

文章编号: 1004-0609(2003)06-1473-04

反应喷射沉积 5083 铝合金的微观组织^①

杨守杰¹, 戴圣龙¹, 李树索², 韩雅芳^{1, 2}

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为满足超塑成形对晶粒尺寸的要求, 选择 Al-Mg (5083) 合金, 利用反应喷射沉积的方法用 N₂-O₂ 混合雾化气体进行喷射沉积。结果表明: 沉积态的微观组织由等轴晶粒组成, 晶粒尺寸随着雾化气体中 O₂ 含量的提高而减小, 过热温度和微量 Zr 元素的添加对晶粒尺寸也有一定的影响。

关键词: 反应喷射沉积; Al-Mg (5083) 合金; Zr; 微观组织

中图分类号: TG 132.3

文献标识码: A

目前, 铝合金代替钢制作汽车上的薄壁件以提高燃料效率和改善环境是一种发展趋势。在汽车工业中, 高的抗腐蚀性能的要求使各种低合金化 Al-Mg 合金在不需热处理的条件下得到应用^[1, 2]。应用最广泛的是 5083 铝合金, 其公称成分为 Al-4.5Mg-0.7Mn, 该合金具有良好的抗腐蚀性能和较高的强度。

铝合金的成形性比深冲性钢差, 致使采用常规挤压方法制作薄壁件受到限制, 也导致零件设计效率低、装配费用增加。因此, Al-Mg 合金的超塑成形具有广阔的应用前景^[3-7]。5083 铝合金经过热机械处理(TMP)后已显示出超塑性。热机械处理通过多步轧制形成一变形组织或部分再结晶组织, 再经过进一步的静态再结晶处理可以得到细小的等轴晶组织。为了得到超塑性, 晶粒尺寸必须小于 10 μm。常规冶金方法得到的铸锭晶粒尺寸一般大于 150 μm。由于冷却速度慢, 存在严重的宏观偏析, 必须经过长时间的均匀化处理和热机械处理才能够得到超塑性。对于 Al-Mg 合金, 典型的热机械处理工艺是多步的轧制—退火处理, 达到的真应变是 1.5~2.5, 厚度方向的变形量是 78%~92%。

喷射雾化沉积可以得到细小的等轴晶组织, 晶粒尺寸在 20~60 μm 之间, 并且使偏析程度降低, 使用喷射沉积锭坯进行热机械处理可以减少加工步骤和减小变形量^[8]。如果进一步降低晶粒尺寸对超塑成形十分有利, 最近又开发出了反应喷射沉积的新工艺, 它包括以下几个过程^[9, 10]: 将熔融的金属雾化成小液滴; 化学反应; 小液滴沉积并与反应产

物形成沉积锭坯。这种方法可以进一步细化晶粒, 并产生弥散分布。目前已用这种方法得到了喷射沉积复合材料和弥散强化合金。对于弥散强化相, 液-气反应生成的氧化物是 Al₂O₃ 和 MgO, 添加微量的 Zr 也能细化晶粒, 形成的氧化物是 ZrO₂。本文作者研究了反应喷射沉积 5083Al-Mg 合金的微观组织特征, 优化了工艺参数以控制弥散强化相的尺寸和体积分数。

1 实验

实验用合金的化学成分如表 1 所示。为了探讨 Mg 和 Zr 对反应产物的影响, 特选用工业用纯铝 (99.99%) 进行比较。

表 1 合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of alloys
(mass fraction, %)

Material	Cr	Mg	Mn	Zr	Al
5083	0.15	4.50	0.70		Bal.
5083-Zr	0.15	4.50	0.70	0.30	Bal.

反应喷射沉积的工艺参数如表 2 所示, 图 1 所示为实验装置图。喷射室先预抽真空至 13.6 Pa, 然后充填 N₂ 至 0.12 MPa 的静压力, 在此气氛下石墨坩埚内的金属熔体过热至 800~1000 °C, 雾化气体为 N₂ 和 O₂ (0.5%~10%、体积分数) 的混合气体, 喷射时的动压力为 1.24 MPa, 雾化小液滴与气体反应后沉积在一旋转的水冷铜基底上, 转

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (598810050)

收稿日期: 2003-02-20; 修订日期: 2003-05-07

作者简介: 杨守杰 (1974-), 工程师, 博士。

通讯联系人: 杨守杰, 博士; 北京 81 信箱 2 分箱, 100095; 电话: 010-62458122; E-mail: hanyg@95777.com

表 2 反应喷射沉积工艺参数

Table 2 Processing parameters of reactive spray-deposited experiments

Sample No.	Material	Superheating temperature/ °C	$\varphi(\text{O}_2)/\%$
1	5083	800	0
2	5083	800	5.0
3	5083	900	5.0
4	5083	1000	5.0
5	5083	800	3.0
6	5083	800	10.0
7	5083	1000	10.0
8	5083+ Zr	850	5.0
9	5083+ Zr	850	3.0
10	5083+ Zr	850	1.0
11	5083+ Zr	850	0.5

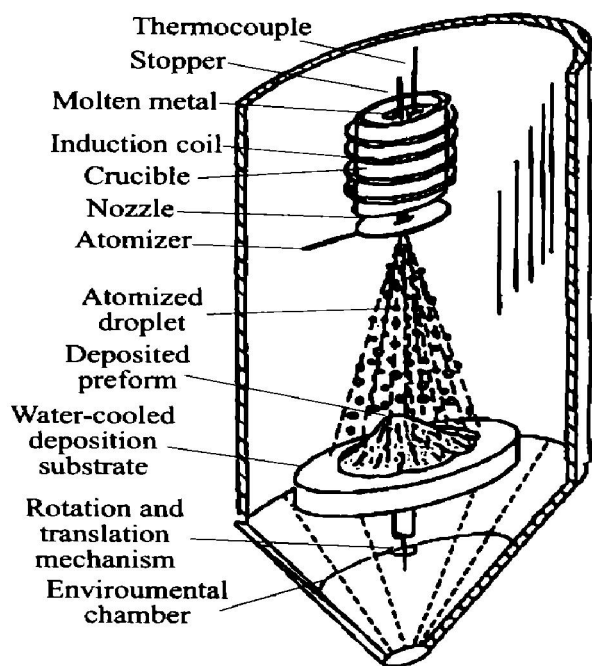


图 1 反应喷射沉积实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of process apparatus utilized for reactive spray deposition experiments

速为 75 r/min, 沉积距离为 380 mm, 最后形成一锭坯。

反应喷射沉积锭坯的微观组织用光学显微镜、透射电子显微镜(TEM)、图像分析仪和 X 射线衍射仪(XRD)进行分析观察, 侵蚀剂为改进的 Poulton 试剂: 50 mL Poulton 试剂, 25 mL 硝酸, 12 g 铬酸和 40 mL 水。定量图像分析用来确定晶粒尺寸, TEM 试样用双喷的方法制备, 电解液为 25% 硝酸 + 75% 甲醇, 透射电子显微镜的型号为 PHILIPS CM20。

2 结果与分析

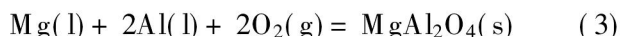
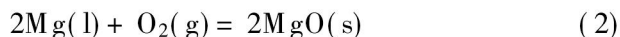
反应喷射沉积锭坯的微观组织如图 2 所示。图 2(a)所示是 N_2 喷射沉积 5083 铝合金的微观组织, 等轴晶平均晶粒尺寸为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 这是典型的喷射沉积 Al 合金的晶粒尺寸, 比常规铸锭的晶粒尺寸($150\text{ }\mu\text{m}$)要小得多, 但还达不到超塑性对晶粒尺寸的要求。图 2(b)所示是 $\text{N}_2 + 5\%\text{O}_2$ 反应喷射沉积 5083 铝合金的微观组织, 晶粒为均匀的球形, 比 N_2 喷射沉积 5083 铝合金的要更细小一些。如图 2(c)、(d)所示, 提高雾化气体中 O_2 含量和加入合金元素 Zr, 晶粒尺寸得到了进一步的细化。

用图像分析仪对表 2 列举的各实验条件所得到的反应喷射沉积锭坯的晶粒尺寸进行了分析, 晶粒尺寸与雾化气体中 O_2 含量的关系分别如图 3、4 所示。

从图 3 可以看到: 当熔体过热温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 随着雾化气体中 O_2 含量的增加晶粒尺寸减小。当 O_2 含量从 0 增至 5.0% 时, 晶粒尺寸是稳步减小的; 而当 O_2 含量从 5.0% 增至 10.0% 时, 晶粒尺寸减小的幅度明显加大。 O_2 含量达到 10.0% 时, 平均晶粒尺寸为 $17.5\text{ }\mu\text{m}$, 这已接近超塑成形所要求的晶粒尺寸。从图 4 可以看到: 当熔体过热温度为 $850\text{ }^\circ\text{C}$, 5083 铝合金加入 Zr 后, 晶粒尺寸得到进一步细化, 随着雾化气体中 O_2 含量的增加晶粒尺寸也减小, 但变化规律与 5083 铝合金不同, 在 O_2 含量增加的初始阶段, 晶粒尺寸迅速减小, 而后又趋于平缓。

图 5 所示是反应喷射沉积 5083 铝合金晶粒尺寸与熔体过热温度的关系曲线。从图 5 可知: O_2 含量为 5.0% 时, 随着过热温度的增加晶粒尺寸增加, 而当 O_2 含量为 10.0% 时, 随着过热温度的增加晶粒尺寸减小, 这一变化规律可能与雾化过程、反应过程、沉积过程以及冷却过程都有关系。

喷射沉积时, 雾化气体中含有 O_2 , 可能与小液滴发生以下反应^[11]:



这些反应得到的氧化物在凝固过程中以及随后的热暴露中可以有效地阻止晶界的移动, 从而细化晶粒, 并能够使合金得到强化。

在合金中加入 Zr 后可以进一步提高强化效果。因为 Zr 和 O_2 有很强的亲和力, 可以发生以下反

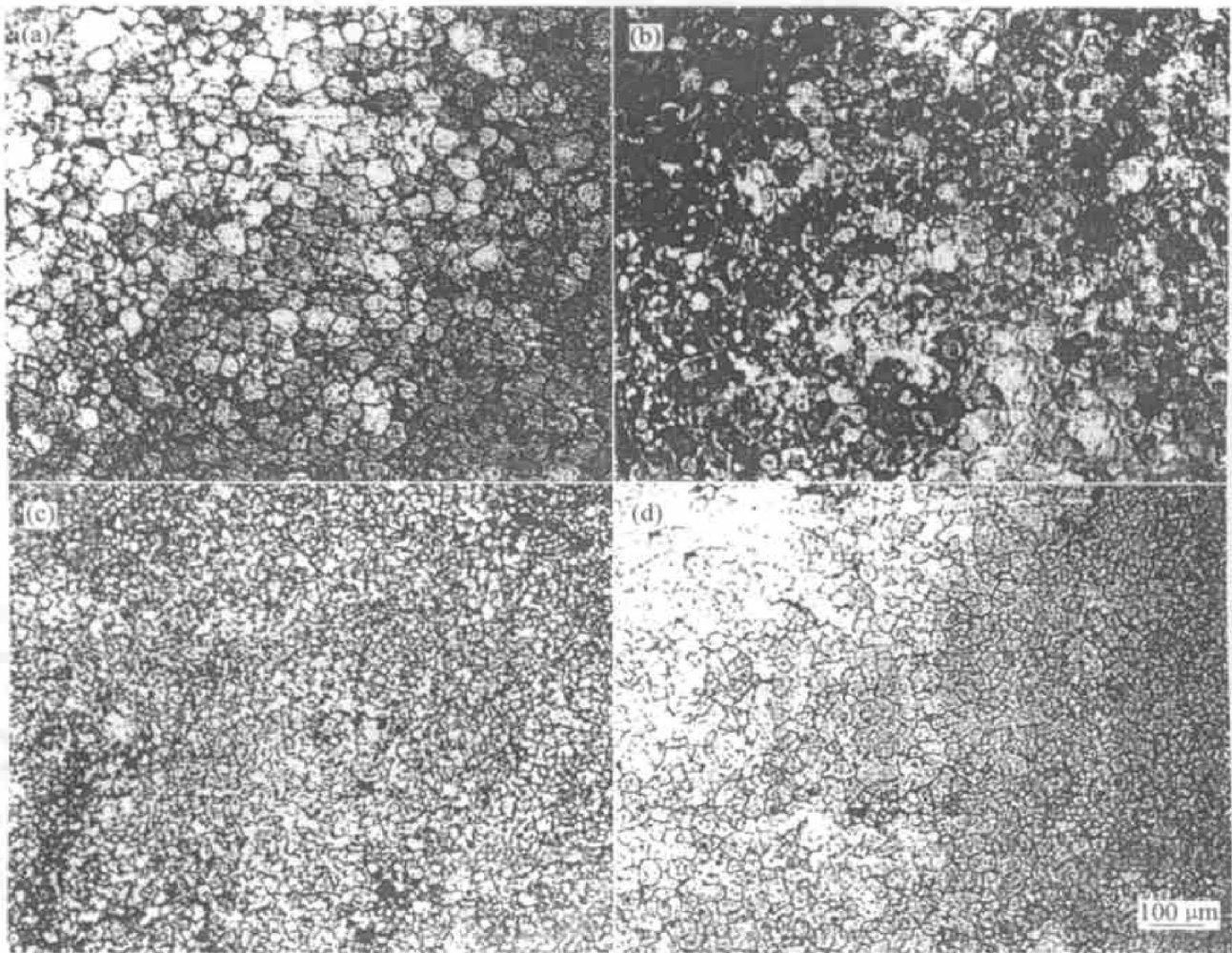


图 2 反应喷射沉积态的微观组织

Fig. 2 Microstructures of as-spray-deposited Al alloy

(a) —5083 Al alloy processed by using N₂; (b) —5083 Al alloy processed by using N₂+ 5.0% O₂;
(c) —5083 Al alloy processed by using N₂+ 10.0% O₂; (d) —5083+ Zr alloy processed by using N₂+ 5.0% O₂

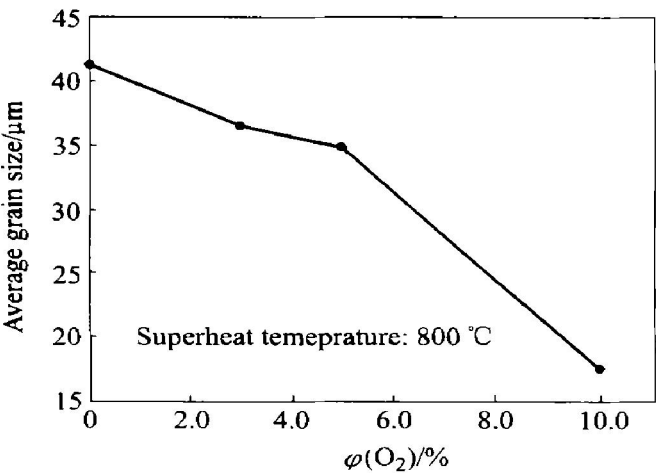


图 3 5083 合金平均晶粒尺寸与雾化气体中 O₂ 含量的关系

Fig. 3 Relationship between average grain size and atomization gas O₂ content for reactive spray -deposited 5083 Al alloy

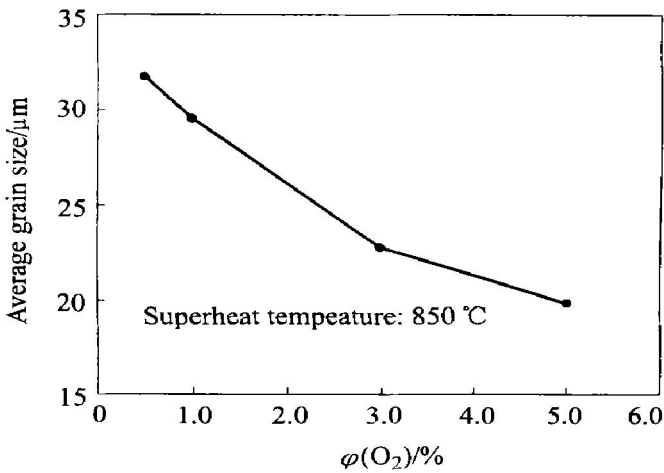


图 4 5083+ Zr 合金平均晶粒尺寸与雾化气体中 O₂ 含量的关系

Fig. 4 Relationship between average grain size and atomization gas O₂ content for reactive spray-deposited 5083 + Zr alloy

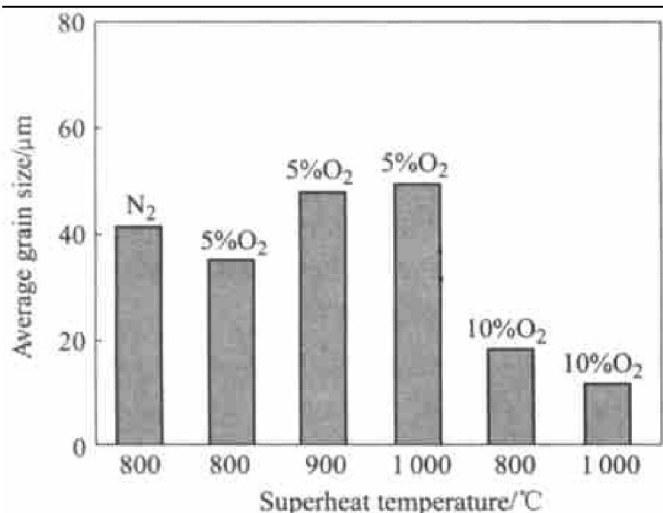
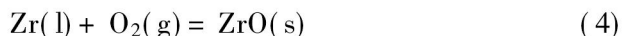


图 5 反应喷射沉积 5083 铝合金平均晶粒尺寸与过热温度的关系

Fig. 5 Relationship between average grain size and superheat temperature for reactive spray-deposited 5083 Al alloy

应^[12]:



反应生成的 ZrO 可以起到很好的细化与强化效果。

REFERENCES

- [1] Blum W, Zhu Q, Merkel R, et al. Geometric dynamic recrystallization in hot torsion of Al5Mg0.6Mn(AA5083) [J]. Metall Sci Eng A, 1996, A205: 23 - 30.
- [2] Tell Kamp V L, Lavernia E J. Processing and mechanical properties of nanocrystalline 5083 Al alloy [J]. Nanostructured Materials, 1999, 12: 249 - 252.
- [3] Verma R, Ghosh A K, Kim S, et al. Grain refinement and superplasticity in 5083 Al [J]. Metall Sci Eng A, 1995, A191: 143 - 50.
- [4] Friedman P A, Ghosh A K. Microstructural evolution and superplastic deformation behavior of fine grain 5083 Al [J]. Metall Mater Trans A, 1996, 27A: 3827 - 3839.
- [5] Hales S J, McNelley T R. Microstructural evolution by continuous recrystallization in a superplastic AlMg alloy [J]. Acta Metall, 1988, 36: 1229 - 1239.
- [6] Kannan K, Hamilton C H. Inhomogeneities in initial cavity distribution in a superplastic Al 5083 alloy [J]. Scripta Materialia, 1997, 38: 299 - 305.
- [7] Orita H Z, Fujinami T, Nemoto M, et al. Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal channel angular pressing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117: 288 - 292.
- [8] Grant P S. Spray forming[J]. Progr Mater Sci, 1995, 39: 497 - 545.
- [9] Perez J F, Morris D G. Copper-Al₂O₃ composites prepared by reactive spray deposition [J]. Scr Metall Mater, 1994, 31: 231 - 235.
- [10] Liu H, Zeng X, Lavernia E J. Processing maps for reactive atomization and deposition processing [J]. Scr Metall Mater, 1993, 29: 1341 - 1344.
- [11] Cai W D, Smugeresky J, Lavernia E J. Low-pressure spray forming of 2024 aluminum alloy [J]. Mater Sci Eng A, 1998, A241: 60 - 71.
- [12] Wu Y, Castillo L D, Lavernia E J. Superplasticity of 5083 alloys produced by spray deposition [J]. Scripta Materialia, 1996, 34: 1243 - 1249.

Microstructure of 5083 Al alloy processed by reactive spray deposition

YANG Shou-jie¹, DAI Sheng-long¹, LI Shu-suo², HAN Ya-fang^{1, 2}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The reactive spray-deposition processing was implemented to reduce the grain size for superplasticity. A typical AlMg alloy(5083) was selected and was sprayed by using N₂-O₂ atomization gas mixtures. The as-deposited microstructure reveals an equiaxed grain morphology, and the grain size decreases with increasing atomization gas oxygen content and is affected by the superheat temperature and small additions of Zr.

Key words: reactive spray-deposition; AlMg alloy(5083); Zr; microstructure

(编辑 李向群)