

喷射成形工艺参数及热挤压制度对 8009 耐热铝合金的组织及性能的影响

朱宝宏^{1*}, 熊柏青¹, 张永安¹, 刘红伟¹, 石力开¹, 孙玉峰²

(1. 北京有色金属研究总院国家有色金属复合材料中心, 北京 100088; 2. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要: 采用喷射成形方法制备了 Al-8.5Fe-1.4V-1.7Si (8009) 耐热铝合金, 研究了喷射成形工艺参数及沉积坯件的热挤压工艺对材料的微观组织及性能的影响。结果表明: 喷射成形工艺能够有效地抑制 8009 合金中粗大的富铁相的析出, 获得均匀细小的组织; 当喷射成形工艺参数选择适当时, 沉积坯件具有良好的成形性与致密度, 在随后的热挤压过程中, 通过较低的挤压比即可使材料达到全致密。合金经过热挤压后, 在室温及高温下均具有良好的力学性能。

关键词: 喷射成形; 热挤压工艺; Al-Fe-V-Si 合金; 耐热铝合金

中图分类号: TG132.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7076(2003)06-0692-04

耐热铝合金的研究兴起于 20 世纪 70 年, 并迅速在全世界范围内得到了深入的开展, 其合金体系主要分为 Al-Fe 系, Al-Cr 系, Al-Ni 系等^[1~6], 其中 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金中的 8009 合金由于具有良好的室温和高温强度而得到了世界各国的青睐与重视, 并在航空、航天、军事等领域得到广泛应用^[1, 2]。目前已投入使用的 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金均是通过传统的 RS/PM 工艺生产, 存在制备工艺复杂、材料中的含氧量不易控制、大尺寸坯件成型困难等缺点, 限制了该合金应用范围的进一步扩大。喷射成形是起源于 20 世纪 70 年代、并于 90 年代在国际上大规模发展起来的一种先进的快速凝固制坯技术^[7], 其最主要的特点就是可从液态金属直接制取具有快速凝固组织特征的大尺寸坯件, 并可有效缩短材料制备工艺流程、控制材料中的含氧量, 因此近年来发展十分迅速^[8~13]。利用喷射成形方法制备 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金是近几年才发展起来的, 由于喷射成形工艺参数对合金的组织及性能等影响非常大, 因此本文采用喷射成形方法试制了 8009 耐热铝合金, 研究了喷射成形工艺参数对沉积坯件的影响, 探索了沉积坯件的热挤压工艺, 并对材料的组织及性能进行了

分析与测试, 从而为优化喷射成形制备 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的工艺参数提供一些基本的参考。

1 实 验

实验用合金成分(%, 质量分数)为: Fe 8.5, V 1.4, Si 1.7, 其余为 Al (即 8009 合金); 喷射成形实验在北京有色金属研究总院自行设计的 SF-200 喷射成形设备上, 雾化气体为 N₂。具体的喷射成形工艺参数如下: 雾化温度 1000~1050, 雾化距离 450~600 mm, 斜喷角 20°~30°, 接收盘旋转速度 30~60 r·min⁻¹, 下降速度 1~3 mm·s⁻¹, 调整喷射沉积过程中的雾化气体与合金液体质量流率比(G/M 比), 选择气雾化喷嘴固定和扫描两种喷射沉积方式, 制备出不同的沉积坯件。

将沉积态合金圆锭剥皮后在不同的温度、挤压比条件下进行热挤压, 在 NEOPHOT-2 型金相显微镜下观察沉积态、挤压态组织情况, 在 JEM 2000FX 型透射电镜上进一步观察合金的组织, 合金的力学性能测试在 AG-25TA 型日本岛津拉伸仪上进行。采用排水法测量沉积坯件及挤压态合金的平均致密度。

收稿日期: 2003-06-10; 修订日期: 2003-08-10

基金项目: 国家“973”计划“提高铝材质量基础研究”资助项目(GI999064905-3)

作者简介: 朱宝宏(1974-), 男, 山东青岛人, 硕士; 研究方向: 新型铝合金材料

* 通讯联系人 (E-mail: sprayform@mail.grim.com.cn)

2 结果与讨论

2.1 喷射成形工艺参数对沉积坯件成形性、致密度及实收率的影响

表 1 是喷射成形工艺参数对沉积坯件成形性、致密度及实收率的影响。由表 1 可以发现,同固定喷嘴不同的是,喷嘴增加扫描运动,可以在较低的 G/M 值下使得合金具有良好的成形性与较高的相对密度。而喷嘴固定不动时,只有在较高的 G/M 值下材料才具有良好的成形性及相对密度,这是因为,在喷嘴固定不动的情况下,当 G/M 较低时,雾化气体的冷却能力低,因此喷雾中雾化液滴的液相含量高,故到达沉积坯件表面时的液相含量较高,从而在沉积坯件表面形成了较厚的半固态层,由于雾化气体大量卷入该层,在气体还未完全从该层中“溢出”,半固态层的底层就可能发生完全凝固,从而捕获了大量的气孔,大大降低了沉积坯件的致密度;而当 G/M 比提高时,喷雾到达沉积坯件表面时固相含量提高,使得沉积坯件顶部形成的半固态层厚度适中,气体卷入量减少,同时适量的液相合金有效地填充了固态颗粒之间的缝隙,导致了沉积坯件中心较为致密,但与此同时,沉积坯件周边由于本身散热速度较快,当固相含

量很高的喷雾沉积后,合金颗粒之间的界面没有充足的合金液体进行有效填充,从而留下了大量的疏松,因此沉积坯件的整体致密度仍无法得到有效提高。当喷射成形过程中喷嘴作一定角度的扫描时,沉积坯件整体散热的均匀性得到了有效地改善,从而减小沉积坯件中心和周边部位散热速度上的差别,因此在较小的 G/M 比下便可获得整体致密的沉积坯件。但在喷嘴扫描的情况下的雾化液滴过喷现象严重,因此为了使沉积坯件获得一定的致密度,要适当的控制扫描角度;同时,为了避免沉积坯分层现象,应尽量提高扫描频率,一般不应低于 $3 \text{ Hz}^{[9]}$ 。

图 1 为铸态和喷射沉积态 8009 系耐热铝合金的典型金相组织照片,从照片中可以看出,喷射成形有效地消除了铸态组织中的粗大的富 Fe 针状相,沉积坯件晶粒细小、组织均匀,无明显的气孔和疏松存在。

研究结果证实^[14, 15],快速凝固制备的 8009 合金中,主要是由 $\alpha\text{-Al}$ 和 $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 以及少量的 AlSiFe 三元相组成。其中, $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 是 8009 合金中最主要的弥散耐热强化相。图 2(a) 是沉积态合金在透射电镜下的形貌,其中弥散分布的大量球状相就是 $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相,其尺寸大

表 1 喷射成形工艺参数比对沉积坯件成形性、致密度和实收率的影响*

Table 1 Effect of spray forming parameters on deposits

雾化喷嘴扫描角度及扫描频率	G/M	沉积坯件质量	相对密度/ %	实收率/ %
0°	3.5	成形性差,液相含量过高	/	/
0°	3.8	成形性较好	85	73
0°	4.8	成形性良好,距沉积坯表面 20 mm 范围内存在疏松组织	92	67
$\pm 2.5^\circ/3 \text{ Hz}$	3.8	成形性良好,距沉积坯表面 10 mm 范围内存在疏松组织	95	61
$\pm 3.5^\circ/3 \text{ Hz}$	3.8	成形性良好,但距沉积坯表面 8 mm 范围内存在疏松组织	96	57

* 沉积坯件的直径在 200 ~ 210 mm 范围内;相对密度 = 实测密度/理论密度,沉积坯件实收率 = 沉积坯件重量/雾化合金总量

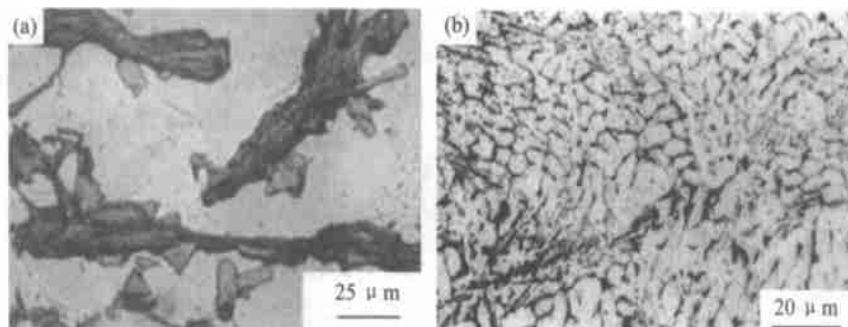


图 1 喷射成形 8009 耐热铝合金的典型金相组织照片

(a) 铸态; (b) 喷射沉积态

Fig. 1 Optical microstructure of spray formed 8009 alloy

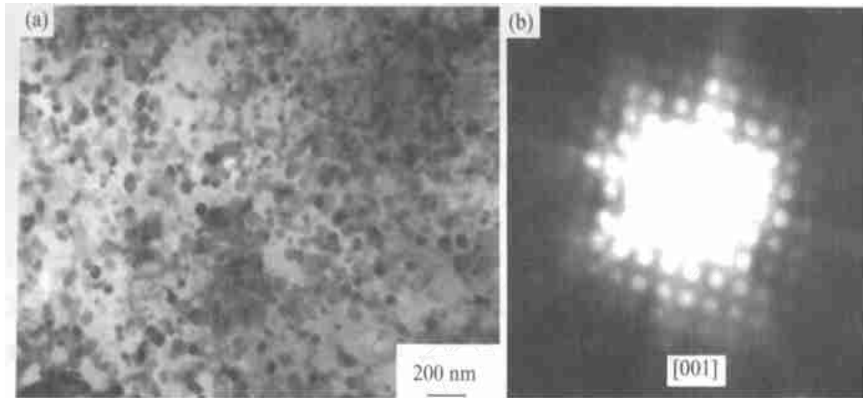


图2 沉积态合金 TEM 形貌及球状相的选区电子衍射图

(a) 沉积态 TEM 形貌图; (b) 硅化物选区电子衍射图

Fig.2 TEM image and SAED of silicide phase in the deposits

约为 30 ~ 100 nm, 这些球状相的存在有利于增强合金的性能。图 2(b) 是球状相的选区衍射图, 表明这些球状相具有体心立方结构。

2.2 热挤压工艺参数对合金型材致密度、组织与性能的影响

表 2 是热挤压工艺参数对 8009 合金致密度的影响。从表中可以看出, 当沉积坯件整体致密度较低时, 即使采用了较高的挤压比进行热挤压仍无法使合金型材达到接近全致密, 合金内部大量缺陷的存在将严重地影响合金的力学性能。而对于整体致密度较高的沉积坯件, 以较小的挤压比即可以获得接近全致密的合金型材; 当合金在较低的挤压比下获得近全致密时, 进一步提高挤压比, 对最终合金型材致密度的影响不大。这是因为, 喷射成形工艺制备的材料中, 制备的材料只需经过较小的挤压比即可得到有效地致密化, 所以该合金在 7:1 的挤压比下孔洞、疏松等缺陷便能够有效地焊合, 致密度得到明显地提高; 这时要使材料中的孔洞继续焊合是非常困难的, 因此进一步提高挤压比也无法明显地提高材料的致密度。

图 3 为喷射成形 8009 系耐热铝合金挤压型材

表 2 热挤压工艺参数对合金型材致密度的影响

Table 2 Effect of extrusion process parameters on density of 8009 alloy

试样 编号	沉积坯件 相对密度/ %	热挤压工艺参数		挤压态合金 相对密度/ %
		挤压温度/	挤压比	
1	92	400	17:1	96.0
2	95	400	7:1	99.3
3	95	350	7:1	99.2
4	95	350	17:1	99.4

的典型金相组织照片, 从照片中可以看出, 经过热挤压后, 合金内部晶粒进一步细化、组织的均匀性进一步提高, 各种缺陷的数量被进一步降低。

表 3 为喷射成形 8009 合金挤压型材和力学性能。根据表 2 和 3 中的数据可以看出, 当挤压态合金的致密度较低时, 其力学性能也明显偏低, 其原因主要是由于挤压态合金致密度较低, 使得合金中存在的缺陷较多, 在拉伸过程中, 这些缺陷非常容易成为应力集中区, 从而可能在较低的应力下就可能引起合金断裂; 随着挤压态合金致密度的提高, 合金中缺陷的数量减少, 从而使得合金在拉伸过程的开裂源减少, 因此合金的力学性能得到了明显的提高。

图 4 是 8009 合金经过高温挤压、高温拉伸等高温过程后的 TEM 照片, 可以发现, 经过一系列高温过程, 合金中的球状相没有发生明显的聚集长大, 说明这些球状相在高温下具有很好的热稳定性, 从而成为合金在高温下的主要的弥散强化相。

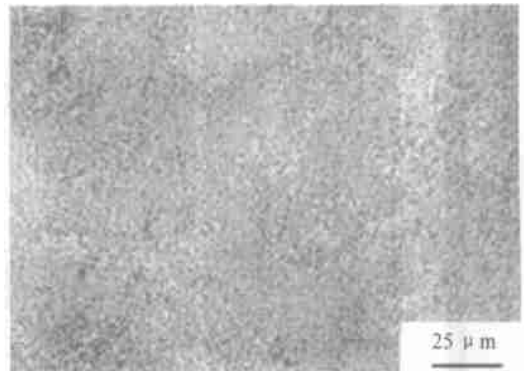


图3 喷射成形 8009 耐热铝合金挤压型材的金相组织照片

Fig.3 OM image of as-extruded 8009 alloy prepared by spray forming process

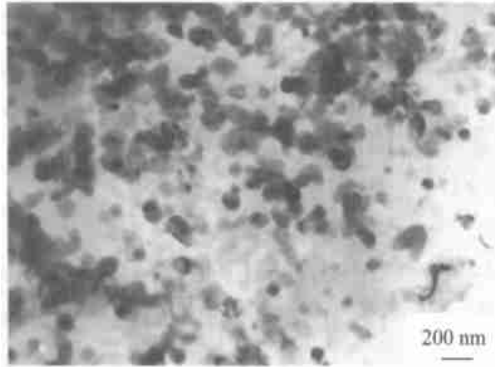


图 4 挤压态合金高温拉伸试样 TEM 照片

Fig. 4 TEM image of the extruded alloy after tensile test at high temperature

表 3 喷射成形 8009 系耐热铝合金挤压型材的力学性能

Table 3 Mechanical properties of as-extruded 8009 alloy

试样编号	$t/$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$
1	25	351.0	221.0	8.0
	350	/	/	/
2	25	395.0	310.0	7.5
	350	195.0	171.0	12.0
3	25	435.0	330.0	7.0
	350	204.0	181.0	14.0
4	25	465.0	405.0	15.0
	350	200.0	179.0	10.0

3 结 论

1. 当喷射成形工艺参数合理时, 沉积坯件具有良好的成形性与致密度。在喷射成形过程中, 雾化喷嘴的扫描运动可以使 8009 合金在较低的 G/M 值下便获得良好的成形性和较高的致密度, 而固定喷嘴则需要较高的 G/M 值下才能获得较好的致密度。

2. 喷射成形制备的原始致密度较高的 8009 合金, 通过较低的挤压比即可使合金接近全致密; 而

对于原始致密度较低的沉积坯件, 即使在热挤压过程中选用较高的挤压比仍难以使合金型材接近全致密; 合金型材致密度的降低将严重影响材料的力学性能;

3. 在喷射成形制备的 8009 合金基体上, 弥散分布着大量球状 $\text{-Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相, 该相具有良好的热稳定性, 是 8009 合金最主要耐热强化相。

参考文献:

- [1] Skinner D J, Bye R L, Raybould D. Dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloy [J]. Scripta. Metall., 1986, 20: 867.
- [2] Das S K. Rapid solidification and powder metallurgy at Allied-Signal Inc [J]. J. Powder Metallurgy, 1988, 24(2): 175.
- [3] Thomas M P, Palmer I G, Baber C. Scripta Met., 1992, 12: 337.
- [4] Tsakiroopoulos P, Pratt R C, Jones H, et al. Mater. Sci. Eng., 1986, 98: 143.
- [5] Inoue A, Horio Y, Masumoto T. Mater. Trans., JIM, 1993, 34 (1): 85.
- [6] 黎文献, 易丹春, 陈振华. 快速凝固 Al-Fe-Ce 合金的研究中南矿冶学院学报 [J]. 中南矿冶学院学报, 1991, 22(S1): 104.
- [7] Singer A R E. The principle of spray rolling of metals [J]. J. Met. Mater., 1970, 4: 246.
- [8] 李月珠. 快速凝固技术和材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [9] Leatham A. Proceedings of 4th International Conference on Spray Forming [C]. 1999, 9, USA.
- [10] 熊柏青. 喷射成形技术的产业化现状及应用发展方向 [J]. 稀有金属, 1999, 23(6): 425.
- [11] 熊柏青. 材料导报, 2000, 14(12): 50.
- [12] Xiong Baiqing, Zhang Yongan, Lin Yaojun, et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1999, 9(2): 302.
- [13] Xiong Baiqing, Zhang Yongan, Lin Yaojun, et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1999, 9(3): 472.
- [14] Hariprasad S, Sastry S M L, Jerina K L, et al. Microstructures and mechanical properties of dispersion-strengthened high-temperature Al-8.5Fe-1.2V-1.7Si alloys produced by atomized melt deposition process [J]. Metall. Trans. A, 1993, 24A(4): 865.
- [15] Srivastava A K, Ojha S N, Ranganathan S. Microstructural features and heat flow analysis of atomized and spray-formed Al-Fe-V-Si alloy [J]. Metall. Mater. Trans. A, 1998, 29A(8): 2205.

Effect of Spray Forming and Hot Extrusion Process Parameters upon Microstructure and Mechanical Properties of 8009 Alloy

Zhu Baohong^{1*}, Xiong Baiqing¹, Zhang Yongan¹, Liu Hongweia¹, Shi Likai¹, Sun Yufeng² (1. Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, National Research Center for Nonferrous Metal Composite Materials, Beijing 100088, China; 2. Institute of Mechanics of China Academic Secenes, National Microgravity Laboratory, Beijing 100080, China)

Abstract: Heat-resistant Al-8.5Fe-1.4V-1.7Si (namely 8009) alloys were prepared by spray forming process. The effects on the microstructure and mechanical properties from the spray forming and hot extrusion processes parameters were investigated. The results show that some coarse rich Fe element phases were eliminated, and the mi-

Key words: spray forming process; hot extrusion process; Al-Fe-V-Si alloy; heat-resistant aluminum alloy

crostructure is very homogeneously and fine. When the parameters of the spray forming process are suitable, the as-deposited alloys have good forming properties and high density, and can be compacted completely with low hot extrusion rate. The alloys have good mechanical properties at both room temperature and high temperature.