

喷射成型制备的 Al-23Si-5Fe 合金圆锭 的凝固组织^①

张永安 熊柏青 韦 强 张少明 石力开
(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

刘 勇 王 峰
(北京科技大学, 北京 100083)

摘 要 根据喷射成型的工艺过程特点, 研究了喷射成型制备的高硅铝合金圆锭凝固组织。结果表明: 喷射成型过程中, 在沉积坯件的上表面存在一个有一定尺寸的液态金属熔池; 沉积坯件的凝固组织与粉末凝固组织有明显差别: 沉积坯件整体上呈逐层凝固, 但不同部位的微观组织随凝固速度的不同而有明显区别。

关键词 喷射成型 凝固进程 液态金属熔池

中图法分类号 TG146.2

近年来, 喷射成型技术在世界范围内得到迅猛的发展, 并在一定程度上已走向实用化、商品化阶段^[1, 2]。喷射成型技术之所以能取得如此大的发展, 得益于该工艺制备的材料具有准快速凝固材料的优异性能。喷射成型制备的沉积坯件的凝固组织对最终沉积态材料的性能起决定性的作用^[3, 4]。因此, 有必要对喷射成型制备材料的凝固进程进行详细的研究及控制。本文选取 Al-23Si-5Fe 合金为例, 对喷射成型制备圆锭的凝固组织进行了分析, 并提出了对沉积坯件凝固组织进一步优化的方案。

1 实验方法

选用高硅铝合金为原料, 其化学成分为 Si 22.8%~23.5%, Fe 4.8%~5.1%, Al 余量。雾化气体采用北京普莱克斯公司生产的压力为 14.7 MPa 的瓶装氮气。

在自行研制的 PF-200 大型雾化喷射成型设备上, 进行喷射成型圆锭制备试验, 选用自行研制的非限制式气雾化喷嘴。具体工艺参数

为: 斜喷角 30°, 雾化气体压力 0.8 MPa, 接收距离 530 mm, 偏心距 45 mm, 接收基体旋转速度 60 r/min, 接收基体的下降速度依据喷射密度函数变化相应调整。

2 雾化粒滴在飞行过程中的凝固进程

在喷射成型过程中, 高温金属熔体经高温导流系统注入雾化区, 被高速雾化气体破碎、雾化, 形成包含有大量不同尺寸的小液滴的雾化锥。雾化锥中小液滴与周围雾化气体之间存在较大速度差(对于非限制式气雾化, 此速度差高达 200 m/s), 小液滴就会被加速。而与此同时, 二者之间存在着较大的温度差, 小液滴在高速飞行时, 其热焓就会以表面对流传热和辐射传热的形式传输至周围雾化气体中。

在这个阶段合金小液滴冷却速度最高可达 $10^3 \sim 10^5$ °C/s^[5], 当液滴温度冷却到该合金形核温度以下时, 在热力学和动力学上均满足形

① 国家“八六三”计划资助项目 收稿日期: 1999-01-15
张永安, 男, 27岁, 硕士, 助理工程师

核条件,在其内部就会发生异质形核,开始凝固,由于小液滴的三维尺寸均比较小,各向传热速率均等,液滴内部温度均匀,其凝固过程是各部分基本上同时凝固。

图1是Al-23Si-5Fe合金过喷粉末的微观组织照片,(a)中粉末直径大约为20 μm ,基体组织是非常细小的铝硅共晶组织,初生硅外形呈颗粒状,是正八面体结构,其尺寸为1 μm 左右,铝铁金属间化合物特有的针状形态并不明显,其尺寸也很细小,与初生硅基本接近,二者均匀弥散分布在铝硅共晶基体上;(b)是直径为70 μm 左右的粉末的微观组织,左边粉末直径为65 μm ,右边粉末直径为75 μm ,其组织形态与直径为20 μm 的粉末基本相似;(c)是直径为120 μm 的粉末微观组织,初生硅相外形仍呈颗粒状,但尺寸增大至4~5 μm ,而铝铁金属间化合物针状形态非常明显,尺寸达20 μm 左右,作为基体的共晶铝硅组织略有增大;另外,分别对直径为200, 270, 320 μm 的过喷粉末微观组织进行研究,结果表明基体组织依然为细小共晶组织,初生硅形状依然是颗粒状,尺寸约为10~15 μm ,铝铁金属间化合物尺寸明显增大,二者均匀地分布在细小基体组织上。

液滴的冷却速度与液滴的直径有直接关系,直径小的液滴冷却速度较快,其凝固速度也快,而直径大的液滴凝固速度则较慢。对比不同直径粉末颗粒中的组织,可以看出凝固速度与凝固组织存在一定的对应关系,通过分析这种对应关系,便可为进一步分析沉积坯件中不同部位的凝固速度奠定基础。另外,在喷射成型过程中,雾化锥中包含有大量不同尺寸的液滴,其冷却速度存在差异,在距雾化焦点一定距离处取一平面,可能会出现3种不同形态的粒滴:(1)完全固态;(2)部分固态,部分液态;(3)完全液态。根据雾化锥中粉末的粒滴分布和不同直径粒滴的凝固速度,加权计算可求得在某一距离处雾化锥的整体固相含量,而雾化锥的整体固相含量正是制备圆锭成型性的关键参数。

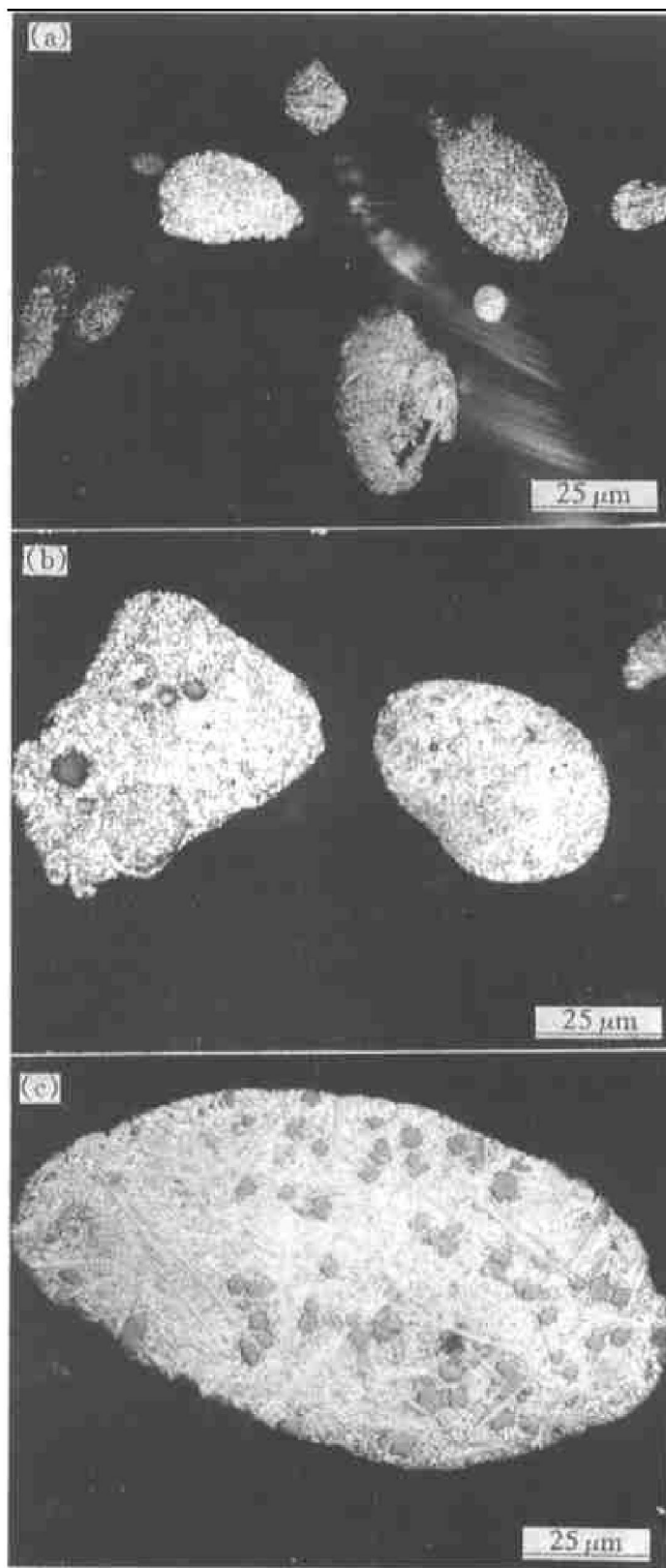


图1 过喷粉末微观组织

Fig. 1 Microstructures of over-sprayed powders
(a) —20 μm ; (b) —70 μm ; (c) —120 μm

3 沉积坯件的凝固组织分析

在喷射成型过程中,沉积坯件的凝固进程由热焓输入输出比率以及沉积成型后的热传输

方式所决定;在沉积成型过程中,热焓的输入量由雾化锥的平均热焓量和平均沉积速率所决定;而热焓输出量则由表面对流传热状况,沉积坯件热传导率和沉积坯件内部温度场分布所决定,以上各参量之间的相对关系决定了沉积坯件的凝固组织。图2是喷射成型制备的 Al-23Si-5Fe 合金圆锭的宏观照片及取样示意图,图3是相应部位的微观组织照片。

在沉积成型的起始阶段,高速飞行的粒滴撞击到水冷接收基体上,迅速粘结成型并发生凝固,此时沉积物在很短的一段时间内沉积长大。在这一阶段沉积坯件的热焓主要依靠水冷接收基板以热传导的方式输出,此时,在同一平面上,冷却速度基本相同,凝固过程从下至上逐层凝固,微观组织基本相同。图3(a)是沉积成型圆锭接近接收基体处的微观组织,可以看出基体组织是非常细小的共晶组织,而初生硅相呈正八面体结构,尺寸达 $5\sim 6\mu\text{m}$ 左右,原本在粉末中呈长针状的铝铁金属间化合物呈折断针状形态,尺寸为 $5\mu\text{m}$ 左右,二者均匀弥散分布在细小基体组织中。说明雾化粒滴高速撞击到接收基体上时,有充分的打击作用,使针状组织发生折断。

当沉积物增大到一定尺寸以后,其热能的散失以侧边表面对流传热和通过已凝固的沉积坯件向接收基板热传导的方式进行,根据在线

监控系统观察和沉积坯件外表面形态分析,此时在沉积成型的上表面存在一定厚度的高温熔池,该金属熔池的形态与大小是和喷射成型的工艺参数密切相关的,对于非限制式雾化方式而言,雾化锥比较细小,包含的热焓比较集中。在制备圆锭时,如果初始偏心距偏小,则熔池厚度较大;而初始偏心距偏大时,沉积坯件实收率较低;只有初始偏心距在适当的范围内时,熔池厚度较小,有利于在较短的时间内迅速凝固并保证较好的沉积坯件实收率。此外,由于雾化粒滴高速冲击熔池,使沉积物和雾化粒滴中大量已凝固部分破碎,造成熔池中存在大量小晶核,有利于其凝固。与此同时,一些尺寸较小的液滴在到达沉积坯件时,已完全凝固,它们高速冲击并沉积在熔池中,图4是已凝固小颗粒冲入熔池并保存了原有形态的金相照片。图3(b)是沉积圆锭中心部位微观组织,此时的基体依然为比较细小的共晶组织,其上弥散分布着尺寸为 $7\sim 8\mu\text{m}$ 颗粒状初生硅相和折断的针状铝铁金属间化合物;(c)是圆锭侧边微观组织照片,可以看出在这一部位初生硅相非常细小,尺寸只有 $1\mu\text{m}$ 左右,而针状金属间化合物组织也不明显,主要为非常细小的枝状共晶组织,这说明在沉积成型的过程中,圆锭外表面的凝固速率远比中心部位高,其凝固方式是从侧边逐渐向中心推进。到达雾

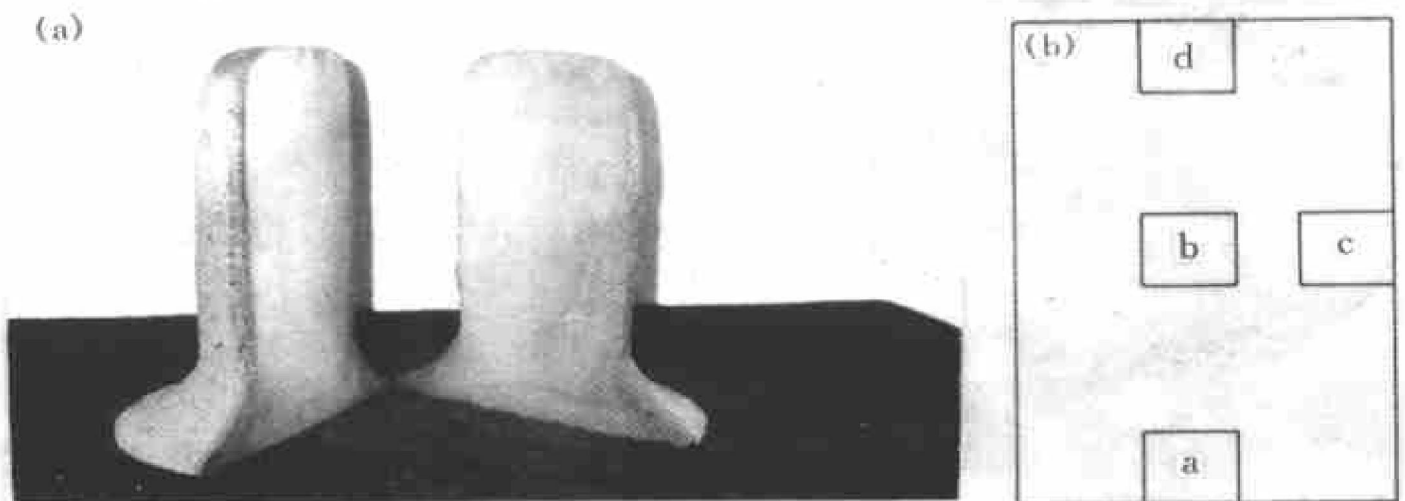


图2 喷射成型制备圆锭的宏观照片及取样示意图

Fig. 2 Macrographs of preform made by spray forming and schematic of sample

(a) —Macrographs of real image; (b) —Schematic of sample

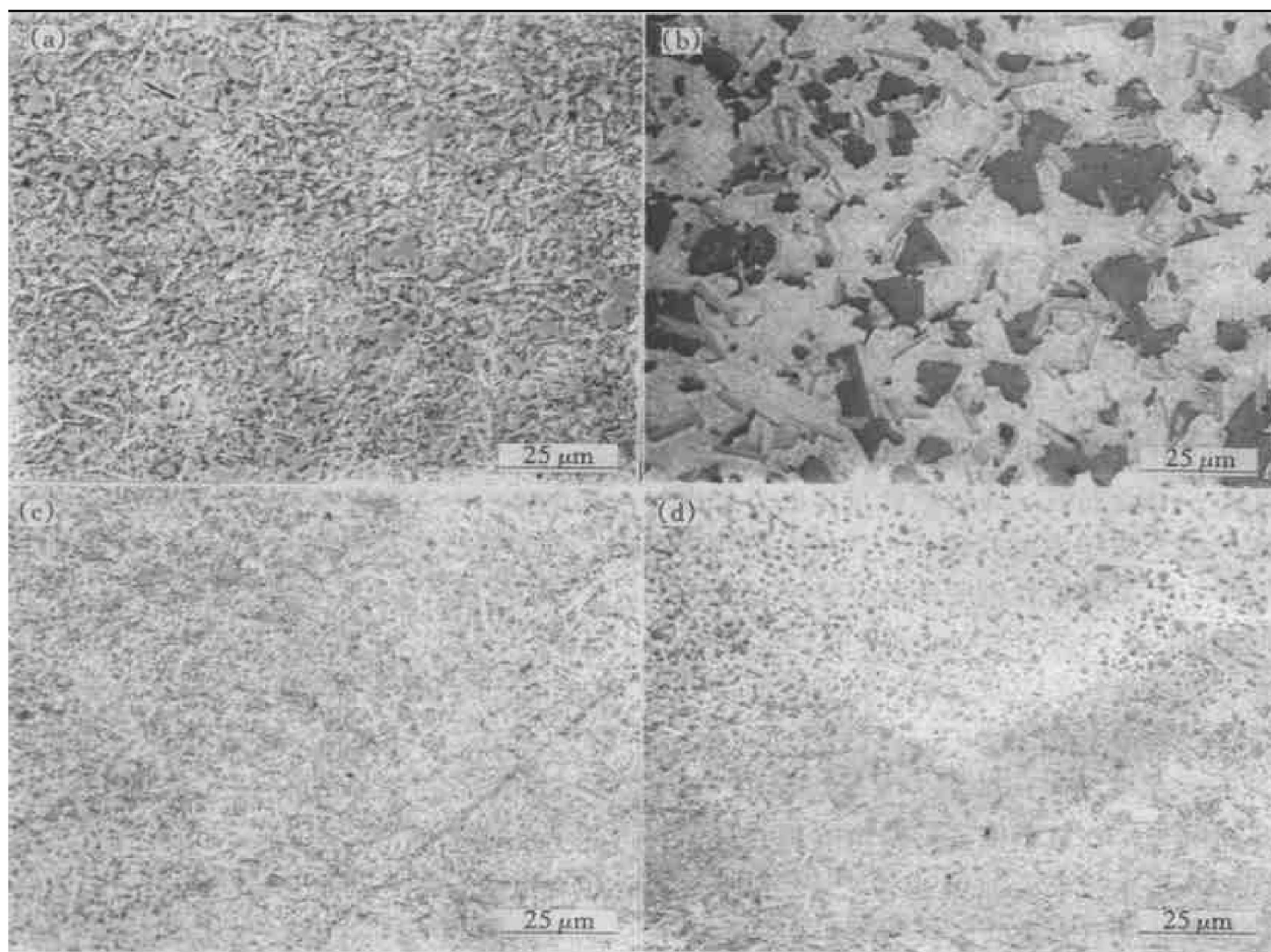


图3 沉积圆锭的微观组织

Fig. 3 Microstructures of preform made by spray forming process

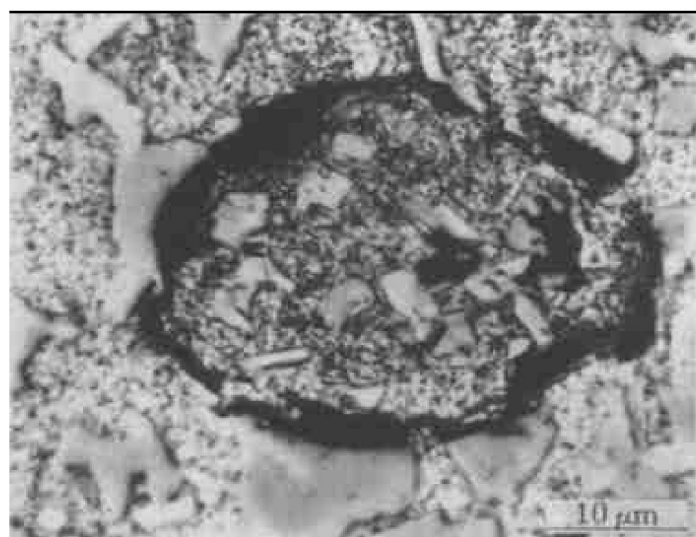


图4 固态粉末冲击熔池微观组织

Fig. 4 Microstructure of presolidified

powder in preform

化沉积结束阶段时, 不再有高温的雾化粒滴沉积到沉积物上, 热焓的输入量为零, 此时的沉积物表面的传热呈三维强对流传热, 冷却速率明显增大, 凝固速度也相应地增大, 图3(d)是上表面凝固组织, 可以发现在靠近表面的部位组织非常细小, 初生硅相尺寸非常小接近于共晶组织中的硅的尺寸, 在远离表面的方向上初生硅相明显增大, 铝铁金属间化合物也逐渐出现, 但整体尺寸细小。

对比沉积坯件的微观组织和过喷粉末的微观组织, 发现沉积坯件中铝铁金属间化合物呈折断的针状组织, 说明在雾化粒滴高速沉积到沉积坯件上时, 处于不同状态的粒滴均对沉积

坯件表面的熔池有强烈打击作用, 打碎了沉积坯件的熔池中雾化粒滴中已经凝固的针状和枝状组织, 从而细化了微观组织, 使沉积态材料具有半固态加工材料的组织特征。

综合对比沉积圆锭的各部位的微观组织, 可以发现在沉积坯件的周围和上下端面部位的凝固组织非常细小, 相对而言中心部位则略为粗大。这说明在喷射成型制备的材料中存在微观组织不均匀现象, 这是由沉积坯件的不同部位有不同凝固速度所决定的。而进一步调整沉积坯件中的热焓输入输出方式, 改变沉积坯件的温度场分布, 从而改变沉积坯件的凝固进程, 可以在一定程度上减轻这一现象。通过采用双喷嘴系统或喷嘴扫描的方法, 可使热焓的输入方式更趋于合理, 使沉积坯件中的等温曲线趋于平缓, 减小熔池的体积^[6], 从而达到控制凝固进程, 改善材料微观组织, 提高材料性能的目的。

4 结论

(1) 喷射成型制备圆锭时, 在沉积坯件的上表面存在一个液态金属熔池;

(2) 喷射成型制备的圆锭的微观组织与其过喷粉末的微观组织有明显差别, 雾化粒滴高速沉积到沉积坯件上时, 对沉积坯件表面熔池有强烈的打击作用, 打碎了沉积坯件中已凝固的针状和枝状组织;

(3) 喷射成型制备的圆锭的不同部位微观组织有所不同, 靠近沉积坯件的周围和上下端面部位的凝固组织非常细小, 而中心部位则相对略为粗大。

REFERENCES

- 1 Singer A R E. *Metals Mat*, 1970, 4 (4): 246.
- 2 Higginbotham G J S. In: *Second Inter Cong On Spray Forming*, 1993, 259.
- 3 Annavarapu S and Doherty R D. *Int J Powder Metall*, 1993, 29, (4): 259.
- 4 Yu Fuxiao, Dwarakadasa E S and Ranganathan S. In: Wood J V ed, *Procs of the Third Inter Cong on Spray Forming*. Cardiff, UK, 1996, 313.
- 5 Liu Jiang(刘江). Master Thesis(硕士论文), Beijing: Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals. 1996, 43.
- 6 US Patent Application 08/108. 715.

SOLIDIFICATION MICROSTRUCTURE OF Al-23Si-5Fe BILLET IN SPRAY FORMING PROCESS

Zhang Yongan, Xiong Baiqing, Zhang Shaoming and Shi Likai

Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China

ABSTRACT Based on the characteristic of spray forming process, the solidification progress of the Al-23Si-5Fe alloy billet made by spray forming process was studied. The results showed that there is a metal melt pool on the top surface of the preform in the spray forming process, the microstructure of the over-sprayed powders and the preform are different, namely the microstructures of the preform change in different regions corresponding to different heat input and output rates.

Key words spray forming solidification progress metal melt pool

(编辑 朱忠国)