

## 超塑球形气瓶用 TC4 钛合金管材的制备工艺

那晓菲<sup>1</sup>, 王卫民<sup>2</sup>, 樊亚军<sup>2</sup>, 李雷<sup>2</sup>

(1. 西部金属材料开发有限公司, 西安 710016;

2. 西安赛特金属材料开发有限公司, 西安 710016)

**摘要:**通过真空自耗熔炼制备的 TC4 合金铸锭, 经开坯锻造后, 终锻成棒坯并机加工成挤压管材用坯料, 随后在不同工艺条件下挤压, 以获得球形气瓶用具有细晶组织特征的超塑性 TC4 合金管材。研究了工艺参数对挤压管材的组织及力学性能的影响。结果表明: 对挤压前的坯料在 1 050 进行 $\beta$ 固溶预处理, 然后在 950 对两相区挤压, 可获得晶粒尺寸达 5~10  $\mu\text{m}$  的细晶组织, 管材超塑性拉伸伸长率达 600%~900%, 有效地保证了球形气瓶的超塑性成型。

**关键词:**球形气瓶; TC4 钛合金; 挤压管材; 超塑性

中图分类号: TF 804.3

文献标志码: A

## Preparation technique of TC4 alloy pipe used for superplastic gas bottle

NA Xiao-fei<sup>1</sup>, WANG Wei-min<sup>2</sup>, FAN Ya-jun<sup>2</sup>, LI Lei<sup>2</sup>

(1. West Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710016, China;

2. Xi'an Saite Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

**Abstract:** VAR was applied to preparing TC4 alloy ingot, then ingot was forged into bar and extruded with fine-grain characteristics of superplastic TC4 alloy pipes under different processing conditions. The effects of processes on microstructure and mechanical properties were investigated. Results show that 5–10  $\mu\text{m}$  grain size of extruded pipe can be obtained by  $\beta$  solution at 1 050 and extruding at 950, which reveals excellent superplastic elongation of 600%–900%. The superplastic formation of spherical gas bottle is ensured effectively.

**Key words:** spherical gas bottle; TC4 alloy; extruded pipe; superplasticity

TC4 合金由于具有比强度高、耐高温、耐腐蚀、低温性能好、综合机械性能优异而被国内外学者不断开发研究, 并广泛应用于航空航天结构件及相关零部件中。其中为某工程研制的高压球形气瓶就是航天产品中要求可靠性最高的零件之一。

球形气瓶的传统制备方法是先将 TC4 合金铸锭开坯锻制成方坯, 然后下料, 再经过多次墩拔细化组织后制成饼材, 在万吨水压机上模锻成半球状, 再机械加工成半球面。两块半球面对焊构成球形气瓶。加工过程工艺复杂、要使用大型设备、成品率和生产效率低,

且焊接区组织及强度影响整体气瓶的使用性能及服役安全系数。而采用管材超塑性气胀性能稳定、可靠<sup>[1]</sup>, 不仅节省材料, 且加工效率高、成型气瓶表面质量好、性能稳定可靠。但是, 管材的超塑性变形较为复杂, 尤其对管材坯料提出了更高的要求, 因此, 如何细化管材组织晶粒, 成为球形气瓶超塑性成型的关键<sup>[2]</sup>。

本文作者根据球形气瓶超塑性成型特性要求, 研究不同工艺条件对 TC4 管材组织性能的影响; 对加工工艺参数进行优化, 并在此基础上分析管材超塑性特性, 为球形气瓶的超塑性成型工艺奠定一定的基础。

## 1 实验

TC4钛合金采用名义成分配比、混料、压制电极、经真空自耗熔炼,制得 $d620\text{ mm}$ 铸锭。合金的化学成分如表1所示。铸锭取样测得TC4合金相变点为 $988$ 。

合金锭经 $1150$   $\beta$ 单相区加热锻造开坯, $980$ 滚圆锻造制得 $d260\text{ mm}$ 挤压棒坯。棒坯根据要求切断、扒皮及钻镗孔,以去除锻造时形成的污染层及产生的缺陷。挤压坯料采用感应加热,在 $3150\text{ t}$ 卧式水压机上挤压,挤压管材的规格为 $d159\text{ mm}\times 12.5\text{ mm}\times L\text{ mm}$ 。分析了不同工艺条件下挤压管材的金相组织,并对挤压成的管材进行室温、 $400$  高温及超塑性拉伸性能试验。

表1 实验TC4钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy (mass fraction, %)

Al	V	Fe	C	N	O	Ti
6.13	4.12	0.05	0.03	0.01	0.15	Bal.

按 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:6$ 的酸液腐蚀TC4钛合金;采用NIKON金相显微镜进行金相分析;材料室温、高温及超塑性拉伸试验在MTS810拉伸机上完成。

## 2 结果与分析

图1所示为挤压管材用 $d260\text{ mm}$ 实验棒坯的横截面金相组织形貌。由于滚圆锻造温度接近实验TC4合金的相变点,挤压棒坯的规格大,锻造变形量小,变

形不充分,基体组织为条状 $\alpha+\beta$ 组织。为了研究不同工艺条件对挤压管材超塑性的影响,采用常规挤压工艺和坯料预处理2种实验方案。

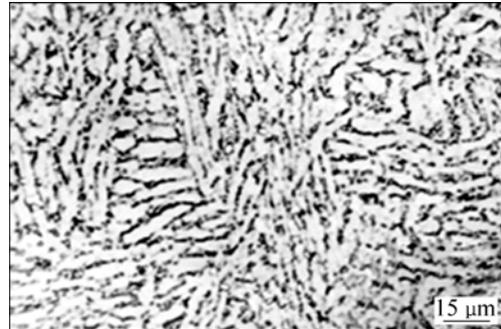


图1 挤压管材用TC4棒坯组织形貌

Fig.1 Microstructure of TC4 bar used for extruded pipe

### 2.1 常规挤压工艺路线

常规挤压工艺对挤压管材的组织性能的影响试验中,其挤压管材的挤压比均选 $\lambda=6.7$ ,挤压加热温度分别为 $1000$ 、 $950$ 和 $900$ 。挤压后,截取棒材远离两端头的横截面进行金相分析。不同加热温度挤压管材金相组织如图2所示。结果表明,在相变点以上的 $1000$  挤压时,合金的挤压变形抗力小,容易挤压,挤压管尺寸公差和表面质量好,但得到的管材组织为粗大的条状 $\alpha+\beta$ 两相组织,如图2(a),显微组织没有改善;而当挤压在相变点以下的 $950$  两相区进行时,管材的微观组织为初生等轴 $\alpha+\beta$ 转变组织,晶粒度为 $15\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 。进一步降低挤压温度到 $900$ ,挤压时由于温度回升,与 $950$  挤压比较,显微组织改善不大,但挤压变形抗力显著提高。因此挤压选择在相变点以下 $20\sim 50$  范围的 $950$  挤压,可以得到细小、均匀的组织,其综合性能也较理想。不同挤压温度下TC4管材的力学性能见表2。

图3所示为 $950$  下管材挤压示意图。由于挤压

表2 不同挤压温度下TC4管材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of extruded TC4 pipe at different temperatures

试样 编号	挤压温度/ $^{\circ}\text{C}$	室温力学性能				400 力学性能		
		$R_m/\text{MPa}$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
1	1000	915	830	13	30	620	14	55
2		911	822	11	30	617	13	56
3	950	955	848	15	39	705	17	64
4		938	845	17	42	700	19	65
5	900	965	855	16	40	718	19	64
6		957	843	16	45	709	23	67

注:管材室温性能为 $760$ , 1 h退火态测定结果。

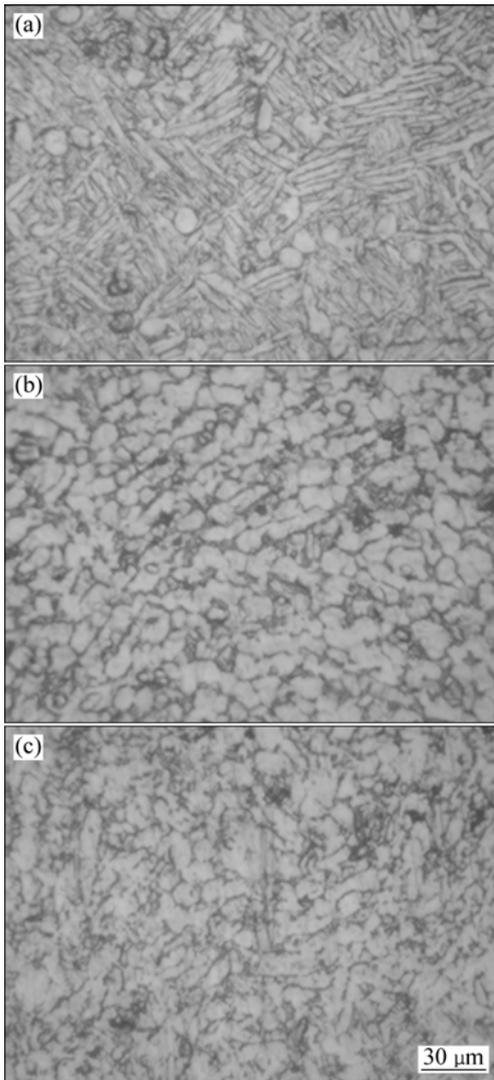


图2 不同温度下挤压 TC4 管材的横向组织形貌

**Fig.2** Transverse microstructures of TC4 pipe extruded at different temperature: (a) 1 000 °C; (b) 950 °C; (c) 900 °C

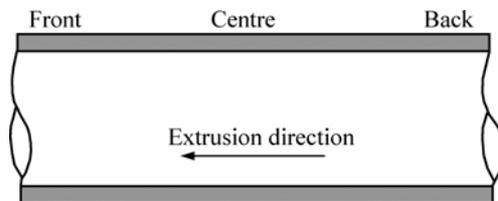


图3 管材挤压示意图

**Fig.3** Schematic plot of TC4 pipe extruded sample

过程中金属变形特点是：沿挤压方向由头部到尾部变形量逐渐增大，相应的热效应也是从头部到尾部逐渐增大，所以制备的管材各个部位的组织形貌及力学性能有差异。由图4可知，在相变点以下950 °C挤压时，头部是刚开始挤压位置，变形量还不是很大，组织为拉长的条状 $\alpha+\beta$ 组织；随着挤压的进行，变形

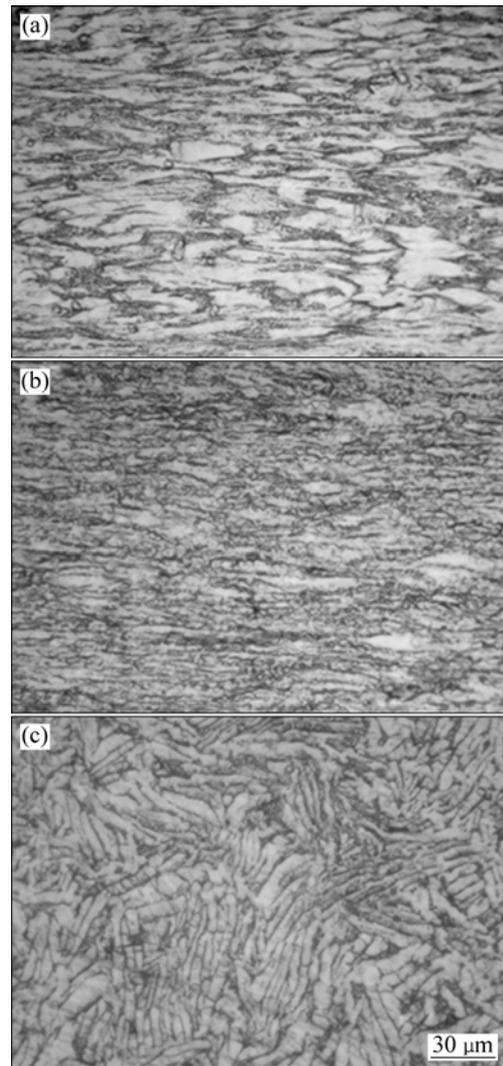


图4 TC4 挤压管材不同位置纵向组织形貌

**Fig.4** Longitudinal microstructures of TC4 pipe extruded at different position: (a) Front; (b) Centre; (c) Back

速率及变形量逐渐加大并趋于稳定，导致管材中间位置晶粒拉长更加厉害，如图4(b)所示；尾部由于热效应和变形程度逐渐减弱的影响，显微组织为较粗大的片状 $\alpha+\beta$ 组织。

表3所列950 °C挤压TC4管材不同部位的力学性能。结果表明：由于合金在挤压变形过程中变形量不同，挤压管材的温度回升高低的差异，使挤压管材头、尾的组织粗细不均，进而造成挤压管材头、尾的强度和塑性比中部的低，但都达到了国家标准。

## 2.2 坯料预处理工艺路线

高压球形气瓶是通过挤压管材后续热气胀超塑性成型的，球形气瓶气胀成型过程中管材各部分的变形是不均匀的，成型中间部分(即球形赤道位置)变形量

表 3 挤压 TC4 管材不同部位的力学性能

Table 3 Mechanical properties of extruded TC4 pipe at different locations

试样 编号	位置	室温力学性能				400 °C 力学性能		
		$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$R_m$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
1	端头	935	834	13	34	632	20	51
2		921	826	15	37	615	18	54
3	中间	966	859	16	39	601	17	56
4		968	866	18	44	596	20	59
5	尾部	923	822	15	41	603	19	50
6		916	819	11	36	600	23	47

注: 管材室温性能为 760 MPa, 1 h 退火态后测定结果。

大, 管材必须具有很高的超塑性拉伸伸长率, 以保证成型气瓶的规格尺寸、表面质量及性能可靠。由于材料的超塑性是以细晶为特征的变形机制, 尽管实验 TC4 合金采用了两相区 950 °C 挤压工艺使合金管材获得了两相区加工组织, 但组织晶粒度为 15~20 μm, 材料的超塑性不理想。因此, 如何细化组织成为高压球形气瓶超塑性成型的关键。

为使挤压 TC4 管材具有良好的超塑性成型性, 为后续生产合格的球形气瓶, 材料必须具有足够细小晶粒尺寸。为此, 研究了挤压前的坯料于 1 050 °C β 固溶水淬热处理及随后 950 °C 挤压方案, 利用形变硬化和小量的相变硬化<sup>[3]</sup>, 使原始 β 晶粒发生再结晶而导致 β 晶粒细小, 从而达到细化挤压管材显微组织的目的。图 5 所示为经 1 050 °C 的 β 化固溶水淬工艺处理后 950 °C

挤压管材的组织, 管材晶粒可细化到 5~10 μm。管材的超塑性拉伸试验在 870、910、950 °C 下进行。比较了管材坯料未预处理和预处理 2 种方案的超塑性性能。结果表明: 棒坯未经 β 固溶热处理, 相变点以上 1 000 °C 挤压的管材在 870~950 °C 的超塑性拉伸的伸长率仅为 100%~200%; 而挤压温度在相变点以下 950 °C 挤压管材的超塑性伸长率可达 300% 以上, 最高达 510%; 900 °C 挤压管材由于组织晶粒等轴、均匀性较 950 °C 的差, 故超塑性略差一些; 而棒坯经 1 050 °C 的 β 化固溶水淬处理后挤压管材的超塑性拉伸伸长率比未经 β 固溶处理的高很多, 超塑性拉伸的伸长率为 600%~900%, 如图 6 所示。采用上述工艺制备的 TC4 钛合金管材, 通过超塑性气胀成型的气瓶解剖面示意图如图 7 所示; 成型气瓶不同位置的微观组织如图 8 所示。由图 8 可见, 位于球型赤道位置在气胀过程中变形量较大, 晶粒在一定程度上被拉长, 同时发生动态再结晶, 晶粒较上、下收口处的细小很多。

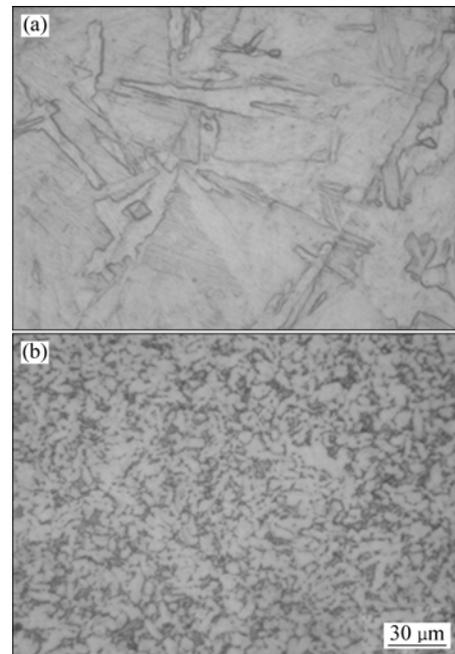


图 5 TC4 合金的组织形貌  
Fig.5 Microstructures of TC4 alloy: (a) β solution of 1 050 +WQ; (b) Extruded pipe

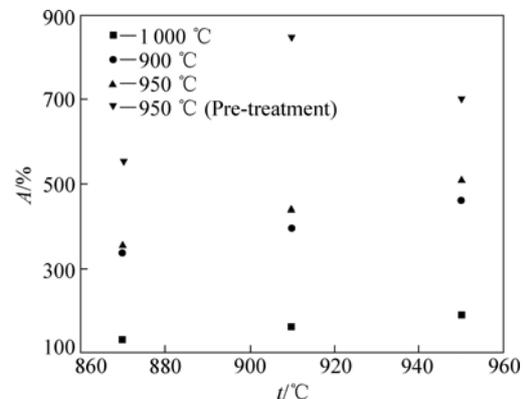


图 6 TC4 管材不同条件下处理后的超塑性拉伸伸长率  
Fig.6 Superplastic elongation of TC4 pipe extruded under different conditions

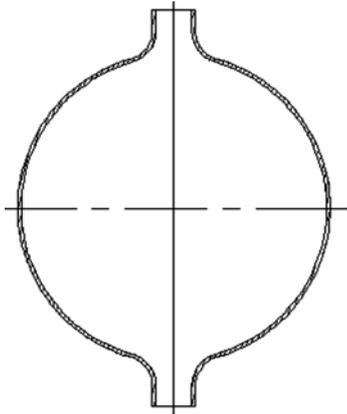


图7 超塑性气瓶示意图

Fig.7 Schematic plot of spherical gas-bottle by superplastic formation

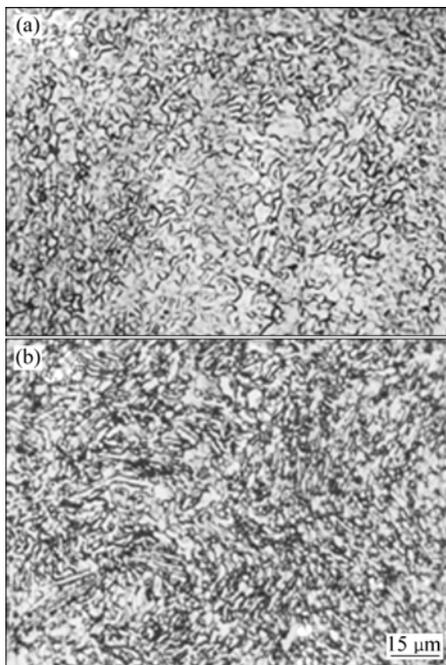


图8 超塑性气瓶不同位置的微观组织

Fig.8 Microstructures of superplastic cylinder at different

positions: (a) Equator position; (b) Cork position

### 3 结论

球形气瓶用TC4钛合金管材在不同温度下挤压热加工后,沿挤压方向组织差异明显,但各部位的室温力学性能差异并不大。对TC4管材挤压前的棒坯进行1050℃ $\beta$ 固溶预处理,950℃挤压成型的管材晶粒可达5~10 $\mu\text{m}$ ,有效细化了晶粒尺寸,超塑性拉伸后伸长率不低于600%,有效保证了球形气瓶的超塑性成型。超塑性气胀成型后气瓶赤道位置TC4钛合金晶粒度较两端收口处细小,均为 $\alpha+\beta$ 两相等轴组织。

### REFERENCES

- [1] C.莱莹斯, M.皮特尔斯. 钛及钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 240-253.  
LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 240-259.
- [2] 王敏, 郭鸿镇. TC4钛合金晶粒细化及超塑性研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(4): 155-158.  
WANG Min, GUO Hong-zhen. TC4 titanium refine and superplastic[J]. Journal of Engineering Plastic, 2008, 15(4): 155-158.
- [3] 郭鸿镇, 苏华, 刘建超. 改善TC4棒材高低倍组织的研究[J]. 稀有金属, 1994, 18(2): 115-119.  
GUO Hong-zhen, SU Hua, LIU Jian-chao. Study of microstructure of TC4 bar [J]. Journal of Rare Metals, 1994, 18(2): 115-119.

(编辑 陈卫萍)