

文章编号: 1004 - 0609(2004)08 - 1348 - 05

喷射沉积-轧制工艺制备的 FVS0812 薄板的高温组织和力学性能^①

詹美燕, 陈振华, 夏伟军

(湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 用喷射沉积-轧制工艺制备了 FVS0812 耐热铝合金薄板, 研究了该板材在高温下的组织与性能。实验表明, 板材具有优异的高温力学性能和热稳定性, 可归因于基体上弥散分布的纳米尺寸的 $Al_{12}(Fe, V)_3Si$ 相。FVS0812 合金在 200~300 °C 温区内延性降低, 是铁原子扩散而造成的动态应变时效(DSA)的结果。较高温度下板材的拉伸断口呈晶间断裂, 可能是由于 DSA 效应中铁原子和 $Al_{12}(Fe, V)_3Si$ 扩散到晶界而造成的晶界弱化的结果。

关键词: 喷射沉积; 耐热铝合金; 组织; 性能

中图分类号: TF 124.37

文献标识码: A

Microstructure and properties of spray-deposited heat-resistant FVS0812 aluminum alloy at high temperature

ZHAN Mei-yan, CHEN Zhen-hua, XIA Wei-jun

(School of Materials Science and Engineering,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The FVS0812 heat-resistant aluminium alloy sheets were produced by spray-deposition and rolling process. The high temperature hardness, microstructure and mechanical properties were studied. The results reveal that the attractive elevated temperature mechanical properties of FVS0812 alloy are attributed to the ultrafine dispersed $Al_{12}(Fe, V)_3Si$. DSA was observed at a temperature ranged from 200 °C to 300 °C which was demonstrated via a drop in the tensile elongation. The fractographs of FVS0812 at elevated temperature are characterized by intergranular fracture possibly owing to the decrease of strength in grain boundary caused by DSA and the gathering of $Al_{12}(Fe, V)_3Si$.

Key words: spray deposition; heat-resistant aluminium alloy; microstructure; properties

传统高温高强铝合金(2000系、7000系)使用温度不能高于190 °C, 温度更高时会出现相变及晶粒粗化现象。应用快速凝固技术开发的一系列耐热铝合金在300 °C以上还具有较好的力学性能^[1-5], 这是因为用快速凝固技术制备耐热铝合金, 可以使溶质原子在铝基体中的固溶度大大提高, 具有一定的过饱和度。虽然过饱和度与合金元素的含量相比

较小, 但是它可以通过动态应变时效(DSA)影响合金的力学行为^[4-14], 尤其是中温区的力学行为, 从而导致了材料变形特性的改变, 如动态应变时效降低了材料在中温区的拉伸延性, 中温区的范围有赖于固溶元素和应变速率。耐热铝合金FVS0812将被应用于航空航天领域, 因此研究分析其高温性能及成形性具有重要意义。

① 收稿日期: 2003-11-12; 修订日期: 2004-03-01

作者简介: 詹美燕(1973-), 女, 博士研究生。

通讯作者: 陈振华, 教授, 博士; 电话: 0731-8821648; E-mail: chenzhenhua@hotmail.com

本文作者采用喷射沉积-直接轧制成形工艺制备了 FVS0812 耐热铝合金薄板, 研究了该材料的高温力学性能, 以为材料的塑性加工与成形提供一定的理论基础。

1 实验

采用喷射沉积技术制备了 8009 耐热铝合金板坯^[15], 合金化学成分(质量分数, %)为: 8.5Fe, 1.3V, 1.7Si, 余为 Al。板坯采用包套轧制、交叉轧制工艺直接轧得 1.2 mm 薄板。薄板沿轧制纵向和轧制横向取试样, 分别按 GB/6397-86 和 GB/4338-84 线切割制备室温和高温力学性能拉伸试样, 标距 $L_0=25$ mm。高温拉伸分别在 100、150、200、250、300、350、400、450 °C 保温 10 min 后进行, 拉伸速度为 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。在 WDW-E200 型电子拉伸机上进行拉伸实验。对成品薄板进行退火处理。退火试样在 HBRVU-187.5 型布洛维光学硬度计上测试硬度, 用 XJL-03 型金相显微镜及 JEOL JSM-5600LV 型扫描电镜观察退火前后的组织变化。

2 结果与讨论

2.1 8009 薄板的室温组织与性能

轧制纵向与横向的室温力学性能见表 1。由于采用反复交叉轧制, 板材纵向与横向的力学性能相近, 板材的各向异性不明显。薄板优良的室温力学性能来源于其细小的晶粒和大量均匀分布在基体上

的球状纳米弥散相。板材显微组织如图 1 所示, 可见板材中的细小球状第二相 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 均匀分布在晶内与晶界处, 尺寸为 30~70 nm 左右, 密集处的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相互接触^[6]。

表 1 薄板的室温力学性能

Table 1 Mechanical properties of FVS0812 sheet at room temperature

| Direction | σ_s /MPa | σ_b /MPa | δ /% | E /GPa |
|--------------|-----------------|-----------------|-------------|----------|
| Longitudinal | 307 | 415 | 14.4 | 85 |
| Transverse | 301 | 406 | 12.0 | 79 |

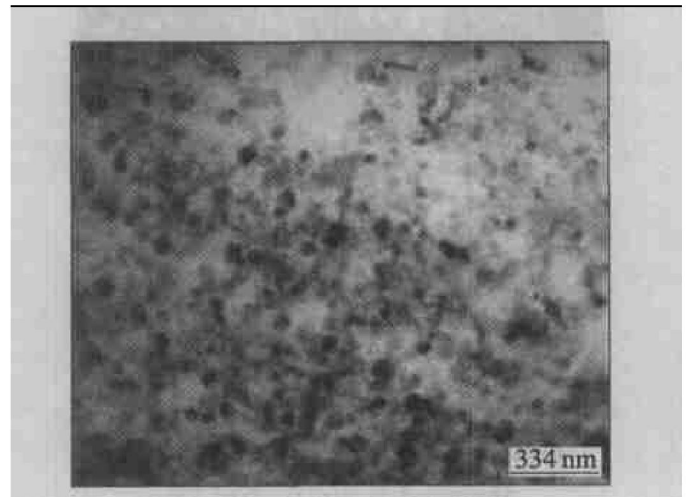


图 1 薄板的显微组织

Fig. 1 Microstructure of sheet

2.2 高温退火对薄板组织与性能的影响

退火温度和时间对 FVS0812 薄板硬度的影响如图 2 所示。

由图 2 可见, 本实验制备的 FVS 0812 耐热铝

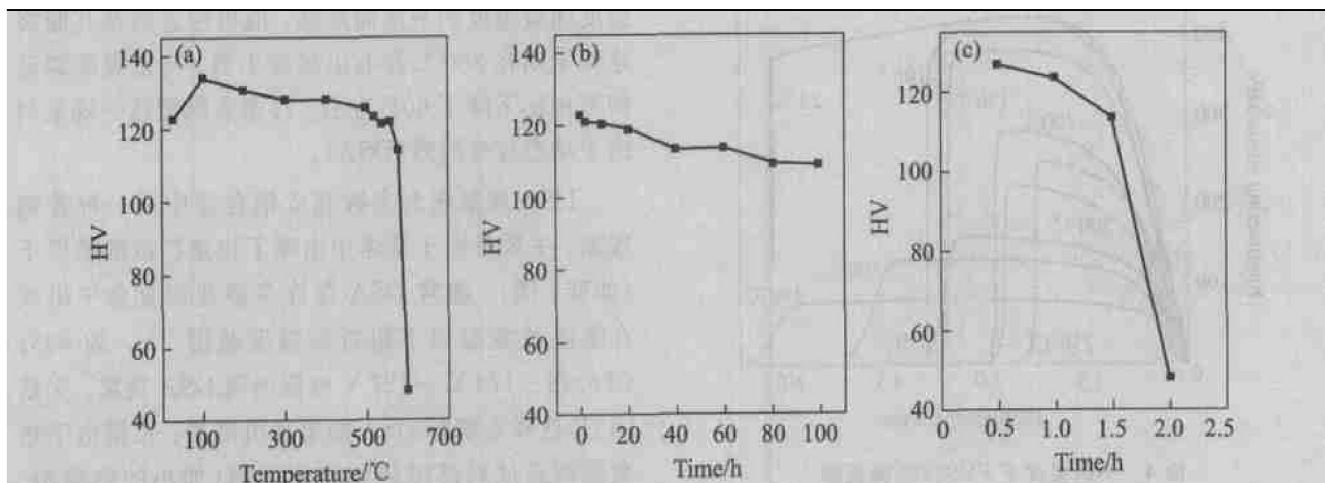


图 2 退火温度和时间对 FVS0812 薄板硬度的影响

Fig. 2 Room temperature hardness after annealed at: (a) different temperatures for 2 h; (b) 540 °C for different durations; (c) 600 °C for different durations

合金薄板具有优越的热稳定性, 在 540 °C、100 h 退火后硬度值下降不大。这可归因于基体上弥散分布的大量的纳米尺寸 $Al_{12}(Fe, V)_3Si$ 第二相, 该相热稳定性高, 在高温下粗化速率慢 ($\sim 10^{-27} m^3/h$)^[4], 而且能有效阻碍位错运动, 阻止基体晶粒的长大和再结晶。只有当退火温度达到 600 °C、保温 2 h 时, 材料的硬度才有明显下降, 此时材料的微观组织如图 3 所示。由图 3 可见, 600 °C、2 h 退火后基体内细小的球状第二相已经转变为粗大的针状、片状相, 能谱测定为 $Al_{13}Fe_4$ 。

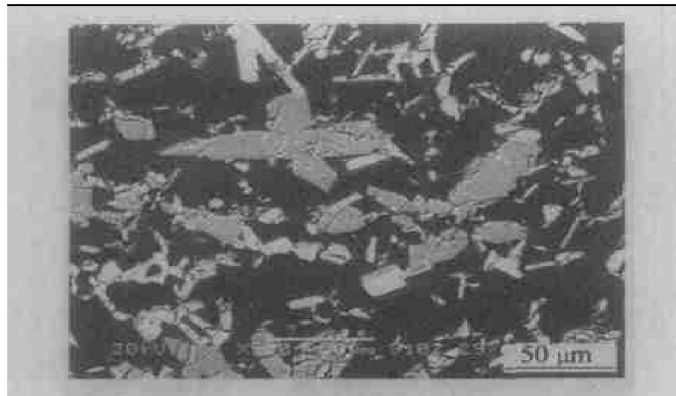


图 3 薄板经 600 °C、2 h 退火后的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM image of sheet after annealed at 600 °C for 2 h

2.3 薄板的高温力学性能

薄板在不同温度下的应力—位移曲线如图 4 所示。由图 4 可见, 250 °C 的应力—位移曲线屈服之前的部分变形抗力比 200 °C 的要大。温度对薄板屈服强度、断裂强度和断裂延伸率的影响如图 5 所示。

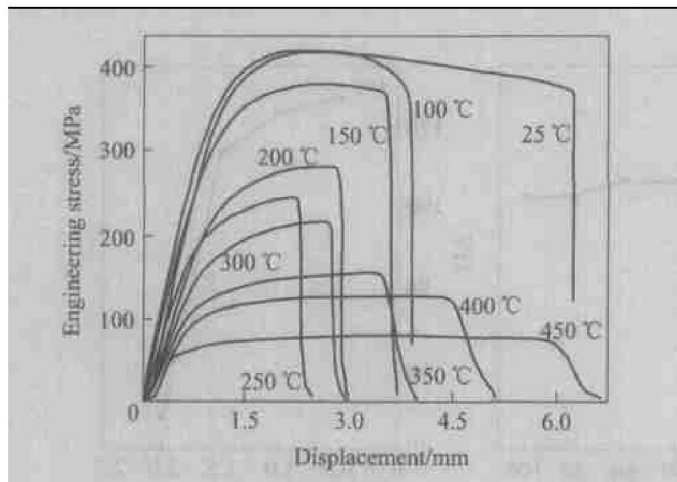


图 4 不同温度下 FVS0812 薄板的拉伸曲线 ($\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-4} s^{-1}$)

Fig. 4 Stress—strain curves of FVS0812 sheet at different temperatures with strain rate of $3.3 \times 10^{-4} s^{-1}$

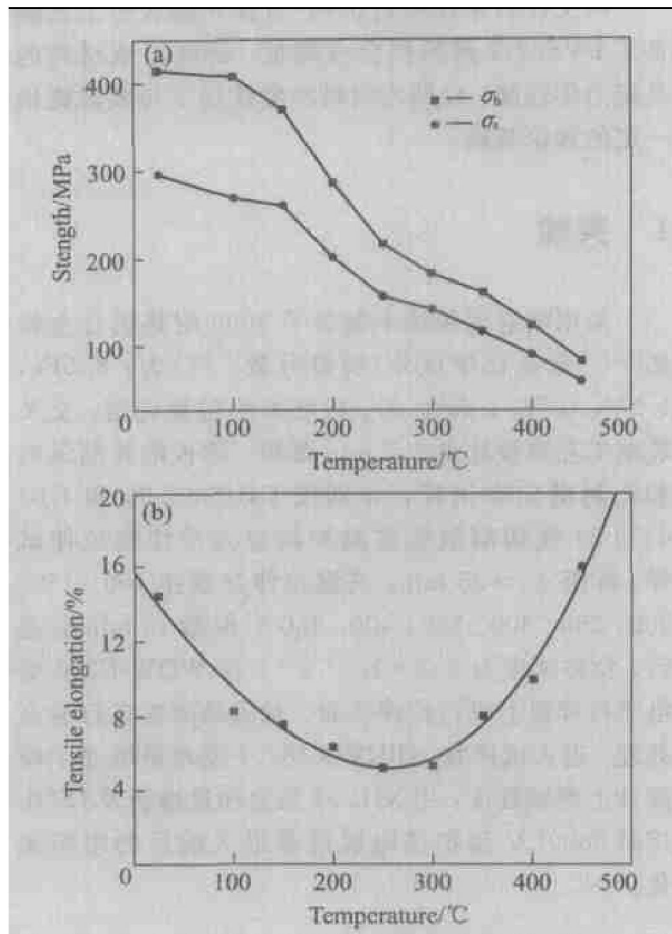


图 5 不同温度下 FVS0812 薄板屈服应力、断裂强度(a) 和断裂延性(b) 与温度的关系

Fig. 5 Ultimate tensile strength and yield strength(a) and fracture elongation(b) of FVS0812 versus testing temperature

示。由图 5 可见, FVS0812 薄板的屈服强度与抗拉强度随着温度的升高而降低, 值得注意的是其断裂延伸率则在 250 °C 左右出现最小值, 与室温断裂延伸率相比下降了 60% 左右。许多文献把这一现象归因于动态应变时效(DSA)。

DSA 现象在大多数商业铝合金中是一种普遍现象, 主要是由于基体中出现了快速扩散溶质原子(如硅、镁)。通常 DSA 在许多商业铝合金中出现在室温或室温以下附近的温度范围^[4, 5], 如 6061 (T6) 在 -173 °C~127 °C 范围出现 DSA 现象。文献 [4] 是这样来解释 DSA 的微观机制的: 位错由于热激活而通过局部障碍物聚集区域(如小的弥散相、位错林)的运动过程, 有一个等待时间 t_w 。在等待时间内, 溶质原子扩散到位错中去, 增加了障碍物的强度。因此, 随着等待时间的增加, 障碍物的强度越来越大, 导致了在流动应力值上出现了一个与热作用相反的被激活的时效作用。由于这种效应基

于扩散, 因此温度上升(溶质扩散更快)将使合金的流动应力 σ_f 增加, 使 $\sigma-T$ 曲线出现凸形, 这种作用随着温度的升高、应变速率的下降而增强。对于高温耐热铝合金来说, 由于引进了在固溶状态下扩散速率很慢的合金元素铁, 以阻止析出相的快速长大, 因此 DSA 现象会在更高的温度下才表现出来, 并且会由于 RS 过程中溶质固溶解度的增加而加强。当温度足够高以后, 溶质的扩散速度足够快, 则 DSA 不再发生。

DSA 被认为是溶质气团与运动位错之间的相互作用, 增强了 DSA 温区材料的强度, 并且影响了应变硬化速率, 导致局部塑性不稳定使延性下降。DSA 对延性的影响大小有赖于被溶质气团锁定的运动位错的数目, 溶质气团由固溶状态溶质的量所控制。对于大多数合金, 由于固溶度小, 这个因素

的影响相对较小, 但 FVS0812 中固溶态铁的含量很高, 因此 DSA 效应更大。

2.4 拉伸断口分析

不同温度下的拉伸断口形貌如图 6 所示。室温及 100 °C 下的拉伸断口呈明显的近圆形韧窝, 材料属延性断裂。当拉伸温度大于 250 °C 后的断口则是典型的晶间断裂, 可以认为由于 DSA 效应而造成的晶界弱化是晶间断裂的原因。铁元素在较高的温度下, 扩散速度增加, 从而使其在晶界的浓度增加, 降低了晶界的断裂强度。另外, 可以从图 6(e) 中发现, 在更高的拉伸温度时, 弥散分布的 $Al_{12}(Fe, V)_3Si$ 第二相粒子会向晶界扩散, 这可能也是造成晶界弱化的一个因素。

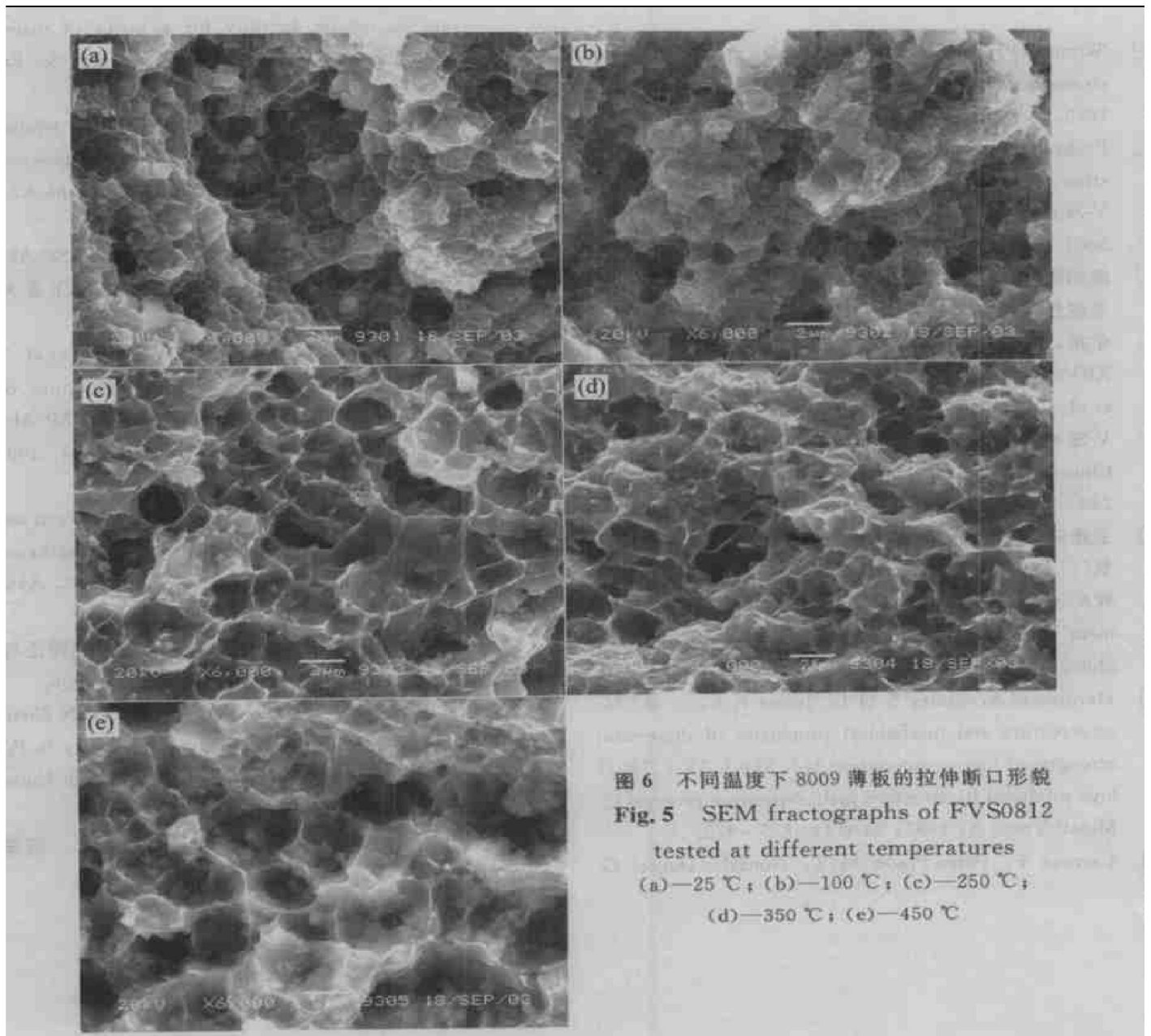


图 6 不同温度下 8009 薄板的拉伸断口形貌
Fig. 5 SEM fractographs of FVS0812 tested at different temperatures
(a)—25 °C; (b)—100 °C; (c)—250 °C;
(d)—350 °C; (e)—450 °C

3 结论

1) 用喷射沉积-轧制工艺制备的 FVS0812 耐热铝合金薄板具有优异的高温稳定性, 在 540 °C, 100 h 退火后硬度值下降不大, 高的热稳定性来自于基体上弥散分布的 $Al_{12}(Fe, V)_3Si$ 相。

2) FVS0812 耐热铝合金薄板具有优异的室温及高温力学性能; 在 200~ 300 °C 温区内存在一个中温脆性区, 可归因于铁原子扩散而引起的 DSA 效应。在较高温度下, 拉伸断口呈晶间断裂形貌, 可能是由于 DSA 效应和 $Al_{12}(Fe, V)_3Si$ 相扩散到晶界而造成的。

REFERENCES

- [1] Skinner D J, Bye R L, Raybould D, et al. Dispersion strengthened AlFeV-Si alloy[J]. Scripta Metall, 1986, 20: 867 - 872.
- [2] Prakash U, Raghu T, Gokhale A A, et al. Microstructure and mechanical properties of RSP/M AlFeV-Si and AlFeCe alloys[J]. J Mater Sci, 1999, 34: 5061 - 5065.
- [3] 熊柏清, 朱宝宏, 张永安, 等. 喷射成形 AlFeV-Si 系耐热铝合金的制备工艺和性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 250 - 254.
XIONG Baiqing, ZHU Baohong, ZHANG Yong'an, et al. Technique and property of heat resisting AlFeV-Si alloys prepared by spray forming process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 250 - 254.
- [4] 王建强, 曾梅光. 快速凝固耐热铝合金研究动态与前景[J]. 材料工程, 1995, 12: 43 - 46.
WANG Jiangqiang, ZENG Meiguang. The development and prospect of rapid solidified high-temperature aluminium alloy[J]. J Mater Eng, 1995, 12: 43 - 46.
- [5] Hariprasad S, Sastry S M L, Jerina K L, et al. Microstructure and mechanical properties of dispersion strengthened high-temperature Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si alloys produced by atomized melt deposition process[J]. Metall Trans A, 1993, 24A(4): 865 - 875.
- [6] Carrena F, Perez-Prado M T, Gonzalez Doncel G. Texture stability of a rapidly solidified dispersion strengthened AlFeV-Si material[J]. Scripta Mater, 1998, 38: 1427 - 1433.
- [7] Bouchaud E, Kubin L, Octor H. Ductility and dynamic strain aging in rapidly solidified aluminium alloys[J]. Metall Trans A, 1991, 22A(3): 1021 - 1027.
- [8] Frank R E, Hawk J A. Effect of very high temperature on the mechanical properties of AlFeV-Si alloy[J]. Scripta Metall, 1989, 23: 113 - 118.
- [9] Lee J C, Lee S, Lee D Y, et al. On the embrittle of a rapidly solidified AlFeV-Si alloy after high-temperature exposure[J]. Metall Trans A, 1991, 22A: 853 - 858.
- [10] Mitra S. Elevated temperature mechanical properties of a rapidly solidified AlFeV-Si[J]. Scripta Metall, 1992, 27: 521 - 526.
- [11] Skinner D J, Zedalis M S, Gilman P. Effects of strain rate on tensile ductility for a series of dispersion strengthened Al based alloy[J]. Mater Sci Eng A, 1989, A119: 81 - 86.
- [12] Zhu S J, Kucharova K, Cadek J. High temperature creep in an Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si alloy processed by rapid solidification[J]. Metall Mater Trans A, 2000, 31A: 2229 - 2237.
- [13] 徐移恒, 李松瑞, 黎文献, 等. 高温对 RSP AlFeV-Si 系合金组织与性能的影响[J]. 中南工业大学学报, 1996, 27(3): 320 - 323.
XU Yiheng, LI Songrui, LI Wenxian, et al. Investigation on the effect of high temperature on the structure and mechanical properties of RSP AlFeV-Si alloy[J]. J Cent South Univ Technol, 1996, 27(3): 320 - 323.
- [14] Khatri S C, Lawley A, Koczak M J. Creep and microstructural stability of dispersion strengthened AlFeV-Si alloy[J]. Mater Sci Eng A, 1993, A167: 11 - 21.
- [15] 黄培云, 金展鹏, 陈振华. 粉末冶金基础理论与新技术[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1995.
HUANG Peiyun, JIN Zhanpeng, CHEN Zhenhua, et al. Basal Theory and New Technology in Powder Metallurgy[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1995.

(编辑 何学锋)