

特约专栏

近五年钛合金材料研发进展

赵永庆¹, 葛 鹏², 辛社伟¹

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西部钛业有限责任公司, 陕西 西安 710201)

摘 要: 钛合金因具有比强度高、耐蚀、耐低温、无磁、生物相容性好等优异的综合性能, 在航空、航天、海洋工程、石油化工、民用等国民经济各行各业得到大量应用, 受到众多行业的高度重视。近 5 年国内钛行业工艺、技术和产品等得到提升, 取得众多成果。简要综述了近 5 年国内钛合金材料研发取得的主要进展, 如开发的多种钛合金材料成功应用于我国重要工程, 钛合金的熔炼技术、锻造技术、板材制备技术、大口径钛及钛合金无缝管材及弯管制备技术、钛合金型材及深加工制品制备技术等得到明显提升, 创新研制了满足用户要求的新合金并开展了众多的应用基础研究等, 最后指出了存在的问题和发展方向。

关键词: 钛合金; 研究进展; 发展方向

中图分类号: TG146. 23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)07-0527-08

Progresses of R&D on Ti-Alloy Materials in Recent 5 Years

ZHAO Yongqing¹, GE Peng², XIN Shewei¹

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Western Titanium Technology Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: Because of their excellent comprehensive properties, such as high specific strength, good corrosion resistance, low temperature resistance, nonmagnetic property and good biocompatibility, Ti-alloys are widely used in aviation, space flight, marine, chemical engineering fields, and so on. Ti-alloys have been paid more attention. In recent 5 years, national titanium industry's technologies, techniques and products have been improved and many achievements have been attained. This paper briefly introduces the main progresses of R&D on Ti-alloy materials in recent 5 years in China, for example, many designations of Ti-alloys have been used for national key engineering projects, and their melting technology, forging technology, plate rolling technology, processing technology for big diameter seamless tubes, structural sections and deep processing products have been improved greatly. Several new Ti-alloys have been designed and developed to meet the requirements and many basic researches for applications are undergoing. Finally, the problems existed and developing directions are proposed.

Key words: titanium alloy; progress; developing direction

1 前 言

钛合金因具有比强度高、耐腐蚀、耐高温、耐低温、无磁、可焊、生物相容性好等优异的综合性能, 在航空、航天、核工业、兵器、海洋、石油、化工、医疗、日常生活等众多领域都有着重要的用途, 为越来越多的人所接受。钛虽然在地壳中含量高, 但是由于活性大, 提炼

困难, 需要经过多次氧化还原过程才能达到工业应用的品位。通常采用氯还原法提纯金属钛, 熔炼采用多次真空电弧熔炼工艺, 另外钛合金变形抗力较大, 属于难变形材料, 也就是说钛合金材料制备工艺复杂、流程长等原因致使其成本高, 限制了钛合金在民用等领域的扩大应用。降低成本已成为目前钛合金发展必须要解决的重要问题之一。近 5 年, 国家及一些省市高度重视钛合金材料的科技进步, 支持了不少科技项目, 取得了良好的成果和效益。本文简要评述近 5 年国内钛合金材料在熔炼技术、锻造技术、轧制技术、新合金研发等方面的主要进展(不包括钛的金属间化合物、复合材料、粉末冶金材料、医用钛合金等), 并指出存在的问题和未来发展方向。

收稿日期: 2020-05-21 修回日期: 2020-06-19

第一作者: 赵永庆, 男, 1966 年生, 研究员, 博士生导师,

Email: trc@c-nin.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202006025

2 取得的主要工程技术进展

近 5 年, 钛科技领域尽管没有院士和国家级科技成果奖出现, 但钛合金材料研究、开发及生产相关的人员规模, 装备规模, 钛材的产能、产量都得到扩大, 如钛材产量由 2015 年的 4.86 万吨上升到 2019 年的 7.53 万吨, 增长了 55%。经过相关科技人员的努力, 取得了众多的工程技术成就。

(1) 开发的多种钛合金材料成功应用于我国重要工程。例如由西北有色金属研究院创新研制的高强高韧损伤容限钛合金 TC21^[1-3] 和具有我国特色的中强高韧损伤容限钛合金 TC4-DT^[3] 在西部超导材料科技股份有限公司 (以下简称“西部超导公司”) 实现大规格棒材批量化生产, 已成功应用于我国新型战机等^[4] (图 1 为某飞机用 TC21 合金的锻件), 成为了我国航空领域的主干钛合金牌号; 由西北有色金属研究院研制的新型 CT20^[5] 低温钛合金管 (图 2)、板、丝材及管件等成功应用于我国新一代航天器中。西北有色金属研究院研制的特殊耐蚀钛合金 Ti35 在核乏燃料后处理设备中已经获得应用 (图 3), 是我国 200 t 后处理示范工程设备用核心材料之一。



图 1 TC21 合金模锻件

Fig. 1 Die forgings of TC21 alloy



图 2 CT20 管材和应用部位

Fig. 2 CT20 tubes and their applications

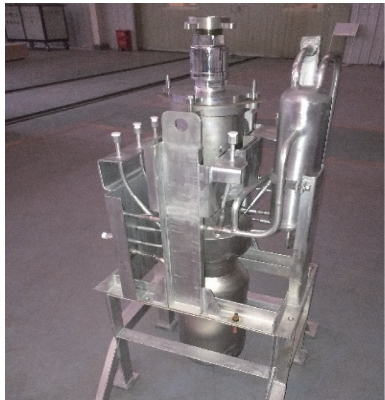


图 3 Ti35 合金溶解器

Fig. 3 A dissolver made by Ti35 alloy

(2) 钛合金的熔炼技术得到提升。工业化钛合金铸锭成分的均匀性、一致性能够得到保证。宝鸡钛业股份有限公司 (以下简称“宝鸡钛业公司”)、西部钛业有限责任公司 (以下简称“西部钛业公司”)、西部超导公司等实现了 SP700、Ti-1023 等易偏析钛合金的 3~5 t 级高均质铸锭的工业化制备, 掌握了 TC4 (图 4 和表 1)、Ti80、TA15 等常用钛合金 10 t 级超大规格高均质铸锭的制备技术。电子束冷床炉熔炼的多组元钛合金扁锭的成分均匀性有明显提升 (图 5)。



图 4 西部钛业公司制备的 TC4 合金 12.8 t 铸锭 (VAR 熔炼, 直径为 1020 mm)

Fig. 4 12.8 t ingot of TC4 alloy (by VAR melting, with diameter of 1020 mm) made by Western Titanium Technology Co., Ltd.

表 1 12.8 t TC4 铸锭上中下五点成分

Table 1 Chemical compositions at upper, middle and lower positions of 12.8 t TC4 ingot (w/%)

Positions	Al	Fe	V	O
Upper	6.23	0.174	4.15	0.11
Center between upper and middle	6.19	0.170	4.13	0.11
Middle	6.20	0.170	4.12	0.11
Center between middle and lower	6.22	0.178	4.14	0.11
Lower	6.23	0.176	4.15	0.10
Range	0.04	0.008	0.03	0.01
Target value	6.2	0.18	4.2	0.11
Scope	6.0~6.4	0.15~0.20	4.0~4.3	0.09~0.12

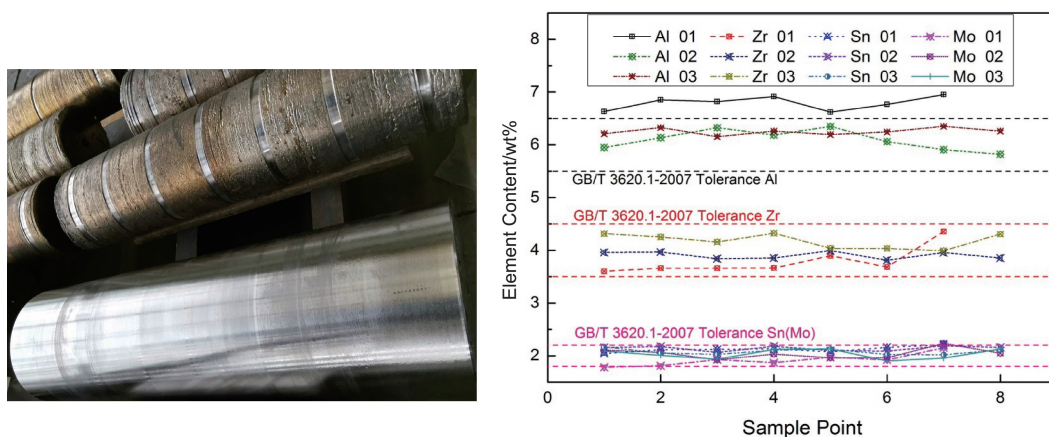


图 5 青海聚能钛业公司电子束冷床炉熔炼的 TA19 合金圆锭及不同部位化学成分

Fig. 5 TA19 ingot by electron beam cold hearth melting and its chemical compositions made by Qinghai Juneng Titanium Co., Ltd.

(3) 钛合金的锻造技术水平迈上了新台阶。国内主要钛合金公司掌握了 TC4(图 6)、TC21(图 7)、TC18、TC4-DT、TA15 等常用钛合金高品质大规格锻坯及棒材的

稳定化制备技术, 成材率、探伤水平、组织均匀性都获得了显著提升。



Plate size: 390 mm×1970 mm×3100 mm Result of ultrasonic testing: $\Phi 1.2$

图 6 西部钛业公司制备的重 10 t 的 TC4 合金板坯

Fig. 6 10 t plate of TC4 alloy made by Western Titanium Technology Co., Ltd.



图 7 西部超导公司制备的直径为 350 mm 的 TC21 合金棒材及直径为 650 mm 的 TC4 ELI 棒材

Fig. 7 TC21 bars with diameter of 350 mm and TC4 ELI bars with diameter of 650 mm made by Western Superconducting Technology Co., Ltd.

(4) 钛合金板材制备技术得到提升。生产的 TC4、TC4 ELI、Ti70、TA5 等钛合金板材已在我国若干重要工程中获得成功应用。西部钛业公司开发出了航空用高品质 TC4 钛合金厚板生产新工艺(图 8), 使产品质量稳定性(合格率大于 95%)、成材率(原有水平的 1.5 倍)、

生产效率(提升 2 倍)大幅度提升, 使国内高品质钛合金厚板制备技术得到了跨越式提高, 满足了重大型号急需。开发出超大规格钛合金厚板制备工艺, 制备出国内最大规格及单重的 TC4 钛合金厚板(图 9), 为深海空间站、舰船等装备对超大规格钛合金构件的需求

提供支撑。西北有色金属研究院、西部钛业公司、宝鸡钛业公司制备的细晶 TC4 和 TA15 等钛合金超塑板材获得批量应用(图 10 和表 2)。

西部钛业公司开发出装甲用低成本高强度 Ti-5322 钛合金板材制备技术(图 11), 形成可稳定化生产的工艺技术文件。可制备系列规格的装甲板材, 其抗弹性能显著优于 TC4 钛合金, 达到国际先进水平, 成为陆军四代装备的选材之一; 开发出装甲用 TC4 钛合金板材制备工艺, 抗弹性能优于同牌号航空用钛合金板材及进口材料, 满足了新型号的研制需求。并将其拓展用于高尔夫球头, 寿命相比 TC4 合金提升 2 倍以上。

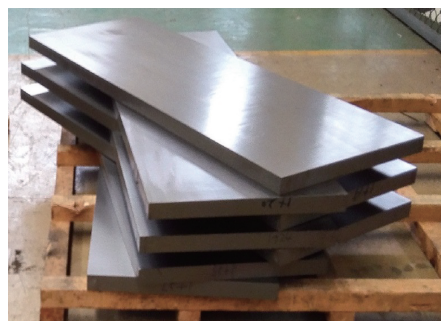


图 8 西部钛业公司制备的组织、性能合格的 TC4 中厚板
Fig. 8 Middle thickness plate of TC4 alloy with good properties and microstructures made by Western Titanium Technology Co., Ltd.

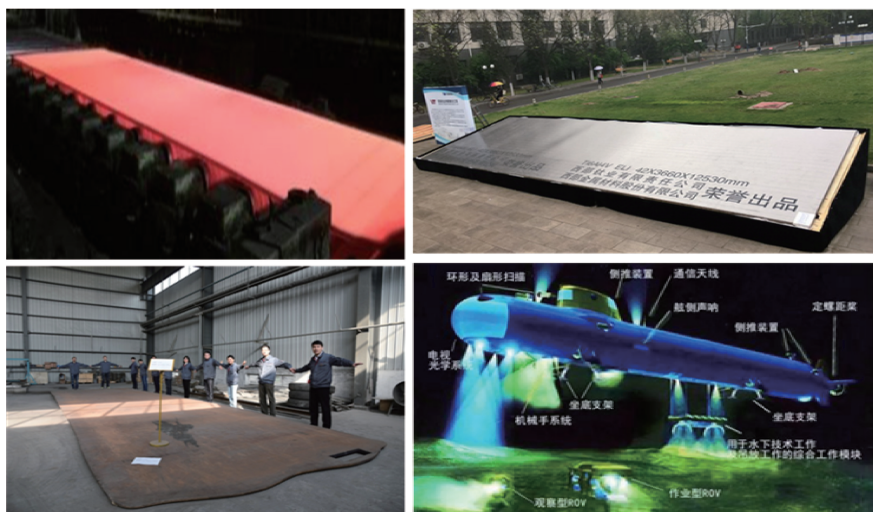


图 9 西部钛业公司制备的 42 mm×3660 mm×115 000 mm 性能组织合格的 TC4 合金厚板

Fig. 9 Plates of 42 mm×3660 mm×115 000 mm with good microstructure and mechanical properties produced by Western Titanium Technology Co., Ltd.

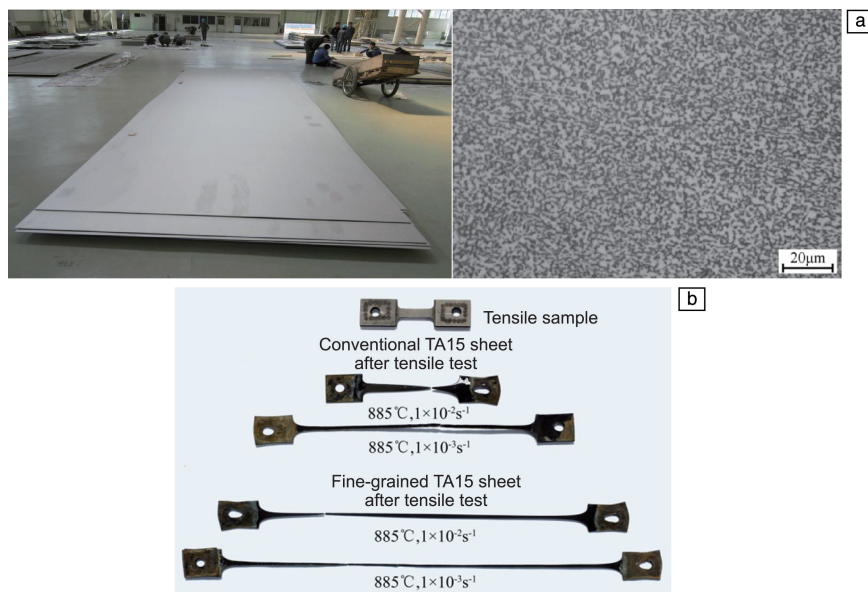


图 10 西北有色金属研究院和西部钛业公司制备的 0.5~4.0 mm×≥1200 mm×≥2400 mm 的宽幅细晶(平均晶粒尺寸≤5 μm)超塑性 TA15、TC4 合金板材和组织照片(a), TA15 细晶超塑性板材超塑性拉伸试验后试样照片(b)

Fig. 10 Wide sheets and microstructure of TA15 and TC4 alloys with the size of 0.5~4.0 mm×≥1200 mm×≥2400 mm and fine grain size (≤5 μm) made by Northwest Institute for Nonferrous Metal Research and Western Titanium Technology Co., Ltd. (a), TA15 super-plasticity tensile samples (b)

表 2 对应图 10 的 TC4 和 TA15 超塑性细晶薄板的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of TC4 and TA15 super-plasticity sheets in fig. 10

Designation	Tensile properties at room temperature							Tensile properties at 500 ℃
	R_m /MPa		$R_{p0.2}$ /MPa		A /%			R_m /MPa
	T	L	T	L	Δ	T	L	L
TA15	1014	1043	958	997	39	18	14	708
	1020	1047	957	1003	46	17	13.5	725
	983	1027	969	1010	41	16.5	13	710
	995	1036	915	950	35	17.5	14	695
Performance index	≥ 980		≥ 910		≤ 50	≥ 12		≥ 690
TC4	1005	1032	899	945	46	16.5	15.5	740
	993	1024	975	1012	37	15.5	15	735
	1014	1088	902	945	43	17	16.5	785
	954	972	901	931	30	16.5	15.5	705
Performance index	≥ 950		≥ 890		≤ 50	≥ 12		≥ 480



图 11 西部钛业公司制备的低成本高强度钛合金板材
Fig. 11 Low-cost high strength Ti-alloy plates produced by Western Titanium Technology Co., Ltd.

(5) 大口径钛及钛合金无缝管材及弯管制备技术得以提升。制备出合格的大口径无缝管材及弯管，如 TA2 的外径大于 200 mm、长度 3 m 以上的无缝管，Ti-75、Ti80 和 TC4 的外径大于 260 mm、长度 3 m 以上的无缝管（图 12）。

(6) 钛合金型材及深加工制品制备技术得到明显提升。宝鸡钛业公司等单位的厚壁钛合金型材的挤压制备技术逐步稳定，西北有色金属研究院等单位制备的钛隔膜、钛毛细管、环形气瓶、球形储箱、药型罩、丝材、各种管件等制品的尺寸和性能的稳定性得到提升（图 13），并获得实际应用。宝鸡钛业公司和中船重工材料研究所成功制备出深潜器的载人球体，实现了国产化。西北有色金属研究院和西部超导公司等开发出攻坚战斗部用钛合金材料及其制备技术，产品已在多个型号导弹



图 12 西部钛业公司和西北有色金属研究院研制的部分钛合金大口径无缝管(a)及 Ti-75 大口径无缝弯管(外径 ≥ 630 mm)(b)
Fig. 12 Large diameter seamless Ti-alloy tubes (a) and a large diameter seamless Ti-75 elbow with diameter ≥ 630 mm (b), produced by Western Titanium Technology Co., Ltd. and Northwest Institute for Nonferrous Metal Research

中批量化装备，大幅度提升了战斗部的毁伤威力，是国内首个使攻坚药型罩性能得到跨越式提升的实用化轻合金材料，是聚能装药战斗部材料的重大突破。

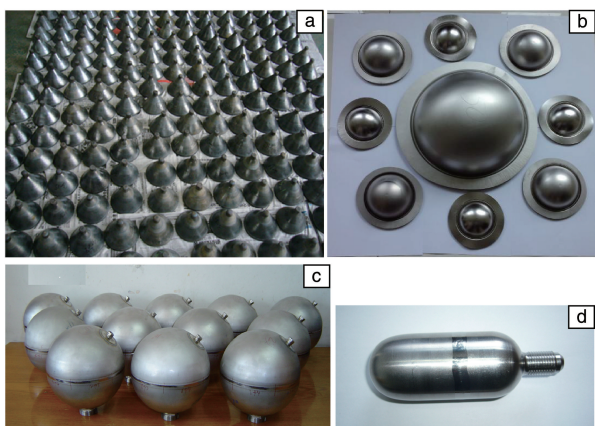


图 13 西北有色金属研究院制备的钛合金药型罩(a)、隔膜(b)、球形储箱内衬(c)、小气瓶(d)

Fig. 13 Some Ti-alloy shaped charge liners (a), diaphragms (b), spherical tank liners (c) and high pressure small gas cylinders (d), produced by Northwest Institute for Nonferrous Metal Research

3 主要的新合金研制和应用进展

(1) 结合国家海洋战略, 创新研制海洋环境应用的钛合金受到高度重视。在国家相关项目的支持下, 西北有色金属研究院、中船重工材料研究所等单位已成功研制出强度 800, 900, 1100 MPa 级的钛合金, 以及放射性快速衰减的钛合金, 性能达到指标要求, 有的已达到中试规模, 制备出合金棒材、板材、管材等, 这些合金均已获得发明专利授权^[6-10]。

(2) 在航空发动机用高温钛合金方面, 由中国科学院金属研究所研制的 Ti-60 合金已经在我国新型航空发动机中进行应用考核, 合金也进入工程化阶段。此外, 在现有高温钛合金的基础上, 中国科学院金属研究所和西北有色金属研究院分别研制出耐 650 °C 的多元固溶强化钛合金 Ti-65 和 Ti-650, 其中 Ti-65 合金已在航天超高速飞行器中进行了试用。

(3) 航空、航天用高强韧钛合金方面, 主要研制了 3 类: 超高强韧钛合金、超高强中韧钛合金和高强损伤容限钛合金。超高强韧钛合金的核心指标为: 抗拉强度 ≥ 1300 MPa、延伸率 $\geq 6\%$ 、断裂韧性 ≥ 55 MPa \cdot m^{1/2}, 典型合金有西北有色金属研究院研制的 Ti-1300^[11]、宝鸡钛业公司的 TB15^[12]、北京航空材料研究院的 TB17^[12]、西部超导公司的 TB18^[12]、西北工业大学的 Ti-7333^[13] 等, 这些合金大都进行过中试验证和相应的应用研究; 超高强中韧钛合金的核心指标为: 抗拉强度 ≥ 1500 MPa、延伸率 $\geq 5\%$ 、断裂韧性 ≥ 45 MPa \cdot m^{1/2}, 西北有色金属研究院和北京航空材料研究院分别进行了研发, 上述性能

指标基本达到; 高强损伤容限钛合金方面, 西北有色金属研究院联合北京航空航天大学、南京工业大学在 TC21 合金的基础上, 研制出 Ti-5321 合金^[14], 其在 1200 MPa 级强度水平下断裂韧性可以达到 70 MPa \cdot m^{1/2} 以上, 基本代表了目前损伤容限钛合金的最高水平, 经合金成分设计、实验室研究、500 kg 铸锭中试扩大研究, 制备的合金棒材性能为: 抗拉强度 ≥ 1200 MPa、延伸率 $\geq 8\%$ 、断裂韧性 ≥ 80 MPa \cdot m^{1/2}。

(4) 在兵器领域, 围绕高性能和低成本问题, 在 Ti-12LC、Ti-8LC 和 Ti-0.8Al-1.2Fe 等低成本钛合金的基础上, 西部超导公司依托“装发预研”项目, 开发出 M36 合金, 已经用于多功能战斗部的制备。西北有色金属研究院围绕返回料的回收利用问题, 开发出 Ti-6432、RT154 等低成本钛合金, 目前正在进行相关应用性能考核。

(5) 设计开发出可冷轧中高强钛合金, 基于该合金西部钛业公司开发出直径 200~300 mm 的大规格薄壁管及达到欧盟标准要求的高疲劳寿命自行车车架, 其中大规格管材已用于某导弹壳体。

(6) 创新性研制的钛合金已完成性能优化、工程化和批量化生产。主要合金有高温钛合金 Ti-60、Ti-65、Ti-650, 高强高韧损伤容限钛合金 TC21, 具有我国特色的中高强韧损伤容限钛合金 TC4-DT, 阻燃钛合金 Ti-40, 低温钛合金 CT20, 超高强韧钛合金 Ti-1300, 高强钛合金 Ti-26, 低成本钛合金 Ti-12LC, 乏燃料后处理工程用特种耐蚀钛合金 Ti-35, 船用钛合金 Ti-70 等等, 其中 TC21、TC4-DT 已工业化大批量生产, Ti-70、CT20 已工业化生产。

(7) 深化了钛合金的应用基础研究, 涵盖钛合金的设计方法、集成计算、强韧化机理、相变行为、工艺-组织-性能间关系、损伤容限机理、疲劳行为、腐蚀行为等, 取得较好的进展, 发表了大量的学术论文, 为合金性能优化、工艺改进提供了基础。

4 存在的主要问题

尽管近 5 年, 钛合金材料研制取得了一些成绩, 为我国相关工程提供了大量合格材料, 夯实了基础研究, 但仍然存在一些问题。

(1) 目前国内从事钛合金材料研制、产业化的单位多、科技人员多, 但国家层面项目少、经费少, 钛产业存在无序发展。

(2) 钛合金材料成本居高不下, 限制了钛合金的扩大应用, 尤其是在民用、海洋工程、兵器工业等领域的应用。

(3)存在设计-材料研制-应用研究-应用考核方面环节脱节,存在行业限制;“产-学-研-用”结合不紧密,科技成果转化慢。

(4)缺少全国性的科技成果转化平台,成果转化的中试工程化能力不足。

(5)钛合金材料的成分、组织及性能的均匀性、一致性、批次稳定性等有待进一步提高。

(6)工业化设备先进,但没有充分利用。

(7)钛合金材料品种不全,中试工程化程度不足,设计部门需要的性能数据缺项。

(8)重视新合金研制,老合金性能挖潜不足、应用少。

(9)原创性基础研究和应用基础研究较弱,高端人才队伍不足。

(10)“高、精、尖”高端产品的制备技术储备不足,存在“卡脖子”技术,关键核心技术没有完全自主可控。

(11)探伤、性能评价技术需要进一步提升。

5 钛合金材料的发展方向

(1)钛合金材料的低成本化技术是现在和未来的重要课题。需要通过工艺流程再造、工艺技术变革、高效短流工艺、残废料大量回收使用、低成本的新工艺和新技术的应用、全流程设计、低成本钛合金研发等多个环节,降低钛合金材料的成本,扩大钛合金材料应用范围和领域。开发出能够满足兵器工业、海洋工程和民用领域需求的钛合金材料,建立相应的工艺规范、标准。

(2)面向国家重大需求和国际前沿技术及满足国防新要求,开展新合金、新技术、新材料、新产品研发,强化原创性理论研究及应用基础研究。

(3)对现有钛合金通过新工艺、新技术开发,挖潜合金性能,改善、优化合金性能,降低成本,扩大应用。

(4)高度重视中试/工程化的作用,稳定钛合金的批量化生产,攻克科研-中试-产业各环节的关键技术,推动科技成果转化,形成国家级钛合金成果转化平台。

(5)大力发展“高、精、尖”产品和深加工制品的制备技术,攻克高端产品,满足应用需求。主要产品应该有:高强度管材、薄壁型材、箔材、高质量超长管、超大规模棒材、宽幅厚板/薄板、高质量丝材、隔膜、各类型管件、球形储箱、环形气瓶、药型罩、紧固件等等。解决“卡脖子”材料和技术,实现完全自主可控。

(6)智能钛合金材料的研发,如形状记忆合金管接头、储氢钛合金等。

(7)严格控制钛合金材料的质量以及质量的批次一致性、稳定性,确保以航空领域为代表的国防稳定应用。

(8)增加、提升钛的服务网络,扩大钛在各行各业的应用,使之成为真正的“第三金属”。

(9)钛合金材料制造过程的智能化是钛产业的发展方向;钛合金材料的绿色制造,实现钛产业持续健康发展。

(10)强化钛合金近净成形技术研究及应用。

(11)强化钛合金材料科研、中试、产业的协同创新及共享。

(12)精简钛合金牌号,发展主干钛合金,避免重复研究。

(13)建立钛合金材料数据库及合金设计的专家系统,通过集成计算,指导新合金设计。

参考文献 References

- [1] 曲恒磊,赵永庆,朱知寿,等.一种高强韧钛合金及其制备方法: ZL03105965.1[P]. 2008-04-09.
QU H L, ZHAO Y Q, ZHU Z S, *et al.* A High Strength and High Toughness Titanium Alloy and Its Processing Technology: ZL03105965.1[P]. 2008-04-09.
- [2] 赵永庆,曲恒磊,冯亮,等.钛工业进展[J], 2004, 21(1): 22-24.
ZHAO Y Q, QU H L, FENG L, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2004, 21(1): 22-24.
- [3] 赵永庆,曲恒磊,陈军,等.稀有金属材料与工程[J], 2008, 37(s3): 26-29.
ZHAO Y Q, QU H L, CHEN J, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2008, 37(s3): 26-29.
- [4] 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.
HUANG X, ZHU Z S, WANG H H. Advanced Aeronautical Titanium Alloys and Applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [5] 杨冠军,蔡学章,杜宇,等.一种近 α 型超低温钛合金及其制备方法: ZL03105962.7[P]. 2008-04-09.
YANG G J, CAI X Z, DU Y, *et al.* A Near α Type Super Cryogenic Titanium Alloy and Its Processing Technology: ZL03105962.7[P]. 2008-04-09.
- [6] 赵永庆,侯智敏,赵彬,等.一种屈服强度高于1000 MPa的海洋工程用钛合金: ZL201611005010.X[P]. 2018-07-10.
ZHAO Y Q, HOU Z M, ZHAO B, *et al.* A Titanium Alloy Used for Marine with Yield Strength Greater than 1000 MPa: ZL201611005010.X[P]. 2018-07-10.
- [7] 赵永庆,赵彬,张平祥,等.一种核反应堆用高冲击韧性低活化钛合金: ZL201611021851.X[P]. 2018-07-20.
ZHAO Y Q, ZHAO B, ZHANG P X, *et al.* A Titanium Alloy Used for Nuclear Reactor with High Impact Toughness: ZL201611021851.X[P]. 2018-07-20.
- [8] 尹雁飞,赵永庆,侯智敏,等.一种海洋工程用中等强度高冲击韧性钛合金: ZL201610929026.3[P]. 2018-02-06.

- YIN Y F, ZHAO Y Q, HOU Z M, *et al.* A Titanium Alloy Used for Marine with Middle Strength and High Impact Toughness: ZL201610929026.3[P]. 2018-02-06.
- [9] 侯智敏, 赵永庆, 赵彬, 等. 一种海洋工程用高强韧钛合金: ZL201710798608.7[P]. 2019-02-15.
- HOU Z M, ZHAO Y Q, ZHAO B, *et al.* A Titanium Alloy Used for Marine with High Strength and High Toughness: ZL201710798608.7 [P]. 2019-02-15.
- [10] 李士凯, 杨治军, 张斌斌, 等. 一种高强度高冲击韧性的耐蚀可焊钛合金及其制备方法: ZL201610779584.6[P]. 2017-12-08.
- LI S K, YANG Z J, ZHANG B B, *et al.* A High Strength and High Impact Toughness Titanium Alloy with Good Corrosion Resistance and Good Weldability and Its Processing Method: ZL201610779584.6[P]. 2017-12-08.
- [11] 赵永庆, 葛鹏, 曲恒磊, 等. 一种 1300 MPa 级超高强结构钛合金: ZL200510000974.0[P]. 2011-01-12.
- ZHAO Y Q, GE P, QU H L, *et al.* A 1300 MPa Super High Strength Structural Titanium Alloy: ZL200510000974.0[P]. 2011-01-12.
- [12] 全国有色金属标准化技术委员会. 钛及钛合金牌号和化学成分: GB/T 3620.1—2016[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- National Technical Committee for Standardization of Nonferrous Metals: Designation and Composition of Titanium and Titanium Alloys: GB/T 3620.1—2016[S]. Beijing: China National Standardization Management Committee, 2017.
- [13] KOU H C, LAI M J, TANG B, *et al.* Aging Response and Properties of Ti-7333 Titanium Alloy[C]// Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. Beijing: The Nonferrous Metals Society of China, 2011: 1206-1208.
- [14] 赵永庆, 马朝利, 常辉, 等. 中国材料进展[J], 2016, 35(12): 914-918.
- ZHAO Y Q, MA C L, CHANG H, *et al.* Materials China[J], 2016, 35(12): 914-918.

(编辑 惠 琼)