

# 不锈钢复合板生产技术综述

井玉安<sup>1</sup>, 王晨宇<sup>2</sup>

(1. 辽宁科技大学 材料科学与工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 鞍山高新技术产业开发区, 辽宁 鞍山 114044)

**摘要:**阐述了目前不锈钢复合板的生产方法和制备技术, 分析了各种方法的优缺点。在不锈钢复合板的生产和制备方法中, 爆炸焊接热轧法和钎焊连接热轧法比较成熟, 已得到普遍应用, 但具有很大的局限性。反向凝固法和电磁连铸法具有很强优势, 但工艺还不成熟, 有待进一步深入研究。

**关键词:**不锈钢; 复合板; 钎焊; 反向凝固

**中图分类号:** TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4410(2007)06-0590-05

不锈钢因具有良好的不锈和耐蚀特性而得到广泛应用, 但由于不锈钢中含有高比例的镍铬等稀有金属而使其价格居高不下。近些年来, 由于镍价飙升, 导致含镍较高的 300 系不锈钢价格一涨再涨, 使得不锈钢生产企业不得不加大开发低镍和无镍不锈钢。即便如此, 不锈钢的价格仍然很高, 如 200 和 400 系不锈钢的价格均在每吨两万元以上。因此, 开发不锈钢的替代产品已经成为世界各国材料研究人员关注的重要课题。不锈钢复合板材通常是以不锈钢做面材, 以普通低合金钢或其它合金材料为基材, 通过一定连接方式结合成一体的复合板材, 兼具不锈钢和其它合金材料的优点, 在价格上具有同规格纯不锈钢无法比拟的优势。因此, 不锈钢复合板材自诞生以来就一直受到人们的高度重视。

金属复合板的研究最早是美国于 1860 年开始的, 工业性生产始于 20 世纪 30 年代。当时美国为了降低成本, 提高强度, 开始了镍复合钢板的生产, 其后不断进行了旨在提高结合性能的制造技术开发。20 世纪 30 年代, 苏联也对铝、锡、钢等金属与合金的复合材料进行了初步研究, 所采用的生产工艺主要有轧制法、铸造法、爆炸法、扩散焊接法等。其中, 对冷轧复合法的工艺及力学性能研究较为深入, 试生产了 08F 钢基体上复合 18-8 型不锈钢的三层耐蚀复合板<sup>[1]</sup>。20 世纪 50 - 60 年代, 英国伯明翰大学等单位对固相复合进行了较为系统的研究, 取得了很大成就。日本在复合材料方面的研究虽较晚, 但进步迅速, 近年来成为从事金属复合材料研究最多的国家之一<sup>[2]</sup>。我国的复合板研制始于 20 世纪 60 年代初, 主要方法有爆炸焊接、爆炸焊接 + 轧制、热轧、冷轧等, 主要研究单位有上海钢铁研究所、东北大学、北京科技大学、武汉科技大学等。目前, 太钢、济钢、柳钢等已实现不锈钢的复合生产<sup>[3-6]</sup>。经过一个多世纪的发展, 不锈钢复合生产技术不断提高, 生产方法也日益增多, 目前大致可归结为固-固相复合法、液-固相复合法以及液-液相复合法三大类。图 1 给出了金属复合板材的生产方法。

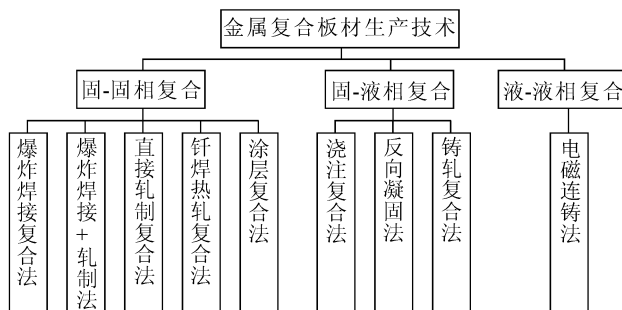


图 1 金属复合板生产方法

Fig. 1 Process of metal clad plate

收稿日期: 2007-10-20。

作者简介: 井玉安(1967 - ), 男, 辽宁锦州人, 副教授。

## 1 固-固相复合法

固-固相复合法相对比较成熟,种类也比较多。主要包括焊接复合法、直接轧制复合法、焊接+轧制法、涂层复合法等。其中,在焊接复合法中,根据焊接方式的不同,又包括爆炸焊接、钎焊法、扩散焊接法等。同时,在焊接成形以后,一般都需要进行压力加工,最终获得大幅面的复合板材,故焊接法通常与轧制法相结合,形成焊接+轧制复合法。在涂层复合法中,根据获得涂层方法的不同,又可分为热喷涂层法、喷射沉积法、感应熔涂法、自蔓延涂层法等多种方法。这些方法通常也会与轧制相结合,以获得表面光洁、结合强度高的复合材料。

### 1.1 爆炸焊接复合法

利用炸药爆炸产生的爆轰波的冲击作用,使被复合的金属和基体金属产生相互撞击,极短时间内,在两者表面形成一层很薄的塑性变形区,结合面之间发生机械及冶金结合,实现两种金属的焊接,如图2所示。该方法是集压力焊、熔化焊和扩散焊三位一体的焊接方法。爆炸焊接复合法有以下几方面优点:(1)可使熔点、强度、热膨胀系数等性能差异极为悬殊的金属实现复合,如:铝/铜、铅/钢等;(2)该法是在瞬间完成,其复合界面几乎没有扩散或者仅有程度很小的扩散,因而可避免脆性金属化合物的生成,可实现诸如钛/钢、铝/钢、钽/钢等金属的复合;(3)可实现异形件的复合,可对金属管材进行外包与内包复合,还可以进行一次多层复合等;(4)复合材料的结合强度高于其它方法,而且速度快。其缺点是由于射流的作用使复合界面呈波浪形,同时由于炸药的存放、爆破地点的选择、噪音的处理、人身安全的保障及污染严重等一系列问题而使得该法不易被推广使用。目前,爆炸复合技术在国内外多学科学者的努力下,已经取得了比较完备的发展,成为一门广泛应用于宇航、石油、化工、机械、原子能等工业工程领域的比较成熟的复合技术。但有些方面如界面结合层的冶金结构、界面层内结合时效行为及力学行为、界面同相反应以及覆层厚度、多层金属复合等仍是国内外学者关注的焦点。我国太钢、四川宜宾等很多生产厂家就是采用爆炸复合方法生产不锈钢复合板的<sup>[1]</sup>。

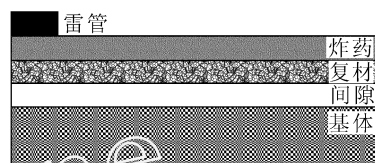


图2 爆炸复合工艺

Fig. 2 Explosive combined processing

### 1.2 爆炸焊接+热轧法

该方法将经爆炸焊接的复合板作为原料来进行热轧,最终获得大幅面的复合板、带的方法,兼有爆炸焊接法和热轧法生产的优点。增加了生产的灵活性,便于推广,缺点是产量、生产率及成材率都较低,产品质量差,尺寸精度低。爆炸焊接和传统压力加工技术(轧制、冲压、锻压、拉拔等)的联合是爆炸焊接技术的延伸和发展,它使复合板的性能有很大改善,特别是以前很难达到技术要求的界面剪切强度得到明显的提高。在复合板的开发研制中,许多单位不仅研究了生产工艺,对复合界面成分、组织结构的变化及对性能的影响也进行了研究。太钢、重钢五厂、北京矿务局爆炸加工厂、上海浦钢和营口中板厂等已采用该法生产出不锈钢复合板<sup>[7]</sup>。

### 1.3 直接轧制复合法

轧制复合法通过轧机的轧制压力使金属复合,是生产复合板的又一种较普遍的方法,分为热轧复合法和冷轧复合法。目前,世界上80%的复合板采用该法生产。该法可以比较方便地生产大尺寸的复合板,可以减少非金属杂质对结合界面的污染,可在基材和不锈钢之间加入镍,形成保护膜,防止不锈钢层增碳。

热轧复合的基本原理是将两种表面洁净的金属相互贴合在一起,有时也将边缘焊接封严,在一定的温度和轧制压力作用下实现异种材料的冶金结合。热轧复合时界面容易结合,但必须注意加热温度和保温时间的控制,以防有害金属化合物的生成。热轧复合对轧机的要求不高,生产效率也较爆炸复合等要高,可进行热轧复合的材料种类也很多。但也有其局限性,工艺复杂,界面结合强度不高,复合材料的

厚度沿轧制方向可能不均匀,每对板坯的厚度比的差异有可能造成最终产品性能的不稳定等。

冷轧复合法是凭借大压下量的冷轧将重迭的二层或多层金属轧制贴合在一起,使其产生原子结合,并随后通过扩散退火,使之强化。与热轧复合法相比,冷轧复合时的首道次变形量更大,一般要达到 60% - 70%,甚至更高。冷轧复合的优点在于省去了其它各法的精整工序,从冷轧带坯开始生产,能够成卷轧制,并且组元层间的厚度比均匀,尺寸精确,层间也不会出现热轧复合时普碳钢中的碳向不锈钢一侧扩散的情况,产品性能稳定,可以实现多种组元的结合。但冷轧复合轧机的投资大,冷轧复合无法生产厚度较大的产品,使其应用受到一定程度的限制<sup>[8]</sup>。

#### 1.4 钎焊热轧法

钎焊是采用比母材熔点低的金属材料作钎料,将工件和钎料加热到高于钎料熔点但低于母材熔点的温度,利用液态钎料润湿母材、填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接的焊接方法。与传统的熔焊比较,钎焊的最大特点是母材不熔化,焊接温度低,焊接变形小,焊件尺寸精度高,可进行封闭焊接。钎焊 + 热轧法生产不锈钢复合板投资少、成本低、工艺独特、规格多样齐全,克服了爆炸法生产工艺无法解决的工艺特性,有效的解决复合层接口处的分体现象,可提高复合界面的结合强度,从而提高复合成功率。该方法在经过表面处理的复材与基体之间置放一种助焊合金,将组合件放入真空或气氛炉内进行钎焊,焊接牢固后再进行热轧或冷轧至成品厚度。焊接时,钎料的主要作用是提高两层之间的润湿性,使两表层间达到原子间结合,从而提高复合材料的结合强度。因此,所用钎料的熔点必须低于母材熔点,同时必须具有较高的连接强度。目前,济钢和柳钢均采用该法生产不锈钢复合板<sup>[9]</sup>。

#### 1.5 喷射沉积轧制法

利用喷射沉积技术将一种合金熔体喷涂在另一种基体金属表面,使基体金属表面具有较高的耐酸碱腐蚀、耐磨损和装饰性等功能,如图 3 所示。人们已经利用该技术开发出制备复合钢板的实验装置,取得对实际生产有重大参考价值的实验结果和分析结论,为进一步大批量生产高质量的复合钢板新工艺提供理论和实验依据。该方法的主要的研究内容有:利用喷射沉积法制备高结合率复合钢板工艺的可行性分析;利用喷射沉积法制备复合钢板的实验装置设计;选用不锈钢作为涂层材料,进行复合钢板的喷涂实验;以不锈钢材料为前提,进行最佳涂层厚度的评判;开发纳米材料喷涂新技术,用于局部损坏构件的再生修复等<sup>[10,11]</sup>。

#### 1.6 感应熔涂轧制法

感应熔涂是将不锈钢合金粉涂敷在基体钢材表面,在真空或保护性气氛下进行感应熔化,使得覆层与基材之间形成牢固的冶金结合。感应加热可使涂层熔制热源得到有效利用,降低对基体金属的热影响,同时,接合效率高。该法也存在一定缺点,例如,感应加热温度不均匀,熔涂界面质量不稳定等。该方法目前仍处于试验研究阶段<sup>[12,13]</sup>。

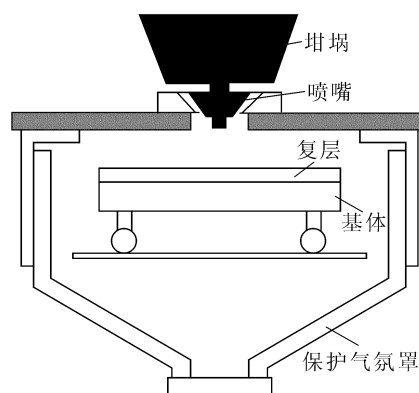


图 3 多层喷射沉积复合工艺

Fig. 3 Combined processing of multilayer spray deposition

## 2 液-固复合法

液-固相复合法包括浇铸复合法、反向凝固法、喷镀复合法、铸轧法等。

#### 2.1 浇铸复合法

浇铸复合法是将两块不锈钢板叠合,中间涂上剥离剂,四周焊合后放在铸模进行组合,将碳素钢液注入铸模内,在铸模内完成不锈钢和碳素钢的复合。为防止浇铸时不锈钢板氧化,形成表面夹杂,不锈钢外表面涂上防氧化剂。待碳素钢液完全凝固后再进行轧制,轧后将焊合的边部切掉,即可得到两块单

面不锈钢复合板。为了避免复合层板被钢水熔化,钢板需要有一定的厚度,因而板厚受到限制<sup>[14]</sup>。

## 2.2 反向凝固复合法

反向凝固工艺是由德国冶金工作者于1989年开发的一种薄带连铸工艺。该方法是将一定厚度的母带从反向凝固器内的钢液中通过,使母带表面附近的钢水迅速降温,在母带表面凝固形成新生相,并在新生相处于半凝固状态时进行轧制,得到表面平整、厚度均匀的热轧薄带,如图4所示。该技术是一种生产双金属复合材料的新型熔合技术,具有工艺简单、效率高、能耗低、产品质量高等优点,可生产不锈钢覆层小于1 mm的复合板材,能够实现生产过程的连续化和短流程化,但操作难度较大<sup>[15,16]</sup>。

## 2.3 铸轧复合法

此方法是将铸造法与轧制法结合起来,固态金属热浸镀技术与液态金属铸轧技术的有机结合,将液态金属在半凝固状态与固态基体金属同时进入轧机实现复合。为了有效地解决金属表面氧化问题,提高固、液相金属之间的润湿能力,在液-固相复合过程中采用了钢板表面浸涂助焊剂的工艺。同时,为解决超薄复合层问题,采用了异步液-固相轧制复合技术和反向凝固轧制复合技术。该方法主要适用于低熔点与高熔点金属的复合,可以连续生产、效率高、成本低。但目前该法的工艺条件还不成熟,有待于进一步完善。

## 3 液-液相复合法

液-液相复合法主要是电磁连铸生产复合板法。其基本原理是借助于安装在结晶器下部的水平电磁场,将两种化学成分不同的钢液通过不同的浸入式水口同时注入结晶器进行结晶生产复合钢坯的连铸工艺,如图5所示。由于在结晶器的下部安装了水平磁场,作用在钢流上的洛伦兹力垂直穿过水平磁场,抑制了两种钢液的混合,而且水平磁场成为一个分界线,依靠磁流体力的作用把结晶器熔池分为上、下两部分。通过结晶器冷却作用,上部熔池的钢液凝固成复合钢坯的外层,下部熔池的钢液在外壳的里边凝固形成钢坯的内芯。该法的主要优点:由于在结晶器内直接实现不锈钢和其它钢铁材料的复合,可避免出现结合界面的氧化、夹渣等情况;由于是液-液相结合,生产的不锈钢复合板界面结合强度更高,也无需对基板表面进行活化处理;可以根据用户的要求灵活地调整复合板的尺寸和复合层的厚度,可用于大批量连续生产双面不锈钢复合板。该生产工艺操作简单,无污染,材料复合强度高,适于大批量生产,而且可通过计算机模拟来实现工艺的最佳控制,这是其它方法无法比拟的,必会日益受到人们的重视<sup>[17]</sup>。

## 4 结 语

上述分析表明,各种不锈钢复合板的制备方法各有优缺点,难以完全互相替代。某些制备方法尽管流程短、成本低、具有较强的竞争力,如反向凝固法和电磁连铸法,但工艺、设备等还不够完善,需要进一

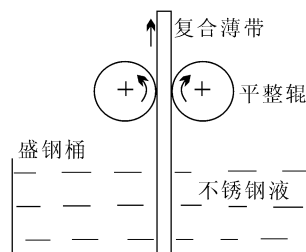


图4 反向凝固法制备不锈钢复合板工艺  
Fig. 4 Processing of inversion casting for manufacturing clad plate of stainless steel

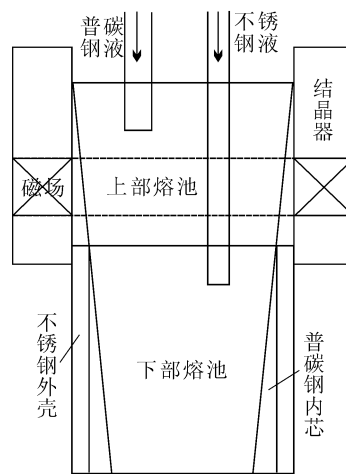


图5 电磁连铸复合工艺  
Fig. 5 Combined processing of electromagnetic continuous casting

步深入研究论证。某些方法尽管已经实现批量生产,如爆炸复合轧制及钎焊轧制复合技术,但在产品规格和生产成本等方面都具有很大的局限性。因此,不锈钢复合板材的研究需要不锈钢生产企业与冶金工作者继续共同努力,进一步完善现有生产技术,不断开发新的制备方法。

### 参考文献:

- [1]郑远谋. 镍-不锈钢爆炸十轧制复合板[J]. 钢铁研究, 2000, (6): 57 - 60.
- [2]克莱因 T W, 威瑟斯 P J. 金属基复合材料导论[M]. 余永宁, 房志刚 译. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 1 - 10.
- [3]倪红卫, 高娟, 唐利民. 不锈钢复合板制备技术的发展[J]. 特殊钢, 2002, 23(3): 4 - 7.
- [4]谢振亚, 李欣田. 双面不锈钢复合板冷轧及热处理工艺探讨[J]. 天津冶金, 2003, (6): 7, 8.
- [5]孙浩, 王克鲁. 不锈钢复合板生产方法和制备技术的探讨. 上海金属, 2005, 7(1): 50 - 54.
- [6]李永松, 沈怡琳. 不锈钢复合板制作新工艺及市场前景的研究[J]. 广西机械, 2001, 4: 34 - 36.
- [7]董宝才, 范江峰, 刘润生. 2205 双相不锈钢复合板爆炸-轧制工艺研制[J]. 压力容器, 2005, 22(2): 9 - 12.
- [8]方建敏, 张杏耀, 单爱党, 等. 累积叠轧焊不锈钢的组织 and 性能[J]. 机械工程材料, 2006, 30(8): 16 - 18.
- [9]祖国胤, 于九明, 温景林. 钎焊热轧复合工艺制备不锈钢/碳钢复合板[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 25 - 28.
- [10]宁洪龙, 王一平, 黄福祥, 等. 多层喷射沉积铝/钢双金属板材的研究[J]. 功能材料, 2002, 33(2): 165 - 167.
- [11]傅定发, 宁洪龙, 陈振华. 喷射沉积技术与双金属材料的制备[J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(1): 65 - 67.
- [12]逯允龙, 谷丰, 戴洪斌, 等. 感应熔涂工艺的研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003, 8(1): 82 - 84.
- [13]张增志, 牛俊杰, 付跃文. 感应熔覆镍基合金粉末涂层工艺和性能研究[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(2): 31 - 36.
- [14]王廷搏. 不锈钢复合板生产技术发展现状[J]. 钢铁, 1986, 21(1): 47 - 49.
- [15]赵红亮, 齐克敏, 高德福, 等. 反向凝固复合不锈钢带的轧制工艺及界面结合[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(1): 73 - 76.
- [16]张建, 张立君, 王万军, 等. 反向凝固法生产复合奥氏体不锈钢薄带的研究[J]. 钢铁, 2000, 35(5): 19 - 23.
- [17]郑红霞, 李宝宽, 昌泽舟. 金属复合板生产方法的发展现状[J]. 炼钢, 2001, 17(2): 20 - 24.

## Manufacturing technology for clad plate of stainless steel

JING Yu-an<sup>1</sup>, WANG Chen-yu<sup>2</sup>

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. Anshan High & Advanced Technology Development Zone, Anshan 114044, China)

**Abstract:** The existing manufacturing Technology for Clad Plate of Stainless Steel were introduced, and the advantages and disadvantages of these processes were analyzed. The explosive plus rolling and brazing plus rolling were restricted by productive specification and cost in spite of matured processes. Inversely, the inversion casting process and the electromagnetic concasting process have an advantage in competition, but their processes are imperfect and needed to make further improvement.

**Key words:** stainless steel; clad plate; brazing; inversion casting

( Received October 20, 2007 )