

基于专利分析的 Ti₂AlNb 合金技术与应用研究现状

高威¹, 鲍芳芳¹, 冯新¹, 朱郎平¹, 丁贤飞², 南海²

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100080)

摘要: 对Ti₂AlNb合金的发明专利进行了检索、统计、分类和多角度分析。结果表明, 自该合金被发明以来, 与之相关的材料优化、制备工艺及应用研究一直在持续进行。随着Ti₂AlNb合金的潜在应用价值被发掘, 专利申请数量快速增长。目前, Ti₂AlNb合金已发展至第二代, 合金成分设计更接近实际工程应用, 工艺探索目标也由材料向结构件发展。而且随着技术成熟度提升, 应用研究的范围扩大。由于该领域技术门槛较高, 全球范围的创新主体集中于中、美、法、日等少数国家。在中国, 高校和科研院所是Ti₂AlNb合金的创新主体。

关键词: Ti₂AlNb合金; 专利; 技术; 应用

Ti₂AlNb合金具有优异的高温比强度、高比模量、抗氧化性能和蠕变抗力, 有助于降低飞行器的自重、提高燃油效率、高温服役性能和推重比。随着航空航天为代表的高端装备领域对耐高温材料、制造及应用技术的需求不断增加, Ti₂AlNb合金已经成为中国、美国、日本等国家新材料领域研究的热点之一。其目标是替代IN-718高温合金作为航空发动机的零部件, 实现减重35%左右, 以适应未来航空航天武器装备对高比强度、高比刚度轻质高温结构材料的迫切要求^[1-4]。由于Ti₂AlNb合金本征塑性相对较低, 在断裂韧性、缺口敏感性、高温氧化等方面处于相对劣势, 且成形工艺窗口窄, 焊接、切削等加工难度大, 仍有不少技术问题亟待解决。因此, 虽然Ti₂AlNb合金具有在轻质高温结构件上广泛应用的良好潜力, 而且合金技术已经取得重大突破, 但是目前国内外还未见其取得实际工程应用的相关报道。

本研究主要以德温特数据库(Derwent Innovations Index)和北京合享智慧科技有限公司的Incopat专利数据库作为数据来源。其中, 德温特数据库收录来自全球60个专利机构的超过4 000万条基本发明专利、8 000多万条专利情报; incoPat收录了全球157个国家/组织/地区1.6亿多项专利技术信息, 对全球的数据信息进行高度整合。将两个数据库的检索结果进行合并去重, 运用定量与定性相结合的专利分析方法, 分析了国内外Ti₂AlNb材料专利申请总体状况以及材料、工艺和应用各技术分支的发展轨迹等情况, 以了解Ti₂AlNb材料研究和技术应用的全球专利分布状况和重点创新机构的研发能力, 并结合对我国Ti₂AlNb合金材料技术创新研究现状的把握及对该材料技术领域研发和技术发展趋势的掌控, 提出该合金自主知识产权相关战略。

1 专利申请总体状况

1.1 申请趋势分析

图1为全球及在华Ti₂AlNb合金专利申请按年份分布趋势, 从图中可以看出, Ti₂AlNb合金相关技术的专利申请可以分为两个阶段。

1988—2013年为第一阶段, Ti₂AlNb合金被发现。1988年Banerjee等人在Ti₃Al基合金的增塑研究时发现了三元金属间化合物Ti₂AlNb, 因其具有正交结构而被命名

作者简介:

高威(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为钛合金铸造。E-mail: gwbiem@sina.com

通讯作者:

丁贤飞, 男, 博士, 高级工程师。电话: 010-62498477, E-mail: xianfeimail@gmail.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)07-0870-07

基金项目:

国家科技重大专项(J2019-VI-0003-0116)。

收稿日期:

2022-05-06 收到初稿,
2022-08-22 收到修订稿。

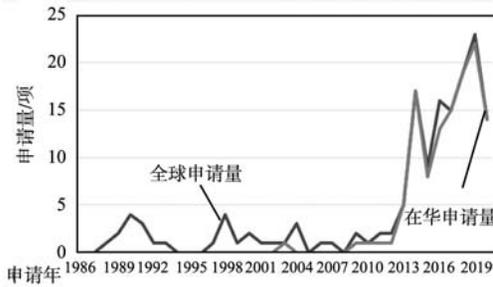


图1 全球及在华专利年度申请量

Fig. 1 Numbers of annual patent applications of the Ti_2AlNb alloy in the world and China

为O相 (Orthorhombic Phase) [5-6]。在此阶段，国内外 Ti_2AlNb 合金相关专利的年均申请量均不高，专利处于低申请量波动的阶段，这是由于在研发过程中无法突破 Ti_2AlNb 合金塑性低、成分均匀性差、成形困难等瓶颈问题。这与其仍处于研发阶段的情况相符合。

2013年开始进入第二阶段，该阶段 Ti_2AlNb 合金的潜在应用价值被关注。围绕 Ti_2AlNb 合金材料、复合材料、成形技术、焊接技术等进行了专利布局。特别是2014年以后，在我国新型航空发动机减重设计的需求牵引下，为了实现减重增效、提高机动性与作战力等目的，期望获得能够适应苛刻高温环境的轻质耐高温材料。与其他国家相比，中国的高校和科研院所越来越认识到 Ti_2AlNb 合金的重要性，该合金再一次进入研究者的视野。中国申请人加大了该领域的研发及专利布局脚步，全球及在华专利申请量都有了显著的增加，图2为在华专利年度申请量及授权量。

由于 Ti_2AlNb 合金专利多为发明申请类型，其经过实质审查获得授权需要一定的时间，因而授权趋势曲线相对于申请曲线存在滞后。从图2可以看出，2012年之前，在华申请量与授权量的曲线趋势基本相差不大。2012年至2014年是 Ti_2AlNb 合金在国内技术发展最活跃的时期，以 Ti_2AlNb 合金在航空航天等高端领域的应用为开端，开始了大量实验室阶段研究，专利申请数量涨幅很大。2014年之后，尤其是2018年之后，申请数量仍为快速增长阶段，我国开始了大量 Ti_2AlNb 合金的工程化应用研究，开始从实验室向工业生产转

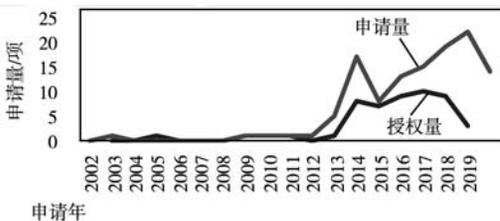


图2 Ti_2AlNb 合金在华专利年度申请量及授权量

Fig. 2 Numbers of annual patent applications and authorization of Ti_2AlNb alloy in China

变，逐步推进该合金在航空航天武器装备等各领域中的应用。但是专利授权量相对于专利申请量呈现明显的收敛，这是由于随着该领域信息披露越来越多，专利获得授权的难度增大。

1.2 技术分布分析

图3所示为各技术分支专利申请分布情况，将 Ti_2AlNb 技术分解为材料、工艺和应用三个技术分支。所述的材料是指主要通过原料组分得到调整或通过多种材料的组合对 Ti_2AlNb 的性能进行调整优化；工艺是指主要通过加工工艺调整 Ti_2AlNb 的组织性能；应用是指将 Ti_2AlNb 合金应用于具体的结构、部件中，或制备所述结构、部件的焊接等工艺。在一件专利中可能会出现同时涉及材料、工艺及应用三个方向，对于此种情况，在技术标引过程中将基于与专利关键技术特征密切相关的技术手段进行区分。由图3可知，材料、工艺及应用三个技术分支的全球申请数量相对较为平均，尽管该 Ti_2AlNb 合金尚未工程化应用，但材料、工艺和应用方面的研究和探索并未间断。

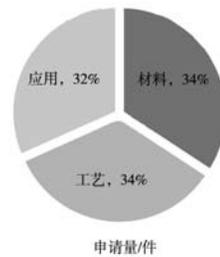


图3 Ti_2AlNb 合金各技术分支专利申请量

Fig. 3 Numbers of patent applications for various technical branches of Ti_2AlNb alloy

图4所示为 Ti_2AlNb 合金材料、工艺和应用技术各技术分支专利年度申请量变化规律，可以看出， Ti_2AlNb 合金材料、工艺和应用技术研究在国内外一直持续不断进行中。相对而言，材料这一分支的专利申请数量整体持续且稳定，而工艺和应用相关专利在2012年之前仅零星出现，大量申请集中于2012年以后。

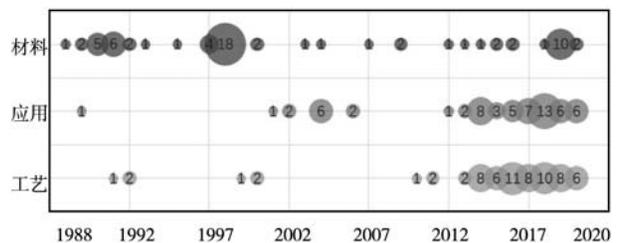


图4 Ti_2AlNb 合金各技术分支专利年度申请量

Fig. 4 Numbers of annual patent applications for various technical branches of Ti_2AlNb alloy

2000年以前,在 Ti_2AlNb 合金材料被发现之初,因其相比 Ti_3Al 合金更高的强度、韧性和抗蠕变性能,受到广泛关注,材料相关专利申请数量集中爆发^[7-8]。但仍处于技术孕育期,所以科研重点集中在合金材料探索研究方面,工艺和应用探索方面的研究和投入相对较少,专利申请数量不多。

2000—2012年,由于 Ti_2AlNb 合金性质介于金属与陶瓷之间,其本身存在本征脆性,其室温塑性、抗氧化性能等相对较低,存在上述技术瓶颈未能突破,工业化应用难度较高、进程较慢^[9-10]。在此期间,材料分支申请数量基本维持在每年0~2件,工艺和应用分支相关专利数量低于材料专利。

2012年以后,在我国航空航天及国防高新技术武器装备高温端部件对轻质合金需求的牵引下,以及对合金不断加深的认识基础上,材料、工艺和应用各分支的专利数量均大幅提升。

1.2.1 材料分支专利申请态势

就数量而言,材料这一分支的专利申请整体持续且稳定,材料相关专利申请分为三个阶段。

2000年之前称为“技术孕育期”。1989年初,通用公司的专利US5032357A公开了一种含有至少18at.%Nb的 Ti_3Al 合金,其含有18at%~30at%的Al,18at%~34at.%的Nb,其余为Ti,该专利中在合金中发现了O型正交相结构,可以看做是最早发现的 Ti_2AlNb 合金相关专利^[11]。自以O相为基的 Ti_2AlNb 合金高温性能优势被发现以来,国外非常重视对该新型合金的开发研究,研究者们共同认识到合金成分设计是发展新型 Ti_2AlNb 合金材料的关键技术。我国在“七五”至“九五”期间,在国家“863”项目支持下,也启动了 Ti_2AlNb 合金的基础研究,因材料技术成熟度较低,只申请了少数专利。对此期间材料分支全球专利进行梳理分析,可以发现成分设计大多采用添加Ta、Nb、V等 β 型元素和Si、C等非金属元素的方法调控合金力学性能和工艺性能。

2000—2012年为 Ti_2AlNb 合金的“技术瓶颈期”,该阶段的专利申请基本维持在每年0~2件。这主要是由于 Ti_2AlNb 合金的低塑性、易开裂等问题难以得到解决,学术界和工业界对该合金的关注度锐减。直到近几年,申请量明显增加,中国 Ti_2AlNb 合金进入“技术成长期”。这期间对 Ti_2AlNb 合金中Nb元素含量范围有了更清晰的界定,具体为:当Nb含量小于25%时,主要合金有Ti-25Al-17Nb、Ti-21Al-22Nb和Ti-22Al-23Nb等,被认定为第一代合金;当Nb含量大于等于25%时,主要合金有Ti-22Al-25Nb和Ti-22Al-27Nb等,称为第二代合金^[5, 12]。第二代 Ti_2AlNb 合金使用性能优

于第一代。其他主元素(Mo、Ta、W等)和微量元素(Si、C、B等)的复合强化方法也是合金发展的重要手段。为解决 Ti_2AlNb 合金低塑性问题,国内外试图开始通过研发复合材料实现增强增韧的效果。如日本专利JP2002003977A开发了一种TiB颗粒增强 Ti_2AlNb 金属间化合物的复合材料^[13]。

2012年以来,世界范围内 Ti_2AlNb 材料分支专利申请数量增速明显,总体呈现波动上升的趋势,进入“技术成长期”。中国作为后起之秀已占据 Ti_2AlNb 合金研究领域的主力地位,这与“十二五”“十三五”期间我国航空航天产业发展提速,相关材料、制造等产业保持加速发展的态势有关^[7]。在国家对轻质高温材料项目和经费大力支持下,在前期二十多年国内外的研究基础上,高校、研究所针对 Ti_2AlNb 合金塑性低、成形难度大等“瓶颈问题”,开展了大量合金成分优化设计工作。梳理分析该期间材料分支相关专利主要内容,可以发现与以往专利内容相比,主要区别在于元素种类和成分范围更接近实际工程应用,更具针对性和目标性。例如,针对高温抗氧化性能差或强度、抗蠕变性能低或可锻性能差等问题,设计了新合金成分(2019年CN106854725B、2020年CN111647771A、2020年CN111394637A等)^[14-17],其特点仍以Al、Nb元素为主元素,复合添加Mo、W、Zr、Ta、Zr、Hf、Si等元素。此外, Ti_2AlNb 基复合材料可以发挥出增强体和基体各自的性能优势,从而克服难以解决的强韧性匹配困难、寿命分散性大等问题,此阶段涌现了大量复合材料相关专利,如Ti-22Al-25Nb/ Al_2O_3 复合材料(2018年CN108396174A)、 $TiAlNb$ 基层状复合材料(2019年的专利CN110202869A)、石墨烯增强 Ti_2AlNb 合金(2019年CN110157933A)、TiAl+ Ti_2AlNb 激光复合材料(2019年CN110449581A)、Ag/ Ti_2AlNb 自润滑梯度复合材料(2019年CN201910436051.1)等^[18-22]。

1.2.2 工艺分支专利申请态势

除 Ti_2AlNb 合金化学成分的影响外,工艺是实现合金工程化应用的首要保证。如图4所示,工艺分支专利的申请大体分为两个阶段。

第一阶段可界定于在2012年以前,自从2004年阿尔斯通公司尝试将 Ti_2AlNb 用于轴流式热力涡轮机,全球开始一系列的专利申请布局^[23]。在此阶段工艺分支相关专利零星出现,可以理解处于刚刚起步阶段,专利的内容大多涉及到常规的热处理、冷热加工工艺等。这期间 Ti_2AlNb 基合金相关工艺大多还是沿用传统的热处理(1991年US5190602A)、热加工和低温液化处理工艺(1999年JP2001152269A)、高低温轧制工艺

(2001年JP2001271131A)等^[24-26]。

第二阶段出现于2012年以后, Ti_2AlNb 合金工艺分支发明专利不断涌现, 我国也越来越意识到 Ti_2AlNb 合金的优势和重要性。在此阶段, 开始以 Ti_2AlNb 基合金机匣环件(2014年CN104139139A)、异形环件(CN112170749A)、环形件(2018年CN108555305A)等特定结构件为目标, 尝试通过优化工艺、提高产品成形性, 以满足产品使用性能, 进一步推进合金工程化应用^[27-29]。

同时, Ti_2AlNb 合金构件粉末冶金、增材制造、复合材料制造等先进新工艺、新技术的发展日趋成熟, 虽然其成熟度不如铸造、锻造和焊接等传统技术, 但是针对 Ti_2AlNb 合金组元密度差大、塑性低、易开裂等特点, 上述先进制造方法具有较强适用性。因此, 在此阶段出现了大量 Ti_2AlNb 合金先进制造技术相关的专利。如: 一种 Ti_2AlNb 复合材料制备方法(2014年CN103710554A)、一种超细高纯度 Ti_2AlNb 合金粉末制备方法(2016年CN105537603A)、激光增材制造的三相 Ti_2AlNb 基合金的热处理工艺(2018年CN109332693A)、一种粉末冶金法制备 Ti_2AlNb 合金的方法(2020年CN111621659A)等^[30-34]。

1.2.3 应用分支专利申请态势

Ti_2AlNb 合金应用研究的发展以材料和工艺的发展为基础。从图4可以看出, 国内外已经开始了 Ti_2AlNb 合金应用研究。较为典型的专利是首次尝试将 Ti_2AlNb 合金用于轴流式热力涡轮机(2004年US7037079B2)^[23], 由此开启了从实验室研究阶段逐渐走向实际工程应用研究阶段。

2012年之前, Ti_2AlNb 合金应用方面的专利数量非常少, 与工艺分支的专利申请趋势相近。这期间美国已经开始将该合金应用到低风险部件, 如压气机机壳以及其他静态部件中。其中, 应用方面少量有益的尝试包括: 如蜂窝板结构(2001年US6758388B1)、轴流式热力涡轮机(2004年US7037079B2)、植入假体(2006年US7682473B2)等, 在本阶段合金和工艺的成熟度不高, 技术瓶颈难以突破, 涉及到应用方面的专利还比较少^[23, 35-36]。

自2012年开始, 在 Ti_2AlNb 合金材料和工艺技术快速发展的同时, 应用技术专利申请量也进入高速发展阶段, 尤其是2014年后申请量大幅增加。分析各专利申请公开内容可发现, Ti_2AlNb 合金的应用多是以大尺寸盘件(2013年CN104001845A)、燃气涡轮发动机高压压气机叶片(2016年UA120018C2)、 $Ti_2AlNb/Ti60$ 双合金盘(2020年CN111570795A)等航空航天上应用的结构件为主, 可以看出 Ti_2AlNb 合金的应用目标是对

轻质耐高温材料有明确需求的航空航天领域。说明我国以 Ti_2AlNb 合金在航天领域应用为开端, 也逐步推进该合金在航空发动机中的应用, 并且取得了阶段性的研究成果。考虑到材料成本和使用性能问题, 该合金很少向民用领域扩展^[37-39]。

此外, 一般高端装备高温部件结构非常复杂, 这必然涉及到 Ti_2AlNb 合金零件与同异种材料、其他结构零件组合连接。因此, Ti_2AlNb 合金连接技术是影响工程化应用不可避免的关键问题。研究者们分别尝试了同材或异材钎焊(2013年CN103567666A、2020年CN111702278A)、TA15/ Ti_2AlNb 异种材料的激光焊接(2015年CN105397292A)、TiAl合金与 Ti_2AlNb 合金的扩散连接(2017年CN106808079A)等, 为 Ti_2AlNb 合金的工程化应用提供技术支撑^[40-43]。

图5为将各技术分支进行细分后的申请数量分布。其中材料可以细分为合金和复合材料, 工艺可以细分为表面处理、粉末冶金、加工成形、热处理和材料制备, 应用细分为结构件和焊接。可以看出, 申请量排在第一位的是材料分支的合金方向, 其次是应用分支中的结构件和焊接方向, 在工艺分支中热处理和加工成形方向的申请数量也相对较高。表明新型合金成分设计仍然是目前 Ti_2AlNb 合金领域的重中之重, 也是限制该合金工程化应用的关键难题。与此同时, 为推进 Ti_2AlNb 合金科研成果在实际工程中的应用, 科研人员也开展了大量 Ti_2AlNb 合金结构件应用研究, 以缩小实验室研究与实际工程应用之间的距离。

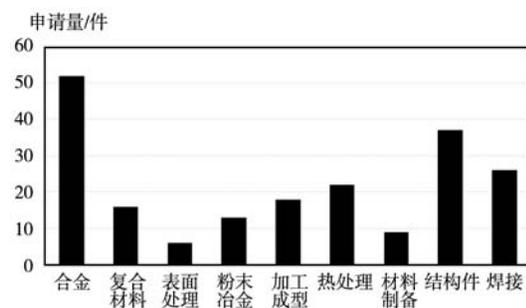


图5 Ti_2AlNb 合金各技术分支申请数量

Fig. 5 Numbers of patent applications for various technical branches of Ti_2AlNb alloy

1.3 地域分布及创新主体

从全球专利地域分布规律分析, Ti_2AlNb 合金创新主体的地域分布局限于中国、美国、俄罗斯、加拿大、法国、德国等国家, 由于该领域技术门槛较高, 创新主体并没有在全球范围内分散。国外美、日、俄等发达国家知名企业在 Ti_2AlNb 合金研究方面具有较强的研究实力, 在最开始的创新研发方面起到了推动作用。中国虽然起步较晚, 却在合金领域的专利数量

上占有绝对优势,说明我国对Ti₂AlNb合金寄予更高的厚望,在技术上也逐渐占据了优势地位。

从全球范围内的申请人来源与布局区域关联(表1),就布局区域而言,美国、欧洲、日本是各国创新主体比较关注的布局区域,美国和法国的申请人在全球范围内多国家或地区布局的意愿强烈。所有在华的Ti₂AlNb合金专利申请人来源中,专利申请量最多的是来自中国的创新主体,其他各国创新主体鲜少在华进行专利布局。可喜的是,我国的创新主体除了在本国进行专利布局外,已经开始考虑在美国、乌克兰、南非等国进行专利布局。法国的申请人在该领域的专利申请数量也较大,而且法国在其他国家,如欧洲、日本、美国等均进行了较为频繁的专利布局。

从在华申请专利的创新主体国内省份分布来看:陕西和北京是创新主体主要集中的区域,黑龙江和辽宁的申请量紧随其后。陕西和北京地区的科研院所、

高校较为集中,使得两地区为该领域创新主体集中的区域,而黑龙江省的专利申请主要由哈尔滨工业大学贡献。

从图6中可以看出,全球主要申请人中,除了法国国家航空空间研究局、美国通用电气和法国阿尔斯通为国外申请人外,其他申请人均为国内申请人。排名前三的申请人为:哈尔滨工业大学、北京航空材料研究院和中国科学院金属研究所。就国内申请主体而言,申请量排名前10位的专利申请人中,包含了4家高校、4家科研院所和2家企业。可见,在华专利申请人以高校和科研院所为主,对该领域研究发展的影响起到了至关重要的作用。企业相对占比有限,申请量均为5件以下。由于Ti₂AlNb合金技术开发难度较大、技术成熟度不高、开发周期较长且主要应用于军工领域。因此,国内研究主体集中于高校、科研院所和少数科研实力较强企业。

表1 Ti₂AlNb合金专利申请人来源与布局区域关联
Table 1 Correlation between the source of patent applicants and layout regions for Ti₂AlNb alloy

国别	中国	德国	俄罗斯	法国	美国	日本	瑞典	瑞士	印度	英国
CA				2						
CN	118									
DE		2		3	3				1	
EP				5	3			2	1	
FR				5	2					
IN				2					1	
JP		2		5	1	9				
RU			4	1						
SG	1									
UA			1							
US	2			3	11	1	1	1	1	
WO	1	1	2	2						1
ZA	1									



图6 Ti₂AlNb合金全球和中国主要专利申请人

Fig. 6 Leading patent applicants for Ti₂AlNb alloy in the world and in China

2 结论与建议

(1) Ti_2AlNb 金属间化合物本征塑性差是阻碍材料开发、产业化和工程化应用的关键问题和最大难点。因此,公开的专利内容大多围绕着如何克服固有脆性的基础上,在合金成分优化、工艺改进、性能提升和工程应用探索等方面进行研究创新。

(2) 自 Ti_2AlNb 合金被发现以来,国内外相关专利申请未间断,但从专利申请数量和申请主体上分析,直到“十二五”期间,在我国航空航天等高端装

备领域对轻质高温合金明确需求的牵引下,加速推进了 Ti_2AlNb 合金从“实验室研究”到“工程化应用研究”。

(3) 中国高校和研究所已经开始考虑在美国、乌克兰、南非等国进行专利布局。随着我国 Ti_2AlNb 合金技术成熟度不断提高,逐渐呈现出占据国际领先地位的趋势,未来应采用兼具进攻性和防御性混合专利申请策略,以保护我国 Ti_2AlNb 合金的研发成果。

参考文献:

- [1] 唐婷婷. 相变在 Ti_2AlNb 与Ti合金超塑性扩散连接中产生的界面效应 [D]. 太原: 太原理工大学.
- [2] 吴波, 陈露, 付金彪, 等. Ti_2AlNb 基合金热处理中的相结构与相变预测 [J]. 材料热处理学报, 2009, 30(4): 189-193.
- [3] 卢正冠. 粉末冶金 Ti_2AlNb 合金的制备及热变形研究 [D]. 安徽: 中国科学技术大学.
- [4] 王伟. 基于三种典型显微组织的Ti-22Al-25Nb合金力学性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [5] 薛晨. 等温锻造Ti-22Al-25Nb合金的显微组织演变与力学性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [6] 林鹏. Ti-22Al-25Nb合金板材高温变形行为与成形性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] 张建伟, 李世琼, 梁晓波, 等. Ti_3Al 和 Ti_2AlNb 基合金的研究与应用 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 336-341.
- [8] 郑友平. Ti-22Al-25Nb合金板条组织及其准解理断裂研究 [D]. 西安: 西北工业大学.
- [9] 王元红. Ti_2AlNb 合金微弧氧化陶瓷涂层的组织结构与高温性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] 李悦. Ti_2AlNb 合金氧化行为的第一性原理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- [11] ROWE R G. Microstructure, high strength, gas turbine engines: US5032357 A [P]. 1991.
- [12] 党薇. Ti_2AlNb 基合金显微组织演化及恒温氧化行为 [D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [13] EMURA S, HAGIWARA M. TiB particle reinforced Ti_2AlNb intermetallic compound matrix composite material and its production method: JP2002003977 [P]. 2002-1-9.
- [14] 王伟, 韩子茹, 王庆娟, 等. 一种高强耐磨无取向石墨烯/ Ti_2AlNb 复合材料的制备方法: CN110157933B [P]. 2020-11-06.
- [15] 张明达, 隋楠, 黄旭. 一种多元素复合抗氧化 Ti_2AlNb 合金及其制备方法: CN111647771A [P]. 2020-09-11.
- [16] 曹京霞, 张明达, 周毅, 等. 一种 Ti_2AlNb 合金及其棒材的制备方法: CN111394637A [P]. 2020-07-10.
- [17] 何永胜, 罗文忠, 雷强, 等. 一种 Ti_2AlNb 基合金及其铸锭的制备方法: CN106854725B [P]. 2019-03-19.
- [18] 贾建波, 刘文超, 徐岩, 等. Ti-22Al-25Nb/ Al_2O_3 复合材料的制备方法: CN108396174B [P]. 2019-11-05.
- [19] 骆良顺, 李东海, 王亮, 等. 一种 $TiAlNb$ 基层状复合材料及其制备方法: CN110202869A [P]. 2019-09-06.
- [20] 王伟, 韩子茹, 王庆娟, 等. 一种高强耐磨无取向石墨烯/ Ti_2AlNb 复合材料的制备方法: CN110157933B [P]. 2020-11-06.
- [21] 张国会, 秦仁耀, 黄帅, 等. 一种TiAl+ Ti_2AlNb 复合材料激光熔化沉积制备的方法: CN110449581A [P]. 2019-11-15.
- [22] 王伟, 周海雄, 王庆娟, 等. 一种Ag/ Ti_2AlNb 自润滑梯度复合材料的制备方法: CN110144477B [P]. 2020-12-01.
- [23] GERDES C P, NAZMY M Y, WETTSTEIN H D. Axial-flow thermal turbomachine: JP2004293549 [P]. 2004-10-21.
- [24] BENDERSKY L, BOETTINGER W J, BIANCANIELLO F S. Heterophase titanium aluminides having orthorhombic and omega-type microstructures: US5190602 [P]. 1993-3-2.
- [25] EMURA S, HAGIWARA M. O-phase base Ti-Al-Nb alloy and producing method therefor: JP2001152269 [P]. 2001-6-5.
- [26] EMURA S, HAGIWARA M. O-phase Ti-22Al-27Nb alloy and its production method: JP2001271131 [P]. 2001-10-2.
- [27] 魏志坚, 杨晋, 王莹, 等. Ti_2AlNb 基合金机匣环件的轧制成形及热处理方法: CN104139139A [P]. 2014-11-12.
- [28] 葛金锋, 占立水, 李明, 等. Ti_2AlNb 基合金异形环件反向轧制成形方法: CN112170749A [P]. 2021-01-05.
- [29] 李金山, 朱雷, 唐斌, 等. Ti_2AlNb 合金和TiAl粉末制备环环件的方法: CN108555305B [P]. 2020-10-20.
- [30] 李爱滨, 范国华, 陈锐, 等. 一种用真空压力浸渗法制备 Ti_2AlNb 合金的方法: CN103710554A [P]. 2014-04-09.
- [31] 左振博, 王庆相, 韩志宇, 等. 一种超细高纯度 Ti_2AlNb 合金粉末的制备方法: CN105537603A [P]. 2016-05-04.
- [32] 张永忠, 刘彦涛, 叶章根, 等. 一种激光增材制造的三相 Ti_2AlNb 基合金的热处理工艺: CN109332693A [P]. 2019-02-15.
- [33] 王俊勃, 黄晟, 张娇娇, 等. 一种粉末冶金法制备 Ti_2AlNb 合金的方法: CN111621659A [P]. 2020-09-04.
- [34] 刘长猛, 李自祥. 一种 Ti_2AlNb 基合金结构件的电弧增材制造方法及其所用装置: CN110977108A [P]. 2020-04-10.

- [35] GOOD S A, LEHOLM R B, SCHERTZER S K, et al. Titanium aluminide honeycomb panel structures and fabrication method for the same: US6758388 [P]. 2004-7-6.
- [36] BOEHLERT C J. Ti, Al and Nb alloys: US2007084530 [P]. 2007-4-19.
- [37] 梁晓波, 张建伟, 李世琼, 等. 一种Ti₂AlNb合金大尺寸盘件的锻造工艺方法: CN104001845A [P]. 2014-08-27.
- [38] VESELKOV, MIKHAIL M, NOCHOVNAIA, et al. Method for making blanks from alloys based on titanium intermetallic compound with ortho-phase: WO2017105290 [P]. 2017-08-10.
- [39] 李凯, 林莺莺, 李伟, 等. 一种制备Ti₂AlNb/Ti60双合金盘的方法: CN111570795A [P]. 2020-08-25.
- [40] 静永娟, 李晓红, 侯金宝, 等. 适用于钛合金钎焊和Ti₂AlNb合金钎焊的带状钎料及制备和钎焊方法: CN103567666A [P]. 2014-02-12.
- [41] 蔡雨升, 王清江, 杨锐. Ti₂AlNb基合金同材或异材钎焊中温Ti基钎料及其制备方法和钎焊工艺: CN111702278A [P]. 2020-09-25.
- [42] 步贤政, 李宏伟, 王志敏, 等. TA15/Ti₂AlNb异种材料的激光焊接方法: CN105397292A [P]. 2016-03-16.
- [43] 唐斌, 朱雷, 寇宏超, 等. 一种TiAl合金与Ti₂AlNb合金的扩散连接方法: CN106808079A [P]. 2017-06-09.

Research Status of Technology and Application of Ti₂AlNb Alloy Based on Patent Analysis

GAO Wei¹, BAO Fang-fang¹, FENG Xin¹, ZHU Lang-ping¹, DING Xian-fei², NAN Hai²

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. BIAM MATERIAL Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract:

In this paper, the invention patents of Ti₂AlNb alloy were retrieved, counted statistically, classified and analyzed from multi-aspects. It could be found that since the alloy was discovered, the related material optimization, processing technics and application research have been continuously carried out. As the potential application value of the Ti₂AlNb alloy has been explored, the number of relevant patent applications increased rapidly. So far, the Ti₂AlNb alloy has progressed to the second generation, the alloy composition design is more close to the actual engineering application, and the preparation process research objective is also developed from materials to structural parts. With the improvement of technology readiness levels, the scope of application research expands. Due to the high technological threshold in this research field, the global innovation bodies are concentrated in a few countries such as China, the U.S., France and Japan. In China, universities and research institutes are the main innovation bodies of the Ti₂AlNb alloy.

Key words:

Ti₂AlNb alloy; patents; technology; application