

RAL · NEU 研究报告 No.0007

真空制坯复合轧制 技术与工艺

ZHENKONG ZHIPI FUHE ZHAZHI JISHU YU GONGYI

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

RAL · NEU 研究报告 No. 0007

真空制坯复合轧制技术与工艺

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)

TA335.5
26

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 简 介

本书介绍了利用电子束焊接技术进行真空制坯复合轧制技术开发的应用现状,真空制坯复合轧制特厚钢板、不锈钢复合板、钛钢复合板的技术与工艺。

本书对冶金企业、科研院所从事钢铁材料研究与开发、钢基复合板工艺开发和复合板生产设备研发的人员有重要的参考价值,也可供中、高等院校中的钢铁冶金、材料学、材料加工及复合材料等专业的从教人员和研究生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

真空制坯复合轧制技术与工艺/轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学)著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 11

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-6755-5

I. ①真… II. ①轧… III. ①钢板轧制—研究
IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 244527 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjbs@cnmp.com.cn

责任编辑 卢 敏 李培禄 美术编辑 杨 帆 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6755-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 11 月第 1 版, 2014 年 11 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.5 印张; 165 千字; 154 页

41.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

研究项目概述

1. 研究项目背景与立题依据

特厚钢板（厚度大于 80mm）广泛应用于海洋工程、电力、建筑、军工以及模具等诸多领域，目前主要应用于一些重点行业和重大技术装备，因此对特厚钢板的性能要求很高，生产技术难度很大，国内仅有舞钢、宝钢、济钢等少数企业可以生产部分产品。目前国内特厚钢板的年需求量超过 100 万吨，市场缺口达 60% 以上，大量特厚钢板需要依赖进口。国内钢铁企业生产特厚钢板主要采用连铸法、模铸法以及电渣重熔法。连铸法具有浇铸速度快和可连续生产的优点，但因坯料厚度和压缩比的限制，导致成品板的厚度有限。由于在大厚度连铸坯心部容易产生偏析，因此目前国内连铸坯的厚度一般不超过 320mm，生产 100mm 以上厚度钢板的难度很大。利用模铸法生产的大尺寸铸锭可轧制出特厚钢板，但其内部偏析很难避免，并且铸锭法的工序长、能耗大，会对环境造成一定污染，此外其成材率较低，一般不超过 70%。电渣重熔法可获得高洁净度的内部组织，并可有效消除铸锭心部偏析，但电渣重熔法生产效率较低，需对钢坯二次熔化，消耗大量能源，生产成本较高，目前多用于制备特钢的特厚板。

近年来伴随着我国经济的高速发展，不锈钢/钢和钛/钢等具有耐蚀性的异种金属复合板被广泛用于石油化工、食品工业、海洋工程以及能源电力等领域。其中，不锈钢/钢复合板材以普碳钢或低合金钢为基层、不锈钢为覆层进行复合而成，复合板同时兼具不锈钢的耐蚀性和钢的低成本特性。不锈钢复合板可节约镍铬合金 70%~80%，降低生产成本 30%~50%，具有广阔的市场前景和巨大的社会效益，是目前应用最为广泛的耐蚀性金属复合板。

长期浸泡在海水中的不锈钢将有大量的铬离子析出，很容易对海洋环境造成污染，而钛金属离子则不会溶出，因此与不锈钢相比，钛具有更为优异的耐腐蚀性能，是一种理想的绿色海洋工程材料，被誉为“海洋金属”。然

而钛的高成本和钛/钢焊接接头中大量脆硬的 Ti-Fe 金属间化合物限制了钛在钢结构腐蚀防护领域的应用。钛/钢复合板兼具钛的强耐蚀性和钢的低成本性、高强度，同时钛/钢复合板的钢侧可与钢结构进行可靠的焊接，能够实现对钢结构的有效腐蚀防护。

目前，国内异种金属复合板主要采用爆炸复合法、扩散复合法以及轧制复合法制备。爆炸复合法是国内应用最广的复合技术，但其界面结合率低、界面结合强度不均匀以及易产生缩孔、裂纹和气孔等缺陷，此外还存在严重的环境污染，使得爆炸复合法面临被逐渐淘汰的趋势。扩散复合法由于具有长扩散时间、有限的产品尺寸以及较低的界面结合强度等缺点，不适用于大尺寸复合板的工业化生产。目前热轧复合法是复合板制造的发展趋势，复合板具有良好的板形、较高的生产效率、低污染、低能耗等特点，尤其是可以生产宽幅复合板。然而，热轧过程中的界面氧化很难避免，很容易削弱复合板的界面结合强度。因此，目前国内采用轧制复合法生产的异种金属复合板界面强度一般不高，亟需一种有效的技术改善其热轧复合的界面结合。

20 世纪末，日本川崎重工发明了真空制坯复合轧制技术，该技术在高空条件下对复合界面四周进行电子束焊接封装，然后经热轧得到复合板。该技术可以用于生产同种的特厚复合钢板和异种的金属复合板。电子束焊接封装能确保复合界面维持高真空，防止热轧过程中复合界面的氧化，以实现复合界面两侧金属的优异冶金结合。真空制坯复合轧制技术的生产过程具有低成本、高成材率和高生产效率的优点，特别是在特厚钢板生产中采用了来源广泛的普通连铸坯为原料，生产流程十分便捷。目前，日本 JFE 公司采用真空制坯复合轧制技术已量产了特厚复合钢板、不锈钢/钢以及钛/钢复合板，生产出了厚度分别达到 240mm 和 360mm 的高性能特厚钢板，不锈钢复合板最大板幅和厚度达到 4200mm 和 120mm，钛复合板最大板幅和厚度达到 3900mm 和 72mm。因此真空制坯复合轧制技术是一种绿色高效的复合板制备技术，在复合板工业生产应用中将产生显著的经济和社会效益。

目前关于真空制坯复合轧制技术的相关报道很少，东北大学 RAL 实验室对该技术进行了大量的研究工作，成功应用真空制坯复合轧制技术开发出了具有优异性能的特厚钢板、不锈钢/钢和钛/钢异种金属复合板，以及相应的工业技术装备。

2. 研究进展与成果

(1) 为了生产出特厚复合钢板, 南京钢铁股份有限公司与东北大学 RAL 共同开发出了具有快速装夹定位功能的超高速坯料表面机械清理系统、具有预热功能的大型高效真空电子束焊机、可实现全自动化功能的焊前快速组坯系统等特厚复合钢板生产装备。此外还相应地开发出了连铸坯料表面清理技术、真空电子束焊接组合制坯技术、大单重复合连铸坯的加热技术, 以及“高温低速小压下+高温低速大压下”相结合的大单重复合坯料轧制技术。通过现场生产实践的检验表明, 可开发出 Q235、Q345、Q460、45 号、E690 等不同碳当量和合金含量的高性能特厚复合板, 特厚板的 Z 向性能测试显示断裂均发生在基材, 呈现明显的韧性断裂特征, 为真空制坯复合轧制技术在特厚钢板制备领域的应用找到了新的途径。目前该项技术已申请 3 项国家发明专利, 已获授权 2 项, 并成功应用于南京钢铁股份有限公司的特厚板制坯生产线, 现场应用效果良好。

(2) 为了生产出高质量的不锈钢/钢复合板, 东北大学 RAL 在“863”项目的资助下开展了真空制坯复合轧制不锈钢/钢复合板的开发。并相应地开发出了不锈钢板酸洗和钢板机械加工的表面清理技术, 不锈钢板和钢板的组坯技术, 组合坯在真空室内的随动装夹技术, 真空电子束焊接制坯技术, 界面氧化物控制技术, C、Cr、Ni 元素的界面扩散控制技术, 不锈钢复合板的热轧技术, 复合界面变形和再结晶的控制技术, 复合板的轧后热处理技术。现场生产实践的检验表明, 可以获得奥氏体不锈钢/低合金钢、铁素体不锈钢/低合金钢、双相不锈钢/低合金钢的高性能不锈钢复合板, 界面剪切强度超过 450MPa, 远超过国标规定的 140MPa, 为真空制坯复合轧制技术在不锈钢复合板制备领域的应用找到了新的途径。目前该项技术已获授权国家发明专利 2 项。

(3) 为生产出高品质的纯钛/钢复合板, 东北大学 RAL 与西北有色金属研究院天力金属复合材料有限公司开展了真空制坯复合轧制纯钛/钢复合板的开发。并相应地开发出了纯钛的酸洗和钢板机械加工的表面清理技术、钛与钢之间的界面隔离层控制技术、钛板和钢板的组坯技术、真空电子束焊接制坯技术、界面 Ti-Fe 金属间化合物控制技术、界面的 TiC 层生成控制技术、钛

复合板的热轧技术、复合界面变形和再结晶的控制技术、复合板的轧后退火技术、复合板的冷轧技术。通过现场生产实践的检验表明,可以获得纯钛/Q235、纯钛/Q345、纯钛/X60 管线钢的高性能钛/钢复合板,界面剪切强度超过 300MPa,远超过国标规定的 196MPa。目前该项技术已获授权国家发明专利 2 项。

结合开发特厚钢板、不锈钢复合板、钛/钢复合板的研究过程,已培养博士毕业研究生 1 名、硕士毕业研究生 9 名;研究成果已先后在日本、泰国等国举行的大型国际会议和著名学术期刊上发表学术论文 10 篇,其中被 SCI 检录 4 篇,被 EI 检录 7 篇,申请国家发明专利 7 项,获得授权 6 项。获得冶金科技进步二等奖 1 项。研究所形成的特厚板以及异种金属复合板的制造技术及其配套的装备已受到国内钢铁企业的广泛关注,在特厚板、不锈钢复合板、钛/钢复合板等领域展现出很好的推广应用前景。

3. 论文与专利

论文:

(1) Guangming Xie, Zongan Luo, Guanglei Wang, et al. Interface characteristic and properties of stainless steel/HSLA steel clad plate by vacuum rolling cladding [J]. Materials Transactions, 2011, 52 (8): 1709~1712.

(2) 王光磊, 骆宗安, 谢广明, 等. 加热温度对热轧复合钛/不锈钢板结合性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013 (02): 387~391.

(3) 王光磊, 骆宗安, 谢广明, 等. 首道次轧制对复合钢板组织和性能的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2012 (10): 1431~1435.

(4) Guanglei Wang, Zongan Luo, Guangming Xie, et al. Experiment research on impact of total rolling reduction ratio on the properties of vacuum rolling-bonding ultra-thick steel plate [J]. Advanced Materials Research, 2011 (299~300): 962~965.

(5) 谢广明, 骆宗安, 王光磊, 等. 真空轧制不锈钢复合板的组织和性能 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2011 (10): 1398~1401.

(6) Zongan Luo, Guanglei Wang, Guangming Xie, et al. Effect of Nb inter-layer on property of Ti/SS clad plate bonded by vacuum hot-roll bonding [C]. Inter-

national conference on materials processing technology 2013. Bangkok, Thailand, 2013.

(7) 骆宗安, 王光磊, 谢广明, 等. 铌夹层对真空轧制复合钛/不锈钢板的组织及性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2013 (23): 3335~3339.

(8) Zongan Luo, Guanglei Wang, Guangming Xie, et al. Interfacial micro-structure and properties of a vacuum hot roll-bonded titanium stainless steel clad plate with a niobium interlayer [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013 (26): 754~760.

(9) 骆宗安, 谢广明, 胡兆辉, 等. 特厚板复合轧制工艺的实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2009 (16): 125~128.

(10) Guangming Xie, Zongan Luo, Guanglei Wang, et al. Microstructure and mechanical properties of heavy gauge plate by vacuum cladding rolling [J]. Advanced Materials Research, 2010 (97): 32~35.

(11) 谢广明, 骆宗安, 王国栋. 轧制工艺对真空轧制复合钢板组织与性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2011 (12): 27~30.

(12) 骆宗安, 谢广明, 王光磊, 等. 界面微观组织对真空轧制复合纯钛/低合金高强度钢界面力学性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2013 (27): 1~7.

(13) Zongan Luo, Guangming Xie, Guodong Wang, et al. Interface of heavy Gauge plate by vacuum cladding rolling [J]. Steel Research International, 2009 (81): 51~53.

专利:

(1) 骆宗安, 谢广明, 王国栋等. 一种真空复合轧制特厚板的方法, 2011-07-13, 中国, CN200910248877. 1.

(2) 骆宗安, 谢广明, 王光磊等. 一种制备特厚复合钢板的真空焊接机构, 2014-01-29, 中国, CN201110442047. X.

(3) 骆宗安, 谢广明, 王光磊等. 一种不锈钢-碳钢复合板的制备方法, 2012-11-14, 中国, CN201110029651. X.

(4) 谢广明, 王光磊, 骆宗安等. 防止真空复合轧制不锈钢复合板的界面氧化的方法, 2013-01-02, 中国, CN201110029656. 2.

(5) 谢广明, 骆宗安, 王光磊等. 一种钛-钢复合板薄带的制备方法,

2012-09-05, 中国, CN201010539333. 3.

(6) 骆宗安, 谢广明, 王光磊等. 一种钛-钢复合板的制备方法, 2010-11-11, 中国, CN201010539065. 5.

4. 项目完成人员

主要完成人员	职 称	单 位
王国栋	教授 (院士)	东北大学 RAL 国家重点实验室
骆宗安	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
谢广明	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
丁 桦	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
于九明	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
王光磊	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
冯莹莹	助理研究员	东北大学 RAL 国家重点实验室
苏海龙	高级工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
胡兆辉	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
王洪光	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
厉 梁	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
刘纪源	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
曹保新	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
王立朋	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
杨 阳	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
蒋 君	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

骆宗安、谢广明、王光磊。

6. 致谢

本研究是在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室王国栋院士的悉心指导下, 在课题组成员的精诚合作下完成的。本研究多个课题被列为东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室部署项目, 项目完成过程中, 实验室完善的装备条件和先进的检测手段, 为本研究创造了良好的研究环境,

衷心感谢实验室各位领导、相关老师和工程技术人员所给予的热情帮助和大力支持。同时本研究也得到了“863”项目、教育部高校基本科研业务费项目、济南钢铁股份有限公司、南京钢铁股份有限公司、天力金属复合材料有限公司的大力支持，在此表示衷心的感谢。

目 录

摘要	1
1 真空制坯复合轧制技术开发的背景与理论基础	3
1.1 引言	3
1.2 金属复合板的生产方法	3
1.2.1 爆炸复合法	3
1.2.2 扩散焊接复合法	5
1.2.3 钎焊热轧法	6
1.2.4 轧制复合法	6
1.3 国内外热轧复合钢板的生产及研究现状	10
1.3.1 特厚复合钢板	10
1.3.2 不锈钢复合板	12
1.3.3 钛钢复合板	13
1.4 真空电子束焊接	14
1.5 复合轧制的理论基础——双金属固相复合机理	16
2 真空制坯复合轧制特厚钢板的技术与工艺	19
2.1 钢坯表面清理方式对复合效果的影响	19
2.1.1 化学处理法	19
2.1.2 角向钢丝刷打磨法	22
2.1.3 磨床加工处理法	24
2.1.4 直向钢丝刷打磨法	25
2.1.5 结论	27
2.2 焊接方法对复合板界面的影响	27



2.2.1	电弧焊接加机械泵抽真空对复合界面的影响	27
2.2.2	电弧焊接加机械泵和分子泵两级抽真空对复合界面的影响	33
2.2.3	真空电子束焊接对复合界面的影响	39
2.2.4	结论	41
2.3	电子束焊接工艺研究	41
2.3.1	实验方案	41
2.3.2	焊缝组织及力学性能分析	44
2.3.3	间隙为 0.5mm 工件的焊接工艺	51
2.3.4	结论	53
2.4	轧制工艺对特厚复合钢板性能的影响规律	54
2.4.1	轧制道次对等厚度复合板组织性能的影响	54
2.4.2	总压下率对连铸坯复合钢板复合的影响规律	66
2.4.3	结论	76
3	真空制坯复合轧制不锈钢复合板的技术与工艺	77
3.1	表面处理方式对不锈钢/碳钢复合板界面夹杂物的影响	77
3.1.1	不同表面处理方式的不锈钢表面微观组织分析	78
3.1.2	不同表面处理方式板坯表面高温氧化产物分析	81
3.1.3	不同表面处理方式的复合板界面夹杂物显微组织分析	87
3.1.4	结论	96
3.2	加热温度对复合界面的影响	97
3.2.1	不同加热温度下复合界面的微观组织	97
3.2.2	不同加热温度下复合界面的力学性能	100
3.2.3	结论	102
3.3	压下率对复合界面的影响	102
3.3.1	不同轧制压下率下复合界面的微观组织	102
3.3.2	不同轧制压下率下复合界面的力学性能	106
3.3.3	结论	107
3.4	扩散退火对复合界面的影响	107
3.4.1	退火后复合界面的微观组织	107



3.4.2 退火后复合界面的力学性能	110
3.4.3 结论	110
4 真空制坯复合轧制钛钢复合板的技术与工艺	111
4.1 实验材料与工艺	112
4.1.1 实验材料	112
4.1.2 实验方法	112
4.2 真空热轧复合法制备钛/碳钢复合板	113
4.2.1 不同加热温度下复合界面的微观组织	113
4.2.2 不同加热温度下复合界面的力学性能	124
4.2.3 结论	129
4.3 真空热轧复合法制备钛/不锈钢复合板	131
4.3.1 直接轧制复合	131
4.3.2 添加镍夹层的钛/不锈钢直接轧制板的组织和性能	136
4.3.3 添加铌夹层的钛/不锈钢直接轧制板的组织和性能	141
4.3.4 钛/不锈钢复合板热处理工艺分析与制定	145
4.3.5 结论	147
参考文献	149

摘 要

目前,国内异种金属复合板主要采用爆炸复合法、扩散复合法以及轧制复合法制备。爆炸复合法是国内应用最广的复合技术,但其界面结合率低、界面结合强度不均匀,以及易产生缩孔、裂纹和气孔等缺陷,此外还存在严重的环境污染问题。扩散复合法由于具有长扩散时间、有限的产品尺寸以及较低的界面结合强度等缺点,不适用于大尺寸复合板的工业化生产。目前热轧复合法是复合板制造的发展趋势,复合板具有良好的板形、较高的生产效率、低污染、低能耗等特点,尤其是可以生产宽幅复合板。然而,热轧过程中的界面氧化很难避免,很容易削弱复合板的界面结合强度。20 世纪末,日本川崎重工发明了真空制坯复合轧制技术,该技术在高真空条件下对复合界面四周进行电子束焊接封装,然后经热轧得到复合板。该技术可以用于生产同种的特厚复合钢板和异种的金属复合板。电子束焊接封装能确保复合界面维持高真空,防止热轧过程中复合界面的氧化,以实现复合界面两侧金属的优异冶金结合。真空制坯复合轧制技术的生产过程具有低成本、高成材率和高生产效率的优点,特别是在特厚钢板生产中采用了来源广泛的普通连铸坯为原料,生产流程十分便捷。目前,日本 JFE 公司采用真空制坯复合轧制技术已量产了特厚复合钢板、不锈钢/钢以及钛/钢复合板,生产出了厚度分别达到 240mm 和 360mm 的高性能特厚钢板,不锈钢复合板最大板幅和厚度达到 4200mm 和 120mm,钛复合板最大板幅和厚度达到 3900mm 和 72mm。因此真空制坯复合轧制技术是一种绿色高效的复合板制备技术,在复合板工业生产中将产生显著的经济效益和社会效益。

目前关于真空制坯复合轧制技术的相关报道很少,东北大学 RAL 国家重点实验室对该技术进行了大量的研究工作,成功应用真空制坯复合轧制技术开发出了具有优异性能的特厚钢板、不锈钢/钢和钛/钢异种金属复合板,形成了比较完整的真空制坯复合轧制技术工艺及装备。主要研究工作和成果如下:

(1) 开展了真空制坯复合轧制特厚钢板的技术与工艺研究,主要包括:

钢坯表面清理方式对复合效果的影响研究, 焊接方法对复合板界面的影响研究, 电子束焊接工艺研究, 轧制工艺对特厚复合钢板性能的影响规律。通过现场生产实践的检验表明, 可开发出 Q235、Q345、Q460、45 号、E690 等不同碳当量和合金含量的高性能特厚复合板, 特厚板的 Z 向性能测试显示断裂均发生在基材, 呈现明显的韧性断裂特征, 为真空制坯复合轧制技术在特厚钢板制备领域的应用找到了新的途径。

(2) 开展了真空制坯复合轧制不锈钢/钢复合板的开发研究, 主要包括: 不锈钢板的酸洗和钢板的机械加工及表面清理技术, 不锈钢板和钢板的组坯技术, 组合坯在真空室内的随动装夹技术, 真空电子束焊接制坯技术, 界面氧化物控制技术, C、Cr、Ni 元素的界面扩散控制技术, 不锈钢复合板的热轧技术, 复合界面变形和再结晶的控制技术, 复合板的轧后热处理技术。通过现场生产实践的检验表明, 可以获得奥氏体不锈钢/低合金钢、铁素体不锈钢/低合金钢、双相不锈钢/低合金钢的高性能不锈钢复合板, 界面剪切强度超过 450MPa, 远超过国标规定的 140MPa, 为真空制坯复合轧制技术在不锈复合板制备领域的应用找到了新的途径。

(3) 开展了真空制坯复合轧制纯钛/钢复合板的开发研究, 主要包括: 纯钛的酸洗和钢板的机械加工及表面清理技术, 钛与钢之间的界面隔离层控制技术, 钛板和钢板的组坯技术, 真空电子束焊接制坯技术, 界面 Ti-Fe 金属间化合物控制技术, 界面的 TiC 层生成控制技术, 钛复合板的热轧技术, 复合界面变形和再结晶的控制技术, 复合板的轧后退火技术, 复合板的冷轧技术。通过现场生产实践的检验表明, 可以获得纯钛/Q235、纯钛/Q345、纯钛/X60 管线钢的高性能钛/钢复合板, 界面剪切强度超过 300MPa, 远超过国标规定的 196MPa。

本研究所形成的特厚板以及异种金属复合板的制造技术及其配套的装备已受到国内钢铁企业的广泛关注, 在特厚板、不锈钢复合板、钛/钢复合板等领域展现出很好的推广应用前景。

关键词: 金属复合板; 电子束焊接; 真空制坯; 特厚钢板; 不锈钢复合板; 钛/钢复合板; Z 向性能; 界面氧化物; 界面金属间化合物

1 真空制坯复合轧制技术开发的 背景与理论基础

1.1 引言

随着科技的高速发展以及新产业、新技术的不断出现,人们对材料性能的要求日益苛刻,在很多情况下单一的材料已经无法满足特殊性能的需要,于是研究各种新型复合材料已经成为材料科学领域中的一个重要的发展方向^[1~3]。层状金属复合板是由两层或两层以上性能各异的金属板经过特殊工艺加工后在界面上实现牢固冶金结合的复合材料。与单一的金属相比,层状金属复合板结合了多种金属组元各自的优点,可以得到单层金属材料所不具有的物理、化学和力学性能,从而具备高强度、耐磨、耐蚀及优异的导电、导热等综合性能^[4~7]。目前金属复合板越来越多地应用于航空航天、机械、船舶、海洋平台、核电站、电力等领域。另外,采用金属复合板还可以节约稀有、贵金属等材料,从而大幅度地降低成本。以最普遍的不锈钢/碳钢复合板为例,与同规格的纯不锈钢相比,不锈钢复合板可以节约昂贵的 Cr、Ni 合金 70%~80%,可降低成本 40%~50%^[8,9],具有巨大的经济价值。随着环境污染的日益加重,自然能源的不断枯竭,发展低能耗、低成本、高品质的材料与技术已成为当今世界材料科技发展的主要趋势,层状金属复合板则以其优异的性能、低廉的价格而越来越多地引起世界各国科研人员的共同关注。

1.2 金属复合板的生产方法

金属复合板的生产方法多种多样,目前应用较广泛的有爆炸复合法、扩散焊接复合法、钎焊法及轧制复合法等。

1.2.1 爆炸复合法

爆炸复合法是 1944 年美国人 Carl 发明的,其工艺如图 1-1 所示。爆



炸复合法利用炸药作为能源，在炸药的高速引爆和冲击作用下（ $7 \sim 8 \text{ km/s}$ ），在十分短暂的过程中使被焊金属表面形成一层薄的塑性变形区，同时熔化和扩散，从而实现两金属的复合，是集压力焊、熔化焊和扩散焊“三位一体”的复合方法^[10]。

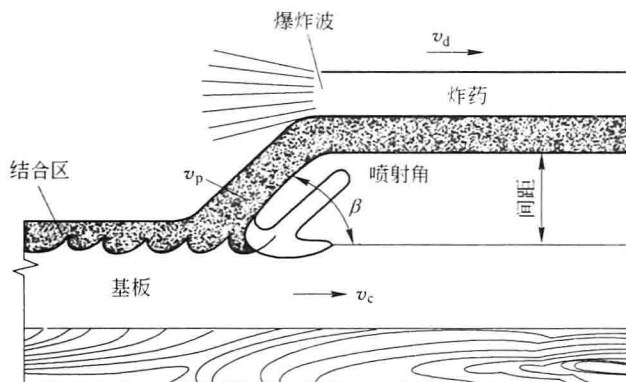


图 1-1 爆炸复合工艺示意图^[21]

爆炸复合法有其显著的优点：

(1) 工艺简单，不需要复杂的设备，成本较低。

(2) 应用广泛，特别适用于物理性质差别较大的合金和金属，至今为止已经成功实现了同基金属如钢/钢、Al/Al、不锈钢/钢等^[11~13]，异种金属如钢/Al、钢/Ti、Ni/Al、Al/Cu、Cu/Ti 等^[14~20]近 300 多种金属的复合，同时适用于生产双层、多层和夹层金属复合板。

但爆炸复合法也具有非常严重的缺点：

(1) 复合界面呈波浪形，机械强度较低，复合表面的质量较差，复合率较低。

(2) 复合板的厚度和质量受到限制，不能生产较薄或宽幅的板坯，不能进行连续生产。

(3) 如图 1-2 所示，爆炸复合时会产生巨大的噪声、振动及烟雾等，对环境造成很大的污染。

爆炸+轧制复合是在爆炸复合法的基础上发展起来的，是将待复合的材料通过爆炸复合后，再进行轧制从而获得宽幅复合板的一种方法^[22,23]。爆炸+轧制技术有效地克服了爆炸复合法不能生产较薄和表面质量要求较高的复合