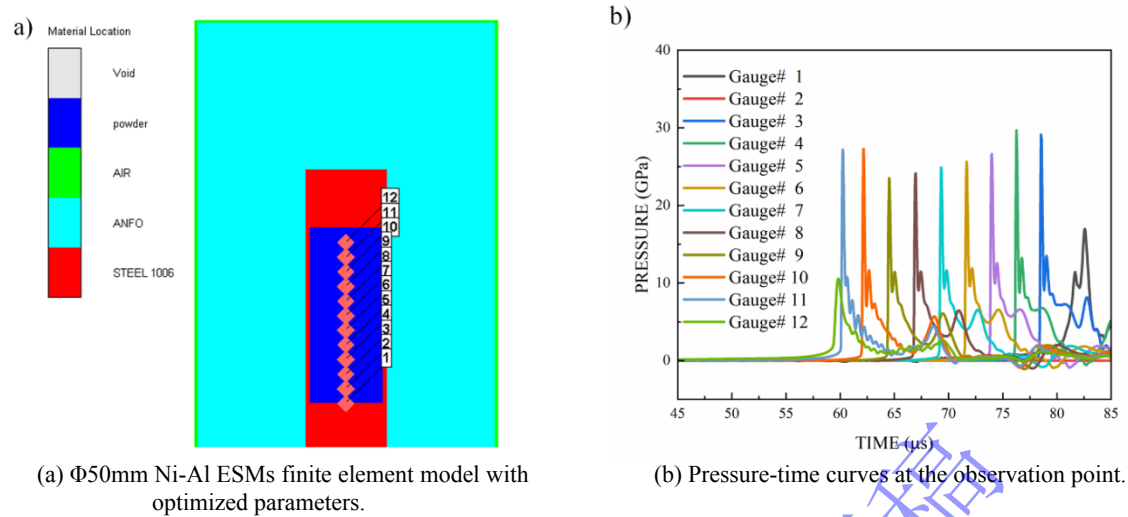


图 7 爆炸烧结 $\Phi 50\text{mm}$ Ni-Al ESMs 优化

Fig. 7 Optimization of Ni-Al ESMs with a 50-mm diameter for explosive sintering

综上所述，可以确定 $\Phi 50\text{ mm}$ Ni-Al ESMs 爆炸烧结实验的关键尺寸：样品管内径为 50 mm，壁厚为 5.3 mm，装粉高度为 100 mm，药筒内径为 204 mm，高度为 290 mm。

2.3 爆炸烧结制备 $\Phi 50\text{mm}$ Ni-Al ESMs

$\Phi 50\text{ mm}$ 爆炸烧结实验装置尺寸如表 6 所示，选取的混合粉末粒径为 $19.8\mu\text{m}$ 的 Ni 粉和 $24.7\mu\text{m}$ 的 Al 粉，封装好 Ni-Al 混合粉末的 $\Phi 50\text{mm}$ 的样品管如图 8 (a) 所示。爆炸烧结现场实验布置如图 8 (b) 所示，实验后回收的样品管如图 8 (c)，去除钢管后的 Ni-Al ESMs 如图 8 (d) 所示。

表 6 $\Phi 50\text{mm}$ Ni-Al 爆炸烧结实验装置尺寸

Table 6. Dimensions of the explosive-sintering device for the $\Phi 50\text{ mm}$ Ni-Al ESMs

Sample tube inner diameter/ (mm)	Sample tube wall thickness/ (mm)	Sample tube powder filling height/ (mm)	Cartridge inner diameter/ (mm)	Cartridge height/ (mm)	Explosive detonation velocity/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
50	5.3	100	204	290	2300

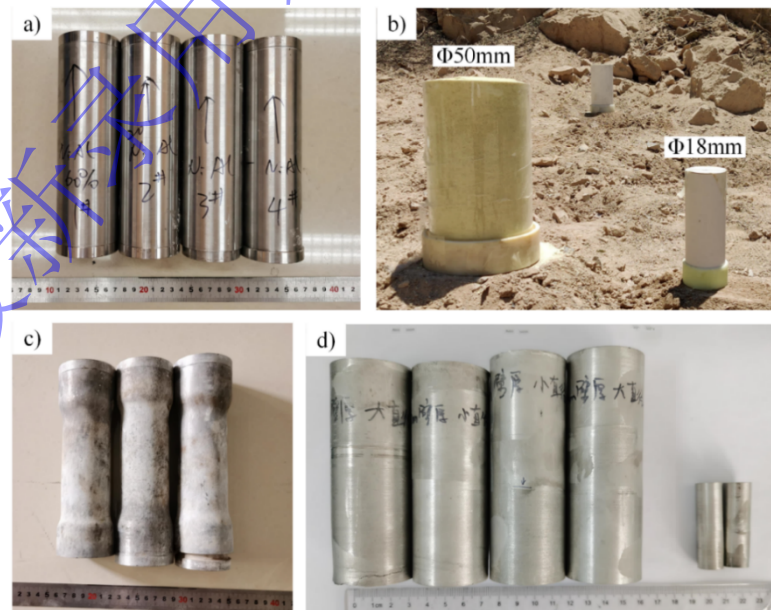


图 8 爆炸烧结制备 $\Phi 50\text{mm}$ Ni-Al ESMs

Fig.8 Preparation of the $\Phi 50\text{ mm}$ Ni-Al ESMs by explosive sintering

3 结果与分析

本研究通过密度测试测量烧结 $\Phi 50\text{mm}$ Ni-Al ESMs 样品密度；采用 SEM 和 XRD 分别表征样品微观形貌和物相组成；将制备的 Ni-Al ESMs 在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保温 300 min 进行热处理，利用准静态压缩实验测试其力学性能，并对压缩后样品的微观组织结构进行分析。

3.1 密度测试

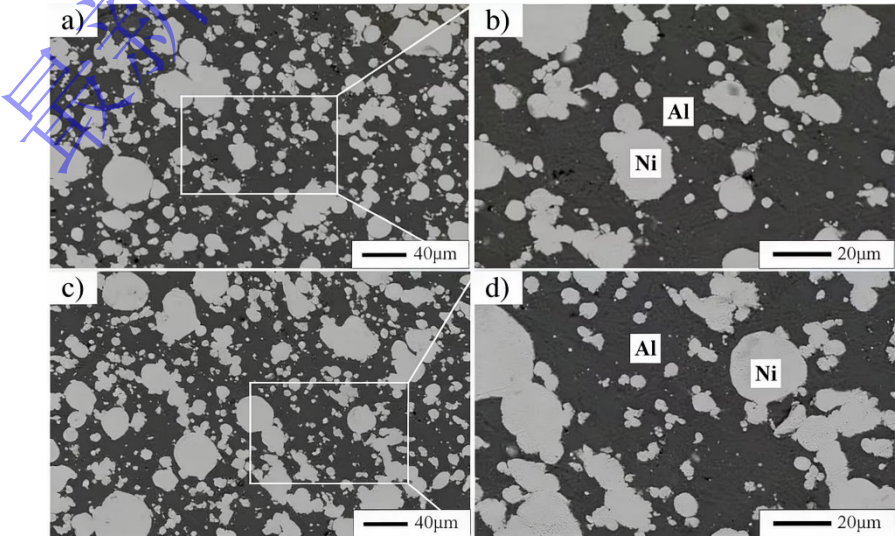
爆炸烧结制备的 Ni-Al ESMs 的密度测试结果如表 7 所示，Ni-Al 混合粉末最终烧结的两种直径样品平均密度均为 $5.121\text{g}/\text{cm}^3$ ，等摩尔比的 Ni-Al ESMs 理论密度（Theoretical density T.D.）为 $5.17\text{g}/\text{cm}^3$ ，平均致密度均为 $99.1\%\text{T.D.}$ 。

表 7 Ni-Al ESMs 密度测试结果
Table 7 Results of Ni-Al ESMs density test

Powder particle size gradation	Mixed powder diameter/(mm)	Initial relative density/(%T.D.)	Sintered density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Average density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Sintered relative density/(%T.D.)	Average relative density/(%T.D.)
19.8 μm Ni+ 24.7 μm Al	18	60	5.123	5.121	99.1	99.1%
	18	60	5.128		99.2	
	18	60	5.102		98.7	
	18	60	5.128		99.2	
	18	60	5.128		99.2	
	18	60	5.118		99.0	
	18	60	5.123		99.1	
	18	60	5.133		99.3	
	18	60	5.118		99.0	
	18	60	5.113		98.9	
19.8 μm Ni+ 24.7 μm Al	50	60	5.128	5.121	99.2	99.1%
	50	60	5.123		99.1	
	50	60	5.123		99.1	
	50	60	5.113		98.9	

3.2 SEM/BSE 分析

图 9 为爆炸烧结制备得到的两种直径 Ni-Al ESMs 的 SEM/BSE 测试结果。图 9（a）（b）和（c）（d）分别为 $19.8\mu\text{m}$ Ni 和 $24.7\mu\text{m}$ Al 的粒径配比制备的 $\Phi 18\text{mm}$ 和 $\Phi 50\text{mm}$ 的块体微观形貌，其中亮色 Ni 颗粒分散于 Al 相中。从图中可以看出，Al 颗粒发生显著的塑性变形，而 Ni 颗粒基本保持原有的球形，未发生明显的塑性变形。Ni-Al 两相分布均匀，没有裂纹，仅观察到少量孔洞，这些孔洞是在砂纸抛磨试样的过程中 Ni 颗粒从 Al 基体中脱落而造成的。对于同种粒径配比的混合粉末，两种直径烧结得到的块体的微观结构基本一致，没有明显的差异，同样未发现裂纹，少量孔洞主要来自砂纸抛磨过程中的颗粒脱粘。



(a)(b): Ni-Al ESMs samples with an 18-mm diameter; (c)(d): Ni-Al ESMs samples with a 50-mm diameter

图 9 两种直径的 Ni-Al ESMs 在不同放大倍数下的 SEM 图

Fig.9 SEM images of Ni-Al ESMs with two different diameters at different magnifications

3.3 XRD 分析

在爆炸烧结的绝热环境下, Ni-Al 体系可能发生金属间反应, 这不仅会降低 Ni-Al ESMs 的反应活性, 还会因脆性 Ni-Al 金属间化合物生成而削弱 ESMs 的力学性能, 因此在制备过程中应尽量避免。从图 10 XRD 图谱中可以看出爆炸烧结制备的两种 Ni-Al ESMs 样品仅出现 Ni 和 Al 的衍射峰, 未出现 Ni-Al 金属间化合物衍射峰。这表明无论是 $\Phi 18\text{mm}$ 还是 $\Phi 50\text{mm}$ 爆炸烧结制备的 Ni-Al ESMs 均没有 Ni-Al 金属间化合物生成, Ni-Al ESMs 未生成明显金属间化合物, 为后续反应活性保留提供了物相依据, 也印证了爆炸烧结实验参数选取的合理性。

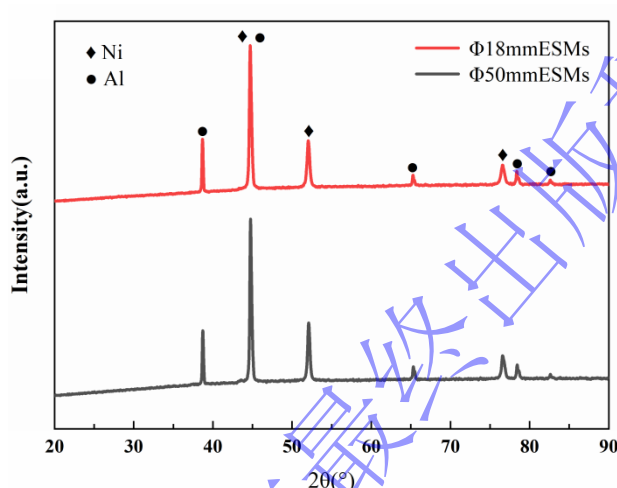


图 10 两种直径的 Ni-Al ESMs 的 XRD 图谱

Fig. 10 XRD spectra of Ni-Al ESMs with two different diameters

3.4 热处理与准静态压缩

图 11 为 $\Phi 18\text{mm}$ 和 $\Phi 50\text{mm}$ 的 Ni-Al ESMs 热处理前后的准静态压缩应力-应变曲线。每种试样均重复测试三次并取平均值。 $\Phi 18\text{mm}$ 试样热处理前的原始试样的平均抗压强度为 257.4MPa, 平均失效应变为 9.3%, 热处理后试样的平均抗压强度和平均失效应变分别为 276.1MPa 和 17.2%; $\Phi 50\text{mm}$ 试样热处理前的原始试样的平均抗压强度为 258.0MPa, 平均失效应变为 9.1%, 热处理后试样的平均抗压强度和平均失效应变分别为 281.5MPa 和 17.8%。通过对比可知, $\Phi 18\text{mm}$ 与 $\Phi 50\text{mm}$ 试样在同一热处理状态下的抗压强度和失效应变接近, 说明尺寸放大未明显削弱其准静态压缩性能。热处理消除了材料内的残余应力和缺陷, 使材料的屈服强度略有下降, 且材料内无 Ni-Al 金属间化合物生成, 从而提升了材料的塑性。

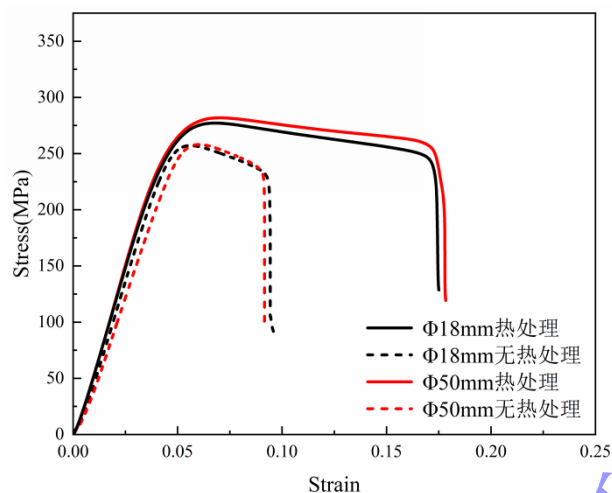
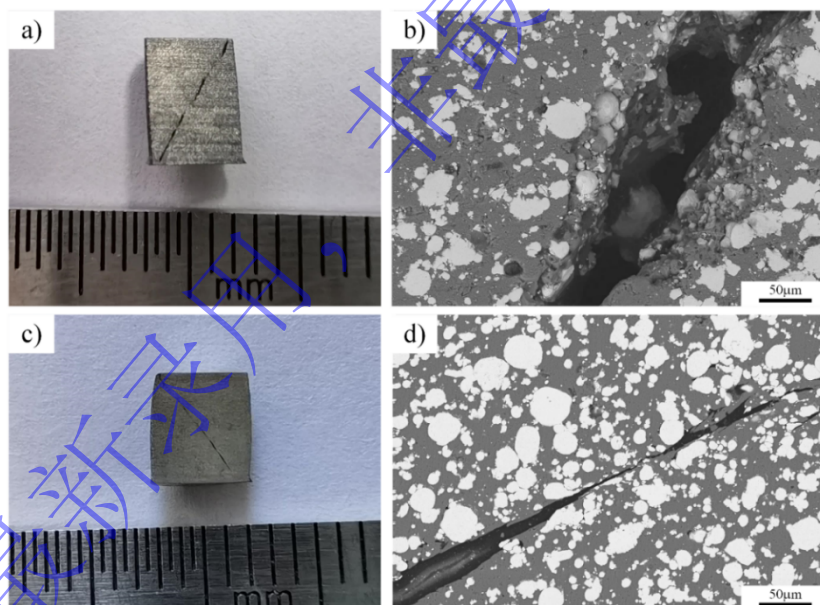


图 11 $\Phi 18\text{mm}$ Ni-Al ESMs 热处理前后准静态加载条件下应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of 18-mm diameter Ni-Al ESMs under quasi-static loading conditions before and after heat treatment

图 12 为准静态压缩后 Ni-Al ESMs 试样纵截面和裂纹的微观形貌 SEM 图。从图中可以看出，准静态压缩后试样均产生了 45° 剪切裂纹，裂纹在 Ni-Al 界面之间扩展。热处理后形成的压缩裂纹较窄，可能与组分间结合强度提高有关。与原始试样的 SEM 微观组织（图 9）相比，在准静态压缩测试后 Ni-Al ESMs 试样中，仅有 Al 相产生了塑性变形，而游离在 Al 相中的 Ni 颗粒由于其较高的硬度基本保持原有的颗粒形状。



(a)(b) Samples before heat treatment; (c)(d) samples after heat treatment

图 12 准静态压缩后 Ni-Al ESMs 试样纵截面和裂纹的微观形貌 SEM 图

Fig. 12 SEM images of longitudinal section and crack morphology of Ni-Al ESMs samples after quasi-static compression

4 结论

本文基于 $\Phi 18\text{ mm}$ Ni-Al ESMs 的制备过程与数值模拟，结合理论计算制备了 $\Phi 50\text{ mm}$ 大直径 Ni-Al ESMs。通过密度测试、SEM 和 XRD 分析其微观结构和物相组成，并对热处理后的样品进行力学性能测试，主要得出以下结论：

(1) 依据 $\Phi 18\text{mm}$ 小直径 Ni-Al ESMs 爆炸烧结过程的模拟结果完成参数优化, 采用 $19.8\mu\text{mNi}$ 和 $24.7\mu\text{mAl}$ 的粒径配比并结合理论计算与修正后的参数, 通过爆炸烧结法成功制备了致密度为 99.1% 的 $\Phi 50\text{mmNi-Al}$ ESMs。结果表明, $\Phi 18\text{mm}$ 工艺向 $\Phi 50\text{mm}$ 放大具有可行性。

(2) 通过 SEM 和 XRD 分析, 材料中未检测到金属间化合物生成, 样品呈现 Ni-Al 两相均匀分布的微观组织结构。

(3) 准静态压缩后, Ni-Al ESMs 试样产生 45° 剪切裂纹, 仅有 Al 相产生了塑性变形, 而游离在 Al 相中的 Ni 颗粒由于其较高的硬度基本保持原有的颗粒形状。

(4) 热处理加强了组分间的结合强度, 使压缩产生的裂纹相对较窄, 热处理后的 $\Phi 50\text{mm Ni-Al}$ ESMs 试样抗压强度和失效应变分别达到 281.5 MPa 和 17.8%, 且所制备的 $\Phi 50\text{mm}$ 试样与 $\Phi 18\text{mm}$ 试样性质基本一致。

最新录用,
非最终出版稿

参考文献

- [1] 白书欣,陈荣.含能结构材料:潜力、挑战与发展策略[J].含能材料,2026,34(4):335-337.
BAI S X, CHEN R. Energetic Structural Materials: Potentials, Challenges and Development Strategies[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2026, 34(4): 335-337.
- [2] Yaws C L, Gabbula C. Yaws' Handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds [M]. Norwich, Knovel, 2003.
- [3] 强遥,吴越,李小军,等. Al-Ni-Mg 含能破片对 2A12 铝靶的侵彻性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(11): 26-33.
QIANG Y, WU Y, LI X J, et al. Research on penetration performance of Al-Ni-Mg energetic fragments against 2A12 aluminum targets[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(11): 26-33.
- [4] 陈京生,李清,陈彦,等.含能药型罩及其标准化的研究进展[J].兵器装备工程学报,2022,43(9):128-135.
CHEN J S, LI Q, CHEN Y, et al. Research progress of energetic liner and its standardization[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(9): 128-135.
- [5] 李延,王伟,张雷雷,等. PTFE 基含能药型罩射流释能特性及影响因素[J].含能材料,2021,29(7):617-624.
LI D, WANG W, ZHANG L L, et al. Jet energy release characteristics and influencing factors of the ptfe-based energetic liner[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(7): 617-624.
- [6] 张博,王海福,郑元枫,等.活性复合双模战斗部对钢靶毁伤行为研究[J].北京理工大学学报, 2025, 45(8): 855-865.
ZHANG B, WANG H F, ZHENG Y F, et al. Study on damage of reactive composite dual-mode warhead to steel target[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2025, 45(8): 855-865.
- [7] 郑添春,郭磊,焦延博,等.含能穿甲弹毁伤反舰导弹战斗部能力分析[J].兵器装备工程学报, 2021, 42(11): 96-101.
ZHENG T C, GUO L, JIAO Y B, et al. Analysis of Damage Ability to Warhead of Antiship Missile with Energetic Armour-Piercing Projectile[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(11): 96-101.
- [8] Huang J Y, Fang X, Wu S, et al. Mechanical and reactive properties of PTFE/Al/MoO₃ Reactive composites [J]. Materials(Basel), 2018, 11(7): 1200-1214.
- [9] Huang J Y, Fang X, Li Y C, et al. The Mechanical and Reaction Behavior of PTFE/Al/Fe₂O₃ under IMPact and Quasi-Static Compression [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017:1-9.
- [10] Wu J X, Wang H, Fang X, et al. Investigation on the Thermal Behavior, Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites Enhanced by Ni Particle [J]. Materials(Basel), 2018, 11(9):1741-1751.
- [11] Wu J X, Fang X, Gao Z R, et al. Investigation on Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites with Different Al Particle Size [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018:1-10.
- [12] Hunt E M, Pantoya M L. Impact sensitivity of intermetallic nanocomposites: A study on compositional and bulk density [J]. Intermetallics, 2010, 18(8): 1612-1616.
- [13] Xiong W, Zhang X, Wu Y, et al. Influence of additives on microstructures, mechanical properties and shock-induced reaction characteristics of Al/Ni composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 648: 540-549.

- [14] Zhao H, Tan C, Yu X, et al. Enhanced reactivity of Ni-Al reactive material formed by cold spraying combined with cold-pack rolling [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 741: 883-894.
- [15] Dean S W, Potter J K, Yetter R A, et al. Energetic intermetallic materials formed by cold spray [J]. *Intermetallics*, 2013, 43: 121-130.
- [16] Bacciochini A, Bourdon-Lafeur S, Poupart C, et al. Ni-Al Nanoscale Energetic Materials: Phenomena Involved During the Manufacturing of Bulk Samples by Cold Spray [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(7): 1142-1148.
- [17] 耿铁强.Ni-Al 含能结构材料的制备及性能研究 [D].沈阳: 沈阳理工大学,2019:9-10.
GENG T Q.Preparation and Properties of Ni-Al Energetic Structural Materials [D].Shenyang:Shenyang Ligong University,2019:9-10.
- [18] 王存洪,曹玉武,陈进,等.金属型含能材料力学行为研究进展[J].*爆炸与冲击*,2023,43(7):3-24.
WANG C H,CAO Y W,CHEN J,et al.Research progress in mechanical behaviors of metallic energetic materials[J].*Explosion and Shock Waves*,2023,43(7):3-24.
- [19] 王梦宇.冷喷涂 Al/Ni 金属含能材料制备及组织性能 [D].沈阳: 沈阳工业大学,2024:12.
WANG M Y.Preparation, microstructure and properties of cold sprayed Al/Ni metal energetic materials [D].Shenyang:Shenyang University of Technology,2024:12.
- [20] 高鹏.冷喷涂制备 Al/Ni 含能材料的工艺及性能研究 [D].沈阳: 沈阳工业大学,2023:1-2.
GAO P.Technology and Microstructure Properties of Al / Ni Energetic Materials Prepared by Cold Spraying [D].Shenyang:Shenyang University of Technology,2023:1-2
- [21] 胡启文,周一博,郭登刚,等.爆炸烧结制备 W-Ni-Al 全金属含能结构材料的微结构及释能特性研究 [J].*兵工学报*,2025,46(12):223-236.
HU Q W,ZHOU Y B,GUO D G,et al.Microstructure and energy release characteristics of W-Ni-Al all-metal energy structural materials prepared by explosive sintering[J].*Acta Armamentarii*,2025,46(12):223-236.
- [22] Zhou Q, Hu Q W, Wang B, et al.Fabrication and characterization of the Ni-Al energetic structural material with high energy density and mechanical properties[J].*Journal of Alloys and Compounds*, 2020,832.
- [23] Du S W, Aydelotte B, Fondse D, et al. Explosive compactions of intermetallic-forming powder mixtures for fabricating structural energetic materials[C]. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2009,1195:498-501.
- [24] Wei C T, Vitali E, Jiang F, et al. Quasi-static and dynamic response of explosively consolidated metal-aluminum powder mixtures [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(3): 1418-32.
- [25] 李晓杰,王占磊,闫鸿浩,等.爆炸压实制取 W-Cu 纳米复合材料的实验研究[J].*高压物理学报*, 2010,24(5):368-372.
LI X J,WANG Z L,YAN H H,et al.Experimental study on explosive compaction of W-Cu nanocomposites[J].*Chinese Journal of High Pressure Physics*,2010,24(5):368-372.
- [26] 王比,安二峰,陈鹏万,等.爆炸烧结制备 W-Al 含能结构材料及其准静态压缩特性研究[J].*高压物理学报*,2019,33(6):68-76.
WANG B,AN R F,CEHN P W,et al.Fabrication of w-al energetic structural materials by explosive consolidationand investigation of its quasi-static compression properties[J].*Chinese Journal of High Pressure Physics*,2019,33(6),68-76.
- [27] Qiwen H,Rui L,Qiang Z,et al.Effects of microstructure on mechanical and energy release properties of Ni-Al energetic structural materials[J].*Materials Science & Engineering A*,2022,849.
- [28] Coker H L, Meyers M A, Wessels J F. Dynamic consolidation of rapidly solidified titanium alloy

- powders by explosives [J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(5): 1277-1286.
- [29] Prummer R. Explosive Compaction of Powders and Composites[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006: 1, 42-101.
- [30] Chadwick M. Some aspects of explosive welding in different geometries[C]. Proc. Select Conf. on Explosive Welding. The Welding Institute, 1968.
- [31] Fredenburg D A, Thadhani N N. On the applicability of the P- α and P- λ models to describe the dynamic compaction response of highly heterogeneous powder mixtures[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(4): 043507.
- [32] Fritz M G, Jr. S J S, Grapes D M, et al. Thresholds for igniting exothermic reactions in Al/Ni multilayers using pulses of electrical, mechanical, and thermal energy[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(1): 014901.
- [33] Grapes D M, Weihs P T. Exploring the reaction mechanism in self-propagating Al/Ni multilayers by adding inert material[J]. Combustion and Flame, 2016, 172: 105-115.

Explosive Sintering and Mechanical Properties of Large-Sized Ni-Al Energetic Structural Materials Optimized via Numerical Simulations

WANG Yihua¹, HUA Haozhan¹, ZHOU Yibo², HU Qiwen¹

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Tongling Chemical Group Xinqiao Mining Co., Ltd., Tongling 244000, Anhui, China)

Abstract: Current research on explosive sintering of Ni-Al energetic structural materials is mostly restricted to small-diameter specimens of $\Phi 18$ mm and below. To fabricate large-size Ni-Al energetic structural materials with both high relative density and superior reaction reactivity and validate the feasibility of specimen scale-up, nickel powder with an average particle size of $19.8\ \mu\text{m}$ and aluminum powder with an average particle size of $24.7\ \mu\text{m}$ were blended at a molar ratio Ni:Al = 1:1. The explosive sintering process of $\Phi 18$ mm samples was simulated via the AUTODYN finite element code, and process parameters were optimized with theoretical calculations. Large-size $\Phi 50$ mm Ni-Al energetic structural materials were subsequently manufactured by explosive sintering. Density measurement, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD) were adopted to characterize the relative density, microstructure, and phase composition of the specimens, respectively. Quasi-static compression tests were carried out to evaluate the mechanical properties of heat-treated materials. The experimental results reveal that the as-fabricated $\Phi 50$ mm samples possess an average relative density of 99.1%, and their microstructures show no obvious distinction from those of $\Phi 18$ mm specimens. Only diffraction peaks of elemental Ni and Al are identified after sintering, with no Ni-Al intermetallic compounds formed, which facilitates the retention of subsequent chemical reactivity of the material. The Al phase presents a continuous distribution, with Ni particles homogeneously dispersed inside, leading to uniform dual-phase distribution. After heat treatment, the $\Phi 50$ mm specimens achieve an average compressive strength of 281.5

MPa and an average failure strain of 17.8%, whose mechanical properties are roughly equivalent to those of $\Phi 18$ mm counterparts. It is concluded that large-size fabrication of Ni-Al energetic structural materials via explosive sintering can be realized by optimizing process parameters on the basis of numerical simulations and theoretical calculations.

Keywords: Ni-Al energetic structural materials; explosive sintering; reaction reactivity; microstructure; mechanical properties

最新录用，
非最终出版稿