引用格式：陈俊阳，相志磊，钱城，等．低成本钛合金研究现状及未来发展趋势[J]．材料工程，2026，54(4)：22-34.
CHEN Junyang，XIANG Zhilei，QIAN Cheng，et al.Current progress and development trends of low-cost titanium alloys[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(4)：22-34.

低成本钛合金研究现状及未来发展趋势

陈俊阳，相志磊，钱　城，周宗熠，王　冰，陈子勇*
（北京工业大学 材料科学与工程学院，北京 100124）

摘要：钛合金因其高比强度、优异韧性、耐腐蚀，广泛地应用于航空航天、兵器、海洋工程和医疗领域。然而，其较高的生产成本严重制约了其推广。本文综述了低成本钛合金的研究现状与未来发展趋势，重点分析传统设计方案与新兴技术路径。在传统方案中，通过使用廉价元素（如Fe、Cr、O、N）替代高成本元素（如Mo、V），并优化熔炼方式及加工路径，显著降低了合金成本。在新兴技术方面，高通量扩散技术、机器学习以及相变诱发高塑性机制/孪生诱发高塑性机制等为快速开发高性能、可短流程制备的低成本钛合金提供了重要理论基础；同时，近净成形技术凭借高材料利用率和短流程，成为成本控制的关键手段。未来，通过引入相变诱发高塑性机制/孪生诱发高塑性机制设计钛合金、辅以先进设计制备技术，并优化间隙元素（如O、N）的添加策略，有望显著降低钛合金的生产成本，推动其在汽车轻量化、军用装甲等领域的规模化应用，促进钛合金在多领域的广泛普及。

关键词：钛合金；低成本；合金设计；加工工艺；变形机制
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000415　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000415
中图分类号：TG146.2；TB31　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)04-0022-13

Current progress and development trends of low-cost titanium alloys

CHEN Junyang，XIANG Zhilei，QIAN Cheng，ZHOU Zongyi，WANG Bing，CHEN Ziyong*
（College of Materials Science and Engineering，Beijing University of Technology，Beijing 100124，China）

Abstract：Titanium alloys，owing to their high specific strength，excellent toughness，and outstanding corrosion resistance，are widely used in aerospace，defense，marine engineering，and medical applications. However，their high production cost remains a major barrier to large-scale adoption. This review summarizes the current research status and future development trends of low-cost titanium alloys，with a focus on both conventional design strategies and emerging technological pathways. In conventional approaches，the replacement of expensive alloying elements（*e.g.*，Mo，V）with more economical alternatives（*e.g.*，Fe，Cr，O，N），combined with optimized melting techniques and processing routes，has significantly reduced material costs. In terms of emerging technologies，high-throughput diffusion techniques，machine learning，and transformation-induced plasticity/twinning-induced plasticity（TRIP/TWIP）mechanisms provide a crucial theoretical foundation for the rapid development of high-performance，low-cost titanium alloys that can be fabricated *via* short-process routes. Near-net-shape forming techniques，with their high material utilization and short processing cycles，have become key tools for cost control. Looking forward，integrating TRIP/TWIP-based alloy design with advanced processing and manufacturing techniques，along with the strategic optimization of interstitial elements（*e.g.*，O，N），is expected to further reduce production costs. Such progress will accelerate the large-scale application of titanium alloys in fields such as automotive light-weighting and military armor，ultimately promoting their widespread adoption across multiple industries.

Key words：titanium alloy；low cost；alloy design；processing technology；deformation mechanism

钛合金以其比强度高、耐疲劳性能好和优异的耐腐蚀性能等特点，被广泛应用于航空航天、兵器、海洋工程和医疗领域[1-3]。然而，较高的生产成本极大地限制了其推广。与传统金属材料相比，钛板材的成本甚至接近钢板材的 100 倍[4-5]。钛合金成本主要来源于合金元素价格、高能耗的熔炼工艺和复杂的热机械加工流程[6]。其中原材料海绵钛的制备约占整个钛合金生产成本的 40%[7]，海绵钛的提炼过程极为复杂，这主要是因为从矿石中提炼钛金属非常困难，目前主流的商业冶炼海绵钛的工艺仍然是生产周期长、能耗高的 Kroll 法（镁热还原法）和 Hunter 法（钠热还原法）[8]。尽管目前学者提出了几种新型的提炼方法，但其大多仅停留在实验室阶段，难以大规模工业化生产[9]。钛合金具有变形抗力高、在高温条件下易发生氧化等固有特性，使其在加工过程中往往需要在较高变形温度下进行以降低流动应力，从而导致能够显著增加；与此同时，高温氧化与组织演化致感性叠加，使其可用加工窗口狭窄，工艺控制要求严格，最终造成成形效率与成材率受限。当前，钛合金制品的推广与应用正受到其高生产制造成本的严重制约。因此，降低钛合金的生产费用成为科研机构和企业亟待攻克的关键问题，发展钛合金低成本制备与成形技术迫在眉睫。

本文综述了近年来低成本钛合金的发展趋势，涵盖研究热点、关键技术问题及基础与应用研究中提出的多种成本控制策略。本文将这些策略分为传统方案与新兴方案，并对现存问题及未来发展趋势进行了分析，以期推动钛合金低成本化的发展进程，促进其在更多应用领域的拓展，并为后续钛合金材料设计与开发提供参考。

1　已商业化低成本钛合金的发展历程及现状

1.1　发展历程

自 20 世纪 50 年代 Ti-6Al-4V 合金广泛应用以来，降低钛合金的制造成本始终是该领域研究的核心课题之一。尤其在航空航天、汽车与能源等高性能结构材料领域，对低成本、高强度钛合金的需求不断增长，驱动了其从高端专用品逐步向民用化发展的转变。已商业化的低成本钛合金大致经历了三个发展阶段。最初在美苏冷战时期，苏联率先推动了 BT 系列合金（如 BT-6、BT-20 等）的研究与工程应用，尽管当时已具备一定的成本意识，但由于主要服务于航空航天等军工领域，性能依然是设计的首要目标。美国 Timetal 公司于 20 世纪 60 年代中期开发的 Timetal 62S，被认为是首个真正以“低成本”为设计核心的钛合金，标志着钛合金低成本化研究的起点，其通过引入廉价的 Fe 元素替代 V 元素，并辅以 Si 元素进行强化，成功实现了良好性能与经济性的平衡，广泛应用于汽车部件制造。随着冷战结束和民用市场的迅速扩张，以日本为代表的国家开始主导低成本钛合金的发展浪潮，其开发的 Ti-Fe-O-N 系列合金，显著降低了钛合金成本，使钛合金得以在汽车底盘、连接件等多个领域实现产业化应用。步入 20 世纪，低成本钛合金逐渐向高强化发展，并且开始应用于船舶、装甲以及航天火箭领域。近年来开发的 Ti12LC 已具备工业化生产能力，其典型应用包括航天器尾喷管等关键构件，并在我国航空航天领域完成验证与推广；与此同时，Ti-5322 合金凭借较高的装甲防护质量系数，已成功应用于装甲防护结构。图 1 汇总了 TC4 合金以及已商业化生产的低成本钛合金力学性能[1,3-4,9-12]，UTS 为抗拉强度，EL 为伸长率。尽管目前已有多款低成本钛合金实现商业化生产，但在实现低成本钛合金高强塑化方面仍显不足，未来发展趋势应当是面向“强度达到 1.2 GPa 级别、伸长率大于 10%”的性能指标，同时兼顾可加工性、焊接性及近净制造能力，以适应船舶、装甲、航天等多元领域的实际应用需求。

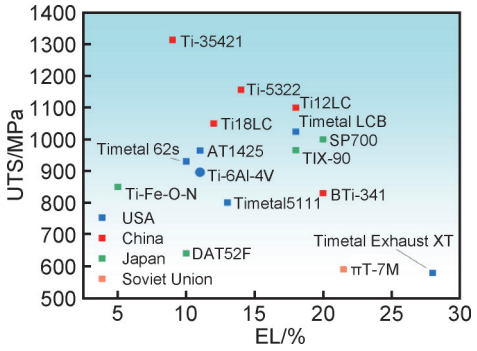


图 1　TC4 合金以及已商业化生产的低成本钛合金力学性能[1,3-4,9-12]

Fig.1　Mechanical properties of TC4 alloy and commercially produced low-cost titanium alloys[1,3-4,9-12]

1.2　典型板材钛合金的组织及加性能对比

由于板材是钛合金应用中最重要的产品形态，也是低成本钛合金主要的面向对象，本文选取 Ti-6Al-4V（TC4）板材作为基准，对比近期国内开发且已应用的低成本钛合金 Ti-5322 板材以及低成本钛合金 Ti-35421 板材。其典型的组织以及性能见图 2、表 1[13-15]；TC4 的相变点为 995 ℃，其加工工艺为单相区锻造开坯、两相区热轧以及 960 ℃，80 min/AC＋700 ℃，120 min/AC 的固溶时效工艺，如图 2(a)所示，其典型组织为固溶过程中产生的等轴 α 以及时效过程中在 β 相中析出 α_s 相构成的双态组织，由于等轴状 α 相能够

在拉伸过程中提供良好的位错储存能力和均匀塑性变形区域，因此具有较好的伸长率，但由于TC4合金的β稳定元素含量较少，时效过程中β相转变为α相倾向大，容易形成尺寸较大的α_s相，界面强化作用有限，抗拉强度通常保持在900 MPa左右。Ti-5322的相变点为892 ℃，其加工工艺为锻造、两相区热轧、870 ℃，60 min/AC＋ 550 ℃，360 min/AC的固溶时效工艺，合金组织为双态组织，残余连续β基体与弥散分布的次生α_s共同提供细化强化作用，而短棒状的初生α_p则起到变形协调的作用，改善了应力分布并延缓失稳。由于α_s相尺寸更小、界面密度更高，Ti-5322的抗拉强度显著提高（UTS≈1156 MPa），且伸长率可达14%，表现出比TC4更好的强塑性匹配。Ti-35421的相变点为807 ℃，加工工艺为锻造、两相区热轧、780 ℃，60 min/AC＋540 ℃，480 min/AC，合金含有较高含量的Mo、Cr和Fe，β相更加稳定，合金组织为短棒状初生α_p和大量α_s，阻碍位错滑移能力强，界面强化效应更明显，使抗拉强度提升至1313 MPa。但由于极小尺度的α_s层片，位错滑移的平均自由程下降，塑性略有降低（El≈9%）。

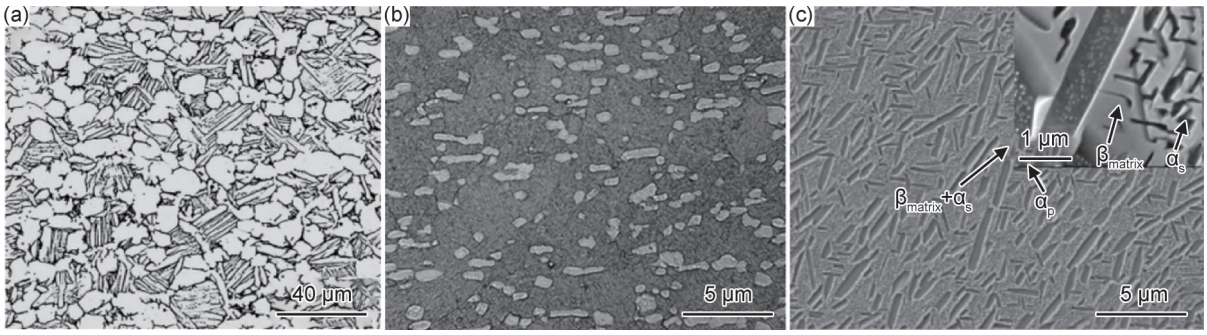


图2 钛合金典型组织[13-15] (a)TC4;(b)Ti-5322;(c)Ti-35421

Fig.2 Typical microstructure of titanium alloy[13-15] (a)TC4;(b)Ti-5322;(c)Ti-35421

表1 TC4、Ti-5322、Ti-35421成分及力学性能[13-15]

Table 1 Compositions and mechanical properties of TC4、Ti-5322 and Ti-35421 alloys[13-15]

Alloy	Nominal composition	UTS/MPa	YS/MPa	El/%
TC4	Ti-6Al-4V	895	825	10
Ti-5322	Ti-5Al-3V-2Fe-2Cr	1156	1037	14
Ti-35421	Ti-3Al-5Mo-4Cr-2Zr-1Fe	1313	1240	9

综上所述，TC4、Ti-5322和Ti-35421三种钛合金板材在热轧＋热处理工艺下具有不同的微观组织特征与力学性能。TC4具备良好的塑性但强度有限；Ti-5322在保持较高塑性的同时，强度显著提升，更接近未来低成本高强钛合金目标性能；而Ti-35421通过界面强化机制实现了更高强度，虽塑性稍微降低，但仍具备良好的工程应用潜力，可以满足未来多领域的需求。

通过对三种合金组织与性能的对比分析可以发现，为实现高强-塑性匹配，组织演化趋势表现为由TC4中相对粗大的等轴α_p＋片层α_s双态组织，向Ti-5322和Ti-35421中细小弥散的短棒状α相与连续的β转变基体构成的细化多相组织转变。通过增加Mo、Cr、Fe等β稳定元素含量以降低相变点，使合金能在更低的温度下进行热变形与热处理，有效抑制α相长大，获得更细小的组织构型，同时发挥细晶强化、界面强化和位错强化的作用，在提升强度同时，由连续的β基体和协调变形的α_p相来维持必要的塑性。因此，未来理想的高强低成本钛合金组织，应在双态组织的基础上进一步优化，调控初生α_p形态及大小，在更小数量级的尺度上控制α_s相的形态、尺寸和分布，以实现更高的强-塑性匹配。

2 开发低成本合金的传统设计方案

2.1 合金化设计

钛合金中的合金元素主要分为α稳定元素（如Al、O、N）和β稳定元素（如V、Mo、Ni、Fe、Cr、Mn、Nb）以及对相变点影响较小的中性元素（如Sn、Zr）[12]。在合金化设计阶段实现低成本化的思路往往集中于通过廉价的合金元素替换成本较高的合金元素，从表2[21-28]也可以看出目前多数研究围绕此思路展开，其中慢共析β稳定元素Fe和Cr因其价格低廉被视为首选的β稳定元素。尽管使用Fe、Cr作为钛合金中廉价的合金元素可以一定程度地降低合金成本，然而过量添加Fe和Cr容易引起铸锭偏析以及发生共析反应产生硬脆Laves相（$TiFe_2$、$TiCr_2$），导致合金力学性能恶化[11]，此外，Fe和Cr在高温条件下的反应活性增

强，进一步加剧了组织不稳定性与脆性相的析出，从而限制了其在高温钛合金中的应用潜力。然而，这类钛合金在室温条件下优良的力学性能和经济性使其在许多陆基设备和设施中具有广泛应用潜力。Al作为最重要且应用最广泛的α稳定元素，在提高钛合金强度、热稳定性以及抗蠕变性能方面发挥着关键作用，然而，Al的过量添加会导致钛合金的可加工性降低[7]，进而增加合金的加工成本。为进一步降低钛合金的生产制备成本，部分学者[24-26]采用O、N来替代Al，并且得到的合金在室温下具有优异的力学性能以及优良的耐腐蚀和成形性[27]，特别是O的加入可以改善钛合金在铸造过程中的流动性[28]，从而提升材料的成材率，但目前针对O、N等元素对钛合金的凝固行为和成形特性的研究仍显不足，并且对于钛合金的高温性能的影响也有待商榷。此外O、N在钛合金熔炼过程中容易溢出熔体，同时受限于设备，O、N元素在钛合金中的精确控制相对困难。因此，未来应当进一步确立钛合金中O、N元素合适的添加量，并在此基础上建立起O、N元素的含量与低纯度海绵钛、合金原料之间的联系，进而降低钛合金成本。

表 2　近期各国开发的低成本钛合金

Table 2　Low-cost titanium alloys recently developed by various countries

Nominal composition	Cost reduction method	Property	Country	Ref.
Ti-(0.35-0.5)O-3Fe	A low-cost titanium alloy with a wide oxygen content tolerance window, suitable for low-purity sponge titanium and recycled titanium materials, and applicable to additive manufacturing processes	The tensile strength ranges from 1034 to 1194 MPa, with an elongation between 9% and 22%	Australia	[16]
Ti-2Fe-0.1B	Low-cost Fe alloying is adopted, followed by forging and hot rolling without any additional heat treatment	The alloy exhibits a tensile strength of 654 MPa and an elongation of 20%, while also demonstrating a high fatigue life	China & Russia	[17]
Ti-22Fe-4Si-4Cr	The high Fe content alloying design enables the alloy to be used in the as-cast condition	The compressive strength reaches 2.56 GPa	India	[18]
Ti-4.5Al-6.9Cr-2.3Mn	Utilizing low-cost Fe, Cr, and Mn, the alloy can be processed by hot rolling and annealing without the need for forging	Tensile strength: 1191 MPa; elongation: 10.7%	China	[19]
Ti-1.5Fe-0.5O-0.025N	Incorporating inexpensive Fe and O, and processed by hot rolling plus solution-aging treatment, the alloy is compatible with low-purity sponge titanium and recycled materials	The alloy exhibits a tensile strength of 1000 MPa and an elongation of 20%	Japan	[20]
Ti-6Al-6Cr-1.2Fe-2Zr	The alloy, alloyed with low-cost Cr and Fe, is processed by forging and hot rolling without extra heat treatment, exhibiting industrial application potential	The alloy exhibits a tensile strength of up to 1.3 GPa and an elongation of 12.8%, indicating a good balance between strength and ductility	China	[21]
Ti-7Cr-4Sn	Without using any expensive alloying elements, the alloy is produced by a short-process fabrication route consisting of hot pressing and subsequent furnace cooling	The alloy exhibits a tensile strength of 1136 MPa together with an elongation of 10%	UK	[22]
Ti-4Al-2.5V-1.5Fe-0.25O	A cast alloy in which oxygen partially replaces aluminum and iron substitutes for vanadium	Tensile strength: 965 MPa; elongation: 13%; excellent corrosion and impact resistance	USA	[23]

综上所述，虽然通过低成本合金元素（如Fe、Cr）的添加可以降低钛合金的名义成本，但Fe、Cr等易偏析元素在商业大规格铸锭中的均匀性仍是关键问题。即便通过多次熔炼减少偏析，其额外的熔炼成本可能抵消廉价元素的成本优势。相比之下，通过添加O、N元素，并系统地研究其对合金性能的影响规律，进而选用含有O、N元素的低纯度原料、返回料来实现钛合金成本的下降具有比较大的商业潜力。

2.2　制备工艺优化

尽管通过替代价格较高的合金元素可在一定程

度上降低钛合金的材料成本，但降低幅度相对有限。熔炼、成形与机加工环节约占钛合金总成本的50%[7-9]。因此，研究者将更多关注转向熔炼技术选择与加工工艺优化，以期进一步降低钛合金制造成本。然而，由于钛合金在高温下反应活泼、对加工参数高度敏感的特性，使得工艺设计难度较大、加工窗口狭窄。当前，钛合金熔炼与加工过程中的降本策略主要集中在两个方向：一是提高返回料的利用率，最大限度回收残余材料以降低原材料成本；二是在保证质量与成材率的前提下，优化工艺流程，推动短流程制备技术的发展，实现制造效率与经济性的协同提升。

2.2.1 熔炼技术优化

目前国内广泛采用的真空自耗电弧熔炼（vacuum arc remelting，VAR）技术是工业化制备钛合金铸锭的成熟工艺，但在实现低成本钛合金制备方面仍存在一定局限。为保证铸锭均匀性，通常需进行2～3次重熔[29]，导致熔炼成本较高；此外，该工艺需依赖高功率压制设备以制备特定形状的自耗电极；在熔炼过程中，低熔点和高蒸气压的合金元素易发生挥发，且VAR技术对高、低密度夹杂的去除效果有限，从而限制了返回料的利用比例。上述因素使得仅依靠VAR技术实现钛合金的低成本化仍面临较大挑战。

随着电子束冷床熔炼（electron beam cold hearth melting，EBCHM）技术的不断发展与成熟[5,30-32]，钛合金的低成本化制备成为可能。图3为电子束冷床熔炼工作示意图，如图所示，EB炉熔炼是以电子束作为高能热源，将熔炼过程划分为原料熔炼区、精炼区和凝固区：原料和返回料在熔炼区被加热熔化，熔体在精炼区通过密度差分离夹杂物，最终在凝固区形成高质量铸锭。相比传统VAR技术，EB炉熔炼具有显著优势：其返回料使用比例可达70%～80%（VAR通常低于30%），显著降低原材料成本；同时，EB炉仅需一次熔炼即可成锭。此外，EB炉还可以一次熔炼生产扁锭，简化后续轧制流程，而VAR生产的圆锭需进行锻造开坯处理。综上，EB炉熔炼在工艺流程优化、能耗降低与成本控制方面均展现出明显优势。然而，由于EB炉熔炼必须在真空条件下运行，其在熔炼多组分钛合金时，高蒸气压的合金元素极易烧损，给合金成分的精确控制带来了严峻挑战。受限于这一技术瓶颈，目前EB炉熔炼钛合金在国内主要面向于纯钛及成熟商业钛合金的返回料回收利用。在此方面，青海聚能钛业的学者[33-37]围绕EB炉熔炼多组分钛合金过程中合金元素挥发行为开展了系统研究，现已掌握TC4、TA15、TA10合金在EB炉熔炼过程中元素挥发规律，为钛合金行业的发展提供了技术支撑。

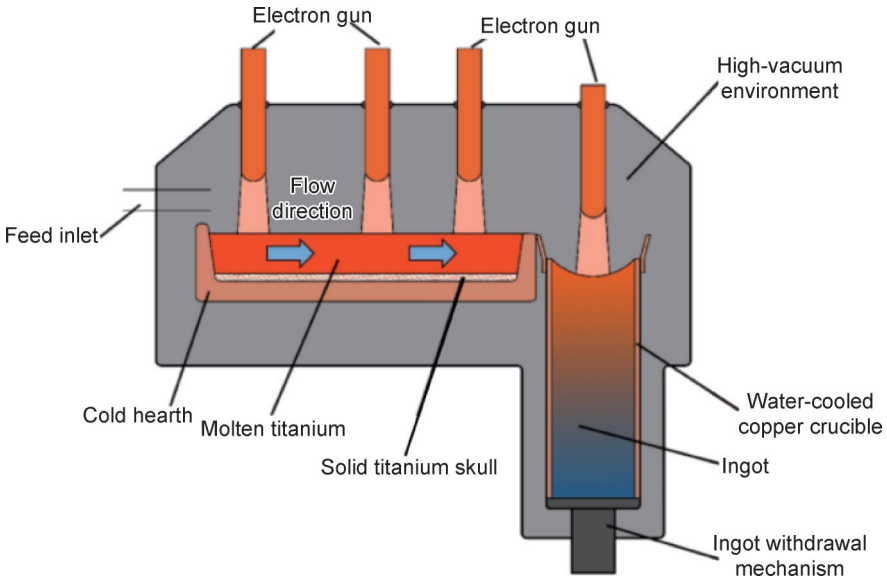


图3 电子束冷床熔炼工作示意图

Fig.3 Schematic diagram of EBCHM

总体而言，与传统VAR炉熔炼相比，EB炉熔炼技术在回收料处理上优势十分显著：其对原料状态的要求相对宽松，无需额外破碎或压制电极，从而简化了预处理环节；同时，其熔炼过程中展现出的卓越精炼除杂性能，显著提升了材料的纯净度和品质。因此，EB炉在回收料处理方面展现出显著优势，特别是在提升材料纯净度、简化工艺流程以及提高回收料利用率等方面，具有广阔的应用前景。

除上述熔炼技术外，对于钛合金中含有大量的诸如Mo、V、W等难熔合金元素，可采用冷坩埚感应

熔炼(induction skull melting, ISM)技术,其是一种通过感应加热配合分瓣式水冷铜坩埚来进行熔炼的特种熔炼方法(图 4),其通过感应线圈在分瓣式水冷铜坩埚中形成感生涡流以熔融金属,同时通过电磁悬浮以及电磁搅拌作用提高成分均匀性,并避免熔体污染[7,38-39]。然而,ISM 技术的结构特性限制了其熔炼效率:一方面,单炉熔炼容量较小(通常为 5~20 kg);另一方面,坩埚底部凝壳较厚,常占总体积的 1/3 以上,导致金属损耗和能耗显著增加。因此,降低凝壳厚度、扩大熔炼规模、提升熔炼效率,是当前 ISM 技术亟待解决的关键问题。

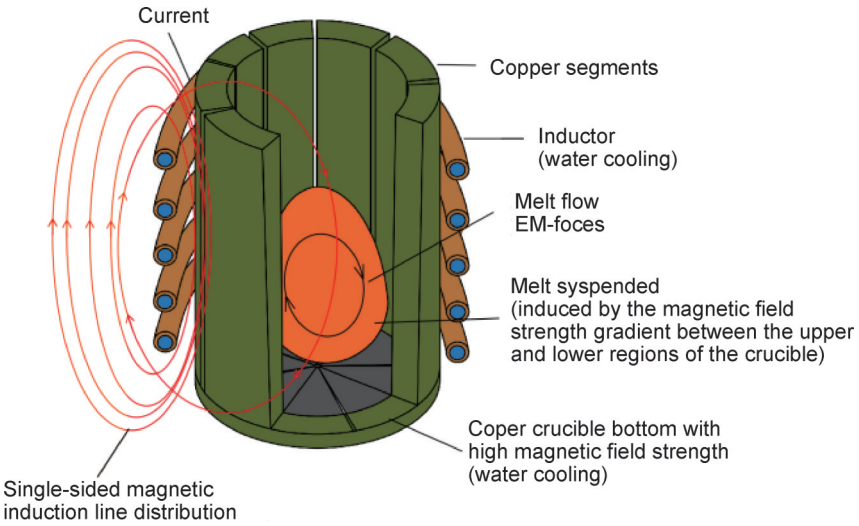


图 4　冷坩埚真空感应熔炼工作示意图

Fig.4　Schematic diagram of cold crucible vacuum induction melting

在提升成材率方面,引入吸铸工艺与 ISM 技术的结合成为研究重点。通过负压将熔融金属直接注入模具,既能显著提高钛合金的成材率,又能实现高效快速成型。但吸铸技术与 ISM 结合的应用仍面临熔体流动性控制和负压环境下水冷铜坩埚磁场优化的技术瓶颈,这直接影响工艺的稳定性和产品质量。尽管 ISM 结合吸铸技术在高温制备[40-41]中已有显著进展,但在钛合金领域的研究仍较为稀缺,大多停留在实验室规模,工业化突破尚未实现。尤其是钛合金熔体流动性差和高熔点特性进一步提高了工艺设计难度,使该领域的研究亟待深入。

2.2.2　成形技术改进

钛合金板材作为一种应用广泛的成品形态;然而,其在成形过程中的高裂纹敏感性、高变形抗力以及显著回弹现象,不仅提高了加工成本,还成为制造中的关键挑战。此外,由于钛合金型材轧制之前往往需要进行加热,进一步造成了能源消耗,提升了钛合金的成本。尽管有学者[42]针对钛合金的室温成形做出研究,但由于钛合金在室温下的成形非常有限,造成其室温轧制成形过程中仍然存在许多困难。因此,热加工仍然是主要加工方法。研究者[43-45]开发了多种本构模型,用于模拟钛合金的塑性变形行为,这些模型可以用于预测流动应力和应变速率之间的关系。在特定情况下,结合多个模型或采用优化步骤可以更准确地预测加工过程。加工图模型可以帮助识别加工钛合金的安全区域,并确定最佳加工条件。因此,结合本构模型和加工图可以有效优化热加工流程,降低成本并提高效率。

目前上述方法已广泛用于现有的商用合金[46-48],有效减少加工过程中的浪费。但针对低成本钛合金的数值模拟技术(包括基于本构模型的应力-应变分析和加工图的参数优化)仍然需要进一步研究。使用这种方法的主要挑战在于选择一个适当的本构模型,以准确描述热加工合金的应力-应变行为。

3　开发低成本合金的新兴设计方案

3.1　成分设计优化

传统的钛合金设计常依赖于类似“炒菜法”的试错策略,这种方法不仅研发周期冗长、成本负担较重,而且在成分设计阶段需要进行大量实验筛选,极大地制约了研发效率。随着高通量扩散技术以及机器学习技术的不断突破和应用[25,49-52],在钛合金成分设计中全面采用此类先进方式已成必然趋势。这不仅能显著缩短研发周期,而且可以大幅降低研制成本,为新型钛合金材料的快速开发提供了坚实的技术保障。

高通量扩散技术作为固态关系测定中最高效、可靠的方法之一。该技术可以在一个试样上快速获得多种合金成分数据，从而显著缩短实验时间。Ding等[53]通过扩散偶技术快速、高效地制备了Ti-6Al-10.9Cr、Ti-6Al-1Mo-1Fe-6.9Cr、Ti-6Al-1.7Fe-0.1Si-7.3Cr三种强度超过1600 MPa、伸长率高于5%的超高强钛合金。朱程鹏[54]结合高通量扩散多元节、机器学习等技术，迅速揭示了Cr、Mo元素在高强韧近β体系Ti-Al-Nb-V-Zr-Sn-Cr-Mo合金中对组织及力学性能的关键调控作用，设计并制备出新型高强塑钛合金Ti-4Mo-4Cr-3Al-2Nb-1.2V-1Zr-1Sn，其抗拉强度达到1123 MPa，伸长率为16.9%。弭光宝等[55]比较了不同机器学习模型在预测航空发动机钛合金力学性能及高温抗氧化性能的特点及优势，总结了人工神经网络模型和集成学习模型算法更加适用于航空发动机钛合金的学习过程，为未来高温钛合金设计提供了参考，同时也为低成本钛合金在相关设计中提供了启发。

尽管高通量扩散技术能够大幅缩短实验周期，但仍存在一定的局限性。例如，在高温长时扩散过程中，晶粒尺寸可能过度长大，影响组织研究的准确性。并且对于O、N等易扩散元素其在扩散组元制备的过程中可能已经充分扩散均匀，使得扩散组元的制备失败，如上文中所提到的O、N等低成本元素对于钛合金的低成本化具有比较大的潜力。因此还需要完善含有易扩散元素的扩散偶制备技术，除此之外还应当充分考量实际热处理工艺与高通量扩散技术的衔接与匹配。而机器学习技术则一直存在欠拟合、过拟合等问题，也是限制其在钛合金领域的应用关键。高通量扩散技术的另一显著优势在于其能够精确测定相平衡关系及相成分。若能将高通量扩散技术、传统的相图计算方法以及机器学习技术相结合，通过高通量扩散技术提供的大量数据点以及相图计算辅助进而实现机器学习模型的优化，必将为钛合金材料的设计带来革命性突破。这种结合不仅能够优化材料性能，还能显著缩短研发周期，为低成本钛合金的推广与研发开辟新路径。

3.2 TRIP/TWIP机制实现短流程化

近年来，相变诱导塑性(transformation induced plasticity，TRIP)与孪生(twinning induced plasticity，TWIP)机制，被广泛认为是高性能钛合金设计中的关键理论基础。两种机制通常基于亚稳态β钛合金，其β相在高温固溶快冷后往往表现出较低的热力学与弹性稳定性。在外部应力作用下，原本以滑移为主的塑性变形机制会发生转变为应力诱导相变(stress induce martensite transformation，SIMT)或变形孪生(twining)主导的机制[56-59]。图5为具有代表性的TRIP、TWIP钛合金的力学性能[21,56,59-63]，如图所示，相较于传统以位错滑移为主要变形机制的β钛合金而言，TRIP、TWIP钛合金往往具有较高的抗拉强度以及极佳的塑性。

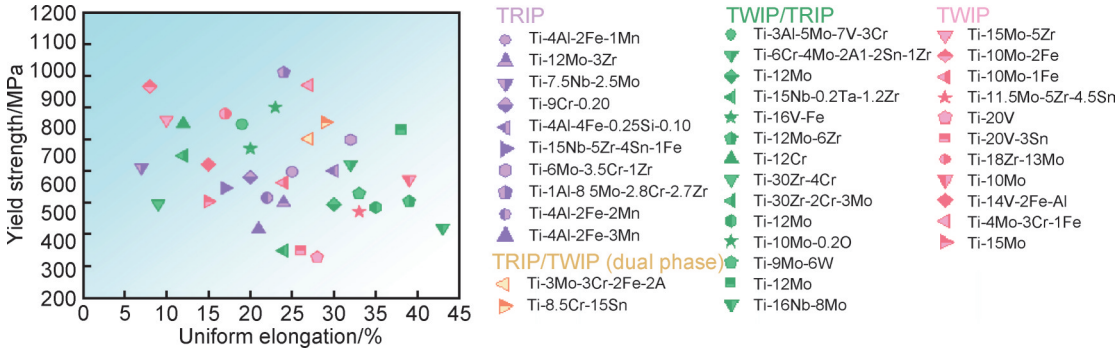


图5 具有代表性的TRIP、TWIP钛合金的力学性能[21,56,59-63]

Fig.5 Mechanical properties of representative TRIP and TWIP titanium alloys[21,56,59-63]

在TRIP机制中，β相会转变为马氏体结构；在TWIP机制中，β相发生孪生从而形成大量孪晶，基于此种动态相变以及变形孪生产生的大量相界/孪晶界可以有效地阻碍位错运动，实现动态霍尔-佩奇效应(dynamic hall-petch effect)进而获得高加工硬化率以及高塑性，然而材料在变形过程中的屈服行为与其主导的变形机制密切相关，应力诱发相变以及应力诱发孪生往往具有较低的启动应力，导致屈服强度降低。通常而言，位错滑移(σ_{Slip})、应力诱发孪生($\sigma_{Twining}$)、应力诱发马氏体相变(σ_{SIMT})的触发应力关系为$\sigma_{Slip}>\sigma_{Twining}>\sigma_{SIMT}$[63-65]。TRIP、TWIP钛合金具有优异的加工硬化率，可以延缓应变局部化，防止塑性失稳、颈缩，如图6(a)所示，其加工硬化行为与TRIP和TWIP的动力学具有直接关系，往往会形成类似于“三阶段”应变模式(图6(b))，在加工硬化率的极小值处，即第一阶段结束时，亚稳β相开始发生马氏体相变或者孪生，此时合

金发生屈服。第二阶段，大量的马氏体、孪晶发生形核与扩展，其中马氏体相变遵循以[111]β//[110]α″，(10-1)β//(10-1)α″的晶体学关系[56,66-68]。在变形的初始阶段往往只会开动单一数量的马氏体变体，而随着应力的增加另一取向的马氏体变形开动，与原始变体形成典型的锯齿形结构；孪生则主要形成{332}〈113〉β孪晶为主并辅以较少的{112}〈111〉β孪晶[58-59,61]，同时在特定晶体学取向下，孪晶内部还可能会形成二次孪晶甚至三次孪晶。这种马氏体或孪晶切割原始β晶粒实现的动态霍尔佩奇效应使得加工硬化率快速上升。在TRIP效应中以马氏体快速形成为特征，因此其动态强化效果比TWIP机制更加有效，而TWIP机制则是在较宽的应变范围缓慢进行，使其在更大范围下可以稳定地进行，虽然导致了较低的加工硬化率但可以有效地防止塑性变形的不均化，因此大多数情况下TWIP钛合金比TRIP钛合金具有更好的塑性。当合金加工硬化率达到极大值时，即阶段二结束时，通常认为马氏体和孪晶开动已趋于极限，位错发生滑移并与马氏体和孪晶发生交互作用，由于这种近饱和的变形诱导产物以及位错大量塞积在晶界处，可动位错减少，加工硬化率逐渐降低，直至合金发生断裂。TRIP、TWIP机制通过不同的微观变形方式，有效提升材料的强度与塑性之间的协同性，使得亚稳态β钛合金在保持良好塑性的同时，还可以获得优异的综合力学性能。

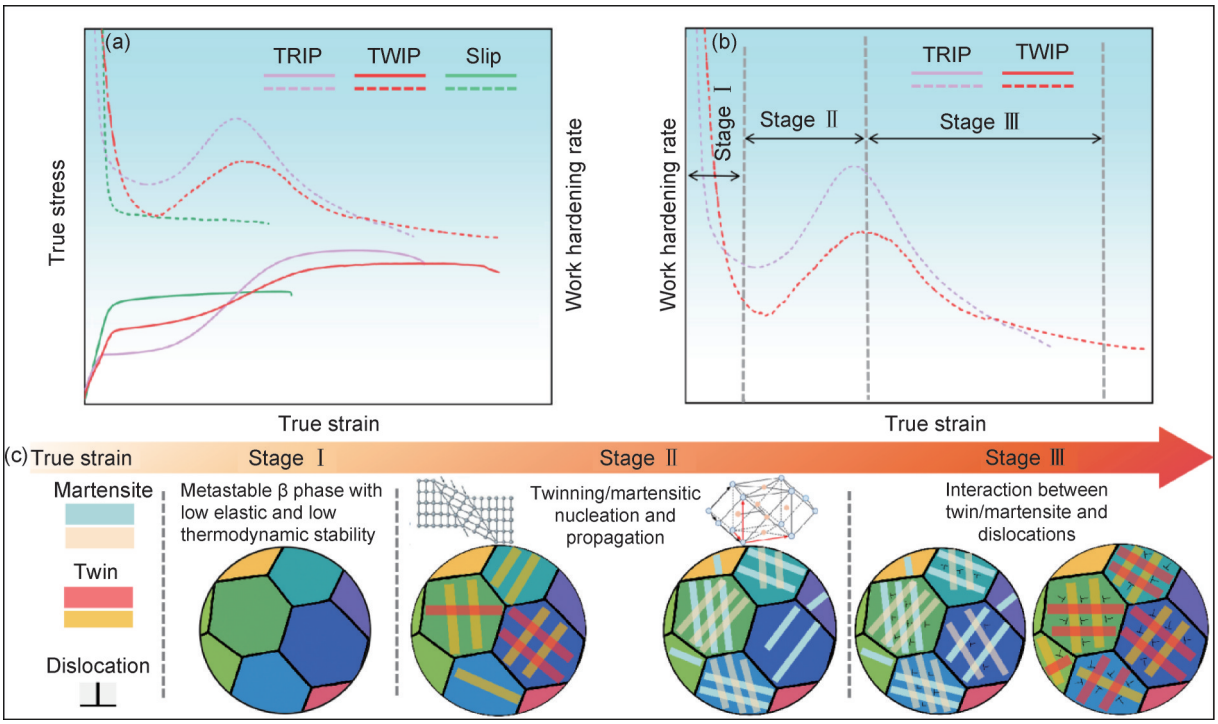


图6　TRIP、TWIP及传统钛合金的应力-应变曲线及加工硬化率曲线(a)、加工硬化行为(b)及变形机制示意图(c)

Fig.6　Stress-strain curves and strain hardening rate curves(a), strain hardening behavior(b), and schematic illustration of deformation mechanisms(c) of TRIP, TWIP, and conventional titanium alloys

基于上述机制，Liu等[69]研制出Ti-9Cr-0.2O合金在保持抗拉强度1025 MPa的同时还能获得20%的伸长率。Lee等[70]通过调控合金稳定性在合金拉伸过程中引入TWIP机制制备出抗拉强度1324 MPa，以及37%高伸长率的Ti-3Mo-3Cr-2Fe-2Al合金。这些研究成果充分表明TRIP、TWIP机制在获得高性能钛合金方面具有极高的潜力。

虽然TRIP/TWIP钛合金的设计本质上是一条以性能优化为核心的路径，旨在突破强-塑性的协同极限。但该合金设计方案在实现钛合金低成本化方面仍展现出独特潜力。其亚稳β相的获得通常仅需通过固溶处理和快速冷却即可实现，不仅缩短了传统钛合金繁杂的热处理流程，又显著降低了生产能耗与成本。同时，β相的稳定性可以通过引入廉价合金元素(如Fe、Cr)加以调控。使后续变形过程中诱发TRIP或TWIP机制，在优化力学性能的同时进一步降低加工成本。

然而，尽管基于TRIP/TWIP机制的钛合金展现出优异的力学性能，当前相关研究多以性能突破为核心，针对其低成本化的系统设计与工程化应用仍相对滞后，主要面临三大挑战：(1)在含多组元合金体系成分设计方面存在缺乏高效的设计策略；(2)其高强塑

性高度依赖β稳定性的精确控制，往往需要高合金化设计（Mo、Cr、Nb、Fe），并且需要保证固溶后快速冷却与组织均匀性对熔炼质量、锭坯尺寸、热处理工艺提出了更高的要求；(3)在屈服强度控制上仍存在显著提升空间。

在成分调控方面目前普遍采用的设计方案是基于钼当量、平均d轨道能级、平均键级以及价电子浓度等参数进行计算[62-63,67,69-71]，但由于上述设计方案是基于单一合金元素（M）对Ti-M二元合金中β相稳定性的影响，忽略了多元合金元素之间的相互作用。大量实验结果已表明，实际观测到的合金变形模式常常与上述模型预测存在显著偏离，因此，亟须一种更加可靠和系统的方法来评估合金的相稳定性。在此背景下，高通量扩散技术因其高效率和良好的可靠性，展现出巨大的应用潜力，有望成为新一代合金设计中的关键工具。

针对TRIP/TWIP钛合金因具有高合金元素含量导致熔炼难度上升的弊端，虽然目前有学者[67,69-71]利用传统的VAR熔炼此类合金时可以实现小规格铸锭的成功制备，但其大规格铸锭的成分均匀性仍然需要验证。而上文中提到的ISM技术为此类熔炼难题提供了解决思路，利用其高效电磁搅拌的特点来改善组织均匀性；除改善设备本身的角度出发之外，开发低合金化的TRIP/TWIP钛合金同样是可行路径，以廉价的强β稳定性元素（Fe、Cr、Mn）为主，辅以少量低偏析倾向的β稳定元素（Mo、V），可以在保证合金β稳定性和抑制偏析的同时降低合金成本。同时该合金化设计以能够显著提高淬透性的强β稳定元素为主，从而保证大尺寸锭坯水淬过程中的组织稳定性。

除成本问题之外，TRIP/TWIP钛合金仍存在屈服强度偏低的关键技术瓶颈，目前多数此类合金的屈服强度尚难突破800 MPa（如图5所示）。其根本原因在于：亚稳β相在早期塑性变形阶段易于激发相变或孪生，而这两种机制所需的临界开动应力显著低于传统滑移机制，导致材料在较低外应力作用下即发生屈服。该特性虽有助于塑性提升，但在高载荷结构应用中却可能影响材料的服役稳定性与可靠性。而在增强合金屈服强度方面目前学者主要从两个角度切入：一是通过提升β相稳定性，调节相变/孪晶开动应力；二是以界面/尺寸效应抑制相变发生。对此，Zhang等[72]通过调控Mo含量并采用β相区循环热轧工艺，成功制备出Ti-Al-8.5Mo-2.8Cr-2.7Zr合金。该合金中的纳米级β相显著提升了马氏体相变的临界开动应力，该策略使得塑性变形过程中位错滑移得以优先生效，从而有效抑制了应力诱导马氏体相变的早期发生，实现高达910 MPa屈服强度的同时，仍保持了约40%的超高伸长率，展现出优异的强塑性协同。而Chen等[26]在设计具有相对较高β相稳定性的Ti-6Al-6Cr-1.2Fe-2Zr合金的基础上，利用热变形过程中的元素动态再分布及位错调控，使β相保持在一种受控的亚稳态。该方法有效延后了应力诱导马氏体相变，从而在不牺牲塑性的前提下显著提升合金的屈服强度。最终制备出的合金展现出高达1250 MPa的屈服强度，同时保持了12.8%的伸长率，实现了强度与延展性的良好平衡。

未来实现TRIP/TWIP钛合金商业化的关键在于：以Fe、Cr、Mn等廉价强β稳定元素为主体，辅以少量低偏析倾向的Mo、V协同调控β稳定性；通过精准控制β稳定度和晶粒尺寸，提高马氏体和孪晶的开动应力，在降低合金成本的同时抑制偏析、保证组织均匀性，并提升屈服强度而保持优良塑性。与此同时，应设计适用于VAR熔炼的低合金化TRIP/TWIP合金，并加快大规格ISM熔炼装备的开发，以实现成分与组织的高效均质化。通过成分设计与工艺优化的协同推进，有望真正实现TRIP/TWIP钛合金的低成本化和工程化应用。

3.3 近净成型技术

钛合金产品经济性受限，不仅源于原材料成本高，更因其制备工艺复杂、周期长、技术要求高，导致整体制造成本偏高。尤其在半成品加工阶段，加工费用常常远超原材料成本，对变形困难或结构复杂的零件尤为明显。传统成型工艺中，坯料余量大、加工过程去除材料多，不仅工序烦琐、效率低，还造成大量浪费。因此，开发高效短流程工艺、提升材料利用率已成为降低钛合金成本的关键方向。粉末近净成形技术是以粉末为原料，通过注射、挤压、热等静压、冷压、激光增材制造等方法，能够在极少或无需后续加工的条件下直接制得成品，具有工艺流程简单、原材料利用率极高等优点。相比之下，传统工艺中锻件和铸件的材料利用率仅分别为10%～15%和45%～60%，而粉末近净成形技术几乎可实现100%的材料利用率，从而大幅提高了资源利用效率，极大地降低了整体制造成本[7,73-75]。此外值得注意的是，粉末近净成型技术还可以实现多个零件进行一体化制备，减少零件数量以及装配工序，同时相应的修复技术还能用于关键零部件的维护，避免直接更换零件带来的经济损失，进一步降低制造和维护成本[76]。然而，粉末冶金技术也存在一定局限性，例如高品质钛粉末的制备成本仍然较高，烧结过程中孔隙难以完全消除，可能影响材料

的疲劳性能和使用寿命。尽管如此，通过结合现代化的成分设计方法和优化烧结工艺，这些问题正在逐步被克服。

4　未来发展趋势

目前，钛合金已逐渐取代镍基合金、铜基合金、不锈钢等传统材料，成为众多领域中的新型材料。为了进一步拓展钛合金在化工、兵器、汽车、体育等行业的应用前景，国内外纷纷投入到低成本钛合金及其制备技术的研发中，并已取得初步成效。结合钛合金产品的成本构成以及设计和制造技术的发展趋势，未来钛合金低成本化研究的重点将集中在以下几个方向。

(1)发展海绵钛新型冶炼技术。推动发展低成本海绵钛提取技术被视为降低钛合金成本的突破口。只有加速电解钛工业化技术的攻关，积极探索更高效的钛提炼工艺，才能有效打破当前钛工业发展的瓶颈。无论是通过持续优化现有工艺，还是引入全新的提炼流程，都有望大幅降低钛提炼成本，从而显著降低海绵钛等原材料的生产费用，为钛合金低成本化提供坚实支撑。随着海绵钛冶炼新技术逐步实现工业化推广，其在降低钛合金整体成本方面必将带来突破性进展，推动整个行业迈向全新的发展阶段。

(2)O、N元素的添加。由于O、N是海绵钛、钛返回料以及合金原料中的主要杂质元素，但其也是潜在的替代合金元素，因此需明确其适宜的添加窗口。在此基础上，进一步建立起含O和N的低纯度原料、返回料之间的关系，进而推动低成本钛合金产业的发展。

(3)低成本TWIP/TRIP钛合金设计。虽然TRIP/TWIP钛合金具有短流程制备的关键优势，但其面向低成本钛合金的设计仍存在欠缺，而通过机器学习以及高通量扩散技术相结合，在设计阶段有效引入TWIP/TRIP机制。通过高通量技术快速表征多种成分与性能关系结合机器学习技术，提升设计效率。

(4)发展钛合金低成本成形制备技术。在铸锭熔炼与加工环节，EB炉熔炼技术通过高比例地掺入返回料，显著降低了原材料成本，并实现了一次成锭，大幅缩减了熔炼次数和中间工序，构建了高效的短流程制备模式，从而显著降低加工费用。同时，实现水冷坩埚真空感应熔炼与吸铸工艺的结合也是降低钛合金成本的潜在突破口。在成形工艺上，积极发展粉末冶金等先进技术，可进一步精简钛合金的制备流程。

5　结束语

综合现有研究与工艺实践，低成本钛合金的整体发展路径可按照应用场景进行分级匹配：首先，采用EB炉熔炼含有大量Fe、O元素或高比例返回料的低成本钛合金，并配合扁锭直轧工艺的加工方案时，尽管产品纯净度和性能略逊于传统VAR铸锭，但可显著降低成本、简化流程，尤其适用于民用领域及航天、兵器的非承载结构件等成本敏感型应用。其次，粉末冶金近净成形技术凭借材料利用率高、形状复杂件可一次成形的优势，可根据产品质量要求匹配不同应用场景：从高精度航天复杂零件，到民用轻量化部件，均具备较高的成本-效益比。最后，TRIP/TWIP钛合金虽仍面临熔炼难度大、屈服强度偏低等技术瓶颈，但凭借其短流程制备特性和优异的强-塑协同性能，展现出推动钛合金低成本化和性能突破的巨大潜力。通过合理调控塑性-屈服强度匹配，该类合金有望实现从航天、兵器到大规模民用领域的广泛应用。

参考文献

[1] WILLIAMS J C, BOYER R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components[J]. Metals, 2020, 10(6): 705.

[2] BAHL S, SUWAS S, CHATTERJEE K. Comprehensive review on alloy design, processing, and performance of β titanium alloys as biomedical materials[J]. International Materials Reviews, 2021, 66(2): 114-139.

[3] TREVISAN F, CALIGNANO F, AVERSA A, et al. Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications[J]. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials, 2018, 16(2): 57-67.

[4] 常辉，董月成，淡振华，等. 我国海洋工程用钛合金现状和发展趋势[J]. 中国材料进展，2020，39(增刊1)：585-590.
CHANG H, DONG Y C, DAN Z H, et al. Present situation and development trend of titanium alloys for marine engineering in China[J]. Materials China, 2020, 39(Suppl 1): 585-590.

[5] 陈子勇，刘莹莹，靳艳芳，等. 航空发动机用耐650 ℃高温钛合金研究现状与进展[J]. 航空制造技术，2019，62(19)：22-30.
CHEN Z Y, LIU Y Y, JIN Y F, et al. Research on 650 ℃ high temperature titanium alloy technology for aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(19): 22-30.

[6] 肖文龙，付雨，王俊帅，等. 高强度高弹性钛合金的研究进展[J]. 航空材料学报，2020，40(3)：11-24.
XIAO W L, FU Y, WANG J S, et al. Recent development in Titanium alloys with high strength and high elasticity[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(3): 11-24.

[7] 张新，刘鸿羽，车昶，等. 钛合金低成本成形技术研究进展[J].

铸造，2021，70(10)：1141-1148.
ZHANG X，LIU H Y，CHE C，et al. Development status of low cost titanium alloy processing technology[J]. Foundry，2021，70(10)：1141-1148.

[8] 朱灏，汪浩，檀成鹏，等. 高纯度钛的应用与制备研究进展[J]. 材料导报，2024，38(18)：120-134.
ZHU H，WANG H，TAN C P，et al. Advancements in the application and fabrication research of high-purity titanium[J]. Materials Reports，2024，38(18)：120-134.

[9] 辛社伟，刘向宏，张思远，等. 钛合金低成本化技术的研究与发展[J]. 稀有金属材料与工程，2023，52(11)：3971-3980.
XIN S W，LIU X H，ZHANG S Y，et al. An overview on research and development of low cost titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2023，52(11)：3971-3980.

[10] ABDALLA A O，AMRIN A，MUHAMAD S，et al. Development of iron (Fe) additions approach for cost reduction in Ti-alloy-a review[J]. International Journal of Materials and Product Technology，2017，55(1/2/3)：56.

[11] 周宗熠，相志磊，马小昭，等. 高强β钛合金的发展现状与强化方法[J]. 北京工业大学学报，2024，50(5)：620-631.
ZHOU Z Y，XIANG Z L，MA X Z，et al. Development status and strengthening methods of high-strength β-titanium alloys[J]. Journal of Beijing University of Technology，2024，50(5)：620-631.

[12] 赵永庆，陈永楠，张学敏，等. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙：中南大学出版社，2012.
ZHAO Y Q，CHEN Y N，ZHANG X M，et al. Phase transformation and heat treatment of titanium alloys[M]. Changsha：Central South University Press，2012.

[13] 王安东，张禄祥，陈彩凤，等. 固溶时效处理对Ti-5322钛合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2020，45(12)：24-28.
WANG A D，ZHANG L X，CHEN C F，et al. Effect of solution and aging treatment on microstructure and tensile properties of Ti-5322 alloy[J]. Heat Treatment of Metals，2020，45(12)：24-28.

[14] 付文杰，谢英杰，高维娜，等. 热处理对TC4合金中厚板组织及性能的影响[J]. 金属热处理，2014，39(11)：92-95.
FU W J，XIE Y J，GAO W N，et al. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy plates[J]. Heat Treatment of Metals，2014，39(11)：92-95.

[15] 张航，孙洋洋，ALEXANDROV VI，等. 高强韧Ti-3Al-5Mo-4Cr-2Zr-1Fe合金低周疲劳性能研究[J]. 稀有金属材料与工程，2021，50(2)：588-594.
ZHANG H，SUN Y Y，ALEXANDROV VI，et al. Study on low cycle fatigue behavior of Ti-3Al-5Mo-4Cr-2Zr-1Fe alloy with high strength and toughness[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2021，50(2)：588-594.

[16] SONG T，CHEN Z，CUI X，et al. Strong and ductile titanium-oxygen-iron alloys by additive manufacturing[J]. Nature，2023，618(7963)：63-68.

[17] WANG C，SUN Y，MI Y，et al. Low-cycle fatigue behavior and fracture characteristics of low-cost Ti-2Fe-0.1B alloy[J]. Metals，2023，13(7)：1208.

[18] SENGUPTA B，SHEKHAR S，KULKARNI K N. A novel ultra-high strength and low-cost as-cast titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering：A，2017，696：478-481.

[19] ZHU K，GUI N，JIANG T，et al. The development of the low-cost titanium alloy containing Cr and Mn alloying elements[J]. Metallurgical and Materials Transactions A，2014，45(4)：1761-1766.

[20] FUJII H. Control of mechanical properties of Ti-Fe-O-N based titanium alloys by thermomechanical processing[J]. Materials Science Forum，2003，426/432：661-666.

[21] CHEN J，XIANG Z，QIAN C，et al. High-yield-strength TRIP titanium alloy：a low-cost and short-process manufacturing approach[J]. Materials Letters，2025，392：138535.

[22] ZOU Z，DUNSTAN M K，MCWILLIAMS B，et al. Development of low-cost Ti alloys with a balanced strength and ductility with generation of ultra-fine microstructures[J]. Journal of Alloys and Compounds，2025，1030：180786.

[23] SUKUMAR G，SINGH B B，BALASUNDAR I，et al. Primary hot working characteristics and microstructural evolution of as-cast and homogenized Ti-4Al-2.5V-1.5Fe alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds，2023，947：169556.

[24] STRÁSKÝ J，PREISLER D，SEINER H，et al. Achieving high strength and low elastic modulus in interstitial biomedical Ti-Nb-Zr-O alloys through compositional optimization[J]. Materials Science and Engineering：A，2022，839：142833.

[25] KUO D H，LIAO W C. Ti-N，Ti-C-N，Ti-Si-N coatings obtained by APCVD at 650-800 ℃[J]. Applied Surface Science，2002，199(1/4)：278-286.

[26] KOIKE M，OHKUBO C，SATO H，et al. Evaluation of cast Ti-Fe-O-N alloys for dental applications[J]. Materials Science and Engineering：C，2005，25(3)：349-356.

[27] WISBEY A，GEARY B，DAVIES D P，et al. Superplastic deformation and diffusion bonding of the low deformation temperature titanium alloy SP700[J]. Materials Science Forum，1994，170/171/172：293-298.

[28] ZHOU Z，XIANG Z，MA X，et al. Effect of oxygen contents on the fluidity of a newly developed metastable β titanium alloy[J]. Materials Letters，2024，367：136537.

[29] 李明宇，杨树峰，刘威，等. 真空自耗熔炼钛合金的偏析缺陷及控制研究进展[J]. 中国冶金，2023，33(9)：1-10.
LI M Y，YANG S F，LIU W，et al. Research process on segregation and control of titanium alloy during vacuum arc remelting[J]. China Metallurgy，2023，33(9)：1-10.

[30] 王伟，王萌，蔡军，等. EB炉熔炼TC4钛合金轧制过程中的组织演变与力学性能[J]. 材料导报，2021，35(8)：8140-8145.
WANG W，WANG M，CAI J，et al. Microstructure evolution and mechanical properties of TC4 alloy prepared by electron beam cold hearth furnace during rolling process[J]. Materials Reports，2021，35(8)：8140-8145.

[31] 朱真泽. EB炉熔铸TA10钛合金扁锭凝固过程数值模拟及实验研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2023.
ZHU Z Z. Numerical simulation and experimental study on solidification process of TA10 titanium alloy slab ingot during electron beam cold hearth melting[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2023.

[32] 赵永庆，葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展[J]. 航空材料学报，2014，34(4)：51-61.

ZHAO Y Q, GE P. Current situation and development of new titanium alloys invented in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 51-61.

[33] 杜彬, 张志斌, 辛社伟, 等. Ti6242钛合金电子束冷床熔炼(EB)技术[J]. 金属功能材料, 2020, 27(4): 10-15.
DU B, ZHANG Z B, XIN S W, et al. Melting technology of electron beam cold hearth melting of Ti6242 titanium alloy[J]. Metallic Functional Materials, 2020, 27(4): 10-15.

[34] 杜彬, 唐增辉, 张志斌, 等. TC4合金的电子束冷床炉熔炼工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2989-2995.
DU B, TANG Z H, ZHANG Z B, et al. Melting technology of electron beam cold hearth melting of TC4 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(12): 2989-2995.

[35] 杜彬, 张志斌, 雷云清, 等. 电子束冷床炉熔炼TA15钛合金的工艺技术[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(11): 2706-2713.
DU B, ZHANG Z B, LEI Y Q, et al. Melting technology of electron beam cold hearth melting of TA15 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(11): 2706-2713.

[36] 杜彬, 张志斌, 曹寿林, 等. 多组元钛合金电子束冷床炉熔炼挥发规律研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 13-19.
DU B, ZHANG Z B, CAO S L, et al. Research on volatilization law of multi-component titanium alloy in electron beam cold hearth melting[J]. Titanium Industry Progress, 2021, 38(1): 13-19.

[37] 唐增辉, 辛社伟, 洪权, 等. 电子束冷床(EB)炉熔炼TC4合金组织与性能研究[J]. 中国材料进展, 2018, 37(3): 204-209.
TANG Z H, XIN S W, HONG Q, et al. Investigation of microstructure and properties of TC4 alloy using electron beam cold hearth melting[J]. Materials China, 2018, 37(3): 204-209.

[38] 雷文光, 赵永庆, 韩栋, 等. 钛及钛合金熔炼技术发展现状[J]. 材料导报, 2016, 30(5): 101-106.
LEI W G, ZHAO Y Q, HAN D, et al. Development of melting technology for titanium and titanium alloys[J]. Materials Review, 2016, 30(5): 101-106.

[39] 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.
SHU Q, GUO Y L, CHEN Z Y, et al. Development of casting and melting technology of titanium alloys[J]. Material Science and Technology, 2004, 12(3): 332-336.

[40] 蒲永亮, 寇生中, 董天文, 等. 水冷铜坩埚重熔吸铸高温合金K418的成分、组织和力学性能[J]. 金属功能材料, 2018, 25(4): 22-26.
PU Y L, KOU S Z, DONG T W, et al. The composition, microstructure and mechanical properties of superalloy K418 by remelting suction casting[J]. Metallic Functional Materials, 2018, 25(4): 22-26.

[41] 杨锐. 钛铝金属间化合物的进展与挑战[J]. 金属学报, 2015, 51(2): 129-147.
YANG R. Advances and challenges of TiAl base alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 129-147.

[42] KAYNAK Y, ROBERTSON S W, KARACA H E, et al. Progressive tool-wear in machining of room-temperature austenitic NiTi alloys: the influence of cooling/lubricating, melting, and heat treatment conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 95-104.

[43] 吕明航, 李安海, 吕豪剑, 等. 金属切削加工本构模型研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(3): 75-80.
LYU M H, LI A H, LYU H J, et al. Research progress on constitutive model of metal cutting[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(3): 75-80.

[44] 陈天天, 施晨琦, 宁哲达, 等. 金属及合金材料热变形中的本构模型与热加工图研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(增刊1): 416-424.
CHEN T T, SHI C Q, NING Z D, et al. Research progress of constitutive model and hot working diagram in hot deformation of metal and alloy materials[J]. Materials Reports, 2022, 36(Suppl 1): 416-424.

[45] 杨勇, 朱卫卫, 李明. 基于正交切削理论的航空钛合金切削加工本构模型构建[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1259-1267.
YANG Y, ZHU W W, LI M. Construction of material constitutive model during cutting process for aeronautical titanium alloy based on orthogonal cutting theory[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1259-1267.

[46] 彭力, 江健, 罗小峰, 等. TA18钛合金热变形行为及热加工图研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(6): 45-50.
PENG L, JIANG J, LUO X F, et al. Hot deformation behavior and processing maps of TA18 titanium alloy[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(6): 45-50.

[47] 陈国定, 王涛, 程凤军. TB6钛合金材料本构关系的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2): 157-159.
CHEN G D, WANG T, CHENG F J. Experimental study of the constitutive relationship of TB6 titanium alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(2): 157-159.

[48] 孙越, 孙勇, 杨勇, 等. TC21钛合金热压缩本构方程及热加工图[J]. 锻压技术, 2023, 48(4): 242-248.
SUN Y, SUN Y, YANG Y, et al. Constitutive equation and thermal processing map of thermal compression for TC21 titanium alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(4): 242-248.

[49] 毕亚男, 吴先月, 陈松, 等. 扩散偶制备技术发展及其应用[J]. 贵金属, 2019, 40(增刊1): 62-72.
BI Y N, WU X Y, CHEN S, et al. Development and application of diffusion couple preparation technology[J]. Precious Metals, 2019, 40(Suppl 1): 62-72.

[50] CHEN L Y, QIU A T, LIU L J, et al. Thermodynamic modeling of the Ti-Al-Cr ternary system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(5): 1936-1946.

[51] CHEN G, KANG J, WANG S, et al. Thermo-mechanical treatment of low-cost alloy Ti-4.5Al-6.9Cr-2.3Mn and microstructure and mechanical characteristics[J]. Materials Research Express, 2018, 5(4): 046533.

[52] 穆昱, 颜鲁春, 庞晓露, 等. 材料高通量制备与表征技术研究进展[J]. 稀有金属, 2024, 48(6): 858-872.
MU Y, YAN L C, PANG X L, et al. Research progress of high-throughput material synthesis and characterization[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48(6): 858-872.

[53] DING C, LIU C, ZHANG L, et al. Design of low-cost and high-strength titanium alloys using pseudo-spinodal mechanism through diffusion couple technology and CALPHAD[J]. Materials, 2021, 14(11): 2910.

[54] 朱程鹏. Ti-Al-Nb-V-Zr-Sn-Cr-Mo合金高通量设计及其强韧化机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
ZHU C P. Composition and microstructure design of Ti-Al-Nb-V-Zr-Sn-Cr-Mo alloys based on the high-throughput experimental methods and its strengthening-toughening mechanism [D]. Changsha: Central South University, 2023.

[55] 弭光宝, 孙圆治, 吴明宇, 等. 机器学习在航空发动机钛合金研究中的应用进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(增刊1): 66-78.
MI G B, SUN Y Z, WU M Y, et al. Application progress of machine learning in titanium alloy research of aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(Suppl 1): 66-78.

[56] FU Y, GAO Y, JIANG W, et al. A review of deformation mechanisms, compositional design, and development of titanium alloys with transformation-induced plasticity and twinning-induced plasticity effects[J]. Metals, 2024, 14(1): 97.

[57] XIAO J F, SHANG X K, LI Y, et al. Grain size-dependent tensile behaviour in a metastable beta titanium alloy [J]. Materials Science and Technology, 2022, 38(8): 469-483.

[58] WU C, ZHAO Q, HUANG S, et al. Deformation mechanisms in a β-quenched Ti-5321 alloy: *in situ* investigation related to slip activity, orientation evolution and stress induced martensite [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 112: 36-48.

[59] GAO B, WANG Q, WANG W, et al. Study on the deformation mechanism of Ti-10Mo-1Fe solid-solution alloys with different cooling rates[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 5221-5229.

[60] SADEGHPOUR S, ABBASI S M, MORAKABATI M, et al. A new multi-element beta titanium alloy with a high yield strength exhibiting transformation and twinning induced plasticity effects[J]. Scripta Materialia, 2018, 145: 104-108.

[61] CHOISEZ L, ELMAHDY A, VERLEYSEN P, et al. Fracture mechanisms in flat and cylindrical tensile specimens of TRIP-TWIP β[J]. Acta Materialia, 2021, 220: 117294.

[62] SUN F, ZHANG J Y, MARTELEUR M, et al. A new titanium alloy with a combination of high strength, high strain hardening and improved ductility [J]. Scripta Materialia, 2015, 94: 17-20.

[63] BROZEK C, SUN F, VERMAUT P, et al. A β-titanium alloy with extra high strain-hardening rate: design and mechanical properties[J]. Scripta Materialia, 2016, 114: 60-64.

[64] ZHU W, LEI J, TAN C, et al. A novel high-strength β-Ti alloy with hierarchical distribution of α-phase: the superior combination of strength and ductility [J]. Materials & Design, 2019, 168: 107640.

[65] XU Y, GAO J, HUANG Y, et al. A low-cost metastable beta Ti alloy with high elastic admissible strain and enhanced ductility for orthopaedic application [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835: 155391.

[66] ZHANG L C, ZHOU T, AINDOW M, et al. Nucleation of stress-induced martensites in a Ti/Mo-based alloy[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(11): 2833-2836.

[67] WANG J, XIAO W, FU Y, et al. Dependence of mechanical behavior on grain size of metastable Ti-Nb-O titanium alloy [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2022, 32(1): 63-71.

[68] WANG C H, RUSSELL A M, CAO G H. A semi-empirical approach to the prediction of deformation behaviors of β-Ti alloys [J]. Scripta Materialia, 2019, 158: 62-65.

[69] LIU H, NIINOMI M, NAKAI M, et al. β-type titanium alloys for spinal fixation surgery with high Young's modulus variability and good mechanical properties [J]. Acta Biomaterialia, 2015, 24: 361-369.

[70] LEE S W, PARK C H, HONG J K, et al. Development of subgrained α+β Ti alloy with high yield strength showing twinning- and transformation-induced plasticity [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 813: 152102.

[71] ZHANG B, HUANG M, CHONG Y, et al. Achieving large super-elasticity through changing relative easiness of deformation modes in Ti-Nb-Mo alloy by ultra-grain refinement[J]. Materials Research Letters, 2021, 9(5): 223-230.

[72] ZHANG C, LIU S, ZHANG J, et al. Trifunctional nanoprecipitates ductilize and toughen a strong laminated metastable titanium alloy[J]. Nature Communications, 2023, 14: 1397.

[73] 阴中炜, 孙彦波, 张绪虎, 等. 粉末钛合金热等静压近净成形技术及发展现状[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 1099-1108.
YIN Z W, SUN Y B, ZHANG X H, et al. Near-net shaping of titanium alloy powders by HIP technology: a review[J]. Materials Reports, 2019, 33(7): 1099-1108.

[74] ZHAO Q, CHEN Y, XU Y, et al. Cost-affordable and qualified powder metallurgy metastable beta titanium alloy by designing short-process consolidation and processing [J]. Materials & Design, 2021, 200: 109457.

[75] 弭光宝, 谭勇, 陈航, 等. 增材制造600 ℃高温钛合金研究进展[J]. 航空材料学报, 2024, 44(1): 15-30.
MI G B, TAN Y, CHEN H, et al. Progress on additive manufacturing of 600 ℃ high-temperature titanium alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(1): 15-30.

[76] CHEN H, MI G, LI P, et al. Excellent high-temperature strength and ductility of graphene oxide reinforced high-temperature titanium alloy matrix composite fabricated by hot isostatic pressing and heat treatment [J]. Composites Communications, 2022, 30: 101077.

基金项目:国家自然科学基金项目(51871006)
收稿日期:2025-07-21;**录用日期**:2025-10-28
通讯作者:陈子勇(1966—),男,教授,博士,研究方向为轻质高强结构材料,联系地址:北京市朝阳区平乐园100号北京工业大学材料科学与工程学院(100124),E-mail:czy@bjut.edu.cn

(本文责编:齐书涵)