

多层喷射沉积制备大尺寸耐热铝合金管坯的研究

袁武华 徐海洋 夏伟军 陈振华

(湖南大学材料科学与工程学院金属材料研究所 长沙 410082)

摘 要 采用多层喷射沉积工艺制备出了尺寸为 630 mm ×250 mm ×800 mm 且质量较好的 FVS0812 耐热铝合金管坯,通过挤压获得了性能优良的大直径管材,并对管坯和挤压后管材的力学性能和微观结构进行了检测和分析。分析结果表明,多层喷射沉积制坯过程中,熔滴在沉积面的冷却速度约 $3.2 \times 10^4 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \sim 10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,熔滴凝固后在沉积坯中形成微细晶粒结构(200 nm ~ 500 nm)和弥散分布的纳米析出相 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ (20 nm ~ 60 nm),使得沉积坯挤压致密后具有优异的性能。

关键词 快速凝固,喷射沉积,耐热铝合金

Preparation of Heat-Resistant Aluminum Alloy Pipe Blanks with Large Dimensions by Multi-Layer Spray Deposition

Yuan Wuhua Xu Haiyang Xia Weijun Chen Zhenhua

(Research Institute of Metal Material, College of Material Science and Engineering, Hunan University Changsha 410082)

Abstract Pipe blanks of FVS0812 alloy with dimension of 630 mm ×380 mm ×800 mm were prepared by multi-layer spray deposition (MLSD) technology. Alloy pipes with high performance were produced by extrusion. The characteristics of as-processed pipes' mechanical properties and microstructure were analyzed. The results show that with molten droplets cooling down at average cooling rate of $3.2 \times 10^4 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \sim 10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$, grains with size between 200 nm to 500 nm and spherical phase $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ with size between 20 nm to 60 nm were shown in the blanks, which made the pipe blanks show high performance after extrusion.

Key words Rapid solidification, Spray deposition, Heat-resistant aluminum alloy

1 引言

耐热铝合金制备工艺对冷却速度的要求很高,要获得纳米析出相 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$,熔体必须以非常高的冷却速度凝固冷却,以抑制 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 等针状析出相的析出^[1]。平流铸造工艺(PFC)冷却速度快、材料性能优异,但工艺复杂、工序繁多、材料的尺寸受到较大限制;而传统的喷射沉积工艺(Osprey)冷却速度较低,难以制备性能优异的沉积坯。作者采用自行研制的多层喷射沉积装置制备出了大尺寸的耐热铝合金管坯,管坯经过挤压后得到了高性能的大

直径管材。本文对该技术制坯原理及材料性能和组织结构进行分析。

2 实验过程

采用 FVS0812 合金,其成分为 Al - 8.5Fe - 1.3V - 1.7Si,熔体温度 940 ~ 1 000,雾化气体压力 0.8 MPa ~ 1.2 MPa,金属熔体流率为 $5 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1} \sim 8 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ 。基体管内径为 380 mm,采用铝合金铸造管加工而成。喷射流以优化轨迹在基体管表面往复扫描沉积至管坯外径为 630 mm^[2],如图 1 所示。喷射沉积耐热铝合金管坯经过挤压后即得到致

收稿日期:2001 - 08 - 26

袁武华,1973 年出生,博士,主要从事喷射沉积制备耐热铝合金及铝基复合材料的研究工作
宇航材料工艺 2001 年 第 6 期

— 51 —

密度较高的大直径管材,挤压工艺参数为:挤压温度 420 ~ 500 ,挤压系数 4.8,挤压压力 110 MN。

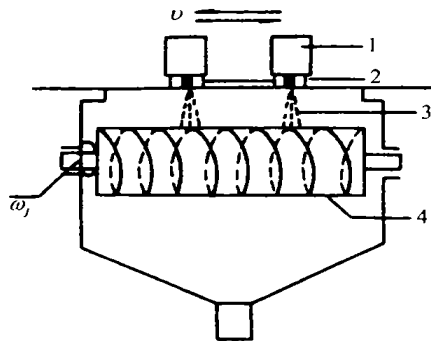


图 1 多层喷射沉积制备管坯原理

Fig. 1 Schematic diagram of MLSD technology

1—坩埚;2—雾化器;3—喷射流;4—基体管。

在喷射沉积管坯和挤压态管材上沿纵向按 GB/T4338—1995 标准取棒状试样,在室温和 350 温度下分别进行拉伸性能测试。同时在管坯和挤压态管材上分别截取小块试样制成金相试样和透射电镜试样,对管坯和管材进行显微结构研究。

3 实验结果

3.1 力学性能

表 1 为不同加工状态耐热铝合金的力学性能比较。多层喷射沉积态(MLSD)管坯的试样在 25 和 350 拉伸时,几乎未发生塑性变形即已断裂,两个温度下的断裂强度均很低。而挤压管材与 MLSD 管坯拉伸性能相比,25 和 350 时,断裂强度分别提高了 130 %和 400 %,并有良好的延伸率和较高的屈服强度。

表 1 不同制备工艺耐热铝合金力学性能

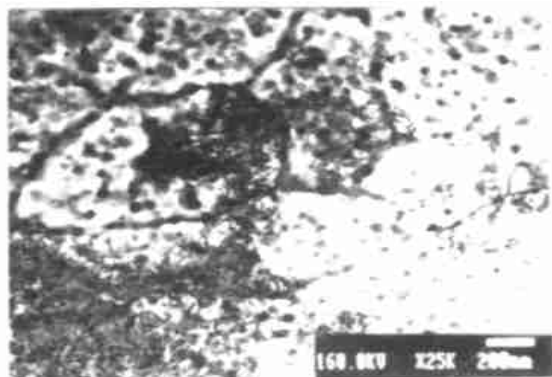
Tab.1 Mechanical properties of heat-resistant aluminum alloy

材料及 加工状态	aluminum alloy					
	25 力学性能			350 力学性能		
	0.2 /MPa	b /MPa	%	0.2 /MPa	b /MPa	%
MLSD 管坯	132	169	<1.0	21	37	<1.0
MLSD 挤压管	310	391	11.4	178	185	12.5
Osprey 挤压棒	271	313	18.0	149 *	161 *	22 *
PFC 挤压棒	414	462	12.9	255 **	276 **	11.9 **

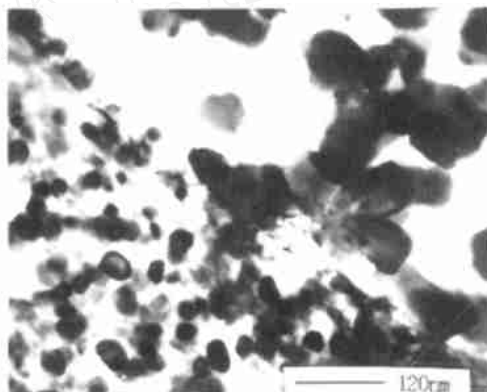
*260 测试结果; **315 测试结果。

3.2 显微结构

管坯挤压前后的显微特征见图 2,X - ray 衍射结果见图 3。



(a) 沉积态管坯



(b) 挤压态管材

图 2 管坯挤压前后的显微结构特征

Fig. 2 Microstructure of pipe blanks and extruded pipes

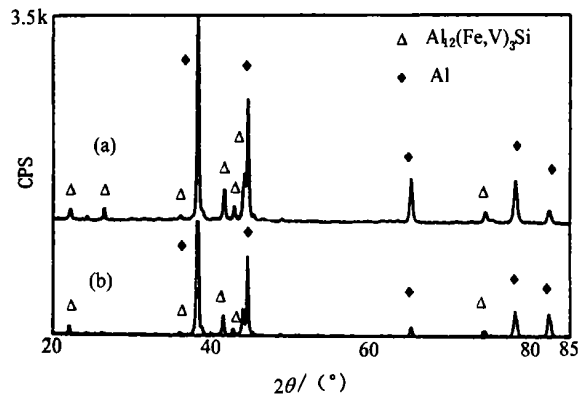


图 3 管坯挤压前后的 X - ray 衍射结果

Fig. 3 XRD pattern of pipes and pipe blanks

(a) 沉积态管坯;(b) 挤压态管材。

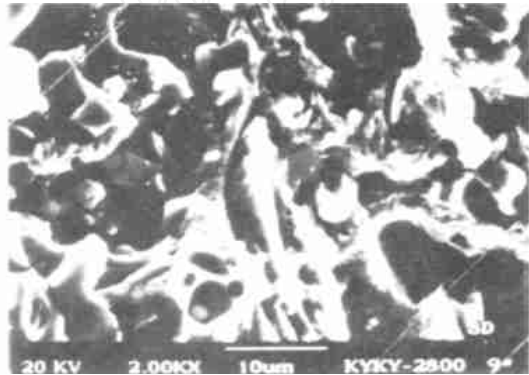
在图 2(a) 中耐热铝合金管坯的晶粒非常细小,多为 200 nm ~ 500 nm 的微晶;析出相均匀分布于基体上,析出相为 20 nm ~ 60 nm 的球形或近球形颗粒,体积分数约为 25 %。在图 3(a) 衍射结果中,沉积坯中的析出相除亚稳相 - $Al_2(Fe,V)_3Si$ 外,无

其他相析出。挤压管材在图 2(b) 的条带组织中, 深色区域的晶粒和析出相非常细小, 晶粒尺寸约为 100 nm ~ 200 nm, 析出相为 50 nm, 主要分布于晶界上; 而浅色区, 晶粒尺寸约为 300 nm ~ 500 nm, 析出相约为 80 nm 左右, 成团状分布。在图 3(b) 的 X-ray 衍射物相分析中, 发现 α -Al 基体中只有 α - $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 析出相, 未发现其他相。

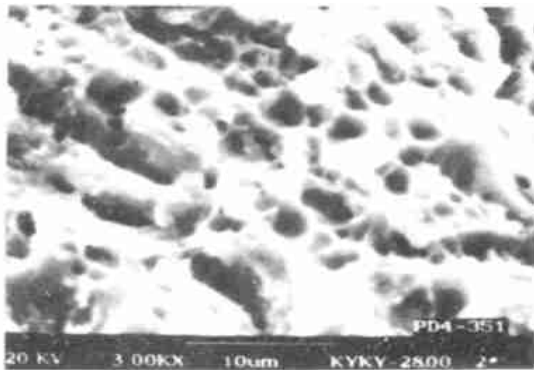
4 分析与讨论

4.1 力学性能

喷射沉积管坯的力学性能较低, 但经过挤压后管材表现出优良的力学性能, 这与挤压致密化加工后管材组织结构的变化有密切关系。多层喷射沉积管坯和挤压管材的密度分别为 $2.56 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $2.81 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。经过挤压, 管材致密度由 88.9% 提高到了 97.6%。图 4 为拉伸试样的断口形貌。



(a) 沉积态管坯



(b) 挤压态管材

图 4 管坯挤压前后的拉伸断口特征

Fig. 4 Break morphologies of test samples

从图 4 中可以明显看出, 多层喷射沉积管坯试样断口形貌中, 原始孔洞、熔滴界面和预凝固粉末颗粒清晰可辨, 熔滴间的结合比较松散 [图 4(a)]; 而挤压管材拉伸试样断口形貌中 [图 4(b)], 基体金属经塑性变形后留下明显的韧窝。可见经过挤压后管

材的致密度得到明显改善, 因而管材的强度和延伸率明显提高 (见表 1)。

与传统喷射沉积和平流铸造工艺制得的耐热铝合金材料相比, 多层喷射沉积管坯挤压后的力学性能明显高于前者, 而略低于后者 (见表 1), 这与各工艺制得的材料微观组织有密切关系。Al-Fe-V-Si 耐热铝合金是晶粒结构非常微细的弥散强化型铝合金, 晶粒尺寸及析出相的大小和形状对强度的影响极大。 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 析出相的大小和数量对材料屈服强度的影响, 可用奥罗万 (Orawan) 机制解释^[3]。当位错运动受到坚硬析出相阻碍无法切过时, 则以奥罗万机制绕过质点, 弥散析出相的强化效果随着体积分数的增大而提高。而体积分数一定时, 强化值与析出相半径成反比, 质点半径越小, 强化值越大。晶粒大小对强度值的影响可用霍尔—佩奇 (Hall-Petch) 方程表示^[4]:

$$\sigma_s = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \quad (1)$$

σ_0 和 K_y 均为常数, 前者表示晶内对变形的阻力, 约相当于单晶屈服强度, 后者表示晶界对变形的影响。由式 (1) 可以看出, 屈服强度与晶粒尺寸成反比。材料的屈服强度可认为主要由三个部分构成, 即基体金属屈服强度、奥罗万强度强化值和霍尔—佩奇微晶强化值。

多层喷射沉积耐热铝合金挤压管材的微观组织中, 晶粒尺寸 (100 nm ~ 500 nm) 和析出相尺寸 (30 nm ~ 80 nm) 均小于传统喷射沉积制备的该合金挤压棒材的晶粒和析出相^[5], 因而表现出较高的强度。与平流铸造该合金挤压棒材中的晶粒和析出相相比则较大^[1]。另外由于挤压系数较小, 管材致密度较低, 因此挤压管材力学性能低于平流铸造挤态合金。

4.2 显微结构

多层喷射沉积制备管坯的工艺中, 同样是将金属熔体雾化后, 直接沉积到基体管上形成沉积坯, 但是喷射流沉积时在沉积面的扫描轨迹不同, 即喷射流与沉积面的相对运动方式不同 (见图 1)。雾化器在基体管的正上方一定喷射高度上可沿管坯轴向 (长度方向) 往复直线运动, 雾化器轴向扫描行程即为管坯长度。而基体管匀速率转动的同时以一定的速率下降, 以保持合适的喷射高度。在管坯制备过程中, 喷射流在整个管坯表面进行往复扫描沉积, 直到沉积到预定沉积坯厚度。与传统的喷射沉积制备管坯工艺相比, 多层喷射沉积制备管坯工艺过程中, 喷射流在同一点沉积时的扫描间隔较长, 喷射流沉积时沉积面已经完全凝固并降低到较低的温度, 喷

射流每次沉积时类似于“溅射急冷”这一快速凝固工艺^[6]。温度为 T 的熔滴在沉积面沉积后“溅射急冷”,采用 Estrada 和 Duszczyc 在牛顿冷却条件下建立的沉积面与气流交互作用薄层的平均冷却速度估算公式^[7],即

$$T/t = T_{ls}h_t / T X(L + C_m T_{ls}) \quad (2)$$

式中 T_{ls} 为合金凝固温度区间值,Al-Fe-V-Si 合金的相图复杂,从 Al-Fe 合金相图估算 FVS0812 合金的凝固温度区间约为 252 K^[8]; T 为喷射熔滴流与气体环境的温度差,多层喷射沉积制备管坯工艺中熔滴在沉积面沉积时的平均温度为 1 060 K,环境温度一般取为 348 K,则 $T = 1 060 - 348 = 712$ K^[9]; X 为交互作用薄层的厚度,此处根据熔滴铺展薄层厚度的计算值和实验值取 $X = 3.4 \mu\text{m}$ ^[9]; h_t 为考虑沉积坯传导、气体对流及辐射的综合传热系数,此处忽略后两者的作用,只考虑传导的急冷作用,传导平均传热系数通常取为 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \sim 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[7]。 L 、 C_m 分别为熔滴的密度 ($2.4 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、熔化潜热 ($3.97 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和比热容 ($1.18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。由公式(2)可估算出直径为 150 μm 熔滴在沉积面沉积时的冷却速度为 $3.2 \times 10^4 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \sim 10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与雾化阶段的熔滴冷却速度相比高一到二个数量级^[9]。

根据 Lawley. A 等人提出的喷射沉积熔滴粘理论,熔滴在已凝固沉积面沉积时必须保持较高的液相分数,否则熔滴的粘结效率很低,甚至完全从沉积面反弹^[10]。为实现喷射流的粘结沉积,多层喷射沉积工艺中喷射流沉积时的平均液相分数约为 0.7^[9]。在雾化阶段,直径较小的熔滴凝固时的冷却速度较大,固相分数较高;直径较大的熔滴虽然冷却速度较低,但是固相分数较低,甚至是全液相,其沉积后可以获得极高的冷却速度。而且制坯过程中,沉积面的温度在喷射流沉积前始终保持在 400 ~ 450,喷射流扫描过程中熔滴沉积铺展时的冷却速度不会随沉积时间而明显降低。因此在多层喷射沉积工艺中,各粒径熔滴凝固时均可获得较高的冷却速度,沉积坯的显微组织细小。喷射流的一次扫描沉积过程中,熔滴在同一位置是逐个沉积的,若前一熔滴铺展后的薄层尚有较高温度时,后一熔滴已经沉积,则后者的冷却速度较前者低,在该薄层中的晶粒和析出相可能较前一层大。而在传统的喷射沉积制坯过程中,喷射流在同一位置的扫描时间间隔非常小,随喷射流的沉积,在沉积坯表面很快形成固/

液相共存区间,熔滴“溅射急冷”的快速凝固过程不明显,因而熔滴的冷却速度逐渐降低,在稳定沉积阶段约为 $10 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数量级^[11]。沉积坯表面的半固态糊状层凝固冷却时,较低的冷却速度使得在积坯中易形成粗大晶粒和析出相,尤其是粗大针状相 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 。

5 结论

(1) 多层喷射沉积制备的大直径耐热铝合金管坯经挤压后,力学性能优良。

(2) 多层喷射沉积管坯的显微组织细小,晶粒尺寸为 200 nm ~ 500 nm, $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 析出相尺寸为 20 nm ~ 60 nm。

(3) 多层喷射沉积制坯过程中,熔滴在已凝固沉积面铺展后可以获得约 $3.2 \times 10^4 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \sim 10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冷却速度,明显高于雾化制粉工艺和传统的喷射沉积工艺。

参考文献

- 1 Skinner D J, Rye R L, Raybould D et al. Dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloy. *Scripta Metall.*, 1986; 20: 867
- 2 Yuan Wuhua, Chen Zhenhua, Huang Peiyun. Preparation of heat-resist aluminum alloy pipe blanks by multi-layer spray deposition. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2000; 10(4): 461
- 3 邓至谦,周善初. 金属材料及热处理. 第一版,长沙:中南工业大学出版社,1989: 22
- 4 曹明盛. 物理冶金基础. 第一版,北京:冶金工业出版社,1985: 253 ~ 258
- 5 Haniprasad S L, Saotry S M, 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. *Metall. Trans. A*, 1993; 24A(4): 865
- 6 Gerardo T, Szekely J. Mathematical modeling of the isothermal impingement of liquid droplets in spraying process. *Metall. Trans. B*, 1991; 22B: 901
- 7 Liang X, Lavernia E J. Evolution of interaction domain microstructure during spray deposition. *Metall and Mater. Trans. A*, 1994; 25A(1): 2 341
- 8 田荣璋,王祝堂. 铝合金及其加工手册. 第二版,长沙:中南大学出版社,2000: 27
- 9 袁武华. 多层喷射沉积制备大尺寸耐热铝合金管坯的研究. 中南大学博士学位论文, 2001
- 10 Mathur P, Annavarapu S, Apelian D et al. Spray casting: an integral model for process understanding and control. *Mater Sci and Eng.*, 1991; A142: 261
- 11 Gutierrez M E, Lavernia E J, Trapaga G M et al. Mathematical model of the spray deposition process. *Metall. Trans. A*, 1989; 20A(1): 7