

喷射沉积电子封装用高硅铝合金的研究进展

刘文水, 王日初, 彭超群, 莫静怡, 朱学卫, 彭 健

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 微电子技术的飞速发展对电子封装材料提出更高的要求, 传统电子封装材料已难以满足现代封装需要。新型喷射沉积电子封装用高硅铝合金以其组织细小均匀、各向同性、热膨胀系数低、热导率高、密度低, 且具有良好的机械加工、涂覆性能以及焊接性能等优良的综合性能成为研究焦点。主要探讨高硅铝合金的喷射沉积制备方法、组织性能和研究动态, 并对其发展前景进行展望。

关键词: 高硅铝合金; 电子封装; 喷射沉积; 热膨胀系数; 热导率; 密度

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Research progress of spray deposited high Si-Al alloys for electronic packaging

LIU Wen-shui, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, MO Jing-yi, ZHU Xue-wei, PENG Jian

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The increasing development of modern microelectronic technology contributes to a higher demand for packaging materials. However, traditional ones can no longer work well for the modern packaging. A new series of spray deposition high Si-Al alloys developed for electronic packaging have attracted much attention for their remarkable comprehensive properties, such as combination of uniform small microstructure, low coefficient of thermal expansion, light mass and good machinability as well as easily coated and welded. The spray deposition process, microstructure, performance as well as research status were discussed, and the relevant problems and development tendency corresponding were also addressed.

Key words: high Si-Al alloys; electronic packaging; spray deposition; coefficient of thermal expansion; thermal conductivity

封装在电路中具有支撑电路、密封、散热和屏蔽等作用, 对电路的性能和可靠性具有重要影响。随着现代电子技术的不断发展, 半导体集成电路芯片(IC)的集成度、频率、组装密度以及计算速度日益提高, 要求电子封装材料主要性能有相应的提升。

在传统电子封装材料中, AlN 易被水溶液侵蚀, 制备工艺复杂, 成本高。Al₂O₃ 应用已较为成熟, 价格低廉, 具有良好的耐热冲击性和电绝缘性, 但热传导性能差, 无法在大功率集成电路中应用。Al 的热导率 (Thermal conductivity, TC) 高、密度小、成本低且易加

工, 但是其热膨胀系数 (Coefficient of thermal expansion, CTE) 高达 $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 远高于 Si 和 GaAs 的, 在器件工作热循环时易产生热应力, 从而导致失效。铜的热导性能较优, 但热膨胀系数高, 且还存在密度过大的问题。W 和 Mo 的热膨胀系数都较接近常用半导体材料的, 热传导性能也能满足封装要求, 但密度较大, 且与 Si 的润湿性不好, 可焊性差, 通常需要在表面涂覆特殊的 Ni 或 Ag 基金属来改性, 工艺复杂, 生产成本低。Be 的热膨胀系数与 GaAs 的相近, 热传导性能良好 ($260 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), 而且也是一种轻质材料, 从理论

上能够满足现代电子封装的要求, 但 Be 有剧毒, 不符合环境友好的要求。Kovar alloy(Fe-29Ni-17Co) 和 Invar alloy(Ni-Fe)热膨胀系数较低, 热导率却非常低, 密度也较高^[1]。

复合材料具有剪裁物性特征, 通过调整第二相含量可以得到预期综合性能。基于此, 人们将研究方向转向了金属基复合材料, 以期综合金属材料热导率高和无机非金属材料热膨胀系数低的优势。目前开发较成熟的有 Al 基复合材料和 Cu 基复合材料。SiC_p/Al 综合参数已能基本满足要求, 并实现一定规模的商品化生产和实际应用, 但其机械加工性能差, 生产工艺复杂, 不易于精确控制。Cu 基复合材料密度过高, 不适合作为航天航空材料。

近年来, 人们研发出一种新型环保易加工的 Si_p/Al 电子封装材料。该材料体系具有良好的热物理性能, 热膨胀系数与基片材料的匹配($7 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), 热导率较高($> 100 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), 密度低($2.4 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$), 且增强相与铝基体之间润湿良好, 在制备过程中不会发生反应而形成中间化合物, 综合了基体在热导率和增强体在热膨胀系数与密度等方面的优势, 是一种很有前景的新型电子封装材料。

JACOBSON 等^[2]在喷射沉积制备高硅铝合金的研发和生产方面起步较早, 已开发出 Al-xSi(12%~70%)系列可控膨胀合金, 通过调整 Si 含量, 材料的热膨胀系数(CTE)在 $7.4 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 之间可控, 该公司还致力于研发 CTE 值约为 $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 的 85%Si-Al 合金。HA 等^[3]采用 Osprey 工艺制备了 Al-25%Si 合金, 得到粒径为 5~7 μm 的等轴初晶硅均匀弥散分布于 Al 基体中的理想组织, 并在挤压比和温度分别为 28:1 和 400 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行热挤压, Si 的尺寸进一步细化至 2 μm 。CHIANG 和 TSAO^[4]报道喷射沉积制备的 Al-25Si、Al-35Si 和 Al-45Si 的尺寸分别为(2.1 ± 1.1)、(5.7 ± 1.2)和(7.3 ± 2.6) μm , 初晶 Si 颗粒钝化良好。田冲等^[5]利用自主设计的喷射沉积设备制备 70%Si-Al 合金, 弥散分布的 Si 相粒子尺寸为 10~20 μm , 热膨胀系数为 $7 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 热导率高于 $100 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 机械加工性能良好。YU 等^[6]利用喷射沉积法制备了 90%Si-Al, 其初晶硅尺寸为 20~30 μm , 密度为 2.25 g/cm^3 , 热导率为 $100 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 298 K 下的 CTE 为 $3.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 673 K 下的 CTE 为 $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

目前, 具有低热膨胀系数、高热导率、轻质、高刚度、尺寸稳定和易于机械加工等优良综合性能的喷射沉积高硅铝合金已经得到一定实际应用, 在射频/微波封装和基板(如 CE11、13、17)、光学和光电子封装(如 CE7、9、11、13、17)、压层 PCBs 基板(如 CE13、17)、

传感器基板(如 CE7)、散热片(如 CE7、11、13)、激光系统镜头支架(如 CE9)、半导体加工装置(如 CE13)和焊接安装夹具(如 CE13)等领域的研发应用已较为成熟^[2]。

本文作者介绍喷射沉积法制备高硅铝合金及其组织与性能, 探讨材料性能变化规律和主要影响因素, 总结喷射沉积高硅铝合金研究动态, 并指出喷射沉积高硅铝合金研究中尚存在的问题与发展方向。

1 喷射沉积高硅铝合金的组织与性能

1.1 喷射沉积法与传统制备方法的比较

1.1.1 传统方法制备高硅铝合金存在的问题

Al-Si 系是一个熔点相差很大的两相体系, Al 相和 Si 相之间不发生反应, 两相之间在常温下的固溶度也极小, 尤其是 Al 在 Si 中几乎不固溶。当合金液的成分处于过共晶区(Si 的含量大于 12.2%)时, 利用传统熔铸法制备硅铝合金, 形成粗大块状或板条状初晶 Si 与针状 Al-Si 共晶并存的组织, Si 的分布极不均匀。粗大的脆性 Si 相在压力加工时易断裂产生裂纹, 材料的力学性能差, 难以进行机械加工等后续处理, 其典型组织如图 1 所示(Si-30%Al)^[7]。随着合金中硅含量的升高, 这一问题更为突出, 同时受到工艺本身的局限, 很难制备高硅铝合金, 阻碍了这种很有应用前景的封装材料的生产应用。

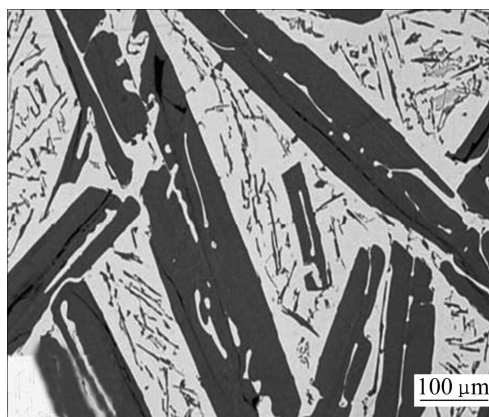


图1 铸造 Si-30%Al 合金的显微组织^[8]

Fig. 1 Microstructure of as-cast Si-30%Al alloy

针对常规熔铸法的不足, 研究者们转而采用粉末冶金法制备硅铝合金。粉末冶金法较易实现两相均匀混合、成分控制和材料成形, 不受基体和第二相的限制, 可以获得颗粒细小、组织均匀和高致密度的复合材料。但当增强体颗粒含量过高时, 合金中会出现各种组织缺陷甚至不能成形^[8]。粉末冶金过程中极易发

生活活泼 Al 粉的氧化, 形成一层稳定的氧化膜, 在惰性气氛下不能被还原和破碎, 对材料内部各相之间的结合、组织、结构以及宏观综合性能都将产生不利影响。此外, 粉末冶金法工序复杂, 涉及的参数多, 难以进行精确控制。粉末冶金设备复杂、成本高, 也是极大地制约该技术在高硅铝合金制备中应用的重要原因^[9]。

研究者们还提出快速凝固-粉末冶金(RS-PM)、熔渗、粉末热压和真空包套热挤压等方法来制备高硅铝合金, 但都由于自身工序复杂、可操作性差或者制备的材料性能达不到相应要求而不适于制备高硅铝合金, 为此, 材料工作者们开发出喷射沉积法。

1.1.2 喷射沉积法制备高硅铝合金

英国 Swansea 大学 SINGER^[10]最早于 1968 年提出喷射沉积理念, 并将金属熔体直接喷射沉积到旋转辊上轧制成带材, 降低了传统铸造-轧制工艺过程中的消耗, 简化了工序, 降低了生产成本, 材料的组织性能得到进一步优化。受此启发, SINGER 的学生 BROOKS 等对该工艺进行进一步的开发, 于 1974 年发明著名的 Osprey 工艺, 成立了 Osprey 金属公司。

图 2 所示为喷射沉积示意图。该工艺的基本原理如下: 将硅铝合金在感应炉中加热成熔体, 熔体经导流管流出后被高压高动量惰性气体破碎雾化成一比例细小固态、半固态和液态颗粒分布的射流。射流在高速气体的作用下沿喷嘴轴线向旋转的接收基板运动, 并不断与气流之间进行热交换冷却。快速冷凝条

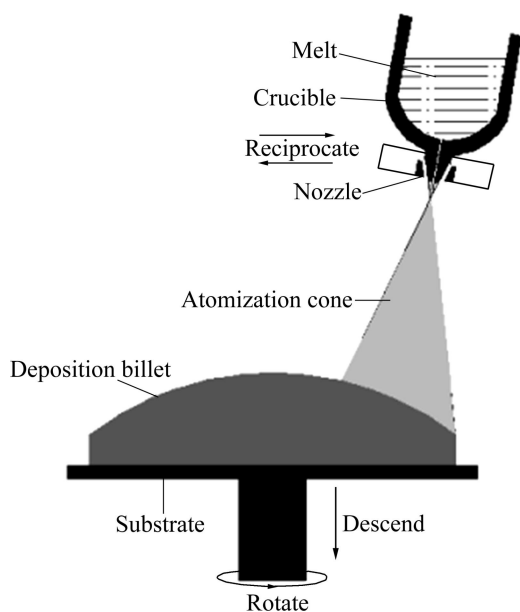


图 2 喷射沉积示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing principle of spray deposition process

件下沉积在基板上, 在其表面附着、堆积、铺展、融合并最终凝固得到组织细小、各向同性的致密坯体^[3]。喷射沉积法有机地将雾化制粉和制坯工艺结合起来, 缩短了工艺流程, 缓解了快速凝固/粉末冶金(RS/PM)中出现的粉末氧化问题, 降低了生产成本^[11]。喷射沉积技术可以显著减小高硅铝合金材料的晶粒尺寸、细化微观组织, 使 Si 颗粒均匀、弥散地分布在铝基体中, 大幅度提高增强相粒子在基体中的固溶度, 获得偏析少或者无偏析的均匀微观组织。材料的力学性能、热物理性能以及机械加工性能得到优化, 可以满足实际应用需求^[12], 为在传统制备工艺下无法获得理想成分、组织、结构和性能高硅铝合金的研发和应用打开了一个突破口。

1.2 喷射沉积高硅铝合金的组织

高硅铝合金熔液从导流管流出, 迅速被高压高速的惰性气体冲击破碎, 雾化成众多粒径细小、比表面积大的熔滴, 极大地增加了金属熔体与同时起冷却介质作用的高压惰性气体的接触面积, 使高温熔体的散热效率显著提高, 冷却速度可达 10^6 K/s。熔体的热量通过冷却介质迅速释放, 获得很大的过冷度, 达到临界晶核尺寸的晶胚数量远高于常规铸造, 大量初晶 Si 晶胚能够成核并结晶长大。由于熔体中的 Si 量一定, 符合成核并长大的晶胚数量越多, 平均每个晶胚所能分配到的 Si 量就越少, 最终生成的 Si 粒平均粒径就越小。同时, 在快速凝固条件下, 出现溶质截留现象, 一定量的 Si 被截留在 Al 基体中而不能析出参与硅的形核长大, 形成过饱和固溶体, 使 Si 粒子在生长时能获得的 Si 原子减少, 进一步细化 Si 相^[13]。

熔滴在冷却介质中飞行时, 熔滴继续与气体对流和辐射散热, 冷却速度达到 10^3 K/s, 属于近快速凝固, 仍能够很好地继续抑制晶核的长大。熔滴在高速气体的作用下, 最终到达距喷嘴有一定距离的沉积基板上, 并开始在气体及沉积基板的强制冷却作用下凝固, 沉积坯表面保持一薄层半固态液膜, 后续熔滴到达沉积坯时, 彼此能够很好地融合, 得到均匀连续的整体性结构^[14]。射流在高压气体的作用下不断地高速冲击熔池, 使已经凝固的枝晶 Si 破碎、变形, Si 颗粒数量增加, 形成新的非均匀形核核心并结晶长大。后续熔滴在沉积坯表面凝固焊合的过程中, 伴随结晶潜热的释放, 局部发生重熔现象, 这也有助于尚未凝固的液相 Si 的长大。液相的快速凝固阻碍 Si 原子的长距离扩散, 阻止 Si 晶粒过度长大, 得到细小均匀的组织^[15]。

图 3 所示为含 Si 量不同喷射沉积高硅铝合金的微观组织^[4]。由图 3 可知, 细小 Si 颗粒均匀弥散地分布

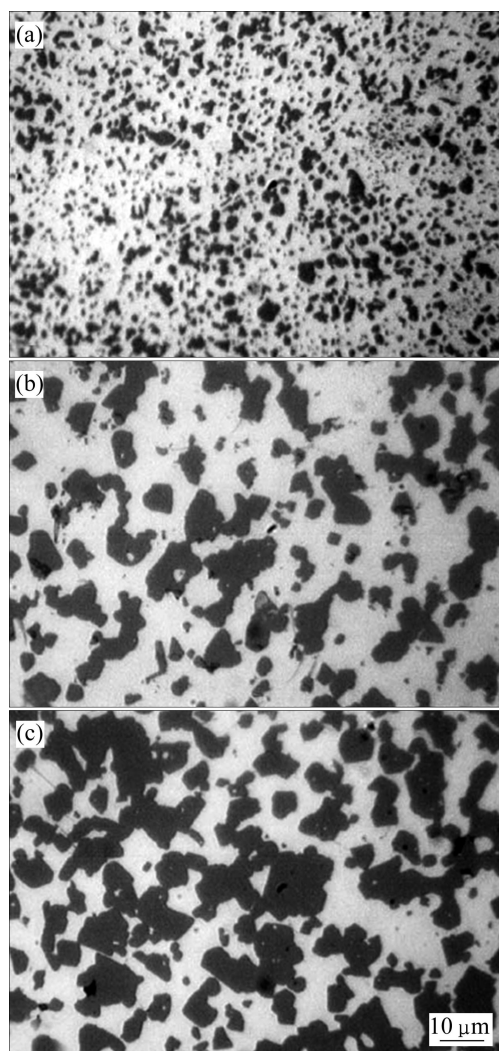


图 3 喷射沉积 Al-25Si、Al-35Si 和 Al-45Si 的显微组织^[4]

Fig.3 Microstructures of spray-deposited Al-25Si(a), Al-35Si(b) and Al-45Si(c)^[4]

在连续 Al 基体中, 无针状共晶硅存在, 随着 Si 含量的增加, Si 颗粒尺寸有所增大, 但仍处于微米级范围内。

关于喷射沉积高硅铝合金的这种特殊组织形态的成因, 有学者提出离异共晶说。甄子胜等^[16]利用喷射沉积法制备了 Al-20%Si 和 Al-30%Si 合金, 并在同等条件下制备收集相应成分的过喷粉末, 喷射沉积合金坯体由初晶硅和基体组成, 而过喷粉末的显微组织中除初晶 Si 和基体外, 还含有共晶组织, 两种产品在雾化飞行阶段的组织变化条件是一样的。甄子胜等^[16]将制得的粉末重新加热至共晶温度半固态, 并模拟喷射沉积阶段沉积坯表面的凝固条件, 发现过喷粉末中的共晶组织消失, Si 相在试验前后数量基本不变, 而尺寸略微增大, 熔体在雾化阶段大的冷却速度下形成大

量 Si 相晶胚, 沉积阶段冷却速度较低, 为离异共晶提供了动力学条件, 发生离异共晶。

也有学者认为, 在喷射沉积快速非平衡凝固条件下发生伪共晶过程。在快速非平衡凝固条件下, Si 相的结晶速率随过冷速度增加而迅速降低, 其生长受到抑制, Al-Si 系的伪共晶区偏向 Si 相一侧, 过共晶区的 Al-Si 合金在一定的冷速及过冷度下有可能处于伪共晶区而发生相应转变^[17]。魏衍广等^[18]利用喷射沉积技术制备 70Si30Al 合金, 并对沉积态合金的显微组织及其在保温加热过程中的衍变机理进行研究, 在合金中发现层片组织, 并认为是铝硅伪共晶相。

1.3 喷射沉积新型硅铝合金的性能

1.3.1 热膨胀性能

高硅铝合金的 CTE 与合金中 Si 含量呈正相关关系, 可以通过调整合金中 Si 的含量来控制材料的热膨胀系数^[2]。张济山^[19]指出, 当 Si 含量达到 70% 时, 材料的 CTE 基本不再随 Si 含量的增加而显著下降。

合金的 CTE 随温度变化的幅度不大, 尤其是当温度达到 573 K 后, 基本不再随温度变化而变化^[20], 常用半导体材料也具有类似的特性。这对于封装电子器件具有重要的实际意义, 当温度(半导体材料使用范围内)升高时, CTE 较稳定的电子封装材料中热应力不会随温度增大而加速半导体元件的失效。

影响合金热膨胀性能的主要因素有两个^[21]: 一是合金组元的热膨胀性质; 二是基体与增强体界面对材料热膨胀行为的约束作用。在喷射沉积高硅铝合金中, Si 的热膨胀系数为 $4.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 远低于纯 Al 的热膨胀系数($23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)。当材料受热温度升高时, 延性相(Al)和脆性相(Si)都会发生热膨胀, 延性相由于热膨胀系数大更容易发生塑性变形, 受到脆性增强体的约束。当延性相连续分布时, 这种约束作用较小, 而延性相不连续分布时, 其形变会受到低膨胀系数脆性相的显著抑制。当高硅铝合金中 Si 含量达到 70% 时, Si 的分布已经呈近似网络状形态, Al 基体的连续分布状态被部分破坏(见图 4^[22])。随着 Si 含量的进一步增加, Al 基体被分割在 Si 的网架结构中, Al 受热膨胀时的变形被控制在 Si 相形成的网架内, 不能很好地反馈到材料的整体热膨胀行为中, 宏观上表现为当 Si 含量超过 70% 以后, 合金的 CTE 降低非常缓慢, 这是人们选择 Al-70%Si 作为典型封装材料的重要依据之一。

1.3.2 热传导性能

随着 Si 含量和温度的升高, 喷射沉积高硅铝合金的热导率呈下降趋势^[2, 20]。Al 基体是良好的导热介质, 其热导率高达 233 W/(m·K) , 是主要导热相。从理论

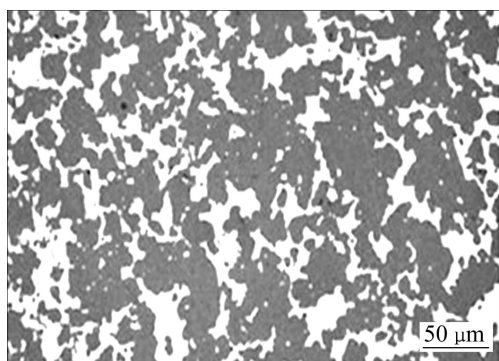


图 4 喷射沉积 Si-30Al 合金的显微组织^[22]

Fig. 4 Microstructure of spray-formed Si-30Al alloy^[22]

角度出发, 根据复合材料性能的剪裁特性, 通过调整 Al 的含量, 材料可以获得良好的热导参数, 但是根据已有的报道, 各类制备工艺所得到的高硅铝合金的最佳热导率仅为 177 W/(m·K)。这说明高硅铝的热导性能受到多因素的影响, 与材料的微观组织结构有着密切的联系, 除金属基体与增强相的热导率以及增强相的含量外, 它还受到增强相粒子的尺寸、形貌、分布、金属基体与增强相的界面结合状况和材料内部的缺陷等因素的影响。

合金的导热主要是通过电子和声子的作用来实现的, 其导热表达式为

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_g \quad (1)$$

式中: λ_e 和 λ_g 分别为电子导热系数和晶格波(声子)的导热系数。

在高硅铝合金中, 热传导主要是通过自由电子的相互作用和碰撞来实现的, 同时声子对此也有一定的贡献。细小颗粒状 Si 相均匀弥散地分布在基体中, 引入大量的 α 相和 Si 相相界面, 使自由电子和声子发生散射, 从而对材料的热传导性能起到阻碍作用。高硅铝合金的热导率不仅与 Si 相的体积分数有关, 而且与 Si 相粒子的尺寸和分布有关。根据有效介质理论 (Effective medium theory, EMT), 界面热阻是 Si 相颗粒尺寸的函数, 其尺寸影响界面热阻, 进而影响热导率。高硅铝合金热导率与界面热阻存在以下关系^[23]:

$$\frac{\lambda_c}{\lambda_m} = \frac{[\lambda_p(1+2\alpha+2\lambda_m)] + 2\varphi[\lambda_p(1-\alpha) - \lambda_m]}{[\lambda_p(1+2\alpha+2\lambda_m)] - \varphi[\lambda_p(1-\alpha) - \lambda_m]} \quad (2)$$

式中: λ_c 、 λ_p 和 λ_m 分别为高硅铝合金、Si 相颗粒和 α (Al) 基体的热导率; φ 为 Si 相颗粒的体积分数; α 为形状因子, 根据 $\alpha=R_{BD}/a$ 计算的(a 为 Si 相颗粒半径)。 α 是衡量界面热阻对热导率影响的量度。当 α 较大即

颗粒半径较小时, 界面热阻占主导地位, 而当 α 较小, 即 Si 相颗粒半径较大时, 界面热阻可以忽略。界面越多, 界面热阻越大, 合金材料的热传导性能就会下降。因此, 若 Si 相的体积分数越大, Si 相的尺寸越小, 则材料的热传导性能越差。高硅铝合金的热导率随温度的升高而下降, 可能是因为电子和声子运动紊乱度随温度升高而增加, 粒子之间相互碰撞的频率增大, 平均自由程减小。

此外, 在快速非平衡凝固条件下, 过饱和固溶体原子或晶体缺陷会造成电子的散射, 降低热导; 且气体的热导率通常较低, 材料中存在的孔隙会进一步降低其热传导能力^[24]。

1.3.4 力学性能

表 1 所列为 Si 含量不同喷射沉积高硅铝合金的主要力学性能参数^[2]。在高硅铝合金中, 增强相颗粒的体积分数和尺寸是影响其力学性能的主要因素。YAMAUCHI 等^[25]发现, 合金的强度值与第二相晶粒数量和尺寸存在如下关系:

$$\sigma \propto \varphi_V d^{-1} (1 - \varphi_V)^{-1} \quad (3)$$

式中: σ 为合金的强度, φ_V 和 d 分别为增强相的体积分数和平均直径。从式(3)可知, 在一定范围内, 若增强相的体积分数越大, 尺寸越小, 则合金的强度越高。

当基体与增强相的热膨胀性能相差较大时, 在加热或者冷却过程中形变不一致而产生残余应力并生成大量位错, 位错在基体/增强相界面及附近大量增殖并相互缠结而产生位错强化效应, 提高材料的强度。

FRIEDEL 与 FLEISCHER 等^[17]研究了屈服应力 τ_c 与固溶体中溶质浓度 c 的关系, 结果表明 $\tau_c \propto c^{1/2}$ 。

表 1 典型喷射沉积高硅铝合金的主要力学性能^[2]

Table 1 Main mechanical properties of typical spray-deposited high Si-Al alloys^[2]

Alloy	Bend strength/MPa	Yield strength/MPa	Elastic modulus/GPa
Al-27%Si	210	183	92
Al-42%Si	213	155	107
Al-50%Si	172	125	121
Si-40%Al	140	134	124
Si-30%Al	143	100	129

如前所述, 喷射沉积高硅铝合金由于其特殊的工艺特点, 能够获得细小脆性 Si 颗粒均匀弥散地分布在延性 Al 基体中的理想组织, 材料的强度显著优于传统铸造产品的。Al 的热膨胀系数远大于 Si 的, 在温度

变化时产生热应力, Al-Si 界面上的位错密度较大, 且在喷射沉积快速非平衡凝固条件下, 产生大量点缺陷, 对位错运动产生阻碍。此外, 在喷射沉积快速非平衡凝固条件下发生溶质截留, Si 在 Al 中的固溶度由平衡凝固条件下的 1.59% 上升至 10%~16%, 固溶度大幅度提高, 由此产生显著的固溶强化效果, 进一步提高材料的力学性能^[12]。

2 高硅铝合金的研究动态

2.1 优化合金成分

喷射沉积工艺赋予高硅铝合金细小均匀的优良组织, 大幅度提高材料的常温力学性能。但在高温状态下, 晶界滑动成为材料形变的主要方式之一, 导致在高温下细晶材料比粗晶材料更容易软化, 与常温时细晶强化的效果相反^[17]。针对高硅铝合金常温强度仍不尽理想和高温稳定性欠佳等问题, 研究者们发现, 在高硅铝合金中加入 Mg 和 Cu 元素能够形成 Al_2Cu 、 Mg_2Si 和 Al_2CuMg 等沉淀强化相, 对位错滑移起钉扎作用, 阻碍晶界位移和亚结构消失, 提高材料的常温强度; Fe 和 Ni 元素在 Al-Si 合金中可以形成 Al_3Ni 、 Al_3Fe 和 AlFeSi 等金属间化合物, 这些弥散相具有良好的高温稳定性, 进一步提高材料的常温强度可有效改善材料的高温稳定性^[26-29]。

袁晓光等^[30]研究喷射沉积 Al-Si-Fe 合金的性能, 合金经挤压后强度高达 465 MPa, 弹性模量为 108 GPa, 573 K 下强度超过 300 MPa, 伸长率为 5.2%, 热膨胀系数小于 $17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 能够较好地满足现代电子封装的综合要求。Al-Si 系列合金中掺入微量 Fe 元素能够提高材料的延展性和韧性, 但当 Fe 含量过高时, 生成大量针状或者棒状 $\alpha\text{-Al}_3\text{Si}_2\text{Fe}$ 和 $\beta\text{-Al}_3\text{SiFe}$ 等金属间化合物, 其尖端或棱角处易成为应力集中源, 降低材料的力学性能^[31]。YANG 等^[32]的研究也证实了这一点。HOU 等^[33]研究添加 Mn(2%) 和 Cr(1%) 对喷射沉积 Al-25Si-5Fe-3Cu(质量系数, %) 合金组织及其热稳定性的影响。结果表明: 喷射沉积能使含 Fe 相及初晶硅的尺寸细化至 10 μm 以下, 加入 Mn 和 Cr 元素后, 进一步得到分布均匀、尺寸小于 5~6 μm 的 $\alpha\text{-Al(Fe, Mn, Cr)Si}$ 颗粒, 减少或消除针状含 Fe 相的有害影响。 $\alpha\text{-Al(Fe, Mn, Cr)Si}$ 颗粒在热处理过程中, 甚至在 813 K 的高温下保温长时间几乎不发生粗化和相变, 此外, Mn 和 Cr 还能提高合金的固相线温度, 使材料具有良好的高温稳定性。而 Al-25Si-5Fe-3Cu 合金在加热过程中由于 $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ 相的粗化并生成高温热稳定性差的

$\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 相, 其稳定性在 750 K 下开始恶化。

现有的大部分合金化研究主要注重在改善材料的力学性能, 并取得预期结果。但材料的热导率等重要性能对界面状况反应较灵敏, 添加合金元素或变质剂会引入新的界面, 使得合金中外来颗粒和夹杂增多, 改变材料内部的组织分布状况, 影响材料综合性能的不确定因素增多, 很有可能对最终热物理性能产生不利影响, 且对于硅铝合金, 添加变质剂的效果不明显。因此, 在研究过程中必须充分综合考虑材料的力学和热物理性能。JACOBSON 等^[2]指出, 在 Al-27%Si 合金中加入微量合金元素(Fe、Mn 和 Mg 等)后, 298 K 下热导率由 177 W/(m·K) 降至 144 W/(m·K)。

2.2 喷射沉积新工艺的提出

针对传统喷射沉积技术在制备大型锭、管和板材时仍存在冷却速度不足、散热效率较低和沉积坯尺寸精度不高等问题, 陈振华等^[34]提出多层喷射沉积技术。其特点如下: 雾化器在沉积坯上方做往复扫描运动, 沉积表面单位面积和时间内的沉积量大幅降低, 当雾化器下一个周期运动到原始点处时, 沉积已经间隔一定的时间, 得到充分的冷却。通过计算机控制雾化器的往复运动, 沉积薄层层层叠加, 沉积坯的尺寸在理论上没有限制。为保证沉积坯表层有合适的液相而不出现喷射界面, 该工艺适当降低喷射高度和雾化气体与金属液流的比值, 其工艺参数如下: 熔体过热温度为 373~573 K, 喷射高度为 80~200 mm, 雾化气体压力为 0.5~2.0 MPa, 导流管直径为 2.0~6.0 mm, 沉积基体的转速与雾化器的移动速率分别为 5~50 r/m 和 10~100 mm/s。

针对某些合金高纯度的要求, 刘宏伟等^[35]开发出一种纯净金属喷射沉积工艺。喷射沉积雾化过程中熔体在高速高动量气体的作用下被雾化成大量尺寸小、比表面积大的熔滴或颗粒, 且其温度较高, 化学反应驱动力强, 人们在此基础上提出反应喷射成形技术, 但是这种技术仍然存在颗粒在基体中分布不均匀的问题。杨滨等^[36]提出将增强相的生成与合金熔体的形成稳定过程一体化, 再进行喷射成形, 开发出熔铸-原位反应喷射沉积制备新技术, 很好地解决了增强体颗粒在基体中分布不均匀的问题。

2.3 开展自动化控制与数值模拟

喷射沉积是一个由多体和多参数共同控制的复杂过程, 涉及到流体力学、传热传质学、凝固理论、数值模拟和检测与控制等多项基础学科。国内外学者已经认识到系统研究喷射沉积基础理论、优化工艺参数

和检测与控制的重要性,并做了大量工作。

美国 MTS 公司将智能化控制理念引入到喷射沉积的过程控制中,开发出一种智能模拟逻辑控制系统^[11]。曲迎东等^[37]基于模糊推理方法,设计出一种 FPID 控制器,提高了喷射成型工艺中的沉积坯尺寸精度。国内的多家研究机构如中国科学院金属研究所、中南大学和哈尔滨工业大学等,也在该领域做了大量工作,并取得一定成绩。

LAVERNIA 和 GUTIERRE Z^[38-39]以及 MEDWELL 等^[40]分别提出喷射沉积热传输理论模型、沉积凝固过程的热传输数学模型和二维沉积凝固模型。傅晓伟等^[41]对喷射沉积过程进行一维定常流动条件下单颗粒模拟计算,模拟喷射沉积雾化过程,描述熔滴的飞行动力学过程及凝固热力学过程,建立熔滴速度、温度和固相分数等参数与熔体过热度及气流速度之间关系的计算模型。结果表明:尺寸在 30 μm 以下的颗粒在到达基板前(飞行距离为 400 mm)全部为固相,140 μm 以上的颗粒全部为液相,雾化气体与熔滴的交互作用是影响熔滴凝固行为及最终组织的重要因素。张胤等^[42]利用概率模拟方法,建立金属液滴的统计模型,得到喷射过程不同尺寸液滴的分布、产生位置以及初速度分布情况。陈美英等^[43]采用热辐射修正方法,模拟喷射沉积高硅铝合金的凝固过程,系统地研究熔滴速度、温度、热交换作用系数、熔滴冷却速率和沉积坯固相分数与沉积距离的关系。曹福洋等^[44]综合考虑沉积坯表面点自身位置变化、温度和其他表面对该点沉积效果的影响,采用坐标跟踪法建立沉积坯形状预测模型。

模拟方法是在作出一定合理的假设和简化的基础上进行的,具有省时和省力的优点,但总与实际会有偏差。利用现有的实验参数,模拟喷射成形过程,并结合实验不断优化喷射沉积工艺参数,仍然是相关领域在可预见的一段时期内的研究重点,甚至可以在一定程度上预测沉积坯的质量。

2.4 喷射沉积高硅铝合金的致密化处理

在喷射沉积成坯过程中,由于凝固颗粒或沉积间空隙、气体卷入、溶解气体的参与以及凝固收缩,坯件中不可避免地存在一些微缩孔^[9]。虽然当温度升高时,Al 相在 Si 相约束下向孔隙内部膨胀,能减小材料总体积膨胀量,降低热膨胀系数,使 Al 相膨胀受约束产生的内应力得以松弛,减小复合材料的热裂纹倾向,但微缩孔破坏基体连续性,降低材料有效载荷,

容易引起应力集中,恶化材料使用性能^[45]。因此,有必要对喷射沉积高硅铝合金进行后续致密化加工,消除孔隙,破碎颗粒表面的氧化膜,达到或者接近理论密度,进一步提高材料性能。喷射沉积硅铝合金的致密化主要有热等静压法和热挤压法等。

2.4.1 热等静压法

热等静压^[46]是一种集高温和高压于一体的工艺生产技术,通常以密闭容器中的高压惰性气体或氮气为传压介质,工作温度和压力可分别达到 2 273 K 和 200 MPa。在高温和高压的共同作用下,通过蠕变和变形破坏表面并发生渗透、扩散、粘结等过程而实现喷射沉积产品的致密化,被加工件各向均衡受压,加工产品的致密度高、均匀性好,材料综合性能得到显著提高。

张磊和杨滨^[47]对喷射沉积 Al-60%Si 进行热等静压处理并比较致密化前后组织,经热等静压处理,Si 相并没有明显长大, Si 相形貌更加规整,有效地减少了孔隙。田冲等^[5]对喷射沉积 Si-30%Al 合金进行了热等静压处理,致密化后材料的密度和致密度分别达到 2.46 g/cm³ 和 99.23%。张永安等^[48]利用喷射沉积法制备 60Si40Al 合金并对其进行 773 K 和液相线以上温度 863 K 热等静压致密化处理。结果表明:合金在 773 K 下的综合致密化效果要优于半固态温度(863 K)时的,材料在 773 K 下已经具备足够的流动性,能充分焊合材料组织内部的各种缺陷;而在半固态温度下,坯体出现局部重熔,且 Si 颗粒有明显长大趋势。致密化后材料热膨胀系数约为 $9 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ K, 热导率约为 110 W/(m·K),能够很好地满足电子封装要求。

2.4.2 热挤压法

热挤压法将喷射沉积坯锭在一定温度(高于再结晶温度)和挤压比下进行挤压,材料在三向压应力作用下变形,促进材料内部孔隙的压合。

SEOK 等^[49]研究喷射沉积 Al-25%Si-X 合金的热挤压法致密化。经热挤压,组织中孔隙消失,密度接近理论值。李志辉等^[50]利用喷射沉积与热挤压致密化相结合的方法制备 Al-60%Si 和 Al-70%Si 合金,得到的 Al-60%Si 和 Al-70%Si 合金的抗弯强度分别可达 220 MPa 和 180 MPa,布氏硬度值分别为 1 620 和 2 610 MPa。刘红伟等^[7]研究热挤压强度和温度对致密化效果以及材料组织性能的影响,在 843 K 保温 0.5 h 后 220~300 MPa 保压 2 h,喷射沉积 70%Si-Al 的密度可达到 2.421 g/cm³,致密度达到 99.18%,298 K 下的热膨胀系数为 6.9×10^{-6} K⁻¹,323 K 下的热导率为 118

W/(m·K), 基本满足电子封装的要求。

3 结语

1) 喷射沉积高硅铝合金以其轻质、高热导率和低热膨胀系数等传统电子封装材料无法企及的优良综合性能, 成为电子封装领域的研究热点, 是一种很有应用前景的新型电子封装材料。

2) 部分工业发达国家在该领域的研究起步较早, 并在一定程度上实现了产业化生产和应用。我国材料科学工作者在这方面也进行了大量的研究工作, 并取得一定的成绩, 但目前尚未实现规模化生产和应用, 与国际水平仍有较大差距。

3) 对喷射沉积高硅铝合金沉积坯组织及其后续加工处理中相的形成和长大机理的研究仍不够系统全面。

4) 针对高硅铝合金电子封装材料在实际应用环境下仍然存在强度不足、易发生腐蚀、高温性能不佳等问题, 需要进一步优化合金成分, 研究材料组织结构与性能之间的关系。

5) 完善理论模型, 提高喷射沉积装置的自动化和智能化程度, 优化工艺参数。利用数学分析方法对喷射沉积雾化和沉积过程中涉及到的传热及传质等过程进行研究, 并提出理论模型, 为指导喷射沉积工艺技术的改进提供理论基础。

6) 研发喷射沉积设备及新工艺, 降低成本, 推进产业化进程。

REFERENCES

- [1] 王敬欣, 张永安. 应用于电子封装的新型硅铝合金的研究与开发[J]. 材料导报, 2001, 15(6): 18-21.
WANG Jing-xin, ZHANG Yong-an. Research and development of novel aluminium-silicon alloys for electronics packaging[J]. Materials Review, 2001, 15(6): 18-21.
- [2] JACOBSON D M, OGILVY A J W, LEATHAM A G. Applications of Osprey lightweight controlled expansion (CE) alloys[EB/OL]. www.smt.sandvik.com. 2012-05-16.
- [3] HA T K, PARK W J, AHN S, CHANG Y W. Fabrication of spray-formed hypereutectic Al-25Si alloy and its deformation behavior[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130/131: 691-695.
- [4] CHIANG C H, TSAO C Y A. Si coarsening of spray-formed high loading hypereutectic Al-Si alloys in the semisolid state[J]. Materials and Engineering, 2005, 396 (1/2): 263-270.
- [5] 田冲, 陈桂云, 杨林, 赵九洲. 喷射沉积硅铝电子封装材料的组织与性能[J]. 功能材料与器件学报, 2006, 12(1): 54-58.
TIAN Chong, CHEN Gui-yun, YANG Lin, ZHAO Jiu-zhou. Microstructures and properties of Si-Al alloy for electronic packaging prepared by spray deposition technique[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2006, 12(1): 54-58.
- [6] YU K, LI C, YANG J, CAI Z Y. Production and properties of a 90%Si-Al alloy for electronic packaging applications[J]. Materials Science Forum, 2009, 610/613: 542-545.
- [7] 刘红伟, 张永安, 朱宝宏, 王锋, 魏衍广, 熊柏青. 喷射成形 70Si30Al 电子封装材料致密化处理及组织性能研究[J]. 稀有金属, 2007, 312(4): 446-450.
LIU Hong-wei, ZHANG Yong-an, ZHU Bao-hong, WANG Feng, WEI Yan-guang, XIONG Bai-qing. Research on densification processing, microstructure and properties of spray-formed 70Si30Al alloys used for electronic packaging[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 312(4): 446-450.
- [8] 王晓峰, 赵九洲, 田冲. 喷射沉积制备新型电子封装材料 70%Si-Al 的研究[J]. 金属学报, 2005, 41(12): 1277-1279.
WANG Xiao-feng, ZHAO Jiu-zhou, TIAN Chong. Study of novel electronic packaging material 70%Si-Al prepared by the spray deposition[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(12): 1277-1279.
- [9] 彭超群. 喷射成形技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004.
PENG Chao-qun. Technology of Spray Forming[M]. Changsha: Central South University Press, 2004.
- [10] SINGER A. Spray forming of metals. British Patent: 1262471[P]. 1972-02-12.
- [11] 符世继, 谢明, 陈力, 杨有才, 张健康, 黎玉盛. 喷射成形过共晶 Al-Si 合金材料的研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(5): 437-439.
FU Shi-ji, XIE Ming, CHEN Li, YANG You-cai, ZHANG Jian-kang, LI Yu-sheng. A review of the research on spray forming hypereutectic Al-Si alloy[J]. 2006, 20(5): 437-439.
- [12] 张大童, 李元元, 罗宗强. 快速凝固过共晶铝硅合金材料的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2001, 29(2): 1-6.
ZHANG Da-tong, LI Yuan-yuan, LUO Zong-qiang. A review on the progress of rapidly solidified hypereutectic Al-Si alloy materials[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2001, 29(2): 1-6.
- [13] 胡锐, 刘振军, 商宝禄. 喷雾沉积快凝高硅铝合金中硅粒子细化的研究[J]. 机械科学与技术, 1999, 18(2): 304-305.
HU Rui, LIU Zhen-jun, SHANG Bao-lu. Study of fining silicon particles in rapidly solidified high silicon Al-Si alloy produced by spray-deposited process[J]. Mechanical Science and Technology, 1999, 18(2): 304-305.
- [14] 吴安如, 黎小辉. 制备工艺对高硅铝合金组织及性能的影响[J]. 材料热处理, 2006, 35(14): 17-19.
WU An-ru, LI Xiao-hui. Study of fabricating processes on microstructure and mechanical property of high-silicon

- aluminum alloy[J]. *Materials heat treatment*, 2006, 35(14): 17–19.
- [15] 张 建, 赵润娟, 刘 杰, 崔宏祥, 毕大森. 喷射沉积硅铝合金组织结构与性能的分析[J]. *有色金属*, 2004, 56(3): 1–3.
ZHANG Jian, ZHAO Run-xian, LIU Jie, CIU Hong-xiang, BI Da-sen. Texture and property of spraying deposition Si-Al alloy[J]. *Nonferrous Metals*, 2004, 56(3): 1–3.
- [16] 甄子胜, 赵爱民, 毛卫民, 孙 峰, 钟雪友. 喷射沉积高硅铝合金显微组织及形成机理[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(6): 816–818.
ZHEN Zi-sheng, ZHAO Ai-min, MAO Wei-min, SUN Feng, ZHONG Xue-you. Microstructures and formation mechanism of spray deposited hypereutectic Al-Si alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(6): 816–818.
- [17] 郑子樵. 材料科学基础[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
ZHENG Zi-qiao. *Foundation of materials science*[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [18] 魏衍广, 熊柏青, 张永安, 刘红伟, 朱宝宏, 王 锋. 喷射成形 70Si30Al 合金在加热保温过程中显微组织的演变规律[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(4): 681–686.
WEI Yan-guang, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, LIU Hong-wei, ZHU Bao-hong, WANG Feng. Microstructure variation of spray formed 70Si30Al alloy during heating procedure[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(4): 681–686.
- [19] 张济山. 新型喷射成形轻质、高热导、低膨胀 Si-Al 电子封装材料[J]. *材料导报*, 2002, 16(9): 1–4.
ZHANG Ji-shan. New spray formed light-weighted Al-Si electronic packaging materials with low thermal expansion and high heat conducting[J]. *Materials Review*, 2002, 16(9): 1–4.
- [20] JACOBSON D M, OGILVY A J W. Spray-deposited Al-Si (Osprey CE) alloys and their properties[J]. *Materials Science and Engineering Technology*, 2003, 34 (4): 381–384.
- [21] 张 伟, 杨伏良, 甘卫平, 刘 泓. 电子封装用高硅铝合金热膨胀性能的研究[J]. *材料导报*, 2006, 20(6): 348–350.
ZHANG Wei, YANG Fu-liang, GAN Wei-ping, LIU Hong. Study on thermal expansion property of high-silicon aluminum alloy for electronic packaging[J]. *Materials Review*, 2006, 20(6): 348–350.
- [22] HOGG S C, LAMBOURNE A, OGILVYB A, GRANTA P S. Microstructural characterization of spray formed Si-30Al for thermal management applications[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55 (1): 111–114.
- [23] 杨 广, 堵永国, 白书欣, 龙 雁, 胡君遂, 张家春. 界面热阻对金刚石/银复合材料导热率的影响[J]. *国防科技大学学报*, 1998, 20(6): 119–122.
YANG Guang, DU Yong-guo, BAI Shu-xin, LONG Yan, HU Jun-sui, ZHANG Jia-chun. Effect of thermal boundary-resistance on the thermal conductivity of diamond/Ag metal matrix composite[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1998, 20 (6): 119–122.
- [24] 甘卫平, 陈招科, 杨伏良. 粉末粒度对高硅铝合金显微组织及性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 15(6): 721–726.
GAN Wei-ping, CHEN Zhao-ke, YANG Fu-liang. Effect of particle size on microstructure and properties of high-silicon aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 15(6): 721–726.
- [25] YAMAUCHI I, OHNAKA I, KAWAMOTO S, FUKUSAKO T. Hot extrusion of rapidly solidified Al-Si alloy powder by the rotating-water-atomization process[J]. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1986, 27(3): 195–203.
- [26] SRIVASTAVA V C, MANDAL R K, OJHA S N, VENKATESWARLU K. Microstructural modifications induced during spray deposition of Al-Si-Fe alloys and their mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, 471(1/2): 38–49.
- [27] WANG F, YANG B, XIONG B Q, ZHANG Y A. Effect of Fe and Mn additions on microstructure and mechanical properties of spray-deposited Al-20Si-3Cu-1Mg alloy[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(5): 384–388.
- [28] CHIANG C H, TSAO Y A C. Microstructures and mechanical properties of spray-formed and squeeze-cast Al-25Si-0.89Cu-1.0Ni-0.84Mg alloys in solutionized and aged conditions[J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, 417: 90–98.
- [29] 陈 刚, 范才河, 苏 斌, 刘鹏飞. 喷射沉积高 Si 铝合金热挤压工艺的研究现状[J]. *轻合金加工技术*, 2004, 32(12): 6–9.
CHEN Gang, FAN Cai-he, SU Bin, LIU Peng-fei. Progress in research on microstructure and mechanical properties of hot-extrusion spray deposited hypereutectic Al-Si alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2004, 32(12): 6–9.
- [30] 袁晓光, 徐达鸣, 张淑英, 李庆春. 喷射沉积 Al-Si-Fe-Cu-Mg 合金的显微组织和力学行为[J]. *金属学报*, 1997, 33(3): 248–252.
YUAN Xiao-guang, XU Da-ming, ZHANG Shu-ying, LI Qing-chun. Microstructure and mechanical properties of spray-deposited Al-Si-Fe-Cu-Mg alloy[J]. *Metal Journal*, 1997, 33(3): 248–252.
- [31] SRIVASTAVA A K, SRIVASTAVA V C, GLOTER A, OJHA S N. Microstructural features induced by spray processing and hot extrusion of an Al-18%Si-5%Fe-1.5%Cu alloy[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(7): 1741–1748.
- [32] YANG B, WANG F, ZHANG J S. Microstructural characterization of in situ TiC/Al and TiC/Al-20Si-5Fe-3Cu-1Mg composites prepared by spray deposition[J]. *Acta Material*, 2003, 51(17): 4977–4989.
- [33] HOU L G, CUI H, CAI Y H, ZHANG J S. Effect of (Mn + Cr) addition on the microstructure and thermal stability of spray-formed hypereutectic Al-Si alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 527(1/2): 85–92.
- [34] 陈振华, 严红革, 陈 刚, 张福全, 胡仲勋, 傅杰新. 多层喷

- 射沉积的装置和原理[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2001, 28(5): 20-27.
- CHEN Zhen-hua, YAN Hong-ge, CHEN Gang, ZHANG Fu-quan, HU Zhong-xun, FU Jie-xin. Principle and setups of multi-layer spray deposition technology[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2001, 28(5): 20-27.
- [35] 刘宏伟, 张 龙, 王建江, 杜心康. 喷射成形工艺与理论研究的进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(3): 63-67.
- LIU Hong-wei, ZHANG Long, WANG Jian-jiang, DU Xin-kang. Research progress in technique and theory of spray forming technology[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(3): 63-67.
- [36] 杨 滨, 王 峰, 黄赞军, 段先进, 张济山. 喷射成形颗粒增强金属基复合材料制备技术的发展[J]. 材料导报, 2001, 15(3): 4-6.
- YANG Bin, WANG Fang, HUANG Zan-jun, DUAN Xian-jin, ZHANG Ji-shan. Advances in technique for spray forming metal matrix composites reinforced by particulate[J]. Materials Review, 2001, 15(3): 4-6.
- [37] 曲迎东, 崔成松, 李庆春, 李荣德, 袁晓光. 喷射成型沉积坯 Fuzzy-PID 智能控制[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42: 19-131.
- QU Ying-dong, CUI cheng-song, LI Qing-chun, LI Rong-de, YUAN Xiao-guang. Fuzzy-PID intelligent control of deposit dimension during spray forming[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42: 19-131.
- [38] MIRAVETE E G, LAVERNIA E J, GRANT N J. A mathematical model of the spray deposition process[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1989, 20(1): 71-85.
- [39] LAVERNIA E J, GUTIERREZ E M. Heat flow behavior during spray deposition of nickel base super-alloy by liquid dynamic compaction[J]. Progress in Powder Metallurgy, 1987, 43: 683-709.
- [40] MEDWELL J O, GETHIN D T, MUHAMAD N. Analysis of the osprey preform deposition process[J]. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 1992, 1: 249-271.
- [41] 傅晓伟, 张济山, 孙祖庆. 喷射沉积过程的计算模型[J]. 北京科技大学学报, 1997, 19(1): 63-67.
- FU Xiao-wei, ZHANG Ji-shan, SUN Zu-qing. Model of the spray forming process[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1997, 19(1): 63-67.
- [42] 张 胤, 樊俊飞, 贺友多, 任三兵, 乐海荣. 金属喷射成型过程大量液滴的统计模型研究[J]. 包头钢铁学院学报, 2004, 23(4): 289-292.
- ZHANG Yin, FAN Jun-fei, HE You-duo, REN San-bing, LE Hai-rong. The study of statistical model of mass liquid drop during metal spray forming process[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2004, 23(4): 289-292.
- [43] 陈美英, 杨 滨, 张济山. 喷射沉积 Si-Al 合金的数值模拟结果与分析[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(5): 428-432.
- CHEN Mei-ying, YANG Bin, ZHANG Ji-shan. Numerical simulation and analysis of spray-deposited silicon-aluminum alloys[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(5): 428-432.
- [44] 曹福洋, 李培杰, 范洪波, 崔成松, 李庆春. 喷射沉积柱状坯形状模型[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(1): 50-54.
- CAO Fu-yang, LI Pei-jie, FAN Hong-bo, CUI Cheng-song, LI Qing-chun. Shape modeling of spray formed aolumnar billets[J]. Materials Science & Technology, 2003, 11(1): 50-54.
- [45] CHIEN C W, LEE S L, LIN J C, JAHN M T. Effects of Si_p size and volume fraction on properties of Al/ Si_p composites[J]. Materials Letters, 2002, 52(4/5): 334-341.
- [46] 詹志洪. 热等静压技术和设备的应用与发展[J]. 中国钨业, 2005, 20(1): 44-47.
- ZHAN Zhi-hong. Application and development of hot isostatic pressing technology and apparatus[J]. China Tungsten Industry, 2005, 20(1): 44-47.
- [47] 张 磊, 杨 滨. 热等静压对电子封装 60wt%Si-Al 合金组织与性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2004, 17(4): 116-121.
- ZHANG Lei, YANG Bin. Effects of HIP on microstructures and properties of 60wt% Si-Al electronic packaging materials[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 17(4): 116-121.
- [48] 张永安, 刘红伟, 朱宝宏, 熊柏青, 石力开, 张济山, 陈美英. 新型 60Si40Al 合金封装材料的喷射成形制备[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 23-26.
- ZHANG Yong-an, LIU Hong-wei, ZHU Bao-hong, XIONG Bai-qing, SHI Li-kai, ZHANG Ji-shan, CHEN Mei-ying. Novel 60Si40Al alloy packaging material by spray forming process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 23-26.
- [49] SEOK H K, LEE J C, LEE H I. Extrusion of spray-formed Al-25Si-X composites and their evaluation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160 (3): 354-360.
- [50] 李志辉, 张永安, 熊柏青, 朱宝宏, 刘红伟, 王 锋, 魏衍广, 张济山. 快速凝固硅铝合金材料的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1659-1663.
- LI Zhi-hui, ZHANG Yong-an, XIONG Bai-qing, ZHU Bao-hong, LIU Hong-wei, WANG Feng, WEI Yan-guang, ZHANG Ji-shan. Microstructure and properties of rapidly solidified silicon-aluminum alloy materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1659-1663.

(编辑 龙怀中)