

# 耐热粉末铝合金成形工艺研究

李 伟 杨 俊 罗琴英

( 北京机电技术研究所 北京 100074 )

**文 摘** 为研制超音速飞行器所需的耐热铝合金管材,采用喷射沉积管坯 挤压成厚壁管材 旋压成薄壁管的成形工艺路线,旋压出 Al - 8.5Fe - 1.3V - 1.7Si 耐热粉末铝合金  $\phi 153 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm} \times 540 \text{ mm}$  的小直径管材和  $\phi 380 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 1140 \text{ mm}$  的大直径管材。大直径管材做成的模拟舱段通过了静强与静热联合试验。

**关键词** 耐热粉末铝合金,快速凝固,喷射沉积,挤压,旋压

## Forming Technology of Heat Resistant Powder Aluminum Alloy

Li Wei Yang Jun Luo Qinying

( Beijing Electromechanical Technology Institute Beijing 100074 )

**Abstract** To develop heat resistant powder aluminum alloy tubes for supersonic aircrafts, spray shaping, squeezing and spinning processes are employed respectively. Some Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si alloy tubes are obtained with small diameter tube of  $\phi 153 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm} \times 540 \text{ mm}$  and large diameter tube of  $\phi 380 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 1140 \text{ mm}$ . Simulation cabin made by the large diameter tubes has passed the combined thermal-static load tests.

**Key words** Heat resistant powder aluminum alloy, Rapid solidification, Spray shaping, Squeezing, Spinning

### 1 前言

随着飞行器向着超音速方向发展,要求材料能耐 350 以上高温,普通铝合金已不能满足要求。钛合金虽能够满足高温使用要求,但是钛合金成本高、密度相对较大且加工困难。另外,在 350 左右使用钛合金有些大材小用;因此开展了能在 350 左右工作的耐热铝合金的研究工作,使材料既可满足耐热结构强度、刚度的要求,又可达到减重的目的。本文以综合性能优良的 Al - 8.5Fe - 1.3V - 1.7Si 耐热粉末铝合金<sup>[1,2]</sup>为研究对象开展了材料的成形工艺研究,应用研究的目的是旋压出可用于舱体的无缝管材。

### 2 耐热粉末铝合金成形工艺探索

要提高铝合金的耐热性能,必须在铝中加入过渡族元素 Fe、Mo、V、Cr、Zr 等,形成热稳定的金属间化合物。采用常规铸锭冶金方法,上述元素加入量有限。采用快速凝固/粉末冶金(RS/PM)技术则可扩大这些元素的固溶度,形成高度过饱和固溶体,在随后的热加工过程中析出弥散的热稳定相质点,有效强化基体,提高铝合金的耐热性能。但是快速凝固/粉末冶金技术只限于生产一些小型结构件,在制取大件时需要很大的等静压设备及大型的挤压设备,在设备能力上很难实现,且工艺流程长,质量难以保证。故采用快速凝固/多层喷射沉积的方法进

收稿日期:2001-04-18

李伟,1973年出生,助理工程师,主要从事金属材料及工艺方面的研究工作

行研究。

## 2.1 快速凝固/多层喷射沉积制坯

快速凝固/多层喷射沉积工艺是由熔融金属直接生产最终产品的近形工艺,其原理是:熔融金属或合金在惰性气体中雾化形成液体颗粒喷射流,雾化颗粒直接喷射到较冷的基体上,产生撞击、凝固而形成沉积物。常规喷射沉积技术的冷速为  $10^2$  K/s 数量级,较粉末冶金  $10^4$  K/s ~  $10^5$  K/s 的冷速要低得多。对 Al - Fe - V - Si 耐热粉末铝合金来说,冷速至少要达到  $10^3$  K/s 才能保证获得细小的微观组织从而保证材料的高温性能。采用多层喷射沉积工艺<sup>[3]</sup>可使冷速提高到  $10^3$  K/s ~  $10^4$  K/s,基本可以满足耐热粉末铝合金对冷却速度的要求。与粉末冶金相比,该工艺避免了制粉、贮存、压制、烧结等工序带来的氧化、易污染等问题,且可制取较大尺寸的材料。

## 2.2 管材成型工艺路线的确定

如果多层喷射沉积管坯能象铸坯一样直接旋压成薄壁管,则可以旋压提供低成本的旋前坯,其经济效益显著。用 60 多只  $\phi 153$  mm 的多层喷射沉积管坯进行旋压试验,变薄率可达到 46%,虽有突破,但是工艺要求极严,因此成功率很低。主要原因是多层喷射沉积工艺不成熟,坯料中缺陷较多,气体含量大,管坯内部孔隙率约为 10%,材料塑性很低,而旋压加工又是暴露材料缺陷的过程,所以多层喷射沉积管坯直接旋压获得管材在技术上的难度很大。

如果将多层喷射沉积管坯经热挤压成厚壁管,则可提高材料的致密度与延伸率。因为挤压加工时材料在挤压筒内处于三向压缩应力状态,有利于孔隙的弥合,消除部分冶金缺陷,提高材料的塑性,有利于后续旋压加工。经试验证明,虽然因挤压工装问题,挤压比仅为 4~5,但对提高该材料的可旋性很有效,材料旋压变薄率可在 83%左右。最终确定了多层喷射沉积制坯 挤压 旋压的材料成形工艺路线。

采用多层喷射沉积技术研制的 Al - 8.5Fe - 1.3V - 1.7Si 耐热粉末铝合金,增加了 Fe、V 在铝中的固溶度,形成高度过饱和固溶体,在随后的处理过

程中可析出弥散坚硬、不易粗化的球形热稳定第二相粒子  $Al_{12}(Fe, V)_3Si$ ,这种粒子相是高温下非常稳定的金属间化合物,有效地提高材料的耐热性能,并使该合金在高温下具有良好的综合性能。

## 3 耐热粉末铝合金旋压工艺研究

### 3.1 小管( $\phi 153$ mm)旋压工艺研究

#### 3.1.1 材料的制备

采用快速凝固/多层喷射沉积方法制备管坯。多层喷射沉积管坯质量直接影响到挤压管质量,如果 Fe、Si 含量偏高,则挤压时变形抗力大,挤压不顺利;如果坯料有夹杂、分层、微裂纹等缺陷,挤压管会出现裂纹,甚至挤裂。因此采取了以下措施提高管坯质量。

(1)合金成分(质量分数)控制在 Fe8.5%, V1.3%, Si1.7%;

(2)对溶体进行过滤、除气、除渣以提高溶体质量;

(3)在多层喷射沉积时一次连续成形,避免出现中间停顿以减少分层;

(4)多层喷射沉积完成后立刻送入退火炉使之缓慢冷却,减小因热应力产生裂纹的可能。

将多层喷射沉积管坯预热 450  $\times 12$  h,放进预热至 420 挤压筒,在 3 500 t 挤压机上挤压成管材。挤压比小于 4。

将挤压管材加工成旋压坯,尺寸规格为: $\phi 153$  mm,壁厚 4 mm ~ 6 mm,长度 150 mm ~ 160 mm。

#### 3.1.2 旋压工艺试验

在 10 t JC64-00 旋床上进行旋压试验,旋轮直径 180 mm,旋轮圆角半径 R8 mm;旋压进给比为 1 mm/r ~ 1.25 mm/r。

坯料加热到 350 后套在已加热到 350 以上的芯棒上,再保温 0.5 h 后旋压。为消除旋压应力,当旋压变形 2~3 道次,变薄率达 40%以上时,需进行一次去应力退火以使旋压顺利进行。

采用多道次小变薄的工艺方案热旋压的管材典型尺寸为  $\phi 153$  mm  $\times 1.2$  mm  $\times 500$  mm,变薄率可达 77%。旋压管的力学性能见表 1。由表 1 可见,管材经过旋压后,其力学性能变化不大。

表 1 耐热粉末铝合金旋压管力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of spun tubes with heat resistant powder aluminum alloy

编号	成分/ % (质量分数)	状态	室温				350 ,7 min		
			$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta_{10}$ / %	$E$ / GPa	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta_{10}$ / %
P6-1	Fe8.5 V1.3 Si1.7	挤压,试棒	440	341	8.2	78	185	161	6.2
P6-2	Fe8.5 V1.3 Si1.7	350 旋压,变薄率 65 %,试片	456	402	6.4	80	182	133	5.3

### 3.1.3 解决的关键技术

#### (1) 采用多道次小变形量的工艺方案

在强旋中变薄率是一个主要的工艺参数,它直接影响到旋压力的大小及旋压精度。变薄率取决于材料塑性,高塑性材料变薄率一般每道次取 30% ~ 40%。由于多层喷射沉积耐热粉末铝合金挤压管材料致密度只有理论密度的 96%,组织较疏松,若采用常规铝合金旋压参数旋压,在第一道次或第二道次头部就会出现多道纵裂纹使旋压难以进行。通过试验和分析提出采用多道次小变形量的工艺方案,即第一、第二道次变薄率控制在 20% 以内,先使材料密度达理论密度的 98% ~ 99%,使组织连续致密,随后的旋压就比较容易进行。

(2) 开旋温度 300 ~ 350 ,终旋温度不低于 200

通过试验,将旋压温度逐渐降低。首次旋压时将芯棒加热至 450 ,坯料加热到 350 套棒旋压。旋压温度高不仅操作难度大,对材料性能特别是高温性能影响较大,通过试验反复调整旋压工艺参数,最终确定开旋温度 350 ,终旋温度 200 左右。

#### (3) 中间去应力退火

为消除旋压应力,变薄率达 40% 以上时,需进行一次去应力退火以使旋压顺利进行。

#### (4) 良好的润滑

热旋时芯模表面质量差,该材料旋压变形时缩径抱芯,且易形成铝瘤,影响旋压管内部质量,脱模也困难。选取一种润滑涂料,坯料套棒前涂在芯棒表面与坯料内表面,有效地解决了脱模难的问题,而且管材内表面质量大大提高。

#### (5) 旋压坯尺寸的确定

芯模与材料的线膨胀系数相差较大,材料的塑性较低。如果管坯内径太大,则与芯模的间隙大,旋压时容易造成管坯开裂;管坯内径太小,则高温时安

装旋压坯困难。根据热胀冷缩规律计算后确定了最佳旋前坯尺寸。

### 3.2 大管(内 380 mm)旋压工艺研究

前期内 153 mm 多层喷射沉积管的旋压是实验室水平的研制阶段。大于内 360 mm 多层喷射沉积管的研制要比小管的研制困难的多。多层喷射沉积大管坯时冷速很难保证,熔体质量也较难控制。挤压成管材时,由于该合金的变形抗力大,要实现大挤压比,挤压力难以达到相应的要求。挤压大管材已经用到 12 500 t 挤压机挤压力的极限。旋压加工时,由于是热旋压,大芯棒的加热、坯料的加热比较困难。大管的研制是放大到 1:1 试验件的研制阶段,其材料成分、力学性能、制作工艺等更接近实际应用。

#### 3.2.1 旋压坯的制备

根据小管研制经验,将合金成分(质量分数)控制为 Fe8.5%,V1.3%,Si1.7%。对熔体进行过滤、除气、除渣,多层喷射沉积时一次连续成形,多层喷射沉积完成后立刻送入退火炉退火。多层喷射沉积管坯尺寸为外 630 mm,内 370 mm,有效长度 700 mm ~ 750 mm。管外包套为 Al-12Si 合金。

挤压前坯料加热 300 °C × 12 h + 480 °C × 3 h。在 12 500 t 挤压机上热挤压成厚壁管,尺寸为外 416 mm,内 338 mm。大管的挤压比要比小管的挤压比大(为 5)。将挤压管加工成旋压坯,尺寸为外 410 mm,内 380 mm,长 350 mm 左右。

#### 3.2.2 旋压工艺试验

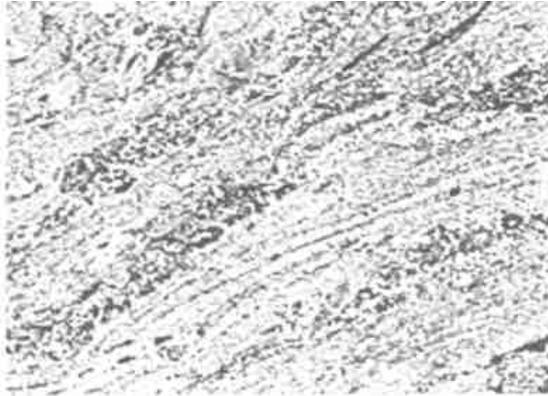
在 60 t 三旋轮立式强力旋压机上进行试验。旋轮圆角半径  $R15$  mm,工作角为 15°。旋压进给比为 2.5 mm/r。

柴油明火加热,坯料加热到 350 °C 后套在已加热到 350 °C 以上的芯模上,再保温 0.5 h 后旋压。为消除旋压应力,当旋压变薄率达 40% 以上时,需进

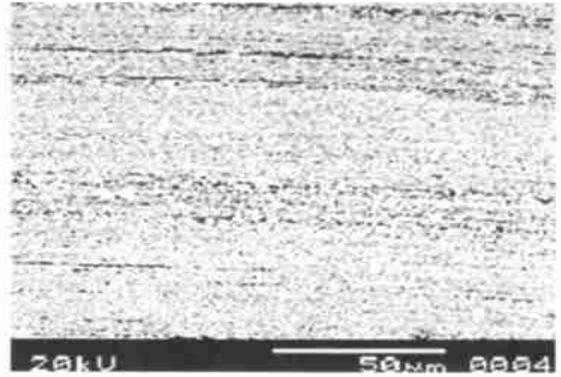
宇航材料工艺 2002 年 第 3 期

行一次去应力退火以使旋压顺利进行。

管材直径较大,热膨胀量较大;大管的材质不是很好,柴油明火加热效果不理想;因此采取了多道次变薄旋压工艺。图1为挤压、旋压后的金相组织照片。由图可见,随着后续加压的进行,材料组织逐渐致密均匀。



(a) 挤压变形 300 ×



(b) 旋压变形 60% 1 000 ×

图1 挤压、旋压后的金相组织照片

Fig.1 Metallographs of alloy tube after squeezing and spinning

旋压出 内 380 mm 大直径耐热铝合金旋压管,总变薄率达到 85%,有效长度达到 1 140 mm,壁厚为 2.5 mm。旋压管的力学性能见表 2,与国外同类材料力学性能相当<sup>[4]</sup>。

表 2 大管挤压、旋压后力学性能

Tab.2 Mechanical properties of large diameter tubes after squeezing and spinning

编号	成分/ % (质量分数)	状态	室温				350 °C, 7min			
			b	0.2	s	E	b	0.2	s	E
			/MPa	/MPa	/ %	/ GPa	/MPa	/MPa	/ %	/ GPa
1 #	Fe8.49V1.19Si1.41	旋压,试棒	391	319	10.3	79	185	178	12.5	60
2 #	Fe8.7 V1.18Si1.42	旋压,试片	402	335	14.1	75	186	141*	12.8	59

\*为夹头一位移法测量。

### 3.2.3 考核试验

用 内 380 mm 旋压管制成模拟舱段进行静强试验与静热联合试验。静强试验中,模拟舱段达设计载荷的 200%未变形。静热联合试验中,按要求升温曲线对模拟舱段进行加热。在 350 °C 保温 350 s (最高温度达到 380 °C),模拟舱段达到设计载荷的 178%时失稳。此时弯曲应力达到 196 MPa,末端与前端最大相对位移仅为 3.09 mm,远小于试验大纲规定的 10 mm 位移。

对试验结果的计算分析表明,耐热粉末铝合金模拟舱段强度和刚度满足设计要求,而且有较大的强度、刚度裕度。

## 4 结论

(1)耐热粉末铝合金的成型采取多层喷射沉积制管坯 挤压成厚壁管材 旋压成薄壁管的工艺路线可行。

(2)所选旋压工艺可在材料质量保证的前提下

进行耐热粉末铝合金大直径薄壁管的生产。

(3)旋出的管材在 350 °C 下满足性能指标要求,可以用来制造超音速飞行器舱体。

### 参考文献

- 周多三等.快速凝固 Al - Fe - V - Si 耐热粉末铝合金的研究.中南矿业学院学报,1991;22(1):89~93
- 黄晖等.快速凝固耐热铝合金及其进展.材料开发与应用,1996;(8):38
- 黄培云,金展鹏,陈振华.粉末冶金基础理论与新技术.长沙:中南工业大学出版社,1995:226~229
- H S 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. Metallurgical Transactions A, 1993;24:871

致谢 参加本课题研究工作的还有中南工业大学、航天新光动力机械厂、北京有色金属研究总院加工中心等单位,在此表示感谢。

(编辑 马晓艳)