

基于全球专利分析的钛钢复合板 技术发展趋势研究

张维娜, 李军, 彭琳, 吴优, 梁光芬

(钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀钢集团研究院有限公司, 四川攀枝花 617000)

摘要: 基于全球钛钢复合板专利申请态势, 对钛钢复合板关键技术的发展变化进行深入分析, 结果显示, 中、日是钛钢复合板主要技术来源国, 日本起步相对较早, 但中国后来者居上, 专利申请数量全球排名第一; 钛钢复合板加工工艺是专利布局热点, 其中直接轧制法专利数量最多; 专利技术功效以降低成本和提高结合强度为主。基于以上分析结果, 从专利的视角, 为国内企业的技术创新和产品开发提出相关建议。

关键词: 钛钢复合板; 专利分析

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)03-0084-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.03.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Review on technology developments of titanium-steel clad plates based on global patent analysis

Zhang Weina, Li Jun, Peng Lin, Wu You, Liang Guangfen

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The development of key technologies of titanium-steel clad plates is reviewed based on a comprehensive mining of global patent applications. The results show that China and Japan are the major technology sources of titanium-steel clad plates. While Japan started earlier, China later rank first in patent applications in the world. Titanium-steel clad plate processing technologies are research hot spots, among which the direct rolling process route holds the largest share in a patent portfolio. The aims of the patented technologies is primarily to reduce the cost and improve the bonding strength. Based on the above findings, some suggestions about technological innovation and product development are proposed from a patent strategic perspective.

Key words: titanium-steel clad plates, patent analysis

0 引言

金属基复合材料在设计上能够弥补单一金属或合金不足, 具有优异综合性能, 成为当今材料科学的

一个研究热点^[1]。钛钢复合板是由钛板与钢板以层状方式组合而成的一类先进金属层状复合材料, 兼具钛的优良耐腐蚀性能和钢的高强度、低成本的特点, 在石化电力、盐化工、交通运输、海水淡化、海

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 四川省知识产权专项资金项目(2021-ZS-00052)。

作者简介: 张维娜, 1990年出生, 女, 陕西咸阳人, 工程师, 研究方向: 先进金属材料技术及发展, E-mail: 1197415196@qq.com。

洋工程和日常生活等领域应用广泛^[2-3]。随着钛钢复合板材料在不同领域应用的拓展,其生产制备技术得到了不断的发展。尤其是近些年,关于钛钢复合板的研究显著增加,主要集中在产品性能的提升和加工工艺的改进与创新方面。如杨文月^[4]、张杭永^[5]、沈春豫^[6]等人基于常规的爆炸复合法对钛钢复合板的界面组成和力学性能进行了提升研究;田世伟^[7]、黄钊^[8]、杨赟^[9]等人围绕直接轧制复合对钛钢复合板的双金属的流变行为、界面结构与调控进行了研究;白于良、朱坤亮等人则对钛钢复合板加工工艺进行了创新,分别采用热压扩散法、冷轧预复合-热轧法及冷轧法制备了钛钢复合板^[10-12]。由此可见钛钢复合板生产技术仍受不少学者关注,通过研究其制备技术能够为工业生产提供有益参考。

关于钛钢复合板技术发展变化的研究,领域内的研究主要从文献综述的角度对钛钢复合板的研究进展进行介绍。专利作为一种极具代表性的技术文献,承载着大量的技术信息,是分析技术变化的重要途径。目前,通过专利分析钛钢复合板技术发展变化的研究相对较少。笔者系统分析了钛钢复合板的全球专利数据,研究其技术发展变化,为企业技术创新和高附加值产品的研发提供参考。

1 技术分解与数据来源

以钛钢复合板制备流程为主线,按生产工序划分为3大类:前置工艺、加工工艺、后处理,将其作为一级技术分支。对一级技术分支作二级分解,得到11个二级技术分支,进一步根据专利初检情况进行扩展后,共得到13个二级技术分支,具体见图1。

基于智慧芽公司(简称“Patsnap”)全球专利检索分析数据库对钛钢复合板专利文献进行检索,具体过程及结果如下:①数据采集原则:在以全为主的基础上求精,对相关的技术分布采用了分类号与关键词相结合的检索原则。关键词的选取上以代表产品特点或技术特征的无歧义词汇为主,适当的利用文献词组对关键词进行拓展以减少杂质数据。②检索范围:检索时间截至2021年11月30日,检索对象为全球发明和实用新型专利。③数据处理:部分词汇具有多义性,具体检索时需通过更细致的逻辑策略或人工阅读的方法进行筛选、去噪,然后再通过分类、标引、二次标引等数据处理步骤进行分析。④检索结果:纳入研究的专利数量为869项,合并同族并进行数据分类、标引后为632项。



图1 钛钢复合板技术分解

Fig. 1 Technical disassembly of titanium steel composite plate

2 钛钢复合板专利整体申请态势

2.1 全球专利申请趋势

图2为钛钢复合板领域全球专利申请情况。由图2可见,钛钢复合板领域的全球专利申请呈现逐步增长的发展态势。1979年以前处于技术萌芽期,年专利申请量一直维持在2件以下。1980~2000年处于技术发展期,年专利申请量呈现几波小高峰,最高维持在15件左右。2000年以后处于技术成长期,专利申请量显著增长,2018年专利申请数量最多,达到60件。

2.2 全球区域布局分析

全球钛钢复合板领域的专利申请高度集中,由表1可见,统计期内,研发和技术创新主要集中在日本和中国为主的亚太地区,中、日两国专利申请量占全球总量的96%左右。

分析日本和中国区域的专利申请情况,由图3可以看出,日本是最早开发钛钢复合板技术的国家,尤其是20世纪80年代以后,其进行了大量系统的研究,极大的提高了日本钛钢复合板领域的生产技术水平,这一时期也取得了大量的专利。而2000年以后,日本未在该领域继续布局专利。

而中国早期钛钢复合板产品以进口为主,随着国内对钛钢复合板产品需求的增加,极大地促进了钛钢复合板产品的国产化,中国本土的申请人在此领域的专利布局也逐步增长,2006年以来共申请专利430件,专利申请数量排名全球第一。

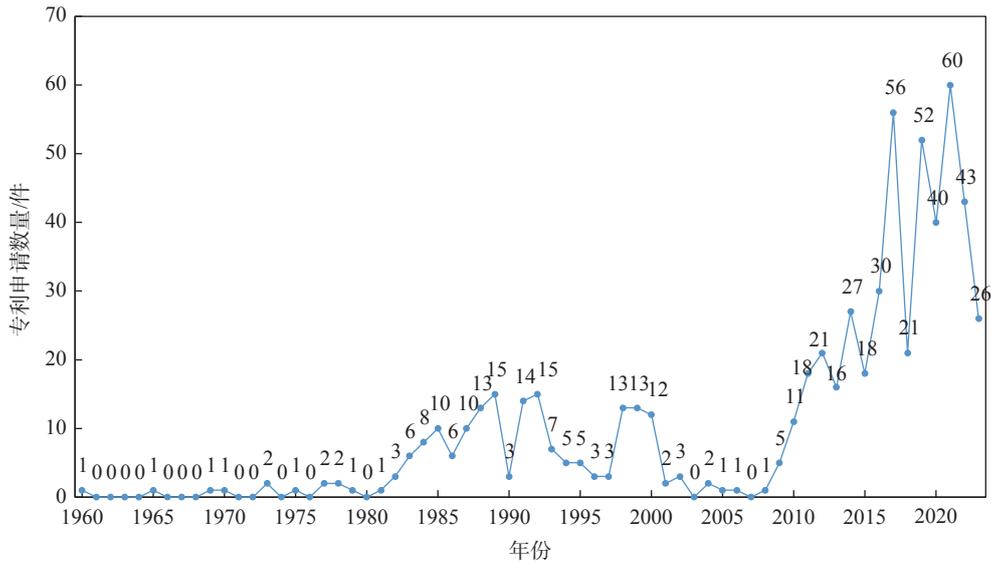


图2 钛钢复合板专利申请趋势
Fig. 2 Patent application trend of titanium-steel composite plate

表1 钛钢复合板全球专利布局情况

Table 1 Global patent layout of titanium-steel composite plate

当前申请(专利权)人区域	专利数量/件
中国	465
日本	142
德国	12
韩国	6
法国	3
美国	2
其他地区	2

2.3 主要专利申请人排名

图4为钛钢复合板领域专利权人排名情况。由图4可见,排名前15的申请(专利权)人主要以企业为主,仅有3所高校布局了相关专利。主要创新主体来自日本和中国,日本以新日本制铁(72件)、日本钢管株式会社(39件)和旭化成株式会社(22件)为主,中国则主要为攀钢集团、宝山钢铁及鞍钢股份。从专利法律状态来看,日本由于研发时间较早,专利已基本处于失效状态;中国企业后来者居上,有效和在审中专利数量较多。

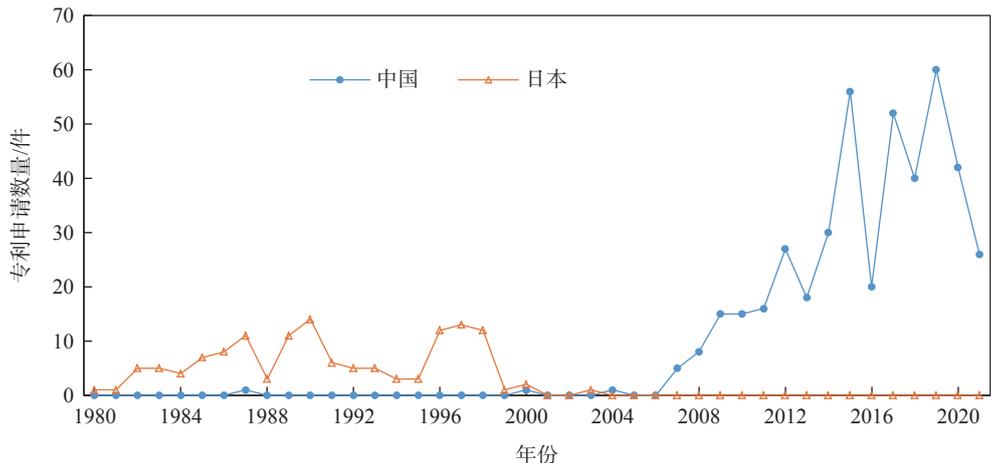


图3 中国和日本区域钛钢复合板1980~2020年专利申请情况
Fig. 3 Patent application profile titanium-steel composite plates in China and Japan

3 钛钢复合板关键技术

钛钢复合板相关专利主要涉及钛钢复合板前置工艺、加工工艺和后处理三大技术领域,见表2。从

专利数量来看,钛钢复合板的加工工艺为研究热点,专利申请数量最多,共计394件,其次是钛钢复合板后处理和前置工艺技术领域,分别申请专利252件和249件。

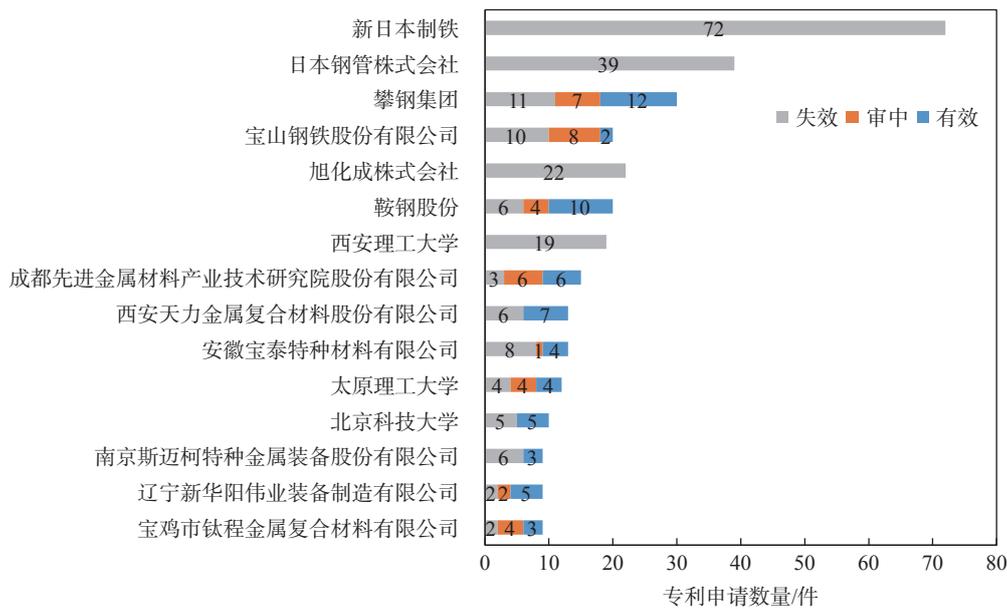


图 4 钛钢复合板专利权人排名情况
Fig. 4 Patentees ranking of titanium-steel composite plate

表 2 钛钢复合板各技术分支专利申请数量情况
Table 2 The number of patent applications for each technical branch of titanium-steel composite plate

工艺名称	处理方式	数量
前置工艺	表面处理	38
	组料/组坯/制坯	137
	原料准备	96
	爆炸复合法	90
加工工艺	直接轧制法	248
	爆炸-轧制复合法	35
	扩散复合法	13
	喷射沉积法	8
	退火	137
后处理	矫直/矫平	39
	吹扫抛丸	38
	检验	47
	切割分离	64
	成品表面处理	37

3.1 前置工艺

钛钢复合板前置工艺技术领域主要包括原料准备技术、组坯技术和表面处理技术^[13], 其中组坯技术专利申请数量最多, 共计 137 件, 表面处理技术专

利布局较少, 仅有 38 件专利申请。

前置工艺中表面处理技术主要包括丙酮清洗 (CN112828039A、CN110681974A、CN102489506B)、酸洗 (CN105107841B)、钢丝刷打磨 (CN112828039A、CN110681974A、CN102489506B) 和砂纸打磨 (CN112828039A、CN110681974A、CN102489506B) 等。

组坯技术主要涉及中间层相关技术, 目前中间层金属主要有 DT4 纯铁、IF 钢、铌、钼、镍、银、铜、钒和铝等^[2]。使用铌 (CN206796714U)、钒 (CN106040741A)、铜 (CN104998903A)、镍 (CN113145981A) 等作为中间层, 是由于这些金属往往不易与钛、钢生成金属间化合物, 可避免脆性相的生成; 而采用 DT4 纯铁和 IF 钢 (CN107695098A、CN108393653A) 作为中间层主要是为了阻隔 C 原子的扩散, 并在一定程度上降低成本。

鞍钢股份和攀钢在无中间层技术领域布局了一定的专利, 通过对轧制工艺和基层金属的技术改进, 提升复合板结合强度并降低生产成本。如鞍钢股份在专利 CN109692873B 中, 一方面采用大厚度比例组坯+大压下轧制技术, 另一方面采用较高碳含量基材和无添加其他金属过渡层, 通过结合这两种技术方案, 实现了提升复合板结合强度、降低成本的目的。

3.2 加工工艺

国内外研究者对钛钢复合板的制备工艺做了大

量研究^[14]。目前,5种主要方法的专利申请趋势见图5。其中直接轧制法专利布局数量最多,目前已达248件,主要的技术路线为原料准备→表面处理→组料→加热→轧制→热处理→矫直,这种方法生产效率高、质量稳定,适合钢铁企业生产复合板;爆炸复合法是出现较早的加工工艺技术,20世纪70年代便有相关专利产出,最早在此领域布局的是日本的旭化成,1971~1982年便在此领域布局

了9件专利。爆炸复合法的技术路线为原料准备→表面处理→组料→爆炸复合→退火→矫直→检验,是目前应用最广的生产方式;扩散焊接法投资较大、生产效率低、不适合规模化生产;喷射沉积法不适合规模化生产大面积和较厚的复合板材,这两种加工工艺相关专利申请较少,专利累计申请数量分别为13件和8件。

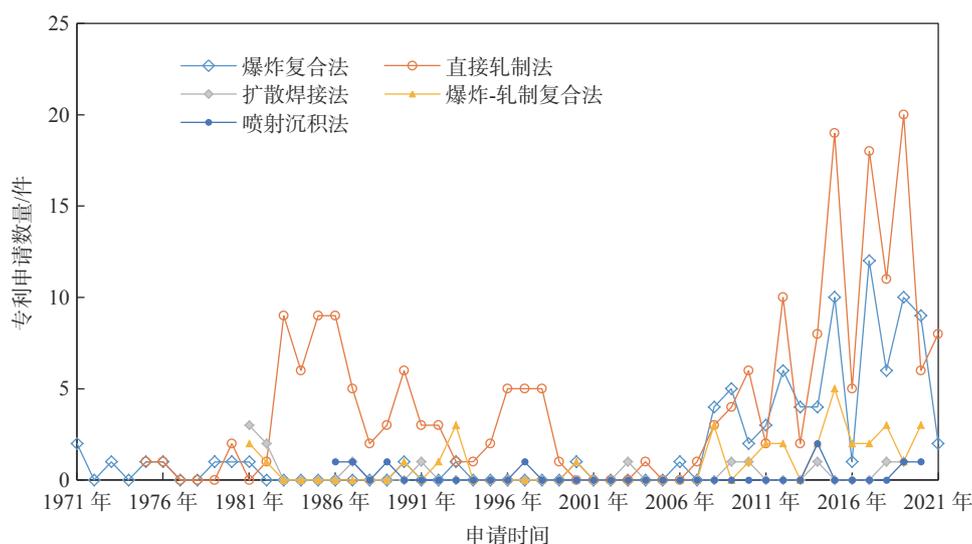


图5 钛钢复合板加工工艺细分技术专利申请趋势

Fig. 5 Patent application trend of subdivision technology of titanium-steel composite plate processing technology

钛钢复合板加工工艺主要申请人及其专利申请情况见表3。由表3可见,日本住友金属、攀钢和日本制铁在直接轧制法技术领域专利产出较为突出,均布局专利20余件;安徽宝泰在爆炸复合法技术领域具有一定的专利数量优势,专利申请数量排名全球第一,在此领域共布局专利12件;爆炸-轧制复合法技术领域主要申请人为西安天力,共布局专利4件;喷射沉积法技术领域主要申请人为宝山钢铁,共布局专利2件。

其中,攀钢的直接轧制法主要是通过对中间层材料、是否抽真空、组合坯料加热温度及加热时间、终轧温度、总变形量及轧制速度等元素的调整,达成减少金属间化合物的产生,提升复合钢板结合强度,降低成本的目的。其中,中间层材料主要包括镍、铜、IF钢以及无中间层,真空度均为 1×10^{-2} Pa及以下(除CN104874605B是在大气环境下,CN104874634A无需真空焊接设备),轧制速度大多为0.1~2 m/s。另外,攀钢还通过采用较高的终轧

温度方式,使界面化合物破碎后产生微孔洞的可能性减小(CN105080997B);以及限定终轧温度高于 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分步冷却的方法,避免界面化合物的大量生成(CN105080998B)。

住友金属主要通过对中间层材料、热轧温度的调整提升钛钢复合板的结合强度。早期住友金属更偏向于使用多层过渡层金属,如“铜层+镍层”(专利JP1985170586A)、“铜层+钼层”(专利JP1985261683A)、“纯铁板+镍板”(专利JP1992071635B2)等,进入21世纪后,住友金属提出了无中间层钛钢复合板制备技术(专利JP3047752B2),主要技术方案为使用多次轧制的方法,当以碳含量为0.01%以下的钢材为基材时,第一次热轧温度为 $950 \sim 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$,压下率为15%以上,第二次热轧温度为 $600 \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,压下率为5%以上,轧制一次或多次;当以碳含量为0.01%~0.05%的钢材为基材时,第一次热轧温度为 $950 \sim 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$,压下率为20%以上,第二次热轧温度为

600 ~ 900 °C, 压下率为 10% 以上, 轧制一次或多次。通过对基材碳含量、热轧温度和压下率的调整, 提升钛钢复合板的结合强度。

表 3 钛钢复合板加工工艺主要申请人(前 5 名)
Table 3 Main applicants for titanium-steel composite plate processing (Top 5)

加工工艺	主要申请人(TOP5)	专利申请/件
爆炸复合法	安徽宝泰	12
	西安天力	9
	旭化成	8
	宝鸡钛程	8
	南京斯迈柯	4
	住友金属	26
	攀钢集团	22
直接轧制法	日本制铁	21
	日本钢管	16
	宝山钢铁	11
	旭化成	4
	兰州理工大学	1
	太原理工大学	1
	日本制铁	1
扩散焊接法	三菱重工	1
	西安天力	4
	中国石油天然气	2
	宝鸡石油钢管	2
	晋西工业	2
	北京科技大学	2
	宝山钢铁	2
爆炸-轧制复合法	日新制钢株式会社	2
	新日本制铁	2
	宝鸡石油钢管	1
	中国科学院金属研究院	1

日本制铁的直接轧制法同样也是通过中间层和热轧温度的调整, 提升钛钢复合板的结合强度。除此之外, 日本制铁还提出了通过限制热轧钢板的总压下率的下限, 防止在界面处残留咬合状的金属间化合物, 从而提高接合界面的耐剥离性(专利 JP1994155049A); 以及通过铝板或铜板将钛板和钢板接合, 制造复合金属板的方法, 其中钛板的加热温度在 400 ~ 800 °C, 钢板的加热温度在 600 ~ 910 °C, 铝板的加热温度在 400 °C 以下, 将铜板的加热温度设为 200 ~ 600 °C, 在氧气浓度为 3% 以下的环境中送入压接辊, 在上述加热温度下以 30% 以下的压下率压接。由于钛板和钢板没有发生加工硬化而接合, 所以可以不经过退火就直接作为最终产品使用(专利 JP1995001161A)。

3.3 后处理工艺

后处理技术包括热处理技术、矫直技术、吹扫抛丸技术、检验技术、切割分离技术和成品表面处理技术, 其中热处理技术领域专利布局数量最多, 共计 137 件, 占有后处理相关技术的 55.02%。热处理过程退火温度影响钛钢复合板的界面组织和机械性能, 为防止 Ti、Fe 与 C 在界面生成脆性的金属间化合物, 一般在 500 ~ 550 °C 温度范围对其进行热处理。从当前各申请人热处理退火温度设置可以发现, 退火加热温度大多维持在 450 ~ 650 °C, 具体数据见表 4。

3.4 技术路线变化分析

钛钢复合板技术路线变化见图 6。由图 6 可见, 钛钢复合板技术最早由日本企业开发, 1980 ~ 1990 年在日本得到发展, 起初主要采用爆炸复合法生产, 利用爆炸产生的冲击力使两层或者多层金属板材实现界面结合。之后为了响应市场需求生产更宽、更长规格的产品, 旭化成采用爆炸-轧制复合工艺生产具有薄中间金属层的钛钢复合钢板, 且产品具有优异的结合强度。这一时期为了进一步降低生产成本, 住友金属公司基于钢铁的热轧设备开发了直接轧制法制造钛钢复合板, 同时中间层材料也经历了从有到无的演变。如 1984 年住友金属申请了专利 JP1985170586A, 其使用的中间层金属为“铜层+镍层”, 1994 年住友金属在专利 JP3047752B2 中, 转为使用无中间层的方式, 使用多次轧制的方式, 通过对基材碳含量、热轧温度和压下率的调整以生产钛钢复合板。

表4 部分专利的退火加热温度范围
Table 4 Annealing temperature ranges of some patents

序号	公开(公告)号	申请人	加热温度/℃	保温时长/min
1	CN102794607B	西安天力金属复合材料股份有限公司	500 ~ 650	60 ~ 300
2	CN103320717B	南京钢铁股份有限公司	450 ~ 650	10 ~ 120
3	CN1110202249B	太原钢铁(集团)有限公司	540	60
4	CN106269963B	广汉程明新材料科技有限公司	500 ~ 700	
5	CN109304367B	瓯昆科技温州有限公司	680 ~ 700	30 ~ 120

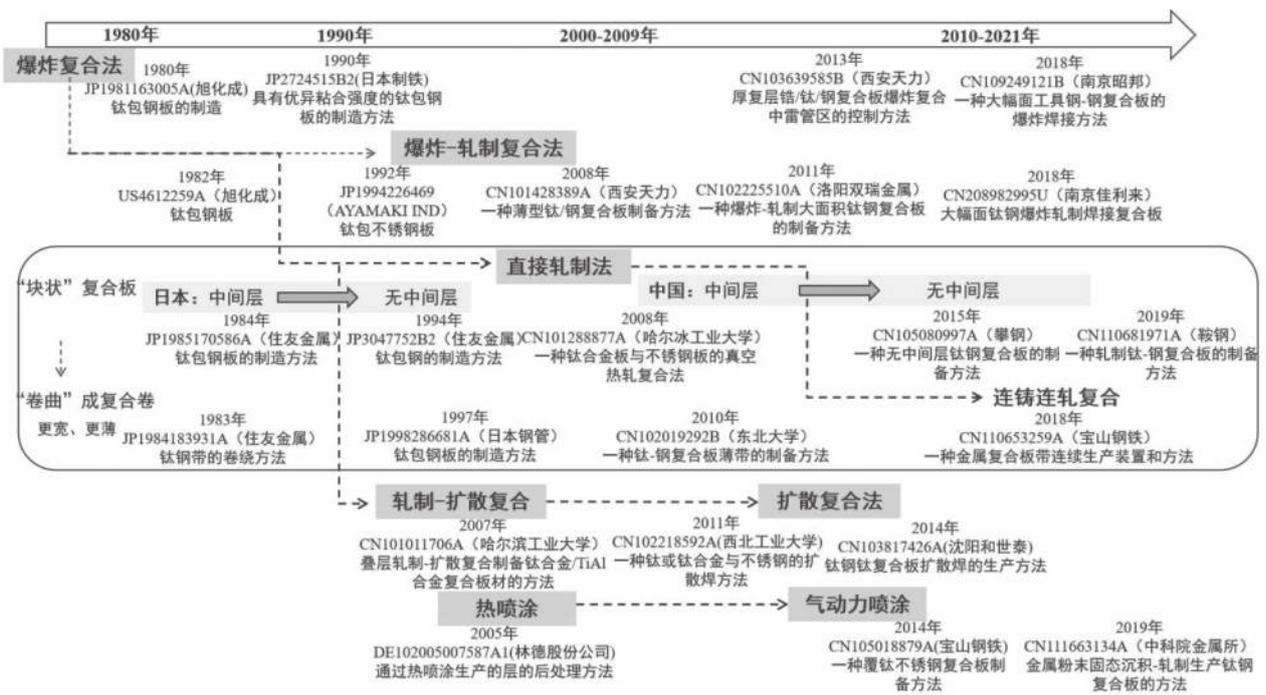


图6 钛钢复合板技术路线变化
Fig. 6 Technology roadmap of titanium-steel composite plate

国内钛钢复合板制造技术由日本引进,2010年以后得到快速发展,其技术演进路线与日本大体相近,也主要是基于爆炸复合、爆炸-轧制复合及直接轧制法三种方式生产。其中,直接轧制法更具规模化优势,可生产更薄规格和更宽幅的低成本复合板材料,仍是今后的发展方向。值得注意的是基于直接轧制法生产的薄规格钛钢复合板可进一步通过钢铁生产流程卷曲成钛钢复合卷,具有显著的规模效益和成本优势。另外,随着连铸连轧技术在金属复合板带材料生产中的应用,直接轧制法生产钛钢复合板的工艺流程将有望进一步缩短,但需要关注该技术是否可以实现工业化生产。

此外,在2000~2010年期间,扩散焊技术和喷涂技术也开始应用于钛钢复合板领域,尽管有专利公开了相关生产方法,但由于制备效率低、生产尺寸受限及难以工业化推广等因素,限制了该技术的发展,目前产出的专利数量较少,市场上也未见基于这两种方法生产的产品。

3.5 技术功效分析

表5显示钛钢复合板的技术功效,可以看到其主要集中在降低生产成本和提高产品界面强度与结合强度方面,前置工艺中的组料和加工工艺中的直接轧制法对实现两种技术功效较为重要,也是各申请主体技术创新和改进的重要方向。

表5 钛钢复合板技术功效
Table 5 Technical efficiency comparison of titanium-steel composite plate

技术/功效	降低生产成本	提高界面强度	提高结合强度	提高表面质量	提高生产安全性	提高生产率
前置工艺						
组料	117	73	60	30	29	24
原料准备	68	37	65	19	21	6
表面处理	32	26	21	9	12	4
直接轧制法	172	99	129	41	32	54
爆炸复合法	55	41	50	13	24	11
加工工艺						
扩散焊接法	6	8	10	0	2	2
喷射沉积法	8	5	5	3	1	0
爆炸-轧制复合法	28	20	20	11	9	9
切割分离	49	36	42	12	18	10
成品表面处理	31	26	19	8	12	4
后处理						
吹扫抛丸	27	21	21	4	12	5
热处理	106	70	73	36	21	39
矫直	33	18	26	17	17	4
检验	40	24	16	14	21	2
焊接	27	26	10	2	5	6
应用领域	17	11	1	5	10	2

此外,从应用领域来看也有相关专利申请,主要为由钛钢复合板制成的设备、产品,包括由钛钢复合板制成的锅具、反应釜、筒体、管道及结构件,这也印证了钛钢复合板的应用范围正在不断扩大。

4 结语

基于钛钢复合板领域的专利发展态势及关键技术分析,从专利视角为国内企业及创新主体的技术创新和产品开发提供以下建议:

1) 围绕降低成本、提高强度进行技术改进与升级

降低成本和提高强度是钛钢复合板技术改进重点。目前能够保证产品结合强度稳定控制在国标(GB/T 8547-2019)中的0类以上(剪切强度 ≥ 196 MPa),且成本较低的技术有利于形成产品的技术优势,在同类竞品中竞争力较强。从目前申请的专利技术来看,提高结合强度方面,直接轧制法的成本和技术优势较大,主要通过组坯加热、改进轧制工艺以提升钛钢复合板的结合强度,同时辅以对组坯方式的创新,包括组坯的结构设计、组坯的焊接方式等实现较高的结合强度。降低成本方面,主要在中间层原料的改进上,主要有选用DT4纯铁、IF

钢等低成本材料或无中间层技术。

2) 关注直接轧制法生产钛钢复合卷技术

基于直接轧制法生产更薄规格的钛钢复合卷已在国内取得显著进步,攀钢目前已试制出了相关产品,并在石化行业取得了良好的使用效果。从全球范围内专利布局来看,仅有少数企业布局了相关专利。因此,建议生产企业或研发单位关注直接轧制法生产钛钢复合卷技术,可与领域内的高等院校联合开发,提高研发效率,提早布局钛钢复合卷生产技术专利,强化企业自主知识产权保护范围。

3) 针对多种应用场景进行产品开发

国内申请主体针对钛钢复合板的应用场景进行了专利布局,如用于燃煤电厂湿法脱硫(CN104259203B)、海洋工程(CN105689882A)、发电厂烟囱(CN107052630B、CN207999118U)、PTA装置(CN203197107U)等领域,可满足市场的不同需求。因此企业应与下游市场紧密结合,深挖应用场景与客户联合开发相关产品。

4) 根据产品市场情况,开展海外专利布局

为了有效保护产品和技术,形成竞争优势,国外企业一般都会在产品未上市前,就对关键技术申请相关专利,并迅速进行全球专利布局,对产品进行全

方位保护。国内钛钢复合板领域中,宝钢具有良好的海外布局意识,在全球6个国家或地区进行了专利布局,而国内其他企业多仍以本土为主。随着我国海洋强国战略的实施,海洋工程领域对钛钢复合

板产品的需求会有新增长,涉及海外市场工程建设可能会发生知识产权风险,因此,在当前钛钢复合板技术领域海外专利布局数量极少的情况下,应提早申请国际专利,以防范潜在的侵权风险。

参考文献

- [1] Chen Xingzhang. Review of laminar composite metal material manufacturing technique[J]. *Nonferrous Metal Materials and Engineering*, 2017, 38(2): 63-66.
(陈兴章. 层状金属复合材料技术创新及发展趋势综述[J]. *有色金属材料与工程*, 2017, 38(2): 63-66.)
- [2] Bai Yuliang, Liu Xuefeng, Wang Wenjing, *et al.* Current status and research trends in processing and application of titanium/steel composite plate[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(1): 85-96.
(白于良, 刘雪峰, 王文静, 等. 钛/钢复合板及其制备应用研究现状与发展趋势[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(1): 85-96.)
- [3] Li Junhan, Sun Ning, Ma Lan, *et al.* Progress in preparation technology and application of titanium-steel composite sheets[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020, (14): 34-36.
(李俊翰, 孙宁, 马兰, 等. 钛钢复合板的制备技术进展及应用[J]. *世界有色金属*, 2020, (14): 34-36.)
- [4] Yang Wenyue, Sun Qian, Li Bing, *et al.* Study on inhomogeneity of interface microstructure and mechanical properties in explosive welding of titanium-steel clad[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2021, 38(12): 15-21.
(杨文月, 孙倩, 李冰, 等. 钛钢爆炸焊接结合界面组织及力学性能不均匀性研究[J]. *压力容器*, 2021, 38(12): 15-21.)
- [5] Zhang Hangyong, Zang Wei, Guo Longchuang. Microstructure and mechanical properties of interface for titanium/steel clad tube sheet prepared by explosive welding[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(6): 48-51.
(张杭永, 臧伟, 郭龙创. 爆炸焊接法制备的钛/钢复合管板界面组织与力学性能分析[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(6): 48-51.)
- [6] Shen Chunyu, Fan Keshe, Li Ying, *et al.* Research on residual stress distribution in explosive welding titanium steel clad plate[J]. *China Chemical Industry Equipment*, 2019, 21(4): 31-35.
(沈春豫, 樊科社, 李莹, 等. 爆炸焊接钛/钢复合板残余应力分布状态研究[J]. *中国化工装备*, 2019, 21(4): 31-35.)
- [7] Tian Shiwei, Jiang Haitao, Liu Jixiong, *et al.* Rheological behavior and hot rolling process of titanium / steel clad plate[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(24): 4141-4146.
(田世伟, 江海涛, 刘继雄, 等. 钛钢复合板双金属的流变行为及轧制制备[J]. *材料导报*, 2019, 33(24): 4141-4146.)
- [8] Huang Zhao, He Weijun, Chen Zejun. Interface structure and failure behavior of TA2/stainless steel/Q235 composite plate[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2021, 42(11): 11-19.
(黄钊, 何维均, 陈泽军. TA2/不锈钢/Q235复合板的界面结构和失效行为[J]. *材料热处理学报*, 2021, 42(11): 11-19.)
- [9] Yang Yun, Ding Wenhong, Wu Mengxian, *et al.* Influence of interfacial microstructure control on bonding strength of titanium-steel composite plate[J]. *Hot Working Technology*, 2023, (7): 56-61.
(杨贇, 丁文红, 吴梦先, 等. 界面组织调控对钛/钢复合板结合强度的影响[J]. *热加工工艺*, 2023, (7): 56-61.)
- [10] Bai Yuliang, Li Jingkun, Liu Xuefeng, *et al.* Effect of induction heating temperature on the interface of cold-hot-rolled titanium/steel composite plates[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(12): 1639-1646.
(白于良, 李晶琨, 刘雪峰, 等. 感应加热温度对冷-热轧制成形钛/钢复合板界面的影响[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(12): 1639-1646.)
- [11] Liu Xuefeng, Bai Yuliang, Li Jingkun, *et al.* Influence factors of interfacial bonding strength of cold rolled titanium / steel laminated composite plates[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(7): 119-126.
(刘雪峰, 白于良, 李晶琨, 等. 冷轧成形钛/钢层状复合板界面结合强度的影响因素[J]. *材料工程*, 2020, 48(7): 119-126.)
- [12] Zhu Kunliang, Zhu Peixian, Zhou Shenggang, *et al.* Performance of Ti-Fe composite prepared by hot-pressing diffusion welding method[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(20): 69-71,76.
(朱坤亮, 竺培显, 周生刚, 等. 热压扩散焊接法制备钛-钢复合材料及性能研究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(20): 69-71,76.)
- [13] Hu Jie, Xie Rong, Du Xunbai. Processing technology of titanium steel clad plate and its application in ship and ocean engineering[J]. *Jiangsu Ship*, 2016, 33(6): 6-8,12.
(胡杰, 谢荣, 杜训柏. 钛钢复合板加工技术及其在船海工程中的应用[J]. *江苏船舶*, 2016, 33(6): 6-8,12.)
- [14] Wang Kuan, Zhu Haiping, Song Zhenli, *et al.* Review on characteristics of interface of titanium clad steel plate[J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(4): 4025-4032.
(王宽, 朱海平, 宋振莉, 等. 钛钢复合板界面特征研究述评[J]. *功能材料*, 2017, 48(4): 4025-4032.)