

柱面聚合激波作用下金属的烧结机理

高举贤 邵丙璜 张科 郑哲敏

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文以表面镀膜的金属丝束替代粉末,研究了柱面聚合激波作用下二维的烧结过程,避免了粉末在三维空间分布的随意性,从而能充分显示烧结的典型过程.对颗粒变形、表层流动规律给出清晰的图象.在形貌上和高温区的分布与 Williamson 的二维数值计算结果一致.

关键词 爆炸烧结,柱面聚合激波

近年来,激波已用于产生动态高压高温烧结各种粉末,它可实现非常高的压力(10^2 GPa)和温度(10^3 K),高温持续时间极短,主要集中在颗粒表层,冷却速度很高,可在爆炸烧结后仍保持高速急冷粉末原有的非平衡态或亚稳态,使非晶或微晶粉末的一切特殊性质得以保留.因此,爆炸烧结为研制和发展新材料开辟了崭新途径.

激波烧结大体分为两种加载方式.一是用轻气炮或炸药平面棱镜产生平面激波,另一种是用柱形装药产生聚合激波,后者成本低,适于大规模生产较大尺寸工件. Perry^[1]对聚合激波的产生和稳定性进行过系统的研究. Payne^[2]给出柱面聚合激波的数值计算方法,对多孔介质的状态方程 Carroll^[3]给出修正的 P - α 模型 Williamson^[4]为了从颗粒尺度研究粉末烧结规律,将粉末的激波烧结简化为平面问题,即以丝束替代粉末进行了数值计算,其结果在烧结机理的研究上取得重要进展.

本文以丝束替代粉末研究聚合激波作用下的烧结机理,将三维简化为二维,避免了粉末在三维空间分布的随意性,从而能充分显示烧结的典型过程,给出有意义的结果.

1 实验工作

采用不同直径的铁丝(含 0.10% C)替代粉末,在丝表面镀以 $15\mu\text{m}$ 厚的锡黄铜.烧结后对黄铜层的厚度、成分、组织结构进行了系统分析.对铁丝表面进行酸洗和未酸洗两种处理,丝径由 $300\mu\text{m}$ 变化至 $2500\mu\text{m}$ (实际爆炸烧结用粉末,不同作者所用粉末的颗粒度变化范围很大,其直径由 $0.5\mu\text{m}$ 至 $1130\mu\text{m}$).装填密度用低倍照相和定量金相加以确定.烧结后距试件起爆端同样距离处,垂直于试件轴切取试样,进行金相和电子显微镜观测及显微硬度测

1989年9月14日收到初稿;1990年3月24日收到修改稿.

本文通讯联系人:高举贤,北京(100083)中国科学院力学研究所

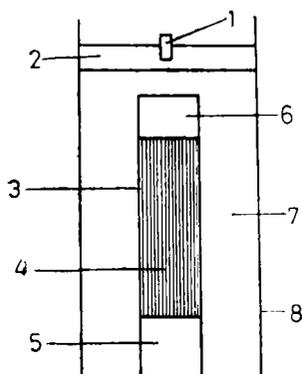


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of explosive consolidation assembly

1—detonator; 2—datasheet; 3—steel tube; 4—iron wire;
5—momentum trap; 6—wooden column; 7—explosive;
8—cardboard

定, 对成分变化进行了能谱分析。

为了尽可能模拟实际粉末的烧结条件, 采用滑移爆轰, 爆炸烧结装置如图 1 所示。采用铍油和黑索金混合炸药, 以变化爆压 p_H 和比冲量 I (单位面积冲量)。用粉状黑索金做传爆药, 8 号电雷管引爆。对不同组分炸药、装药密度及药厚进行了爆速测量, 据此计算爆轰波参数。

2 实验结果

实验条件及典型数据列于表 1。在几乎所有参数都相近的条件下 (见 1 至 3), 烧结效果却有明显的差别, 表面酸洗或镀黄铜的试样都烧结很好, 未酸洗仍保留氧化膜的试样完全没焊合。4—6 的结果也同样说明这个问题, 可见表面状态 (如氧化皮) 对烧结质量影响很大。

图 2 给出 Williamson^[5]用 CSQII Code 进行二维模拟颗粒烧结过程的计算结果, 图 3 是我们的实验结果。两者压力变化范围相近 (前者 7—42GPa, 后者 8—30GPa), 丝都是

表 1 激波烧结实验数据

Table 1 Experimental data of shock wave consolidation

No.	Wire dia. μm	Surface condition	Initial density %	Container		Detonation		Specific Loading impulsion J/cm ² ·s	Bonding time μs	Melting percent %	Melting area %
				Outer dia. mm	Wall thick mm	Speed mm/μs	Press. GPa				
1	2370	brass-plated	76	25	1	4.8	5.8	125	14.1	100	4
2	2350	pickled	76	25	1	4.5	5.1	134	15.1	100	6
3	2500	oxide	87	25	1	4.8	6.5	149	15.5	0	0
4	540	brass-plated	82	14	1.5	5.4	9.3	290	14.1	100	15
5	700	pickled	81	14	1.5	4.1	4.8	196	18.5	100	5
6	500	oxide	68	14	1.5	4.1	4.8	196	18.5	5	1

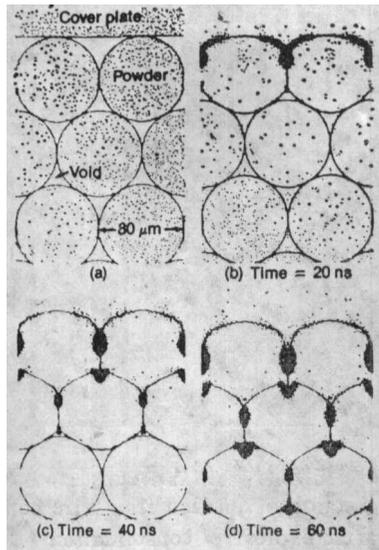


图 2 Willidson 的计算结果

Fig. 2 Calculational result. Black spots denoting high temperature areas

(a) numerical simulation in microlevel; (b) time 20 ns; (c) time 40 ns; (d) time 60 ns

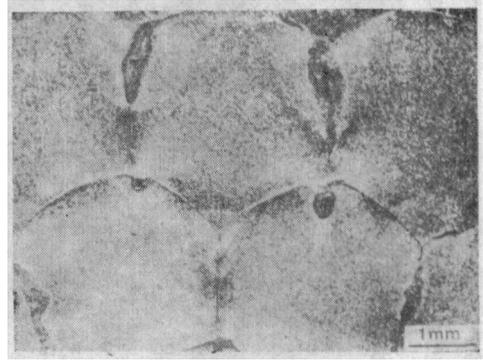


图 3 实验结果

Fig. 3 Section of brass-plated iron wire compact. Collective brass zone and melted zone showing distribution of high temperature zone

密排。虽然他用的是平面波加载，我们用的是聚合波加载，但靠近包套部位曲率半径很大，波形有相似之处。颗粒的变形和高温区的分布与 Williamson 的计算结果非常一致。金相和显微硬度检验证明，这些高温区确实发生了熔化，可见温度幅值也与 Williamson 的计算结果相近。从某种意义上说，我们的实验结果是对 Williamson 计算结果的定性验证。

图 4 为爆炸烧结后黄铜层的流动形貌。可见接近空隙周围厚度变化最大，相应于图 2 中的高温区，黄铜堆积最厚。A 点可见波浪形的黄铜熔化区，它是界面流动失稳的痕迹，该处烧结前缝隙较大；B 点为射流侵入形成的高温区；C 点为黄铜与 Fe 基体形成的新相高温区，能谱分析表明该处形成复杂的合金相，可看到冷却后形成的裂纹，此处烧结前缝隙最大；D 点为 Fe 基体直接焊合的部位，没有黄铜存在，扫描电镜观察表明，焊缝两边产生剧烈的塑性流动，但焊接处既无熔化痕迹，也无相变发生，类似于摩擦焊和压力焊。黄铜层厚度变化实测表明，除高温汇集区外，一般厚度变化为 $5-10\mu\text{m}$ ，即颗粒表面的高温塑性流动层的厚度，仅相当于颗粒半径的千分之几，是非常薄的一层。图 3 中 O 点是形成射流侵入相邻颗粒最典型的例证。射流侵入口小，侵入坑内形成含有 Cu 和 Fe 的复杂合金相。图 3 与图 4 相对照，可看出颗粒初始排列状态和空隙的大小对颗粒的变形、高温区分布和形态有明显影响。由此推论，颗粒间相对位移量（包括平移和转动）和相对运动速度与初始粉末装填密度有关。

图 5 是酸洗铁丝爆炸烧结后横截面，相应于图 2 中高温区附近。金相研究表明，高温区都有一个共同特征，存在 Coring 现象。即紧邻颗粒基体有一层白色不含珠光体的铁素体（原始组织为铁素体加珠光体），是熔化后偏析结晶的产物，它包围着深色类似铸态组织的区域，该区经高倍金相显微镜和扫描电镜鉴别为板条状马氏体组织，显微硬度 HV510—730，围绕它的白色纯铁素体区显微硬度 HV 170—195，与烧结前铁素体初始硬度相当。高温区下边

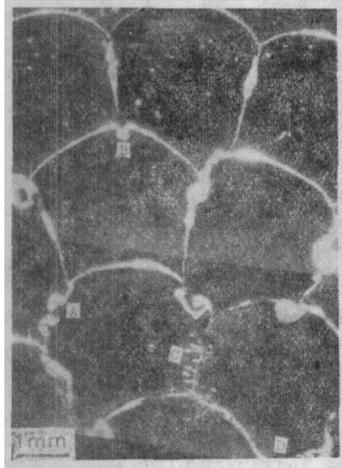


图 4 黄铜层流动形貌

Fig. 4 Section of brass-plated iron wire compact after explosive consolidation
 A—wave brass melting zone;
 B—high temperature zone formed by jet penetrating;
 C—high temperature zone formed by new mixed phase of iron and brass;
 D—directly welded zone among iron wires without brass

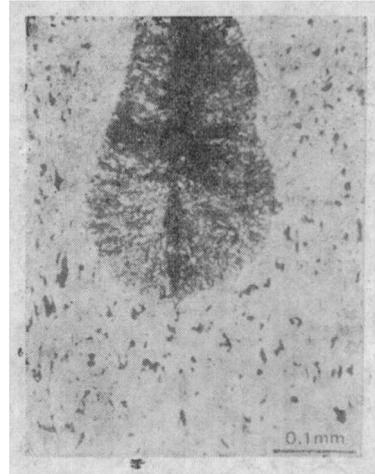


图 5 酸洗丝爆炸烧结后颗粒界面焊合形貌
 Fig. 5 Section of pickled iron wire compact after explosive consolidation

Upper dark area—high temperature melting zone;
 Around white area—segregated ferrite grains around martensite; Lower—non-melted zone

明显可见非熔化焊合, 该处既无相变也无受高温影响的痕迹, 与基体组织没有差异. 图 6 给出沿试件截面的显微硬度分布. 除马氏体区硬度特别高外, 一般从试件边缘到中心, 铁素体的硬度提高, 珠光体的硬度也提高, 都高于初始硬度值. 丝内部主要以孪晶的方式变形, 与丝表面状态无关. 这是低碳钢在激波作用下变形的共同特征. 金相研究表明, 基体的硬度增加与孪晶数量、孪晶取向数有关. 前者随后者增加而增加. 上述规律与激波压力分布规律

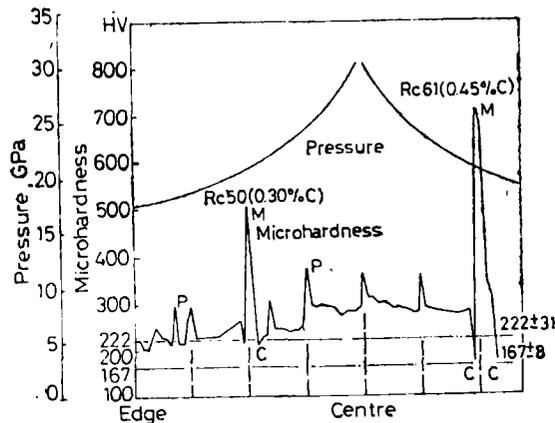


图 6 沿试样横截面的显微硬度分布

Fig. 6 Microhardness distribution along section of pickled iron wire compact after explosive consolidation
 P—pearlite area; C—coring area; M—martensite area
 - - - - - boundary of particles; - · - initial hardness of pearlite;
 - · · - initial hardness of ferrite

一致。

3 讨 论

实验结果表明, 在激波作用下, 颗粒材料流向空隙产生很大的塑性流动, 它们以很高的速度(估算可达每秒数百米)相对运动, 产生相互撞击和摩擦, 从而使动能转化为热能而形成高温区。在高温区, 某些部位可以发生熔化; 某些部位颗粒间的流动聚合速度和会聚角有利于形成射流, 产生类似于爆炸焊接机制的焊合; 颗粒相对运动形成摩擦焊的现象, 在我们的实验中也观察到。上述几种烧结机制都可能发生, 主要取决于颗粒间相对运动的具体条件而定。

Coring 现象的存在是热传导冷却机制的有力证据。实验表明颗粒内部几乎绝大部分处于较低的温度(在实验的压力范围, 激波压缩温升仅几十到二百多度^[6]), 与表层高于熔化的温度相比是低的, 颗粒内部的热容量是很大的冷却源。熔化区中铁素体偏析, 溶液中碳含量富集, C 曲线右移, 直到冷却速度超过临界淬火速度形成马氏体, 这都是在热传导冷却中出现的典型现象。从激波压缩温升来看, 在实验压力范围温升不超过 300℃^[6], 因此稀疏波的冷却作用很小, 热传导是熔化层冷却的主要冷却机制。

颗粒间隙大是形成过大高温熔化区的主要原因, 因而造成缩孔、熔洞、材质不均匀性, 以及出现氧化皮形成的脆性相和微裂纹等现象, 使烧结件质量降低。解决上述问题, 除对表面应进行预处理外, 可考虑用两种不同颗粒度的粉末减小空隙, 按计算给出合理的粒径和数量配比, 以达到颗粒间实现均匀的极薄层的熔化焊合, 提高烧结质量。

在细丝的烧结实验中同样观察到在粗丝实验中所看到的现象。上述一些现象虽然是二维的实验与计算结果, 在我们做的 306L 不锈钢粉末的爆炸烧结件中同样看到这些现象, 不过没有二维实验这么典型、这么集中。表明这些现象是爆炸烧结的基本和典型的物理现象。

4 结 论

(1) 在激波作用下材料的高温流动集中在颗粒表面极薄的一层。不同的颗粒或颗粒的不同部位可能发生局部熔化, 可能产生射流和可能摩擦焊合(没有熔化)。哪一种机制占主导地位取决于颗粒的相对运动速度和颗粒间所形成的夹角。

(2) 爆炸烧结过程中, 存在着颗粒表层熔化现象, 过多过大的熔化区域将会降低焊接质量。

(3) 熔化区域的冷却, 主要是温度低的颗粒内部热传导所致。其冷却速率很快, 可以使奥氏体淬火成马氏体。

(4) 颗粒内部主要以孪晶方式变形, 它是激波作用的结果。在向颗粒间隙流动的过程可见到孪晶上叠加以滑移变形的大塑性流动。

(5) 在聚合激波作用下, 愈靠近试件中心硬度愈高, 与压力分布一致。

(6) 对规则密排细丝的实验结果, 在形貌和高温区的分布上与 Williamson 的数值计算结果相一致。

本工作是国家基金委员会资助项目和 863 高技术项目, 本工作进行中得到谈庆明教授参与讨论, 袁玉东同志帮助制备金相试样, 并得到中国科学院力学研究所材料工艺力学实验室支持。

参 考 文 献

- 1 Perry R W, Kantrowitz A. *J Appl Phys*, 1951; 22: 878
- 2 Payne R B. *J Fluid Mech*, 1957; 2: 185
- 3 Carroll M M, Holt A C. *J Appl Phys*, 1972; 43: 1626
- 4 Williamson R L, Berry R A. In: Gupta Y M ed, *Shock Waves in Condensed Matter-1985*, New York: Plenum, 1986: 341
- 5 Flinn J E, Williamson R L, Berry R A, Wright R N, Gupta Y M, Williams M. *J Appl Phys*, 1988; 64: 1446
- 6 McQueen R G, Marsh S P, Taylor J W, Fritz J N, Carter W J. In: Kinslow R ed, *High Velocity Impact Phenomena*, New York: Academic, 1970: 530

EXPLOSIVE CONSOLIDATION OF METAL UNDER CYLINDRICAL CONVERGING SHOCK WAVE

GAO Juxian, SHAO Binghuang, ZHANG Ke, ZHENG Zhemin
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing*)

(Manuscript received 24 September, 1989; revised manuscript 24 March, 1990)

ABSTRACT Two-dimensional explosive consolidation under the cylindrical converging shock wave has been studied by use of coated fine iron wire compacts to replace conventional metallic powder, so the randomness of three-dimensional spatial distribution of metallic powder might be avoided. The deformation and surface flow pattern of particles as well as the mechanism of consolidation have been clarified experimentally. The distribution of high temperature area is in agreement with the result of numerical simulation by Williamson. A model for the explosive consolidation was given.

KEY WORDS explosive consolidation, shock wave, metallic powder

Correspondent: GAO Juxian, Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080