

退火温度对 TC25 钛合金板材组织和性能的影响

张 苗¹, 强刚刚¹, 关向东¹, 蒲超博¹, 孙梦桐¹, 郭金榜¹, 马佳琨^{1,2}

(1. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

(2. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘 要: 采用三火次热轧工艺制备出厚度为 6.0 mm 的 TC25 钛合金板材, 研究了退火温度对 TC25 钛合金板材显微组织、室温力学性能和高温力学性能的影响。结果表明: 在 760~840 °C 范围内, 随着退火温度的升高, TC25 钛合金板材热加工形成的等轴组织中初生 α 相长大; 当退火温度升高至 880 °C 时, 显微组织由等轴组织向双态组织转变; 温度进一步升高至 920 °C 时, 呈现双态组织; 当退火温度达到 960 °C 时, 双态组织中的初生 α 相含量明显减少, 次生 α 相含量显著增多。双态组织的 TC25 钛合金板材相比等轴组织的 TC25 钛合金板材具有更好的室温力学性能和高温力学性能。TC25 钛合金板材在 920~960 °C 退火时可获得双态组织, 且具有良好的室温和高温拉伸性能。

关键词: TC25 钛合金; 板材; 退火温度; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)03-024-05

Effect of Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of TC25 Titanium Alloy Plate

Zhang Miao¹, Qiang Ganggang¹, Guan Xiangdong¹, Pu Chaobo¹, Sun Mengtong¹, Guo Jinbang¹, Ma Jiakun^{1,2}

(1. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China)

(2. Baoti Group Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: TC25 titanium alloy plate with thickness of 6.0 mm were prepared by three-fire hot rolling process. The effects of annealing temperature on the microstructure, room and high temperature mechanical properties of TC25 titanium alloy plate were studied. The results show that with the increase of annealing temperature in the range of 760-840 °C, the primary α phase in the equiaxed microstructure formed by hot working grows. When the annealing temperature increases to 880 °C, the microstructure of TC25 titanium alloy plate is transformed from equiaxed microstructure to duplex microstructure. And the duplex microstructure is presented when the annealing temperature increases to 920 °C. When the annealing temperature reaches as high as 960 °C, the content of primary α phase in duplex microstructure is reduced, and the content of secondary α phase is increased significantly. The TC25 titanium alloy plate with duplex microstructure has better room and high temperature mechanical properties than the TC25 titanium alloy plate with equiaxed microstructure. Annealing at 920-960 °C, TC25 titanium alloy plate with duplex microstructure and excellent mechanical properties at room and high temperature can be obtained.

Keywords: TC25 titanium alloy; plate; annealing temperature; microstructure; mechanical properties

TC25 (Ti-6.5Al-2Mo-2Zr-2Sn-1W-0.2Si) 属于 $\alpha+\beta$ 型马氏体热强钛合金, 高熔点 W 元素和 Mo 元素的加入使该合金具有很好的热强性和热稳定性, 使用温度高达 550 °C, 适用于制造 500~550 °C 长时使用的航空发

动机零件^[1-4]。

TC25 钛合金半成品主要有锻件、模锻件、冲压件、棒材等, 关于其加工参数、热处理参数等研究也较多^[5-16]。张晓园等^[5]研究了热变形参数对 TC25 钛合金 β 锻坯微观组织和拉伸性能的影响; 王林岐等^[6-8]研究了热加工参数对 TC25 钛合金压气机盘锻件显微组织和性能

收稿日期: 2024-01-02

通信作者: 张苗 (1991—), 女, 工程师。

的影响；白晓环等^[9]研究了热处理工艺对 BT25 钛合金锻件组织与性能的影响；彭新元等^[10]开展了锻造 TC25 钛合金环形件组织和性能的研究；康彦等^[11-13]探索了锻造工艺参数对 BT25 合金棒材组织与性能的影响；彭新元等^[14-15]研究了退火制度对 TC25 钛合金棒材组织和力学性能的影响；史小云等^[16]研究了试样坯热处理和整体热处理两种热处理方式对 TC25 钛合金棒材组织和力学性能的影响。但是，关于 TC25 钛合金板材半成品的研究较为缺乏，仅王媛等^[17]研究了不同热处理工艺对 TC25 钛合金板材室温力学性能和显微组织的影响，且该研究未涉及到高温性能的变化规律。

通过研究不同退火温度下 TC25 钛合金板材的显微

组织、室温力学性能和高温力学性能，分析不同退火温度下板材组织和性能的变化规律，以期对 TC25 钛合金板材的生产提供指导，助推其在航空领域的应用。

1 实验

实验材料为经真空自耗电弧炉 3 次熔炼的 TC25 钛合金铸锭，其相变点为 1000~1010 ℃，化学成分见表 1。TC25 钛合金铸锭经万吨油压机在 β 相区自由锻为厚度 150 mm 的板坯后，采用 1200 mm 四辊可逆式热轧机在相变点以上（30~60）℃一火次（变形量 80%）、相变点以下（30~60）℃两火次（变形量 40%~70%）轧制成厚度 6.0 mm 的板材。

表 1 TC25 钛合金铸锭化学成分（w/%）

Table 1 Chemical composition of TC25 titanium alloy ingot

Ti	Al	Sn	Mo	Zr	Si	W	Fe	O	C	N
Bal.	6.8	2.3	2.4	2.2	0.20	1.0	0.04	0.10	≤0.01	0.01

采用 SX3-12-10 高精度热处理炉对热轧态 TC25 钛合金板材进行不同温度的退火处理，退火温度分别为 760、800、840、880、920、960 ℃，保温时间为 60 min，冷却方式为空冷。对 TC25 钛合金板材进行显微组织观察、室温力学性能和高温力学性能测试。金相试样用腐蚀剂（5%HF+12%HNO₃+83%H₂O，体积分数）腐蚀后，利用 AXIOVERT 200 MAT 金相显微镜按照 GB/T 5168—2020 标准进行显微组织观察。室温和高温力学性能分别按照 GB/T 228.1—2010 和 GB/T 228.2—2015 标准在 INSTRON 5885 电子万能材料拉伸试验机和 ETM 高温拉伸试验机上测试。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 1 为热轧态 TC25 钛合金板材的显微组织。从图 1 可以看出，TC25 钛合金板材热轧态显微组织为拉长组织，其中横向组织中拉长的初生 α 相存在纵横交织现

象，纵向组织中拉长的初生 α 相呈单一方向。

图 2 为 TC25 钛合金板材经不同温度退火后的横向与纵向显微组织。TC25 钛合金板材退火温度在 760 ℃时，初生 α 相球化，但由于温度较低，仍以长条状为主，如图 2a、2b 所示。退火温度升高至 800~840 ℃时，球状初生 α 相直径增加，长条状初生 α 相短轴增宽，说明初生 α 相进一步等轴化，且逐渐长大，如图 2c~2f 所示。当退火温度升高至 880 ℃时，初生 α 相开始溶解，晶界溶断， β 转变组织中次生 α 相增多，TC25 钛合金板材显微组织类型发生转变，如图 2g、2h 所示。退火温度进一步升高至 920 ℃时，TC25 钛合金板材 β 转变基体上的次生 α 相清晰可见，尺寸也明显增大，呈现双态组织，如图 2i、2j 所示。当退火温度升高至 960 ℃时，双态组织中的初生 α 相含量明显减少，次生 α 相含量显著增多，尺寸进一步增大，如图 2k、2l 所示。可见，随着退火温度的升高，TC25 钛合金板材热加工形成的等轴组织逐渐向双态组织转变。

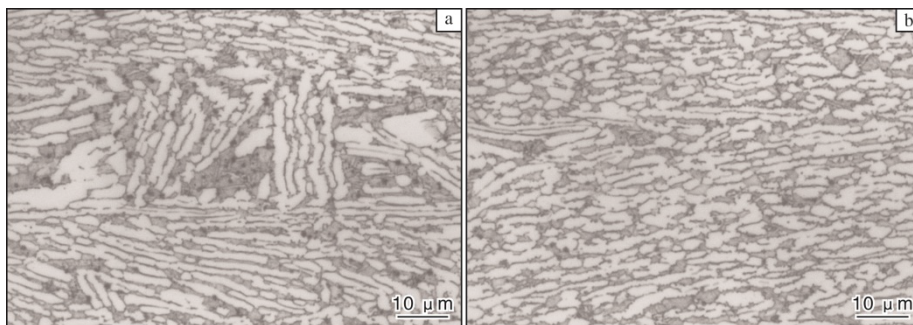


图 1 热轧态 TC25 钛合金板材的显微组织

Fig.1 Microstructures of TC25 titanium alloy plate as hot rolled: (a) transverse; (b) longitudinal

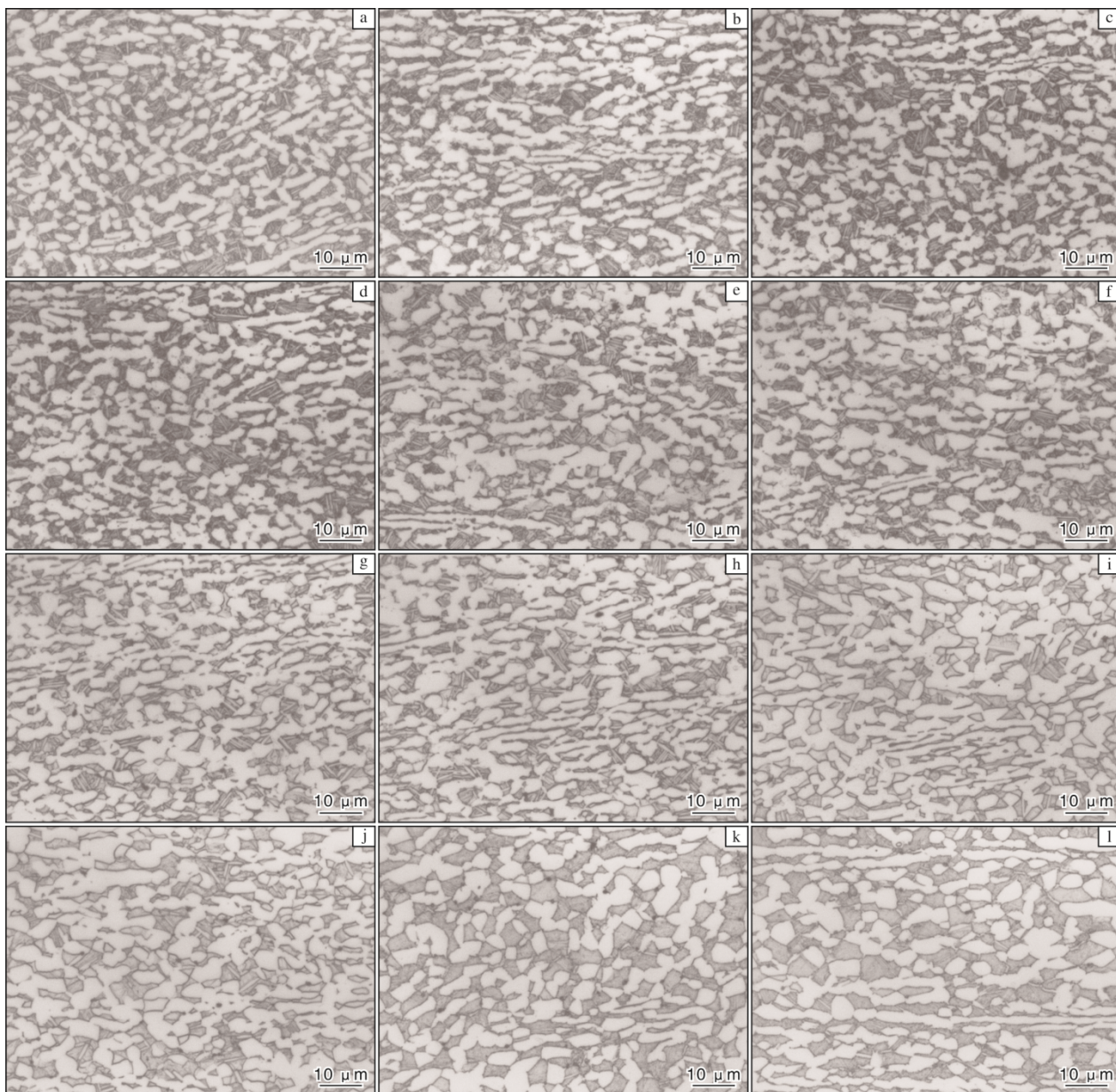


图2 经不同温度退火后 TC25 钛合金板材的显微组织

Fig.2 Microstructures of TC25 titanium alloy plate after different annealing temperatures: (a) 760 °C-T; (b) 760 °C-L; (c) 800 °C-T; (d) 800 °C-L; (e) 840 °C-T; (f) 840 °C-L; (g) 880 °C-T; (h) 880 °C-L; (i) 920 °C-T; (j) 920 °C-L; (k) 960 °C-T; (l) 960 °C-L

2.2 室温力学性能

图3为TC25钛合金板材经不同温度退火后的室温拉伸性能。从图3a可以看出, TC25钛合金板材横向抗拉强度略高于纵向, 随着退火温度的升高, 抗拉强度整体呈现先减小、后变化不大、而后增大的趋势。当退火温度由760 °C升高至800 °C时, 板材室温抗拉强度明显减小。这主要是由于随着退火温度的升高, 加工硬化不断被消除, 板材强度降低。当退火温度升高至840 °C时, 板材内部由于热加工产生的应力已完全消除, 因此退火温度继续升高(880 °C)时强度变化不大。而当退火温

度进一步升高至920 °C时, 次生 α 相增多, 拉伸过程中位错滑移至次生 α 相时易于形成位错塞积, 板材抗拉强度显著升高。温度进一步升高至960 °C时, 抗拉强度变化不大。可见, 抗拉强度的变化与显微组织的变化关系密切。从图3b可以看出, TC25钛合金板材横、纵向屈服强度随着退火温度的升高呈现先减小后增大的趋势, 且横向屈服强度略高于纵向。退火温度为880 °C时, 横、纵向屈服强度最低, 分别为1001 MPa和995 MPa, 而后因组织类型变化, 屈服强度急剧增大。从图3c可以看出, TC25钛合金板材退火温度在760~920 °C时, 其横、

纵向断后伸长率呈现先减小后增大的趋势, 在 920℃时达到最大。退火温度升高至 960℃时, 横向断后伸长率略有减小, 纵向断后伸长率没有变化。

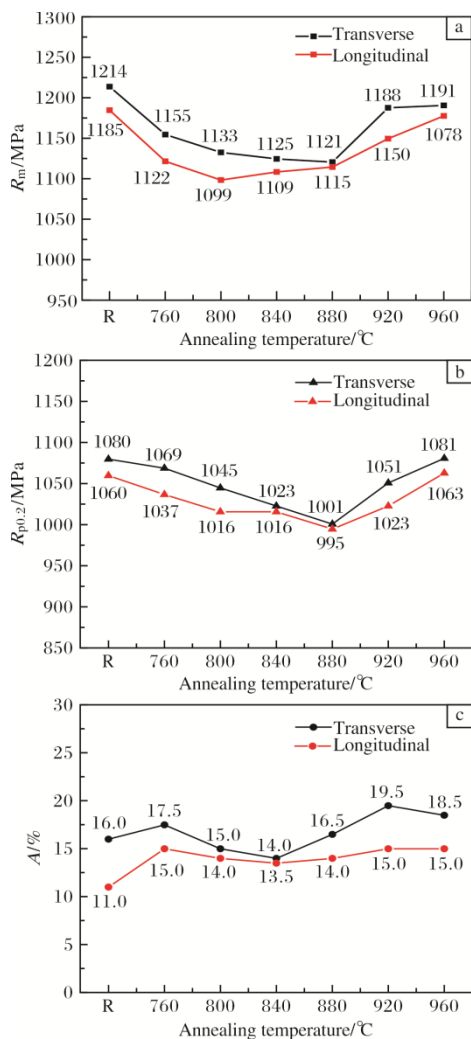


图3 经不同温度退火后 TC25 钛合金板材的室温力学性能

Fig.3 Room temperature mechanical properties of TC25 titanium alloy plate after annealing at different temperatures: (a) tensile strength; (b) yield strength; (c) elongation

可见, 在实验温度范围内, 受显微组织的影响, TC25 钛合金板材在 920~960℃退火时的室温力学性能优于在 800~880℃退火时的室温力学性能。

2.3 高温力学性能

图 4 为 TC25 钛合金板材经不同温度退火后的 500℃高温拉伸性能 (横向)。从图 4 可以看出, 在 800~920℃范围内, 随着退火温度的升高, TC25 钛合金板材高温抗拉强度由 815 MPa 逐渐增加至 924 MPa; 当退火温度达到 960℃时, 高温抗拉强度变化不大。TC25 钛合金板材高温屈服强度在 800~880℃变化不大, 在 684~694 MPa 之间; 而当退火温度达到 920℃时, 高温

屈服强度达到 720 MPa, 960℃时增大至 736 MPa。可见, 与等轴组织相比, 双态组织 TC25 钛合金板材的高温力学性能更为优异。这主要是由于双态组织中等轴 α 相减少、 β 转变组织增多, β 转变组织中交织分布的次生 α 相对滑移起到较强的阻碍作用, 使得板材抵抗变形的能力增加, 从而表现出更好的高温力学性能^[18]。由此可见, 退火温度的提高有助于 TC25 钛合金板材高温拉伸性能的提升。

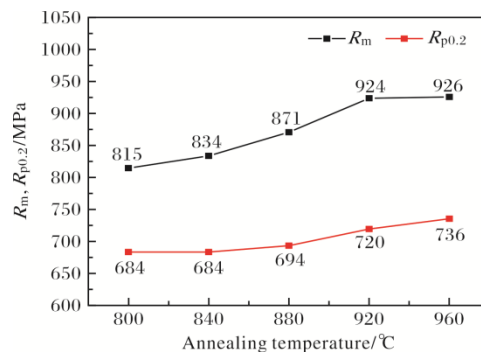


图4 经不同温度退火后 TC25 钛合金板材的高温力学性能

Fig.4 High temperature mechanical properties of TA15 titanium alloy plate after annealing at different temperatures

3 结 论

(1) 随着退火温度的升高, TC25 钛合金板材热加工形成的等轴组织中初生 α 相长大, 在 920℃退火时等轴组织转变为双态组织, β 转变基体上的次生 α 相清晰可见。

(2) 随着退火温度的升高, TC25 钛合金板材室温抗拉强度先在 760~800℃减小、后在 800~880℃变化不大、而后在 920~960℃显著增加; 高温抗拉强度随着退火温度的升高逐渐增大, 在退火温度达到 920℃后变化不大。

(3) TC25 钛合金板材在 920~960℃退火时可获得均匀的双态组织, 且具有良好的室温和高温拉伸性能。

参考文献 References

- [1] 魏寿庸, 王青江, 何瑜, 等. 航空发动机用 BT25 和 BT25y 热强钛合金评述[J]. 钛工业进展, 2013, 30(4): 9-14.
- [2] 朱培亮, 辛社伟, 毛小南, 等. 高温钛合金的热稳定性研究进展[J]. 钛工业进展, 2023, 40(1): 42-48.
- [3] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 247-258.
- [4] 张晓园, 刘向宏, 杜予珩, 等. TC25G 钛合金高温变形组织演变及强塑性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(12): 4227-4237.

- [5] 张晓园, 马驰, 史小云, 等. 热变形参数对 TC25 合金 β 锻坯微观组织和拉伸性能的影响[J]. 锻压技术, 2015, 40(11): 117-121.
- [6] 王林岐, 窦忠林. TC25 钛合金压气机盘锻件工艺选择[J]. 热加工工艺, 2010, 39(19): 121-123.
- [7] 魏鑫, 叶康源, 叶俊青. 冷速对等温锻造 TC25 钛合金盘件显微组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2017, 34(4): 26-29.
- [8] 夏春林, 叶俊青, 叶康源, 等. 热加工参数对 TC25 模锻件组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(21): 152-154.
- [9] 白晓环, 吕平, 徐庆. 热处理工艺对 BT25 钛合金锻件的组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2008, 25(5): 20-22.
- [10] 彭新元, 刘元春, 周贤良, 等. TC25 钛合金环形件组织和性能的研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(9): 16-18.
- [11] 康彦, 邓超, 徐光泽, 等. BT25 钛合金大规格棒材的研究[J]. 钛工业进展, 2008, 25(3): 15-18.
- [12] 于卫敏, 吴跃江, 潘跃进. 锻造温度对 BT25 钛合金组织和性能的影响[J]. 热处理, 2009, 24(4): 36-40.
- [13] 朱红, 孙捷, 凌敏. 锻造工艺对 BT25 钛合金组织和性能影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(21): 102-104.
- [14] 彭新元, 刘元春, 周贤良, 等. 双重退火对 BT25 钛合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(4): 42-46.
- [15] 王丽瑛, 魏寿庸, 高博, 等. 退火制度对 TC25 钛合金棒材组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2011, 28(2): 36-38.
- [16] 史小云, 张晓园, 尚金金, 等. 热处理方式对 TC25 钛合金棒材组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2014, 28(S1): 417-418+437.
- [17] 王媛, 董健, 关玉龙, 等. TC25 合金板材的热处理工艺[J]. 金属热处理, 2016, 41(1): 94-96.
- [18] 张伟, 王丽瑛, 李渭清, 等. 热处理对 TC25G 钛合金大规格棒材组织性能的影响[J]. 世界有色金属, 2016(16): 50-51.

行业动态

陕西省钛镍材料创新中心落户西安经开区

5月23日,陕西省钛镍材料创新中心筹建启动仪式在西安经济技术开发区举行。这标志着陕西省钛镍材料创新中心将正式落户西安经开区并启动建设,为陕西省新材料领域科创资源聚集、研发能级提升开启全新篇章。

陕西省钛镍材料创新中心(以下简称“创新中心”)是按照国家新型工业化和陕西省制造业高质量发展战略,围绕钛行业转型升级和钛镍材料重大需求,创建的新型创新载体。创新中心聚集钛镍产业链材料研发和装备制造领域企业、高校,形成产业联盟,以产业前沿和行业关键共性技术研发供给、转移扩散和首次商业化为重点,以实现产业创新公共服务、创新人才培养、知识产权保护运用、国际交流合作等功能为目标,致力于打造跨界协同的创新生态系统。

建成后,创新中心将充分发挥陕西省支柱产业的区域资源优势,依托企业和高校间的强强合作,形成以技术为主导、产学研用协同、成果转化应用、人才队伍壮大、交流合作融合的钛镍材料创新平台,切实推动钛镍材料产业高端化、智能化、绿色化发展,助力陕西省加快构建现代化产业体系,打造更具国际竞争力的战略性新兴产业集群。

创新中心落户西安经开区,对经开区突破钛镍材料产业核心关键技术,切实增强产业链、供应链韧性和竞争力有着重要作用。西安经开区相关负责人表示,作为陕西省新材料产业科创高地,西安经开区长期围绕钛及钛合金、超导材料、高温合金等新材料领域,打造以有色金属材料为主、多领域协同发展的特色产业体系。

目前,西安经开区正依托陕西省新材料研发与产业基础优势,建设秦创原新材料产业创新聚集区,加速新材料科研与产业的高效融合,打造千亿级新材料产业集群,助推陕西省新材料产业高质量发展。此次宝钛集团牵头筹建创新中心,并落户西安经开区,是经开区新材料科创领域发展的一件大事,西安经开区将聚焦人才、金融、政策、服务等方面,全力为创新中心建设保驾护航,助推陕西省新材料产业发展再上新台阶。

(来源:西安经济技术开发区官网)