

钛合金 VAR 熔炼用电极块压制过程模拟研究

王阳阳¹, 赵小花^{1,2}, 雷强^{1,2}, 吴伟¹, 付杰¹, 尚金金^{1,2}, 何永胜¹, 刘向宏¹

(1. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710016)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 采用数值模拟方法研究钛合金真空自耗电弧熔炼(VAR)用电极块的压制过程, 借此达到优化电极块压制成型工艺参数及改进模具设计的目的。借助 Shima-Oyane 本构模型并结合相关实验重点对电极块压制过程中的相对密度分布、粉末颗粒的流动规律进行分析。同时对现有压制模具进行优化, 将凸模的圆弧段改为直线并减小斜边倾斜角度。凸模优化后, 粉末颗粒整体流动性增加, 电极块相对密度提高, 表面裂纹基本消除。

关键词: TC4 钛合金; 电极块; 数值模拟; 相对密度; 模具优化

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)06-001-05

Research on the Pressing Process of Electrode for Titanium Alloy VAR Melting

Wang Yangyang¹, Zhao Xiaohua^{1,2}, Lei Qiang^{1,2}, Wu Wei¹, Fu Jie¹, Shang Jinjin^{1,2}, He Yongsheng¹, Liu Xianghong¹

(1. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Numerical simulation method was used to study the pressing process of electrode for titanium alloy vacuum arc remelting (VAR), so as to optimize the process parameters of electrode and improve the die design. By means of Shima-Oyane yield criterion and experiment research, the relative density distribution and flow law of powder particles were studied systematically. At the same time, the existing pressing punch was optimized by changing the circular section of punch to a straight line and reducing the inclined angle of the hypotenuse. After optimization, the overall fluidity of powder particles increases, resulting in the increase of relative density of electrode blocks and the elimination of surface cracks.

Key words: TC4 titanium alloy; electrode; numerical simulation; relative density; punch optimization

真空自耗电弧熔炼(VAR)具有生产高效化、工艺全自动化、铸锭规格大型化的特点,是生产钛合金铸锭经济而有效的手段,可满足一般工业要求^[1-4]。电极块压制是钛合金 VAR 熔炼的第一关键工序,是将一定配比的海绵钛及中间合金通过油压机压制成型,以为后续铸锭熔炼奠定基础^[5]。实际生产中,VAR 熔炼用电极块需同时满足以下条件^[6,7]:① 应有足够的密度,以保证后续焊接、熔炼工序的顺利进行;② 无飞边、毛刺等表面缺陷,否则电弧不稳定,容易产生边弧,影响铸锭质量;③ 表面无明显贯穿性裂纹。

本研究采用有限元模拟和试验研究相结合的方法,对钛合金 VAR 熔炼用电极块压制过程中的相对密度(粉末松装或振实密度与电极块密度的比值)分布及粉末颗粒流动规律进行分析,同时对现有压制模具形状进行优化,以期解决电极块表面概率性裂纹问题。

1 粉末压制过程的本构分析

1.1 Shima-Oyane 本构模型

目前,在研究粉末体成形的塑性理论时,一般将其视为“各向同性的可压缩连续体”,比较常用的屈服准则有 Kuhn、Green、Oyane、Shima 和 Gurson 等。本研究使用非线性有限元分析软件 MSC.Marc 中的 Shima-Oyane 本构模型模拟电极块压制过程。该模

收稿日期: 2021-08-13

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1106000)

通信作者: 王阳阳(1994—),女,助理工程师。

型考虑了粉末体在塑性变形时的体积变化、流动应力与相对密度间关系以及静水压力对粉末体屈服的影响,具体表达式如式(1)所示^[8]:

$$F = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{3}{2} \sigma' \sigma' + \frac{P^2}{\beta^2} \right)^{1/2} - \sigma_y \quad (1)$$

式中: σ' 为偏应力张量分量; P 为静水压力; σ_y 为单轴屈服应力; γ 、 β 为与相对密度有关的材料参数,可通过单轴压缩实验和三向压缩实验获得。

1.2 材料参数测定

1.2.1 电极块压制

电极块压制过程中,材料体积呈非线性收缩^[9]。在 MSC. Marc 软件中需要设置弹性模量、泊松比、流动应力等参数随相对密度(ρ)变化的曲线。本研究以 TC4 钛合金电极块为例,将海绵钛(粒径 3.0 ~ 12.7 mm)、Al 豆、TiO₂ 粉末和 V55Al、Fe60Al 中间合金按实际配比混料均匀,在 5 MN 油压机上压制电极块。通过准静态压缩实验获取所需的弹性模量、压缩强度等数据。

压制实验选用的模具尺寸为 $\phi 32 \text{ mm} \times 332 \text{ mm}$ 。通过调节油压机的压制力,得到 6 组不同的电极块,如图 1a 所示。表 1 为不同压制力(F_p)下电极块的相对密度。采用线切割方法从 6 组电极块上分别切取规格为 $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的压缩试样,如图 1b 所示。

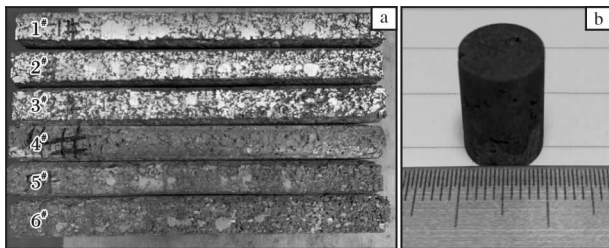


图 1 不同相对密度的电极块及压缩试样照片

Fig. 1 Photographs of electrode blocks with different relative densities (a) and compressed specimen (b)

表 1 不同压制力下电极块的相对密度

Table 1 Relative densities of electrodes under different pressures

No.	F_p/MN	ρ	No.	F_p/MN	ρ
1#	4.508	0.987	4#	2.744	0.870
2#	3.822	0.939	5#	2.156	0.773
3#	3.332	0.914	6#	1.568	0.700

1.2.2 准静态压缩

选用配备激光引伸计的电子万能试验机进行准静态压缩实验,应变速率为 0.001 s^{-1} 。在压缩过程

中采集位移-载荷数据,直至试样断裂。将采集到的实验数据按式(2)和式(3)转换成真应力(σ)、真应变(ε)^[10]。

$$\sigma = \frac{P}{S} \left(1 - \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (2)$$

$$\varepsilon = -\ln \left(1 - \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (3)$$

式中: P 为载荷; S 为试样的横截面积; L_0 为初始试样长度; ΔL 为变形量。

通过上述转换,得到不同相对密度下电极块的应力-应变曲线、弹性模量、压缩屈服强度及抗压强度,如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着相对密度的增加,电极块的弹性模量、压缩屈服强度及抗压

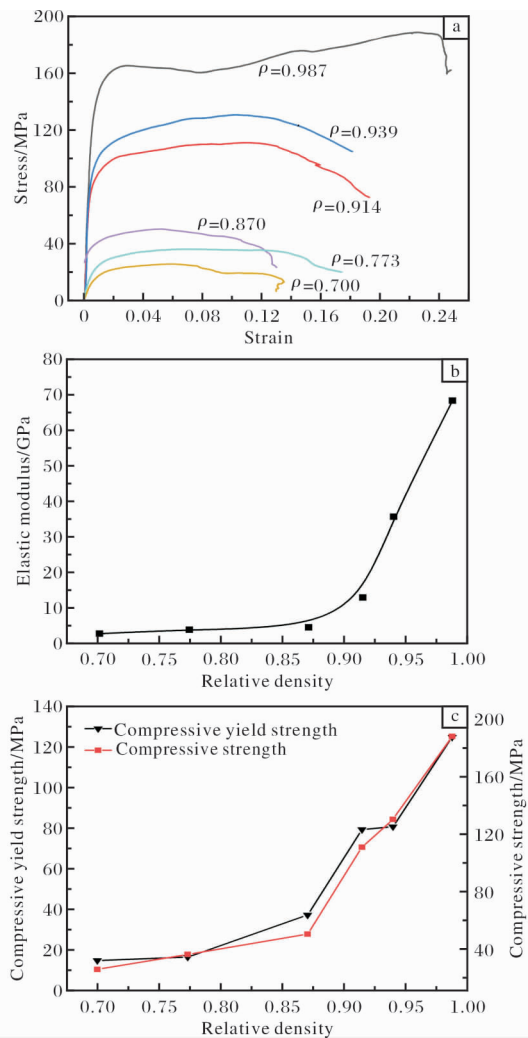


图 2 不同相对密度电极块的应力-应变曲线、弹性模量和压缩性能

Fig. 2 Stress-strain curves (a), elastic modulus (b) and compression performance (c) of electrode blocks with different relative densities

强度等均呈增大趋势。当相对密度为 0.987 时, 压坯的弹性模量和屈服强度分别为 68 GPa、125 MPa, 相比于成品 TC4 钛合金铸锭^[11]分别降低了约 38% 和 87%。这是因为电极块的致密方式是以粉末颗粒间的机械咬合为主, 内部颗粒堆积较为松散, 在受到外力作用时, 这种颗粒堆积极易遭到破坏。

由于压缩实验过程中无法通过横向应变测得泊松比(ν), 故参考北京科技大学任学平提出的概率函数型模型^[12,13], 通过相对密度计算泊松比, 如式(4)所示:

$$\nu = \frac{1}{2} e^{-12.5(1-\rho)^2} \quad (4)$$

2 数值模型建立

西部超导材料科技股份有限公司采用 80 MN 油压机进行钛合金自耗电极块压制, 单块电极质量为 110 ~ 115 kg。实际生产中, 电极块两侧端面会概率性出现贯穿性裂纹, 距离顶部高度 20 ~ 60 mm, 如图 3 所示。该裂纹在自耗电极焊接过程中极有可能受热应力的影响沿某一方向扩展, 使得钛合金铸锭在熔炼过程中存在较大的掉块风险, 最终影响铸锭质量。为避免后续熔炼过程中出现掉块等质量风险, 电极块实际密度需大于 3.60 g/cm³。

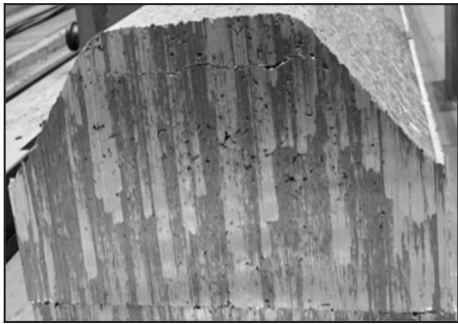


图3 表面有贯穿性裂纹的 TC4 钛合金电极块

Fig.3 TC4 titanium alloy electrode block with penetrating crack on surface

基于 Shima-Oyane 本构模型, 对图 3 所示的电极块进行有限元分析。通过对油压机模具进行简化处理, 建立了电极块二维轴对称模型, 如图 4 所示。凸模、模腔、底模等部件均视为刚体, 粉末体处理为可进行网格划分的有限元单元, 单元总数为 2174。压坯初始相对密度设置为 0.30, 压坯对称轴所在单元处的位移 $X=0$ 。凸模按照实际电极块压制过程中的位移轨迹运动。

模型中采用修正的 Newton-Raphson 迭代方法及大位移、大应变和更新的拉格朗日函数分析电极块压制成型过程中的非线性问题^[12,14], 模具与粉末体间的接触摩擦系数设为 0.20。

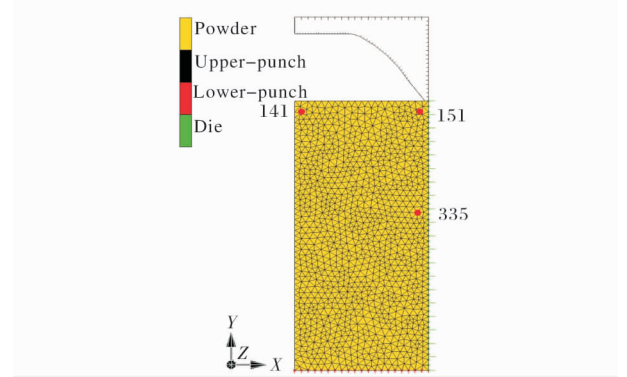


图4 电极块二维轴对称模型(附有典型节点位置)

Fig.4 Two-dimensional axisymmetric model of electrode (with location of typical nodes)

3 模拟结果与分析

3.1 相对密度分布规律

通过建立的电极块二维轴对称模型进行电极块压制模拟, 得到的电极块压制过程中相对密度分布图如图 5 所示。从图 5 可以看出, 随着压制过程的进行, 压坯密度不断增加, 但整体密度分布不均。压制时间 $t=5$ s 时, 压坯上端相对密度由 0.30 降低至 0.29, 这是由于凸模圆弧段首先与粉末颗粒接触, 粉末颗粒水平负方向流动强度大于正方向的结果。 $t=15$ s 时, 与凸模相接触的压坯相对密度较小, 而下半部分的相对密度较大。 $t=19$ s 时, 压制结束, 靠近模壁处的压坯相对密度较高(0.80 ~ 0.91), 与底模和凸模相接触的压坯相对密度较低(0.69 ~ 0.76), 压坯中心处相对密度整体分布较均匀(0.76 ~ 0.79)。将模拟结果与图 3 所示电极块进行对比, 可以看出, 电极块密度分布模拟结果与真实情况吻合较好, 这表明本研究所建立的有限元模型能较为准确地预测电极块的压制过程。

图 6 为压坯上 3 个典型节点(见图 4)在压制后期的相对密度变化曲线。从图 6 可知, 压坯不同位置处的致密化过程是不同的。 $t=13 \sim 19$ s 时, 节点 151 的相对密度变化曲线斜率最大, 致密效果最好, 这是由于其最先与凸模接触, 且该位置容易产生应力集中。节点 141 位于压坯顶部的死区位置, 在 $t=13 \sim 16$ s 时, 其相对密度低于节点 335。由于节点 335

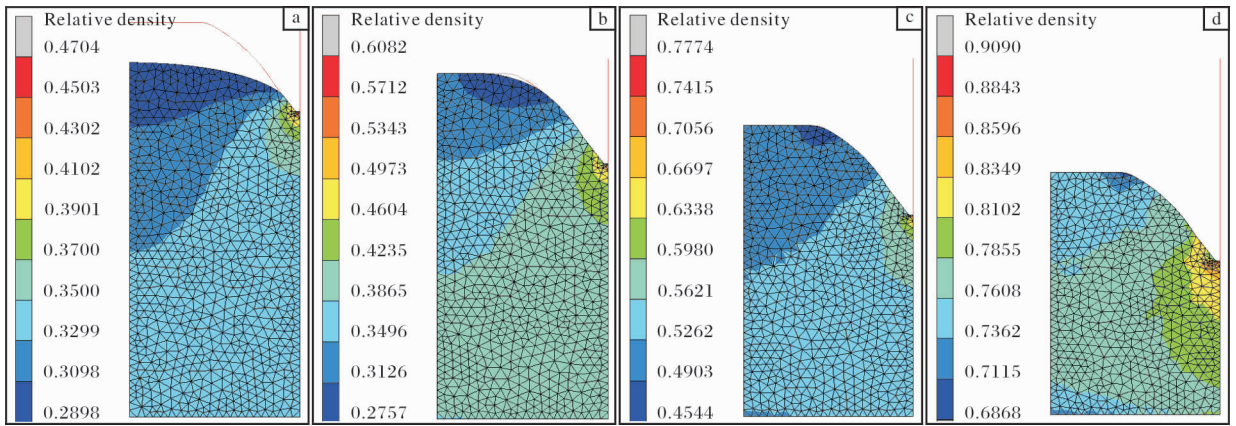


图5 电极块压制过程中不同时间节点的相对密度分布图

Fig. 5 Relative density distribution at different time nodes during electrode block pressing:

(a) $t = 5$ s; (b) $t = 10$ s; (c) $t = 15$ s; (d) $t = 19$ s

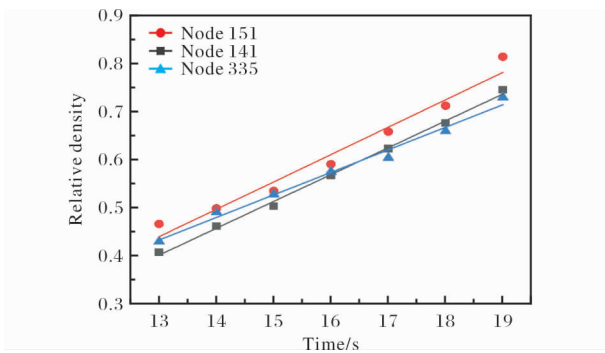


图6 典型节点位置的相对密度随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of relative density vs. time of typical nodes

始终受到模具内壁摩擦力的影响,节点141的相对密度变化曲线斜率大于节点335,最终致密效果相对节点335更好。

3.2 粉末颗粒的流动规律

图7为电极块压制结束后不同方向的位移场分布图。从电极块 X 方向的位移场分布图(图7a)可以看出,压坯内部粉末颗粒沿水平负向流动,最大位移量为30.31 mm,距离凸模顶部35 mm处粉末颗粒沿水平正向流动,凸模圆角处达到最大17.70 mm。而粉末颗粒的这种流动行为,可能导致压坯内部产生水平方向的剪切力进而出现裂纹。从电极块 Y 方向的位移场分布图(图7b)可以看出,位移量沿压制方向呈梯度递减分布,且靠近凸模的粉末颗粒位移量最大。

由以上对电极块压制过程的模拟分析可知,电极块表面出现贯穿性裂纹是由压坯内部粉末颗粒沿水平流动方向不同导致的。进一步分析,出现该现

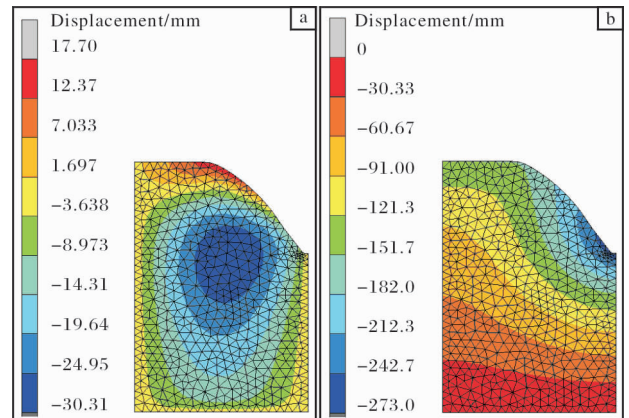


图7 压制结束后电极块不同方向的位移场分布图

Fig. 7 Displacement field distribution in different directions of electrode block after pressing: (a) X direction; (b) Y direction

象的原因是凸模圆弧段先填充,凸模圆角处后填充(图5b、5c)。因此,为加强粉末颗粒整体的流动性,对图3所示电极块压制用凸模的形状进行了优化,即将凸模的圆弧段改为直线并减小斜边倾斜角度。图8为采用优化凸模压制结束后电极块 X 方向的位移场及相对密度分布图。从图8并结合图7可以看出,优化后凸模压制的压坯内部粉末颗粒沿水平负向流动的最大位移由30.31 mm增加至32.62 mm,这使得压坯内部的整体相对密度较凸模优化前(图5d)有明显提升。同时,粉末颗粒水平正反向流动的交界位置由原来距凸模顶部35 mm降至24 mm,水平正向流动的最大位移由17.70 mm降至15.44 mm,这意味着凸模优化后,电极块上表面附近由于粉末颗粒水平流动方向不同产生的位移剪切区域有明显

缩小。实际生产中, 多次采用优化后的凸模进行电极块制备。实践表明, 用优化后凸模制备的电极块表面裂纹基本消除, 如图9所示。

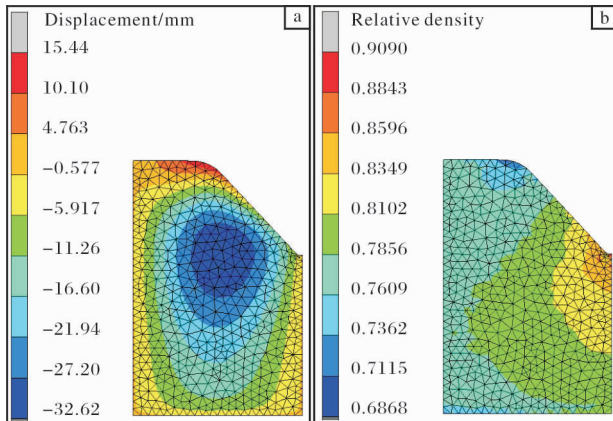


图8 优化凸模压制的电极块X方向位移场及相对密度分布图

Fig. 8 Displacement field distribution in X direction (a) and relative density distribution (b) of electrode block pressed by optimized punch



图9 采用优化凸模压制的 TC4 钛合金电极块
Fig. 9 TC4 titanium alloy electrode block pressed by optimized punch

4 结论

(1) 基于电极块压制实验和准静态压缩实验, 建立了 TC4 钛合金压坯相对密度与力学性能间的关系。随着 TC4 钛合金压坯相对密度的降低, 其弹性模量、屈服强度等材料参数均呈下降趋势。

(2) 电极块不同位置的致密化效果不同, 与凸模最先接触的坯体致密效果最好。轴向位移量沿压

制方向呈梯度递减分布, 且靠近凸模的粉末颗粒位移量最大。

(3) 将凸模的圆弧段改为直线并减小斜边倾斜角度后, 粉末颗粒整体流动性增加, 压制的电极块相对密度提高, 表面裂纹基本消除。

参考文献 References

- [1] 王斌斌, 常辉, 李金山, 等. 真空自耗电弧熔炼中电磁搅拌的数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(11): 1969-1973.
- [2] 李献军. 真空自耗电弧熔炼技术和铸锭质量问题[J]. 钛工业进展, 2001, 18(3): 11-15.
- [3] 赵树萍, 吕双坤. 钛合金在航天航空领域中的应用[J]. 钛工业进展, 2002, 19(6): 18-21.
- [4] 舒群, 郭永良, 陈子勇, 等. 铸造钛合金及其熔炼技术的发展现状[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(3): 332-336.
- [5] 杨斌, 张禹. 钛合金电极成型模具凹模受力分析及设计计算[J]. 机械工程师, 2015(6): 116-118.
- [6] 刘刚. 纯钛电极块的压制工艺研究[J]. 特钢技术, 2007, 13(1): 34-36.
- [7] 李军仁, 董卫选, 李阳, 等. 海绵钛电极块压制模具的结构优化[J]. 钛工业进展, 2020, 37(1): 42-47.
- [8] Shima S, Oyane M. Plasticity theory for porous metals[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1976, 18(6): 285-290.
- [9] Zhou Z Y, Chen P Q, Zhao W B, et al. Densification model for porous metallic powder materials[J]. Journal of Material Processing Technology, 2002, 129(13): 385-388.
- [10] 肖强, 宋裕, 李俊洪, 等. GH1016 合金热变形本构方程及临界变形条件[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 233-237.
- [11] 陈敏. TC4 钛合金力学性能测试及动态材料模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [12] 任学平. 粉末塑性加工原理及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [13] 任学平, 王尔德, 霍文灿. 粉末体的屈服准则[J]. 粉末冶金技术, 1992, 10(1): 8-12.
- [14] Lee S C, Kim K T. Densification behavior of aluminum alloy powder under cold compaction[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(7): 1295-1298.