

钛合金纤维多孔材料制备及压缩性能

王建忠, 敖庆波, 马 军, 李爱君

Preparation and compressive properties of Ti alloy fiber porous materials

WANG Jianzhong, AO Qingbo, MA Jun, and LI Aijun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021080005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

烧结温度对Cu-C-SnO₂多孔材料组织与性能的影响

Effects of sintering temperature on microstructures and properties of Cu-C-SnO₂ porous materials

粉末冶金技术. 2020, 38(6): 436-442

3D打印金属材料中孔隙率的影响因素和改善方法

Influence factors and improvement methods on the porosity of 3D printing metal materials

粉末冶金技术. 2019, 37(3): 163-169,183

放电等离子烧结金属多孔材料研究现状

Developmental states of porous metal materials prepared by spark plasma sintering

粉末冶金技术. 2017, 35(5): 378-383

原位生成六铝酸钙对刚玉质多孔材料结构和性能的影响

Effect of *in-situ* synthesized calcium hexaluminate on the structure and properties of porous corundum materials

粉末冶金技术. 2019, 37(6): 410-415, 421

放电等离子烧结法制备以升华性材料为造孔剂的人体植入骨替代多孔镁块体材料

Preparation of porous magnesium bulk as bone substitute implant by spark plasma sintering using sublimate material as pore-forming agent

粉末冶金技术. 2018, 36(2): 124-129

SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃助焊剂对粉末烧结Cu-C-SnO₂多孔材料组织与性能的影响

Effects of SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃ scaling powder on microstructures and properties of Cu-C-SnO₂ porous materials sintered by powders

粉末冶金技术. 2018, 36(5): 335-341



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

钛合金纤维多孔材料制备及压缩性能

王建忠, 敖庆波[✉], 马 军, 李爱君

西北有色金属研究院金属多孔材料国家重点实验室, 西安 710016

[✉]通信作者, E-mail: panpan0605@163.com

摘 要 为降低钛及钛合金制品的成本, 以钛锭表面切削下来的钛屑(切削纤维)为原料, 经过清洗、剪切、压制、高温约束烧结等工序制备成钛合金纤维多孔材料, 观察材料微观结构, 分析压制压力和孔隙率之间的关系, 并研究烧结温度、纤维宽度、孔隙率对钛合金纤维多孔材料压缩性能的影响规律。结果表明, 钛合金纤维多孔材料内部均为通孔, 随着压制压力的增加, 钛合金纤维多孔材料的孔隙率随之降低。纤维宽度为 2 mm, 孔隙率为 56.0%, 烧结温度为 1200 °C 条件下制得的钛合金纤维多孔材料平台应力达 17.34 MPa。本文实现了原材料零成本制备钛合金纤维多孔材料, 可用于阻尼减振、冲击防护等领域。

关键词 钛合金纤维; 多孔材料; 高温烧结; 孔隙率; 压缩性能

分类号 TG146.4

Preparation and compressive properties of Ti alloy fiber porous materials

WANG Jianzhong, AO Qingbo[✉], MA Jun, LI Aijun

State Key Laboratory of Porous Metals Materials, Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China

[✉]Corresponding author, E-mail: panpan0605@163.com

ABSTRACT To reduce the cost of Ti and Ti alloy products, the Ti chips (cutting fibers) from the surface of Ti ingots were used as the raw materials to prepare the Ti alloy fiber porous materials by cleaning, cutting, pressing, and high temperature confined sintering. The microstructures were observed, the influence of pressing pressure on porosity was analyzed, and the effects of sintering temperature, fiber width, and porosity on the compressive properties of the Ti alloy fiber porous materials were systemically studied. The results show that, the interior of Ti alloy fiber porous materials is the through-pore. As the increase of the pressing pressure, the porosity of the Ti alloy fiber porous materials decreases. The compressive platform stress of the Ti alloy fiber porous materials sintered at 1200 °C is up to 17.34 MPa with the fiber width of 2 mm and the porosity of 56.0%. The titanium alloy fiber porous materials are prepared at zero cost for the raw materials in this paper, which can be applied in the fields of damping, vibration reduction, and impact protection.

KEY WORDS Ti alloy fibers; porous materials; high temperature sintering; porosity; compressive properties

钛及钛合金材料具有重量轻、强度高、耐高温、耐腐蚀、生物相容性好、弹性模量低、机械加工性能好等特点^[1-2], 不仅被广泛应用于医疗领域^[3-5], 而且还用于航空航天、海洋工程等领域的苛刻环境

收稿日期: 2021-12-22

基金项目: 陕西省科技资源开放共享平台资助项目(2020PT-039); 陕西省重点研发计划资助项目(2020KW-037, 2020GY-289)

DOI: [10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021080005](https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021080005); <http://pmt.ustb.edu.cn>

中^[6-8]，同时在宇宙火箭和导弹行业中，钛被用以替代钢铁材料，被誉为宇宙金属^[6]。然而，钛及钛合金材料的价格和加工成本很高，许多应用领域对所选材料的价格及性能等因素进行综合考虑后，选择了其他材料。

在实际工业生产中，铸锭在使用前需要进行表面光泽度处理，例如钛锭在使用前去除表面氧化皮形成的废屑。一般情况下，这些废屑会直接当作废料进行处理。近年来，针对金属纤维的很多研究表明，金属纤维可以制成多孔材料用于吸声降噪^[9]、阻尼减振^[10]、电磁屏蔽^[11]、过滤分离^[12]等众多领域，是一种功能一体化的新型材料，研究中的金属纤维以制备方法可分为两类：切削纤维（宽度 $>0.1\text{ mm}$ ）和拉拔纤维（丝径 $<0.1\text{ mm}$ ），钛锭表面切下来的废屑可归为切削纤维，利用该切削纤维制成多孔材料，不仅减少了废料处理环节，还实现了材料的零成本，将其用于阻尼减振、能量吸收等方面，发挥其质量轻、强度高等优势^[13]。

本文以 TC4 铸锭表面切削下来的纤维为原料，通过清洗、剪切、压制、真空约束烧结、线切割等工艺制备成钛合金纤维多孔材料，系统研究了纤维宽度、烧结温度、孔隙率对钛合金多孔材料的压缩性能的影响。

1 实验材料及方法

将 TC4 铸锭安装于车床上，通过调节车刀的进给量和旋转速度制备出宽度为 2 mm、4 mm，厚度约为 0.4 mm 的钛合金纤维。将钛合金纤维剪切成宽比 ≈ 10 的纤维段，再将剪切好的钛合金纤维依次进行热碱洗、酸洗、无水乙醇超声波清洗并进行干燥。按照所设计的孔隙率，利用体积质量称重法（式（1））对所需钛合金纤维进行质量计算。

$$M = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot V \quad (1)$$

式中： M 为预烧多孔体的质量，g； ε 为设计的孔隙率，%； ρ_s 为致密材料的密度， $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ； V 为预烧结试样多孔体的体积， cm^3 。

称取相应质量的钛合金纤维（清洗干燥后）放入模具中，利用油压机（压力为 20~80 MPa）将其压到设计高度（10 mm），放入真空烧结炉中进行高温约束烧结，烧结温度为 900~1200 °C，保温时间为 2 h，真空度 $\leq 1.0 \times 10^{-2}\text{ Pa}$ ，随炉冷却至 $<100\text{ °C}$ 即可停炉，取出样品进行平整^[14-15]。采用电火花线切割工艺制备出压缩性能测试样品，其宏观尺寸为 10 mm \times 10 mm \times 10 mm（ $\pm 0.2\text{ mm}$ ）。按照

国标《GB T 31930-2015 多孔状和蜂窝状金属压缩试验方法》，使用 Instron 5967 万能材料试验机测试钛合金纤维多孔材料的压缩性能。

2 结果与讨论

2.1 多孔材料微观形貌

利用“车削法+真空约束烧结法”制备的钛合金纤维多孔材料的微观形貌如图 1 所示。可以看出，钛合金纤维横截面比较光滑，表面呈锯齿状。钛合金纤维表面锯齿状微观结构可以使其表面粗糙度增加，不仅可以提高钛合金纤维之间的摩擦力，还可以使钛合金纤维在烧结过程中更易于接触并形成烧结颈达到冶金结合。从图中还可以看出，钛合金纤维多孔材料内部孔隙均为通孔，且其孔隙数量高于集束拉拔法制备的纤维多孔材料的孔隙数量。此外，车削法制备的钛合金纤维内部产生很大的内应力，在压制工序中钛合金纤维发生弯曲，形成很多特殊的大孔（ $>100\text{ }\mu\text{m}$ ），这些大孔对材料整体的孔隙均匀性和力学性能产生很大影响。

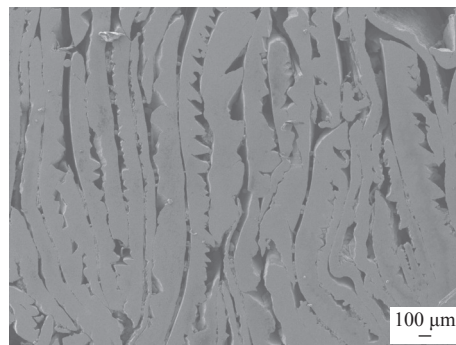


图 1 钛合金纤维多孔材料的微观形貌

Fig.1 Microstructure of the Ti alloy fiber porous materials

2.2 多孔材料孔隙率

不同压制压力所制备的钛合金纤维多孔材料的孔隙率如表 1 所示。该孔隙率是通过样品的质量和体积进行测量后，利用式（1）计算得到的孔隙率实际值。随着压制压力的增加，多孔材料的孔隙

表 1 压制压力与钛合金纤维多孔材料孔隙率的关系

Table 1 Relationship between the pressing pressure and porosity of the Ti alloy fiber porous materials

压制压力 / MPa	孔隙率 / %
20	66.2
40	64.0
60	60.1
80	56.7

率逐渐降低, 当压力由 20 MPa 增加到 80 MPa 时, 孔隙率由 66.2% 下降至 56.7%, 降幅近 10%。图 2 所示为不同压制压力所制备的钛合金纤维多孔材料

显微形貌。由图可知, 增大压制压力, 钛合金纤维的接触面积增大, 多孔材料的孔隙分布更加均匀, 大孔 ($>100\ \mu\text{m}$) 数量显著降低。

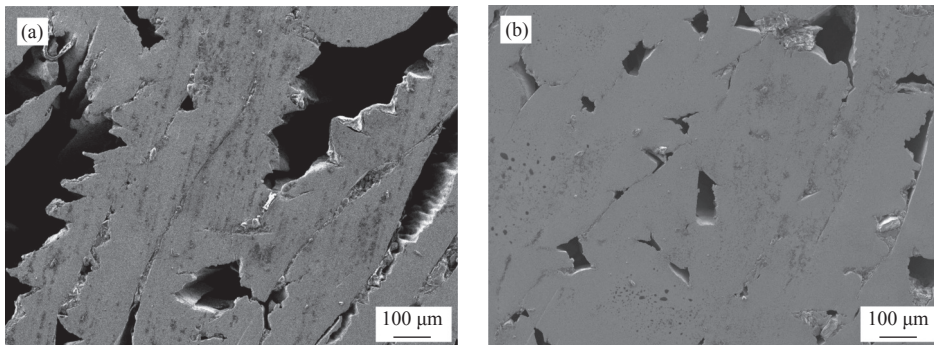


图 2 不同压制压力所制的钛合金纤维多孔材料微观形貌: (a) 20 MPa; (b) 60 MPa

Fig.2 Microstructures of the Ti alloy fiber porous materials prepared by the different pressing pressures: (a) 20 MPa; (b) 60 MPa

2.3 多孔材料压缩性能的影响因素

如图 3 所示, 钛合金纤维多孔材料的压缩应力-应变过程分为三个阶段: 弹性区 (I)、平台区 (II) 和致密化区 (III)。弹性区 (I) 过程很短, 应力增加很快, 但应变增加不大; 当应力增加到钛合金纤维多孔材料的屈服强度后, 进入塑性平台区 (II), 平台区越长, 说明该材料的耐压缩性能越好; 随着应力的迅速增大, 进入致密化区 (III), 钛合金纤维多孔材料被逐渐压实, 失去能量吸收能力。为获得具有较好压缩性能的钛合金纤维多孔材料, 对纤维宽度、烧结温度及孔隙率对钛合金纤维多孔材料压缩性能的影响规律进行研究。

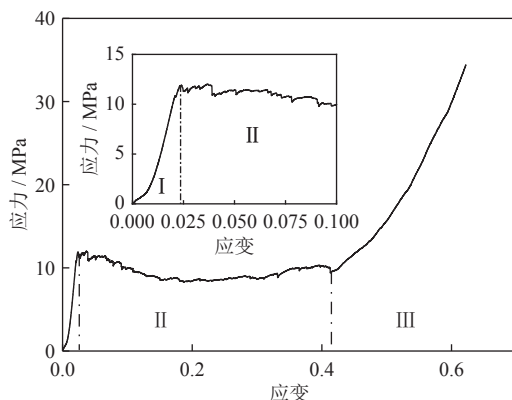


图 3 钛合金纤维多孔材料的压缩应力-应变曲线

Fig.3 Compressive stress-strain curves of the Ti alloy fiber porous materials

2.3.1 纤维宽度的影响

将长宽比 ≈ 10 、宽度分别为 2 mm 和 4 mm 的钛合金纤维压制成形, 经 1200 °C 高温烧结制成孔

隙率为 57%、60%、63% 的钛合金纤维多孔材料, 其压缩应力-应变曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 纤维宽度为 2 mm 的多孔材料压缩性能均优于纤维宽度为 4 mm 的多孔材料, 且前者的应力-应变曲线更加光滑, 平台区 (II) 的平台应力值高且较为稳定。在弹性区 (I) 中, 纤维宽度为 2 mm 的多孔材料屈服强度明显高于纤维宽度为 4 mm 的多孔材料。主要原因为纤维宽度为 2 mm 的多孔材料内部孔隙分布均匀性优于纤维宽度为 4 mm 的多孔材料, 且前者的大孔 ($>100\ \mu\text{m}$) 数量明显低于后者, 如图 5 所示。同时, 纤维宽度为 2 mm 的多孔材料内部纤维弯曲程度明显减弱, 纤维之间的搭桥现象大幅降低, 使得孔隙分布趋于均匀, 改善并提高了多孔材料的压缩性能。

2.3.2 烧结温度的影响

当纤维宽度为 2 mm 时, 所制备的多孔材料孔隙分布更加均匀, 平台区 (II) 内平台应力较高。因此, 本节采用宽度 2 mm、长宽比 ≈ 10 、孔隙率 63% 的钛合金纤维制备多孔材料, 研究 900、1000、1100 及 1200 °C 烧结制备的多孔材料压缩性能的变化规律, 其压缩应力-应变曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 烧结温度为 900 °C 时, 钛合金纤维多孔材料的应力很低, 约为 2.5 MPa。这是因为烧结温度太低, 钛合金纤维多孔材料内部短纤维之间没有形成烧结颈, 钛合金纤维处于搭接状态, 在受压过程中, 迅速被压散失效。随着烧结温度的升高, 钛合金纤维多孔材料内部短纤维开始出现烧结颈, 且随着烧结温度的升高, 烧结颈的数量有所增加,

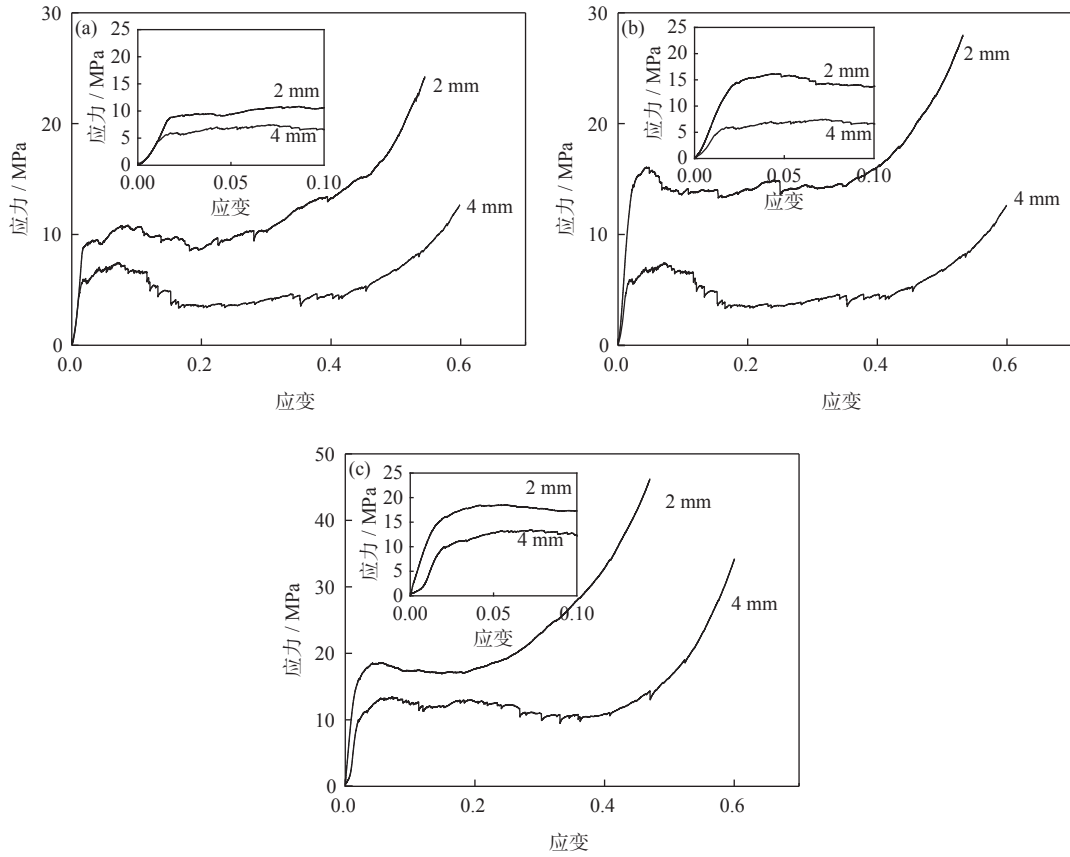


图 4 纤维宽度对钛合金纤维多孔材料压缩性能的影响：(a) 孔隙率 63%；(b) 孔隙率 60%；(c) 孔隙率 57%

Fig.4 Effect of the fiber width on the compressive properties of the Ti alloy fiber porous materials: (a) porosity of 63%; (b) porosity of 60%; (c) porosity of 57%

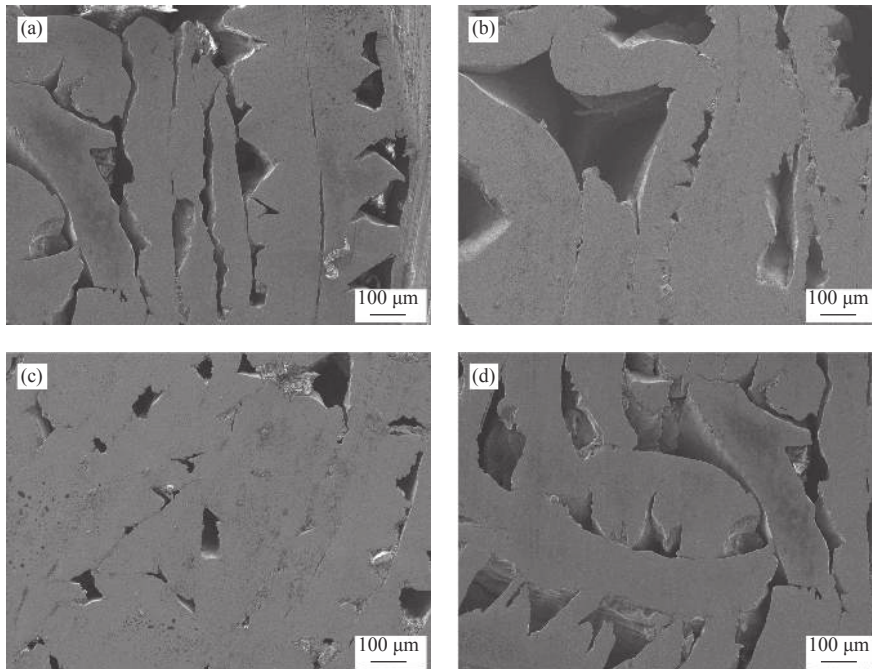


图 5 不同纤维宽度的钛合金纤维多孔材料微观形貌：(a) 孔隙率 63%，纤维宽度为 2 mm；(b) 孔隙率 63%，纤维宽度为 4 mm；(c) 孔隙率 57%，纤维宽度为 2 mm；(d) 孔隙率 57%，纤维宽度为 4 mm

Fig.5 Microstructures of the Ti alloy fiber porous materials with the different fiber width: (a) porosity of 63%, fiber width of 2 mm; (b) porosity of 63%, fiber width of 4 mm; (c) porosity of 57%, fiber width of 2 mm; (d) porosity of 57%, fiber width of 4 mm

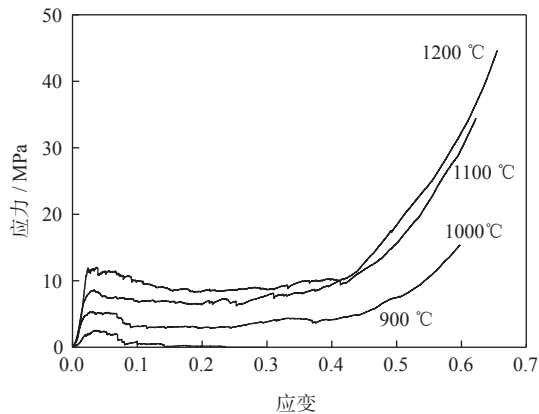


图 6 烧结温度对钛合金纤维多孔材料压缩性能的影响

Fig.6 Effect of sintering temperature on the compressive properties of the Ti alloy fiber porous materials

发育状态也逐渐变好,这是钛合金纤维多孔材料压缩强度随之提高的主要原因。

2.3.3 孔隙率的影响

选取长宽比 ≈ 10 、宽度约为 2 mm 的钛合金纤维,利用上述工艺制备出(烧结温度为 1200 °C)孔隙率分别为 70.8%、65.6%、63%、60.4% 和 56.0% 的钛合金纤维多孔材料。对五种孔隙率的钛合金纤维多孔材料进行压缩性能测试,结果如图 7 所示。同时,对比了五种孔隙率的钛合金纤维多孔材料平台应力,结果如表 2 所示。从图 7 和表 2 可以看出,随着孔隙率的增加,钛合金纤维多孔材料的平台应力逐渐降低,孔隙率为 70.8% 的多孔材料平台应力只有 2.24 MPa。这与多数金属纤维多孔材料孔隙率与压缩性能的影响规律一致^[16-19],即随着钛合金纤维多孔材料孔隙率的提高,内部孔隙数量增加,纤维数量减少,形成的烧结结点数量也随之

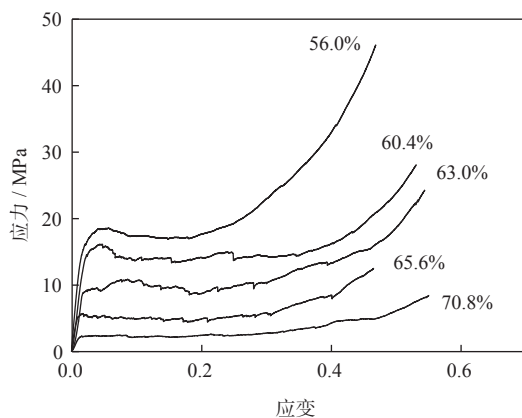


图 7 孔隙率对钛合金纤维多孔材料压缩性能的影响

Fig.7 Effect of porosity on the compressive properties of the Ti alloy fiber porous materials

减少,这是导致高孔隙率钛合金纤维多孔材料压缩性能降低的主要因素。如图 5 所示,高孔隙率钛合金纤维多孔材料内部纤维卷曲形成大孔($>100 \mu\text{m}$)的几率要比低孔隙率钛合金纤维多孔材料要高,导致材料的压缩性能大大降低。

表 2 不同孔隙率的钛合金纤维多孔材料平台应力

Table 2 Platform stress of the Ti alloy fiber porous materials with the different porosity

平台应力 / MPa	孔隙率 / %
2.24	70.8
4.91	65.6
10.61	63.0
13.74	60.4
17.34	56.0

3 结论

(1) 车削钛合金纤维制备的多孔材料内部孔隙均为通孔,压制过程中有部分短纤维发生弯曲,使材料内部有大孔隙($>100 \mu\text{m}$)存在。

(2) 针对长宽比 ≈ 10 、宽度为 2 mm 的钛合金纤维,压制压力在 20~80 MPa 范围内可制备出孔隙率为 56.0%~70.8% 的钛合金纤维多孔材料生坯。当烧结温度为 1200 °C 时,所制的钛合金纤维多孔材料的压缩性能表现较好。

(3) 当纤维宽度较窄、孔隙率越低时,钛合金纤维多孔材料压缩性能表现越好,提高烧结温度可以使其压缩性能有所提高。

参考文献

- [1] Guo L, He W X, Zhou P, et al. Research status and development prospect of titanium and titanium alloy products in China. *Hot Working Technol*, 2020, 49(22): 22 (郭鲤, 何伟霞, 周鹏, 等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景. *热加工工艺*, 2020, 49(22): 22)
- [2] Liu Y N, Wang Z X, Liu J P, et al. Research status and progress of titanium foams prepared by space holder technique. *Powder Metall Technol*, 2019, 37(4): 306 (刘永宁, 王智祥, 刘锦平, 等. 造孔剂法制备泡沫钛的研究现状与进展. *粉末冶金技术*, 2019, 37(4): 306)
- [3] Ren J S, Zhang Y M, Tan J, et al. Current research status and trend of titanium alloys for biomedical applications. *Mater Rev*, 2016, 38(28): 384 (任军帅, 张英明, 谭江, 等. 生物医用钛合金材料发展现状及趋势. *材料导报*, 2016, 38(28): 384)
- [4] Han J Y, Luo J H, Yuan S B, et al. Research status of dental titanium and titanium alloys. *Titanium Ind Prog*, 2016, 33(3): 1 (韩建业, 罗锦华, 袁思波, 等. 口腔用钛及钛合金材料的研究现状. *钛工业进展*, 2016, 33(3): 1)
- [5] Wu Q C, Ji Z, Jia C C, et al. Research progress on titanium and

- titanium alloys used as implant materials for human body. *Powder Metall Technol*, 2019, 37(3): 225
(武秋池, 纪箴, 贾成厂, 等. 钛及钛合金人体植入材料研究进展. *粉末冶金技术*, 2019, 37(3): 225)
- [6] Li X M, Liu L, Dong J, et al. Discussion on economic analysis and decreasing cost process of titanium and titanium alloys. *Mater China*, 2015, 34(5): 401
(李献民, 刘立, 董洁, 等. 钛及钛合金材料经济性及其低成本方法论述. *中国材料进展*, 2015, 34(5): 401)
- [7] Ren X M, Ma B Y, Zhang B W, et al. Research progress of porous titanium and titanium alloy. *Rare Met Cement Carb*, 2018, 46(1): 61
(任鑫明, 马北越, 张博文, 等. 多孔钛及钛合金的研究进展. *稀有金属与硬质合金*, 2018, 46(1): 61)
- [8] Kuang M S, Hu W M, Guo A H, et al. Application of titanium and titanium alloys to ships of US navy. *Torpedo Technol*, 2012, 20(5): 331
(匡蒙生, 胡伟民, 郭爱红, 等. 钛及钛合金在美海军舰船上的应用. *鱼雷技术*, 2012, 20(5): 331)
- [9] Wang J Z, Ao Q B, Ma J, et al. Sound absorption performance of porous metal fiber materials with different structures. *Appl Acoust*, 2019, 145: 431
- [10] Ao Q B, Wang J Z, Ma J, et al. Vibration-damping properties of stainless steel fiber porous materials. *Hot Working Technol*, 2021, 50(8): 30
(敖庆波, 王建忠, 马军, 等. 不锈钢纤维多孔材料的阻尼减振性能. *热加工工艺*, 2021, 50(8): 30)
- [11] Wu Y L, Li Y G, Ma W X. Research progress of metal fiber blended electromagnetic shielding fabric. *Prog Text Sci Technol*, 2020(6): 1
(吴依琳, 李永贵, 麻文效. 金属纤维混纺电磁屏蔽织物的研究进展. *纺织科技进展*, 2020(6): 1)
- [12] Xi Z P, Tang H P, Zhu J L, et al. Application of metal porous materials in energy and environmental protection. *Rare Met Mater Eng*, 2006, 35(Suppl 2): 413
(奚正平, 汤慧萍, 朱纪磊, 等. 金属多孔材料在能源与环保中的应用. *稀有金属材料与工程*, 2006, 35(增刊 2): 413)
- [13] Ma J, Wang J Z, Ao Q B, et al. *A Preparation Process of Low-Cost Titanium Based Porous Material with High Energy Absorption Characteristics*: China Patent, 202011178503. X. 2020-10-29
(马军, 王建忠, 敖庆波, 等. 一种具有高能量吸收特性的低成本钛基多孔材料制备工艺: 中国专利, 202011178503. X. 2020-10-29)
- [14] Wang J Z, Tang H P, Ma Q, et al. Fabrication of high strength and ductile stainless steel fiber felts by sintering. *JOM*, 2016, 68(3): 890
- [15] Tang H P. *Porous Metal Fiber Materials*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016
(汤慧萍. *金属纤维多孔材料*. 北京: 冶金工业出版社, 2016)
- [16] Qiao J C, Xi Z P, Tang H P, et al. Compressive behavior of porous metal fibers. *Rare Met Mater Eng*, 2008, 37(12): 2173
(乔吉超, 奚正平, 汤慧萍, 等. 金属纤维多孔材料的压缩行为. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(12): 2173)
- [17] Wang J Y, Tang H P, Zhu J L, et al. Effect of porosity on compressive properties of porous sintered stainless steel fiber media. *Powder Metall Technol*, 2009, 27(5): 323
(王建永, 汤慧萍, 朱纪磊, 等. 孔隙度对烧结不锈钢纤维多孔材料压缩性能的影响. *粉末冶金技术*, 2009, 27(5): 323)
- [18] Wang J Z, Xu Z G, Ao Q B, et al. Status quo of mechanical properties of porous metal fibrous materials. *Rare Met Mater Eng*, 2016, 45(6): 1636
(王建忠, 许忠国, 敖庆波, 等. 金属纤维多孔材料力学性能研究现状. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(6): 1636)
- [19] Wang J Z, Ao Q B, Ma J, et al. Quasi-static compressive performance of porous stainless steel fiber materials. *J Funct Mater*, 2018, 49(9): 107
(王建忠, 敖庆波, 马军, 等. 不锈钢纤维多孔材料的准静态压缩性能. *功能材料*, 2018, 49(9): 107)

(上接第 115 页)

- [15] Yao X F, Xie F Q, Han Y, et al. Comparison of friction wear properties between TC4 titanium alloy and P110 tubing steel. *Rare Met Mater Eng*, 2012, 41(9): 1539
(姚小飞, 谢发勤, 韩勇, 等. TC4合金和P110油管钢摩擦磨损性能的比较. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(9): 1539)
- [16] Lu H F, Miao Q, Liang W P, et al. Effect of different temperatures on tribological properties of TC4-DT alloy. *J Nanjing Univ Aeronaut Astronaut*, 2016, 48(1): 29
(陆海峰, 缪强, 梁文萍, 等. 不同温度对TC4-DT钛合金摩擦磨损性能的影响. *南京航空航天大学学报*, 2016, 48(1): 29)
- [17] Qu J, Blau P J, Watkins T R, et al. Friction and wear of titanium alloys sliding against metal, polymer, and ceramic counterfaces. *Wear*, 2005, 258(9): 1348
- [18] Ying Y, Li L, Zhao B, et al. Friction and wear properties of titanium alloys and the improving methods. *Nonferrous Met Mater Eng*, 2019, 40(3): 49
(应扬, 李磊, 赵彬, 等. 钛合金的摩擦磨损性能及其改善方法. *有色金属材料与工程*, 2019, 40(3): 49)
- [19] Zhang Q, Ding H, Zhou G, et al. Dry sliding wear behavior of a selected titanium alloy against counterface steel of different hardness levels. *Metall Mater Trans A*, 2019, 50: 220
- [20] Guo H F, Sun T, Li J L. Tribological properties of TC4 alloy under different friction conditions. *Hot Working Technol*, 2014, 43(10): 40
(郭华锋, 孙涛, 李菊丽. 不同摩擦条件下TC4钛合金摩擦学性能研究. *热加工工艺*, 2014, 43(10): 40)
- [21] Huang M J, Han J L, Dong X P. Tribological properties of the SLM-316L filament under the grease lubrication condition. *Chin J Eng*, 2021, 43(6): 835
(黄明吉, 韩建磊, 董秀萍. SLM-316L细丝脂润滑摩擦磨损性能. *工程科学学报*, 2021, 43(6): 835)
- [22] Huang M J, Li B, Dong X P, et al. Effect of wire diameter on friction and wear behavior of 316L stainless steel wire. *Tribology*, 2021, 41(2): 206
(黄明吉, 李斌, 董秀萍, 等. 丝径对316L不锈钢丝摩擦磨损行为的影响. *摩擦学学报*, 2021, 41(2): 206)
- [23] Grützmacher P G, Rammacher S, Rathmann D, et al. Interplay between microstructural evolution and tribo-chemistry during dry sliding of metals. *Friction*, 2019, 7(6): 637
- [24] Chelliah N, Kailas S V. Synergy between tribo-oxidation and strain rate response on governing the dry sliding wear behavior of titanium. *Wear*, 2009, 266(7): 704
- [25] Mao Y S, Wang L, Chen K M, et al. Tribo-layer and its role in dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, 2013, 297(1): 1032
- [26] Cui X H, Mao Y S, Wei M X, et al. Wear characteristics of Ti-6Al-4V alloy at 20~400 °C. *Tribol Trans*, 2012, 55(2): 185
- [27] Wang L, Zhang Q Y, Li X X, et al. Severe-to-mild wear transition of titanium alloys as a function of temperature. *Tribol Lett*, 2014, 53(3): 511
- [28] Wang L, Zhang Q Y, Li X X, et al. Dry sliding wear behavior of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy. *Metall Mater Trans A*, 2014, 45(4): 2284
- [29] He Y N, Yu S R, Li S X, et al. Effect of tribo-oxide layers on wear properties and coefficient of friction of TC4 alloy in fretting. *Rare Met Mater Eng*, 2021, 50(4): 1417
(何燕妮, 俞树荣, 李淑欣, 等. 摩擦氧化层对TC4合金磨损行为和摩擦系数的影响. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(4): 1417)
- [30] Straffelini G, Molinari A. Mild sliding wear of Fe-0.2%C, Ti-6%Al-4%V and Al-7072: a comparative study. *Tribol Lett*, 2011, 41: 227