

铝和铝-锂合金的爆炸烧结试验研究

张登霞 马成辉

(中国科学院力学研究所)

艾宝仁 张晋远 朱瑞珍 柳春兰

(冶金部钢铁研究总院)

摘要 本文研究了纯铝粉和快速凝固铝-锂合金粉的爆炸烧结工艺,测量了烧结体的密度,观察了烧结体内的微观组织和断口形貌。试验用粉末材料为水雾化铝粉、氮气雾化铝粉和氩气雾化铝-锂合金粉。试验时把粉末材料装在包套内,粉状炸药装在包套外的纸筒内,炸药从一端起爆。

根据文中给出的爆炸烧结工艺参数的设计原则,通过系统地试验,已获得 $\phi 17 \times 70$ mm的铝-锂棒材和 $\phi 100 \times 100$ mm的纯铝棒材,相对密度超过98%,无中心孔(马赫孔)。微观组织和断口形貌观察结果表明:颗粒之间已达到焊接结合,结合区是由超细微晶组成,颗粒内部仍保持原始粉末的急冷组织。

试验结果还表明:包套最终运动速度、包套内径、粉末材料强度、粉末材料表面氧化膜的厚度都是影响爆炸烧结质量的重要因素。

关键词 铝 铝-锂合金 爆炸烧结

1.引言

铝-锂合金是一种新型航空航天用材料。用快速凝固(冷却速度 $>10^3$ K/s)的方法制成的细粉,属微晶组织并能使过饱和固熔体得以保留。若用普通粉末冶金的方法把这种粉末材料制成有用的块材,必须对粉末材料进行长时间的加热,这将导致粉末材料晶粒长大和有害相析出,其结果使粉末材料失去了它固有的特性。

爆炸烧结则可避免上述缺点。这是因为在粉末材料的爆炸烧结过程中,粉末颗粒高速塑性变形产生的热只局限在颗粒边界附近的一个很窄的区域内,颗粒内部则处于低温状态,变形结束后,边界处的高温以热传导的方式向颗粒内部传播,高温区温度下降率可超过 10^3 K/s,所以在烧结体内,颗粒间存在着一个超细微晶区,颗粒内部仍保持粉末材料固有的特性。

过去,国外已研究过用爆炸法烧结铝-锂合金粉^[1-3],据报导所得烧结体的密度达到了理论密度的99%,但为了避免中心孔的出现,爆炸烧结前,他们在包套的中心部位放置了一根已挤压成形的棒材,另外烧结体的直径也只有25mm。

本试验的目的有两个:(1)研究用爆炸法烧结无中心孔、且密度超过理论密度98%的铝-锂合金棒的可能性。(2)利用纯铝粉探索爆炸烧结大尺寸棒材的可能性。

通过系统的爆炸烧结试验,得到了 $\phi 17 \times 70$ mm的铝-锂合金棒材, $\phi 100 \times 100$ mm的纯铝棒材,无马赫孔(中心孔),相对密度超过了98%。金相组织和断口形貌观察结果表明上述两种棒材均烧结良好。

1989年12月30日收到原稿,1990年6月5日收到修改稿。

2. 试验方法

图 1 是试验装置示意图。这种装置由包套, 上、下盖板构成, 包套内径为 $\phi 21.5\text{mm}$, $\phi 56\text{mm}$, $\phi 95\text{mm}$, $\phi 98\text{mm}$, $\phi 108\text{mm}$, $\phi 133\text{mm}$ 六种。上、下盖板的厚度在 5—17mm 的范围内, 试验装置所用的材料全部是低碳钢。

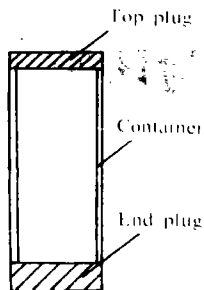


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental set-up

试验用的炸药为铵油炸药加适量黑索金。爆轰速度在 2—3.5 km/s 的范围内, 炸药装在围在包套外的纸筒内。为了保证爆轰阵面为平面, 在炸药顶部铺一层黑索金, 雷管插在轴心处。图 2 是试验组件示意图: 炸药从一端起爆后, 爆轰波沿包套轴向传播, 与此同时, 包套被压垮, 随之粉末材料被压实而烧结。图 3 是这种过程的示意图。

试验用粉末材料为铝粉和铝-锂合金粉两种。粉末材料的特性

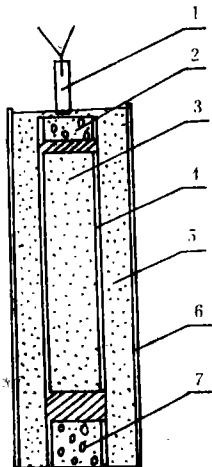


图 2 试验组件

1. 雷管 2. 消波块 3. 粉末材料
4. 包套 5. 炸药 6. 纸盒 7. 垫块

Fig. 2 Explosive consolidation assembly

1. Detonator, 2. Attenuator, 3. Powders, 4. container, 5. Explosive, 6. Cardboard tube, 7. Block

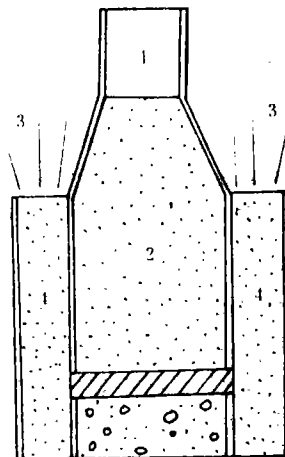


图 3 爆炸烧结过程示意图

1. 烧结体 2. 粉末材料 3. 爆轰阵面
4. 炸药 5. 垫块

Fig. 3 Explosive consolidation process

1. Compacted powder, 2. Powders, 3. Detonation front, 4. Explosive, 5. Block

参数列于表 1。图 4 是粉末材料的形貌及组织。粉末材料装填方式分非真空、真空及真空加热三种。

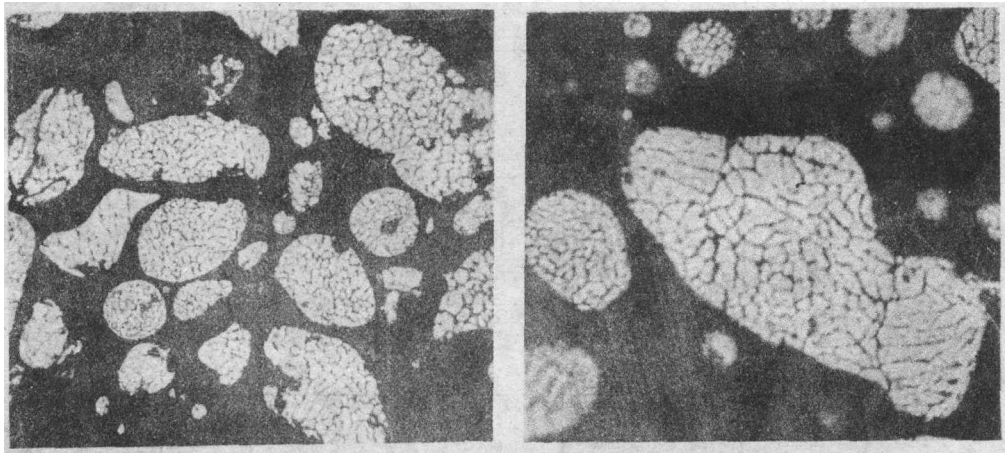
试验结束后, 移去包套, 按 GB 5163-85 规定测量密度。借助光学显微镜和扫描电镜观察金相组织, 借助扫描电镜观察断面形貌。

3. 试验结果及分析

图 5 是烧结体的外形。表 2 是试验中采用的爆炸烧结工艺参数和烧结体特性。分析表列

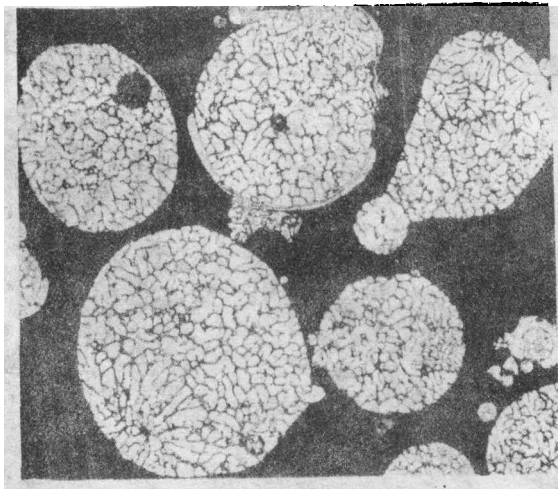
表1 粉末材料的特性参数
Table 1 Character of the powders

Material	Condition of powder fabrication	Particle size (μm)	Impurities of O (%)	Thickness of oxides coated (nm)	Hardness (H)
Al	W. A.	-80	0.23	50 ~ 60	23.7
Al	N.G.A.	-100	0.085	20 ~ 30	22.7
Al-Li	A.G.A.	-100	0.0025	5	86.4



(a)

(b)



(c)

图4 粉末形貌与组织
(混合酸腐蚀)

(a) 水雾化铝粉 (b) 氮雾化铝粉
(c) 氩气雾化铝-锂合金

Fig. 4 Morphology and microstructure of powders

(a) W.A. (Al), (b) N.G.A. (Al),
(c) A.G.A. (Al-Li)

表 2 爆炸烧结工艺参数及烧结体特性
Table 2 Explosive consolidation parameters and compacts characteristic

No.	Container		Explosive layer thickness (mm)	Material		Maximum velocity of container (m/s)	Compacted density (%) (T.D.)	Macro-character of compacts $\phi, \times L, (\text{mm})$
	Inside diameter (mm)	Wall thickness (mm)		Name	Initial density (%) (T.D.)			
1	95	1	25	Al	51.7	1200	99.2	34 × 100
2	95	1	25	Al	52.2	1000	—	22 × 50
3	98	1	19	Al	56.7	1040	97.4	15 × 82
4	98	1	18	Al	54.8	950	97.7	13 × 65
5	98	1	21	Al	55.9	910	97.4	defect free
6	108	1	25	Al	55.4	1000	99.1	defect free
7	133	1.5	37	Al	61.3	1100	99.0	defect free
8	214.5	1.5	20	Al-Li	67.0	1030	98.7	defect free
9	21.5	1.5	20	Al-Li	65.0	1248	97.0	defect
10	21.5	1.5	25	Al-Li	65.0	1040	—	defect free
11	56.0	1.5	27	Al-Li	66.0	885	97.6	defect free

Note: ϕ — The diameter of axial melt cavities

L — The length of axial melt cavities

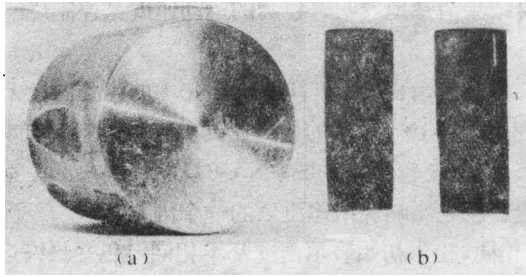


图5 烧结体外形
 (a) 纯铝烧结体, (b) 铝-锂烧结体
 Fig.5 View of compacts
 (a) Al, (b) Al-Li

数据可以得到以下几点极初步的规律。

No. 1 与 No. 2 试样所用包套内径、壁厚、粉末初始装填密度均相同, 但 No. 1 试验包套的最终运动速度显著大于 No. 2 试样包套的最终运动速度。试验结果为 No. 1 烧结体中心孔的尺寸显著大于 No. 2 烧结体中心孔的尺寸。No. 3 与 No. 4 试验也取得同样的结果。No. 8、No. 9 与 No. 10 试验所用包套内径、壁厚、粉末初始装填密度均相同, No. 8 与 No. 10 包套速度基本相同, 试验均获得了无中心孔的棒材。No. 9 试样包套的最终运动速度大于 No. 8 与 No. 10 包套的最终运动速度, No. 9

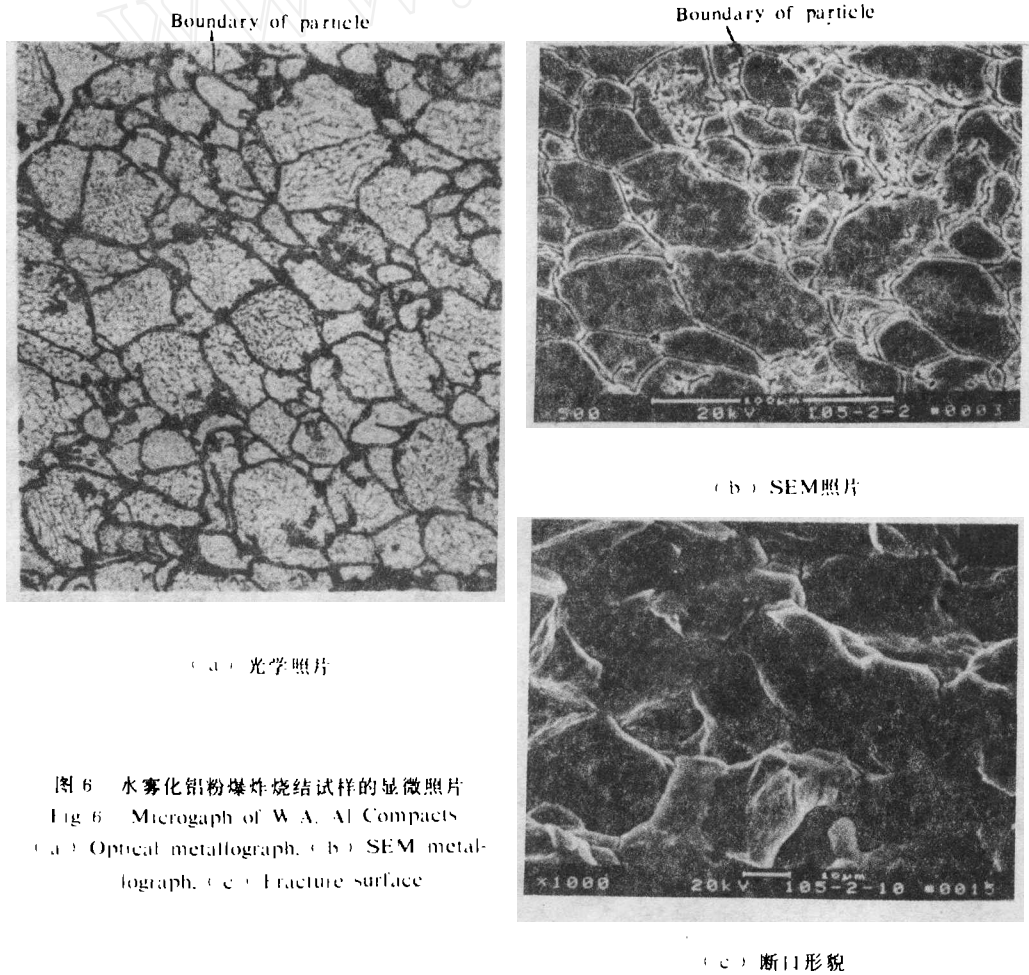


图6 水雾化铝粉爆炸烧结试样的显微照片
 Fig.6 Micrograph of W.A. Al Compacts
 (a) Optical metallograph, (b) SEM metallograph, (c) Fracture surface

烧结体为一根具有中心孔的棒材。上述试验结果清楚地表明，包套的运动速度是控制烧结体质量的一个重要工艺参数。

No. 5 与 No. 6 试样所采用的包套壁厚、粉末初始装填密度均相同，No. 6 的包套内径大于 No. 5 的包套内径，No. 6 包套的最终速度也大于 No. 5 包套的最终速度。虽然两个烧结体均为无中心孔的棒材，但 No. 5 烧结体中心有一个密度较高的区域，No. 6 烧结体中心部位有一个未压实区。这个试验结果预示着，包套内径也是影响烧结体质量的一个因素。

No. 7 与 No. 8 试样所采用的包套壁厚相同，粉末初始装填密度基本相同，包套最终运动速度也基本相同。虽然 No. 7 包套内径是 No. 8 包套内径的六倍，但 No. 7 试样用的纯铝粉，No. 8 试样用的是铝-锂合金粉。铝-锂合金粉的硬度 $H = 86.4$ ，纯铝粉的硬度是 $H = 22.7$ 。所以试验所得结果基本相同，这表明粉末材料强度也是控制烧结体质量的一个重要因素。

对三种烧结体分别进行了金相组织分析和断口形貌观察。用作金相组织分析和断口形貌观察的试样是在各烧结体的相同部位选取的。

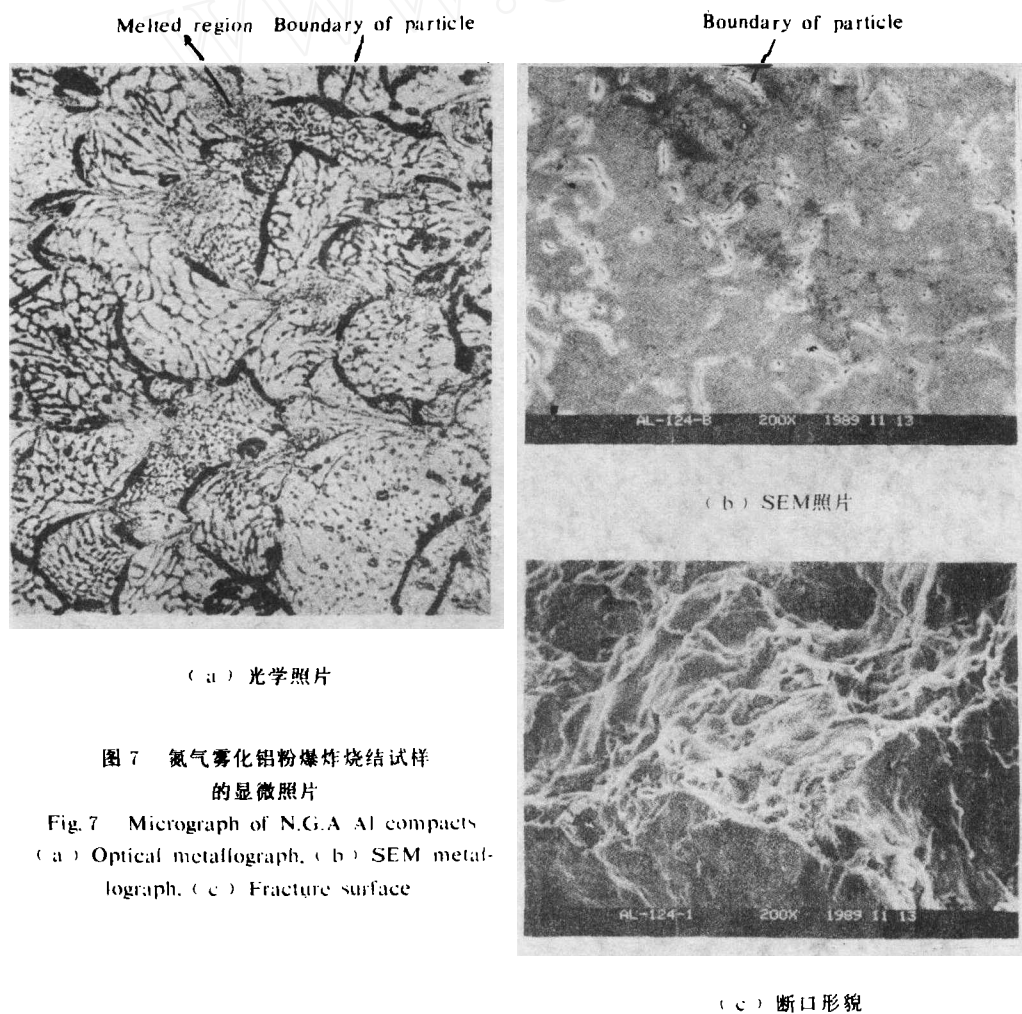
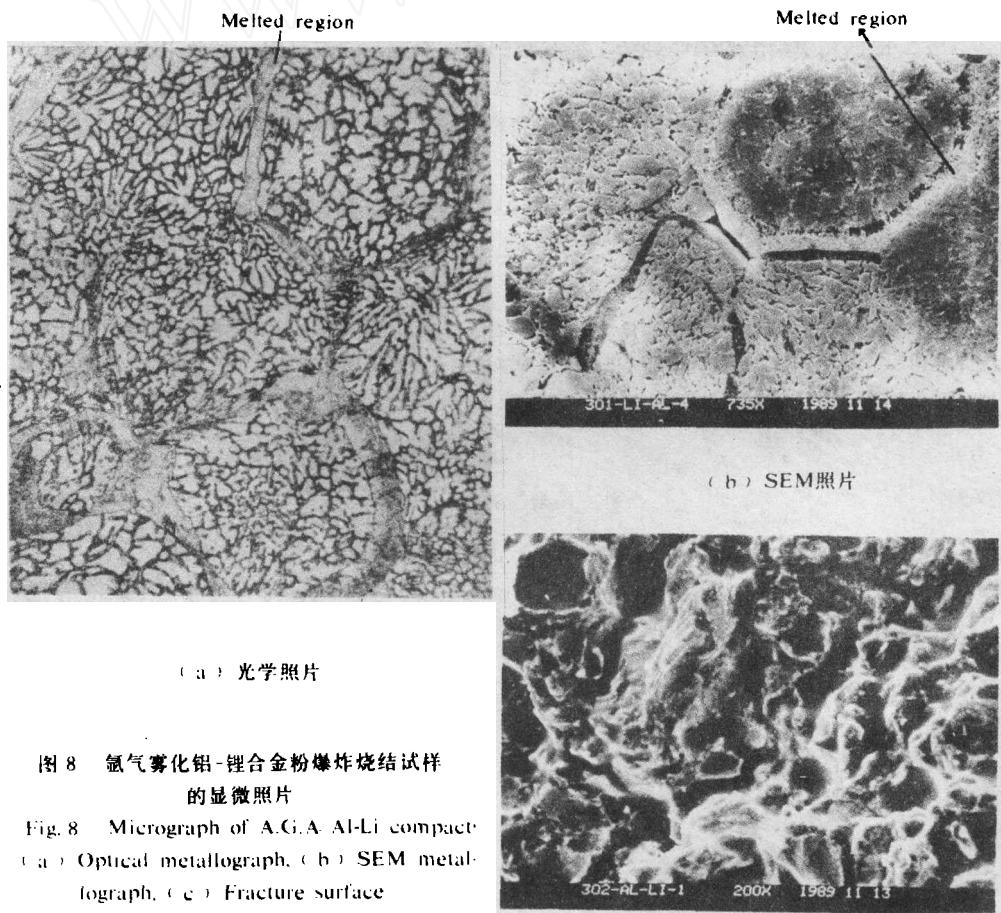


图 7 氮气雾化铝粉爆炸烧结试样的显微照片

Fig. 7 Micrograph of N.G.A Al compacts
(a) Optical metallograph, (b) SEM metallograph, (c) Fracture surface

图6是典型的水雾化纯铝粉末爆炸烧结体的显微照片,分析用试样的相对密度高达99%,从金相组织照片清楚地看到,粉末颗粒已产生了较大的宏观变形,颗粒内部仍保持了它所固有的组织,颗粒边界清晰可辨,不同颗粒内的组织无任何有效的连接,颗粒之间未形成再结晶区,断口形貌照片显示出沿颗粒边界的脆断,这就进一步证明了在这种试样内,颗粒间的连接本质上属于机械咬合。结合粉末颗粒表面的分析资料可知,造成这种征兆的主要原因是该水雾化纯铝粉表面氧化膜过厚(50—60nm)。

图7是典型的氮气雾化纯铝粉末爆炸烧结体的显微照片,分析用试样的相对密度也达到了99%,金相组织照片清楚地显示出:粉末颗粒产生了较大的宏观变形,颗粒内部仍保持了它所固有的急冷组织,部分颗粒边界已消失,颗粒间形成了超细微晶区。还有不少区段显示出清晰的颗粒边界。这种试样的断口形貌是脆断和韧断兼而有之。观察到的这些现象表明,在该试样内除颗粒间的机械咬合外,还有颗粒间的焊接结合。可以预料,这类烧结体已具有一定的机械强度。



(a) 光学照片

(b) SEM照片

(c) 断口形貌

图8 氮气雾化铝-锂合金粉爆炸烧结试样的显微照片

Fig. 8 Micrograph of A.G.A. Al-Li compact
(a) Optical metallograph, (b) SEM metallograph, (c) Fracture surface

和水雾化纯铝粉相比较,这种粉末表面氧化膜较薄,因此在同样条件下,该试样内颗粒间可以形成熔化再结晶区。另外在同一块试样中,颗粒间焊接结合和机械咬合共存表明了,在爆炸烧结过程中颗粒表面层的高速剪切变形是不均匀的。这种不均匀性很难用激波绝热压缩理论解释清楚,相反,用碰撞焊接^[4]原理尚可定性予以说明。

图 8 是典型的氩气雾化的铝-锂合金粉末爆炸烧结试样的显微照片。分析用试样的相对密度大于 98%。从金相组织照片可以清楚地看到:粉末颗粒已由原来的球形变成多面体,这些多面体是由凹面和凸面构成。颗粒内部仍保持了它所固有的急冷组织。粉末颗粒的原始边界消失了。统观相当多的视场,几乎到处可以看到颗粒连成一片的图象。在不少视场,颗粒间形成了白区(光学无特征区),经在高倍扫描电镜下观察,此乃更为细微($\sim 0.2\mu\text{m}$)的胞状晶组织。微晶区的存在表明,在爆炸烧结过程中,粉末颗粒表面处,有一薄层材料经历过熔化和迅速冷却(冷却速度大于制粉过程中的冷却速度)的过程。在冷却过程中,熔化金属再结晶而形成超细晶粒的微晶,这就是粉末颗粒的焊接界面。断口形貌以韧窝型为主。

4. 结论

(1) 根据文中给出的爆炸烧结工艺参数的设计原则,通过试验,已获得 $\phi 17\times 70\text{mm}$ 的 Al-Li 合金棒材,相对密度超过了 98%。 $\phi 100\times 100\text{mm}$ 的 Al 棒材,相对密度达到 99%。这些棒材有效地保持了原始急冷粉末的微细晶粒组织,颗粒间达到了焊接结合,焊接结合区是由超细微晶组成。

(2) 包套最终运动速度、包套内径、粉末材料强度、粉末材料表面氧化膜的厚度都是影响爆炸烧结体质量的重要因素。

本实验是在中国科学院力学研究所爆炸场和爆炸洞进行的,作者对该处工作的同志在试验中给予的帮助表示感谢。另外中国科学院力学研究所史杰荣、中华社会大学蔡铭同学在设计加工、爆炸烧结工艺参数计算方面作了不少工作,在此一并致以谢意。

参 考 文 献

- [1] Peng, T.C. et al., *Metallurgical Transactions A*, 16A (1985), 1445.
- [2] Peng, T.C. et al., *Mechanical Behaviour of Rapidly Solidified Materials*, ed. M.L. Shanker, Metallurgical Society, Inc., Warrendale, Pa., (1986), 181.
- [3] Ahrens, T.J. et al., *Metallurgical Application of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*, eds. L.E. Murr, et al., Marcel Dekker, Inc., NY, (1986), 83.

INVESTIGATION OF THE EXPLOSIVE CONSOLIDATION OF Al-Li ALLOY AND Al POWDERS

Zhang Dengxia, Ma Chenghui

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Ai Baoren, Zhang Jinyuan, Zhu Ruizhen, Liu Chunlan

(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing, China)

ABSTRACT In this paper, explosive consolidation was investigated for rapidly solidified Al-Li alloy and Al powders. The density, microstructures and fracture morphologies of the sintering compacts were examined.

The Al-Li alloy powder was prepared by argon gas atomization. The Al powders were prepared by water or nitrogen gas atomization.

The powder was packed in a container and the explosive, also in powder form, was contained in a concentrically placed cardboard tube. The explosive was initiated on one end.

By proper selection of the explosive parameter, the $\phi 17 \times 70$ mm (Al-Li alloy) and the $\phi 100 \times 100$ mm (Al) sintering cylindrical compacts have been obtained. They are defect-free and the densities of powder compacts were over 98% T.D.

The microstructures and fracture morphologies show that the interparticle bonding occur and the bonding region consists of ultrafine grain. In the interior of particle the inherent microstructures are still retained.

It is shown that the velocity and internal diameter of container, the powder strength and the characteristics of surface oxide layer are important in determining the effectiveness of the joints sintered.

KEY WORDS explosive consolidation, Al powder, Al-Li alloy.