

[文章编号] 1004- 0609(2002)02- 0250- 05

喷射成形 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金的制备工艺和性能^①

熊柏青¹, 朱宝宏¹, 张永安¹, 韦 强¹, 石力开¹, 孙玉峰², 沈宁福²

(1. 北京有色金属研究总院 国家有色金属复合材料工程研究中心, 北京 100088;

2. 郑州工业大学 材料科学与工程系, 郑州 450002)

[摘 要] 采用喷射成形方法制备了不同成分的 Al-Fe-V-Si 耐热铝合金, 对喷射成形工艺参数进行了优化, 对沉积坯件的热挤压工艺进行了探索, 对材料的组织进行了分析, 并对不同成分材料的性能进行了比较。结果表明: 当喷射成形工艺参数选择合理时, 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; 沉积坯件热挤压温度的降低有利于使材料获得更高的力学性能; 同时, 通过对合金成分的优化, 可以获得加工和使用性能更加优良的 Al-Fe-V-Si 耐热铝合金。

[关键词] 喷射成形; 耐热铝合金; 组织; 性能

[中图分类号] TG 132.3

[文献标识码] A

Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金由于具有良好的室温和高温强度, 20 世纪 80 年代末以来已在航空、航天等领域得到广泛的应用^[1, 2]。但目前已投入使用的 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金均是通过传统的快速凝固/粉末冶金(RS/PM)工艺生产的, 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, 限制了这种合金应用范围的进一步扩大。喷射成形是 20 世纪 90 年代国际上大规模发展起来的一种先进的快速凝固制坯技术, 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^[3~8]。本文作者采用喷射成形方法试制了不同成分的 Al-Fe-V-Si 耐热铝合金, 对喷射成形工艺参数进行优化, 对沉积坯件的热挤压工艺进行探索, 对材料的组织进行分析, 并对不同成分材料的性能进行比较, 希望能够发展出一种低成本、高效率的 Al-Fe-V-Si 系耐热铝合金生产工艺。

1 实验

喷射成形实验在北京有色金属研究总院自行研制的 SF-200 喷射成形设备上, 合金成分见表 1, 雾化气体为 N₂。具体的喷射成形工艺参数如下: 雾化温度 1 000~ 1 050 ℃, 雾化距离 400~ 500 mm,

斜喷角 20°~ 30°, 接收盘旋转速度 30~ 60 r/min, 下降速度 1~ 3 mm/s, 调整喷射沉积过程中的雾化气体/合金液体质量比(G/M), 选择气雾化喷嘴固定和扫描两种喷射沉积方式。

表 1 实验用 Al-Fe-V-Si 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Al-Fe-V-Si alloy (mass fraction, %)

Alloy	Fe	V	Si	TiC	Al
1	8.5	1.4	1.7	—	Bal.
2	8.5	1.1	1.9	—	Bal.
3	8.5	1.4	1.7	2.0	Bal.

将沉积态合金棒坯剥皮后在不同的温度和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和挤压态组织, 并在 JEM 2000FX 型透射电镜上进一步观察合金的显微结构, 合金的力学性能测试在 MTS-810 型试验机上进行。

2 结果与讨论

2.1 雾化沉积工艺参数对沉积坯件成形性、致密度和实收率的影响

雾化沉积工艺参数对沉积坯件的影响见表 2。所制备的全部沉积坯件的直径控制在 $d_{200} \sim 210$ mm 范围内; 沉积坯件平均致密度的测量是将沉积

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划项目(G1999064905- 3)
[作者简介] 熊柏青(1963-), 男, 教授, 博士。

[收稿日期] 2001- 04- 29; [修订日期] 2001- 08- 01

坯件剥皮(周边 3 mm, 顶部 2 mm, 底部 5 mm)后采用排水法进行测量; 沉积坯件实收率= 沉积坯件质量/ 雾化合金总质量。从表 2 中可以看出, 采用固定喷嘴方式进行喷射成形不利于获得整体致密度较高的沉积坯件, 主要原因是当合金雾化过程中的 G/M 比较低时, 雾滴到达沉积坯件表面时液相含量过高, 沉积坯件的中心部位由于散热较慢而存在明显的“熔池”现象, 大量雾化气体的卷入使得“熔池”内的合金凝固后不可避免地带有大量气孔, 导致沉积坯件整体致密度的降低; 当合金雾化过程中的 G/M 比提高时, 虽然沉积坯件中心较为致密, 但沉积坯件周边由于本身散热速度较快, 当固相含量很高的雾滴沉积后, 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。采用喷嘴扫描方式进行喷射成形可有效地改善沉积坯件整体散热的均匀性, 减少沉积坯件中心和周边部位散热速度的差别^[9], 因此通过选择适当的 G/M 比便可获得整体致密的沉积坯件; 但同时带来的问题是喷雾过喷量加大, 沉积坯件的实收率会有所下降。因此需要控制喷嘴的扫描角度不能过大, 从本实验结果来看选择 ±2.5° 左右为宜; 同时为避免沉积坯件出现分层现象, 喷嘴的扫描频率应尽量提高, 从现有文献报导来看一般不应低于 3 Hz^[9]。图 1 所示为喷射成形 AlFeV-Si 系耐热铝合金的典型金相组织。可见, 当喷射成形工艺参数选择合理时, 沉积坯件晶粒细小、组织均匀、无明显的气孔和疏松, 且未发现明显的、对材料性能不利的富 Fe 针状析出相。

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

热挤压工艺参数对合金型材致密度的影响见表

表 2 气雾化喷嘴扫描角度、G/M 比对沉积坯件成形性、致密度和实收率的影响

Table 2 Effects of atomizer scanning angle and G/M ratio on quality, density and yield of preform

Atomizer scanning angle(°)	G/M ratio	Quality of preform	Relative density/ %	Yield / %
0	3.5	Poor	—	—
0	3.8	Good	85	73
0	4.2	Excellent	89	70
0	4.8	Excellent	92	67
±2.5	3.8	Excellent	95	61
±3.5	3.8	Excellent	96	57

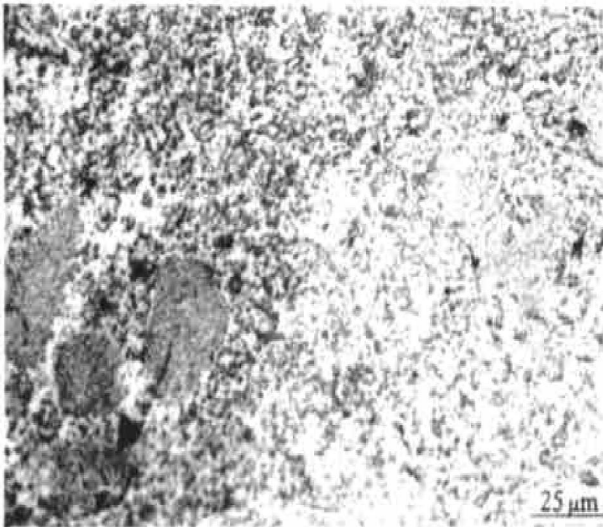


图 1 喷射成形 AlFeV-Si 系耐热铝合金的典型金相组织

Fig. 1 Microstructure of spray formed AlFeV-Si alloy

3。从表 3 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(17: 1) 进行热挤压, 仍无法使合金型材达到接近全致密。对于整体致密度较高的沉积坯件, 当挤压比达到 7: 1 以上时, 可以获得接近全致密的合金型材, 但挤压比从 7: 1 进一步提高至 17: 1 时, 对最终合金型材致密度的影响不大。图 2 所示为喷射成形 AlFeV-Si 系耐热铝合金挤压型材的典型金相组织。从图中可以看出, 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, 各种缺陷的数量进一步降低。

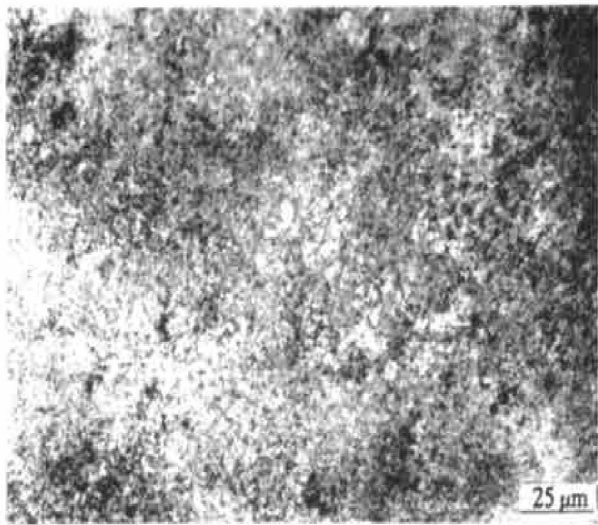


图 2 喷射成形 AlFeV-Si 系耐热铝合金挤压型材的典型金相组织

Fig. 2 Microstructure of as-extruded AlFeV-Si alloy

比较表 4 中的拉伸实验结果可以看出, 当合金挤压型材的致密度较低时, 其力学性能较低, 其原因主要是此时合金挤压型材中存在的缺陷较多, 大

表 3 热挤压工艺参数对合金型材致密度的影响

Table 3 Effect of hot extrusion process on density

Alloy	Relative density of as deposited preform/ %	Hot extrusion parameter	Extrusion ratio	Relative density of as extruded preform/ %
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si	92	400 ℃, 1 h	17: 1	96. 0
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si	95	400 ℃, 1 h	5: 1	97. 2
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si	95	400 ℃, 1 h	7: 1	99. 3
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si	95	350 ℃, 1 h	7: 1	99. 2
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si	95	350 ℃, 1 h	17: 1	99. 4
Al8. 5Fe1. 1V1. 9Si	95	350 ℃, 1 h	17: 1	99. 3
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si+ TiC	95	350 ℃, 1 h	17: 1	99. 4

表 4 喷射成形 AlFeV-Si 系耐热铝合金挤压型材的力学性能

Table 4 Mechanical properties of as-extruded AlFeV-Si alloys

Alloy	Extrusion temperature/ ℃	Relative density of as extruded performs/ %	$\sigma_{0.2}$ / MPa		σ_b / MPa		δ_5 / %		E / GPa	
			25 ℃	350 ℃	25 ℃	350 ℃	25 ℃	350 ℃	25 ℃	350 ℃
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si	400	96. 0	351. 0	—	221. 0	—	8. 0	—	72. 0	—
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si	400	99. 3	395. 0	195. 0	310. 0	171. 0	7. 5	12. 0	73. 0	—
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si	350	99. 4	435. 0	204. 0	330. 0	181. 0	7. 0	14. 0	72. 7	—
Al8. 5Fe1. 1V1. 9Si	350	99. 3	465. 0	200. 0	405. 0	179. 0	15. 0	10. 0	72. 0	—
Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si+ TiC	350	99. 4	482. 0	224. 0	427. 0	191. 0	7. 0	15. 0	74. 4	—

量缺陷成为合金拉伸过程中的裂纹源，并在裂纹扩展过程中相互串通、交叉，使合金更易发生断裂。随着合金挤压型材致密度的提高，合金中缺陷的数量有效减少，使合金拉伸过程中原始开裂源减少，合金的力学性能得到明显提高。

大量的研究结果证实^[10, 11]，对未添加 TiC 的 AlFeV-Si 系合金，其组织由 α (Al) 和 $Al_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 以及少量的 αAlSiFe 相组成，如图 3 所示。结合能谱成分分析结果表明，尺寸在 100~ 300 nm 左右、均匀分布于晶内的球形相为 $Al_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ ；而分布在基体中尺寸在 600 nm 左右的飘带状相和一些尺寸在 50~ 300 nm 左右的不规则相为 αAlSiFe 相。 $Al_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相具有良好的热稳定性^[12]，一般在热挤压及随后的拉伸加热过程中不会发生明显长大；而 αAlSiFe 相则对温度较为敏感^[12]，随着挤压和随后拉伸加热温度的升高，其粗化趋势较为明显，这将显著降低其在合金中的弥散强化效果，因而降低合金的热挤压温度对抑制 αAlSiFe 相的粗化、增强其在合金中的弥散强化效果十分有利。从表 4 的拉伸实验结果还可以看出，随着热挤压温度的降低，合金的力学性能提高。

2.3 合金成分改变对材料组织和性能的影响

在本实验中，为进一步改善合金的加工和使用

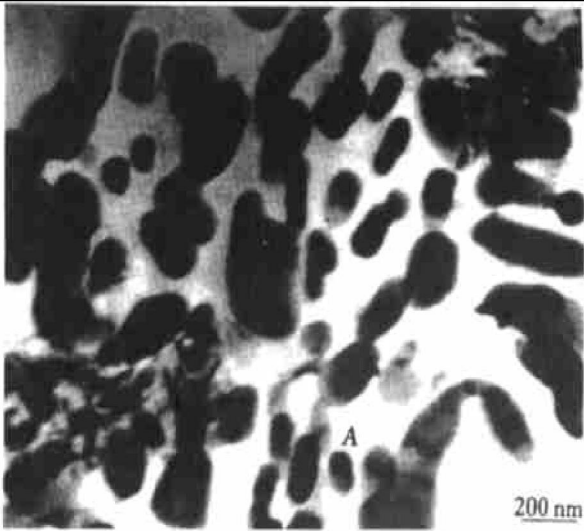


图 3 未添加 TiC 的 AlFeV-Si 系合金的 TEM 像

Fig. 3 TEM morphology of AlFeV-Si alloy without TiC addition

性能，还在 Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si 合金成分的基础上，通过降低合金中 V 含量，同时提高合金中 Si 含量的手段，以及通过原位反应方式加入 TiC 颗粒，设计了两种在成分上与传统 Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si 合金相比略有不同的耐热铝合金。比较表 4 的拉伸实验结果可以看出，与喷射成形 Al8. 5Fe1. 4V1. 7Si 合金相比，喷射成形 Al8. 5Fe1. 1V1. 9Si 合金的室温屈服强度和极限抗拉强度有明显提高，且在室温拉伸过程中样品出现了明显的缩颈现象，其伸长率提

高了 1 倍以上。初步分析其原因可能是在喷射成形 Al8.5Fe1.4V1.7Si 合金中, 由于各合金元素的比例适当, 在喷射成形工艺所提供的冷却速度 ($\sim 10^3$ K/s 左右) 下合金中形成 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相的倾向较大(同时也形成少量 αAlSiFe 相)。合金中所形成的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相的形状基本为球形, 其平均尺寸受合金制备过程中冷却速度的影响, 而喷射成形工艺明显较传统快淬工艺(冷却速度约 10^6 K/s 左右)的冷却速度低, 同时在雾化合金液滴冲击沉积坯件表面时, 由于球状的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相难以被破碎, 因此在采用喷射成形工艺制备合金时, 在凝固过程中直接析出的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相的平均尺寸较大, 增加了合金的脆性, 因此采用喷射成形工艺制备的 Al8.5Fe1.4V1.7Si 合金其室温伸长率很难超过 8%, 而将合金中的 V 含量适当降低, Si 含量升高后, 过量的 Fe 和 Si 导致合金在喷射成形过程中易形成更多的 αAlSiFe 相, 但在喷射成形工艺过程中, 当雾化合金液滴高速冲击沉积坯件表面时, 对条带状、原始尺寸较大的 αAlSiFe 相具有强烈的破碎作用, 足以保证合金中形成大量细小和弥散 αAlSiFe 相颗粒, 从而导致了合金室温强度和伸长率的上升; 当进行上述合金的高温拉伸实验时, 由于在合金长时间加热过程中 αAlSiFe 相会发生明显粗化, 降低了高温环境下其在合金中的弥散强化效果, 从而导致了 Al8.5Fe1.1V1.9Si 合金高温强度和伸长率与 Al8.5Fe1.4V1.7Si 合金相比有所下降, 甚至这种合金自身的高温延伸率与室温延伸率相比亦有所下降。

通过原位反应方式在传统 Al8.5Fe1.4V1.7Si 耐热铝合金中加入 TiC 颗粒后, 由于尺寸在 50 nm 左右的球形 TiC 颗粒均匀地分布在基体上(如图 4

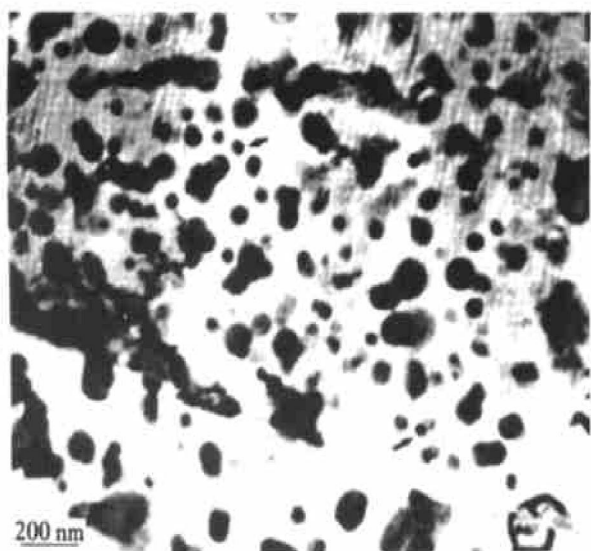


图 4 添加 TiC 的 AlFeV-Si 系合金的 TEM 像

Fig. 4 TEM morphology of AlFeV-Si+TiC alloy

所示), 阻碍了当温度升高时基体组织和各种弥散强化相的粗化, 同时增加了合金中弥散强化相数量, 因此合金的力学性能得到明显提高。

3 结论

1) 当喷射成形工艺参数选择合理时, 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合金型材接近全致密; 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。

2) 沉积坯件热挤压温度的降低有利于使材料获得更高的力学性能, 其原因主要与合金中 αAlSiFe 相的粗化受到抑制有关。

3) 通过原位反应方式在 Al8.5Fe1.4V1.7Si 合金中加入 TiC 颗粒后, 由于 TiC 颗粒阻碍了当温度升高时基体组织和各种弥散强化相的粗化, 同时增加了合金中弥散强化相数量, 合金的力学性能得到明显提高。

[REFERENCES]

- [1] Rylands L M, Wilkes D M J, Raonforth W M, et al. Coarsening of precipitates and dispersoids in aluminum alloy matrices [J]. Journal of Material Science, 1994, 29 (7): 1895- 1900.
- [2] 李月珠. 快速凝固技术和材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
LI Yue-zhu. Rapid Solidification Technology and Materials [M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 1993.
- [3] Leatham A. Introduction and status of spray forming [A]. Proceedings of 4th International Conference on Spray Forming [C]. USA, Baltimore, 1999.
- [4] 熊柏青. 喷射成形技术的产业化现状和应用发展方向 [J]. 稀有金属, 1999, 23(6): 425- 430.
XIONG Ba-qing. Present situation and development of spray forming technology [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 1999, 23(6): 425- 430.
- [5] 熊柏青. 喷射成形技术制备高性能铝合金材料 [J]. 材料导报, 2000, 14(12): 50- 55.
XIONG Ba-qing. Preparation of high properties aluminum alloys by spray forming process [J]. Materials Review, 2000, 14(12): 50- 55.
- [6] XIONG Ba-qing. Preparation of round billets by spray forming process [J]. Transactions of Nonferrous Metals

- Society of China, 1999, 9(2): 302– 307.
- [7] XIONG Bai-qing. Preparation of tube blanks by atomization deposition process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1999, 9(3): 472– 476.
- [8] 袁武华, 陈振华. 多层喷射沉积技术的研究及进展 [J]. 材料导报, 2000, 14(1): 17– 22.
YUAN Wu-hua, CHEN Zhen-hua. Research and development of multilayer spray deposition technology [J]. Materials Review, 2000, 14(1): 17– 22.
- [9] Aumund-Kopp C, Buchholz M, Uhlenwinkel V, et al. Mass flux distribution of a mechanically scanning atomizer for application with spray forming [A]. Proceedings of 4th International Conference on Spray Forming [C]. USA, Baltimore, 1999.
- [10] Sahoo K L, Sivaramakrishnan C S, Chakrabarti A K, et al. Solidification characteristics of the Al-8.3Fe-0.8V-0.9Si alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31A(6): 1599– 1610.
- [11] Hariprasad S. Microstructures and mechanical properties of dispersion-strengthened high-temperature Al-8.5Fe-1.2V-1.7Si alloys produced by atomized melt deposition process [J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24A(4): 865– 871.
- [12] Srivastava A K, Ojha S N, Ranganathan S, et al. Microstructural features and heat flow analysis of atomized and spray-formed Al-Fe-V-Si alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29A(8): 2205– 2219.

Technique and property of heat resisting Al-Fe-V-Si alloys prepared by spray forming process

XIONG Bai-qing¹, ZHU Bao-hong¹, ZHANG Yong-an¹, WEI Qiang¹,
SHI Li-kai¹, SUN Yu-feng², SHENG Ning-fu²

(1. National Engineering Research Center of Nonferrous Metal Composites,
Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China;
2. Department of Materials Science and Engineering, Zhengzhou Polytechnic University,
Zhengzhou 450002, China)

[Abstract] Heat resisting Al-Fe-V-Si alloys have been prepared by spray forming process. The process parameters were optimized, the hot extrusion process was investigated, and the microstructures and resulting mechanical properties were evaluated and compared. The results show that under suitable spray forming conditions, the as-deposited alloys have good forming properties and high dense, and can be compacted completely with low hot extrusion rate. The decrease of hot extrusion temperature has good effects on mechanical properties of extruded products. By optimizing the alloy contents, high machining and employing properties of alloys can be obtained.

[Key words] spray forming process; heat resisting aluminium alloy; microstructure; mechanical property

(编辑 杨 兵)