doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.04.005

试验研究

大尺寸超厚C46200铜/ASTM A283 GrC钢复合板组织与性能研究

任倩玉[1,2],黄杏利[1,2],张鹏辉[1,2],吴江涛[1,2],曹永强[1,2],张向阳[1,2]
(1.西安天力金属复合材料股份有限公司,西安 710200;2.陕西省层状金属复合材料工程研究中心,西安 710200)

摘　要:针对超厚铜/钢复合板爆炸焊接界面结合困难的技术瓶颈,通过精准调控C46200铜覆板与ASTM A283 GrC钢基板的材料性能、爆炸参数及复合工艺,成功制备大尺寸超厚(13+85) mm铜/钢复合板。结果表明,复合界面呈现典型波浪状冶金结合,界面结合率达100%(除雷管区),剪切强度(245,261 MPa)高于现行标准要求;弯曲试样无裂纹/分层,证实界面力学稳定性优异。焊后基板钢强度提高30~50 MPa,延伸率下降3%;因爆炸冲击,铜覆板抗拉与屈服强度降低不超过40 MPa,延伸率下降不超过7%,呈现轻微硬脆倾向;界面硬度呈梯度分布(铜侧74~79 HV,钢侧150~192 HV),但未形成显著硬化区。该研究突破传统铜覆板6 mm厚度限制,为超厚铜/钢复合板工程应用提供了创新工艺方案。

关键词:铜/钢复合板;爆炸复合;界面组织;力学性能
中图分类号:TH142.2;TG44;TB302　　**文献标志码**:A

Study on microstructure and properties of large-sized ultra-thick C46200 copper/ASTM A283 GrC steel composite plates

REN Qianyu[1,2],HUANG Xingli[1,2],ZHANG Penghui[1,2],WU Jiangtao[1,2],CAO Yongqiang[1,2],
ZHANG Xiangyang[1,2]
(1.Xi′an Tianli Clad-metal Materials Co.,Ltd.,Xi′an 710200,China;
2.Shaanxi Engineering Research Center of Metal Clad Plate,Xi′an 710200,China)

Abstract: To address the technical bottleneck of difficult interfacial bonding in explosive welding of ultra-thick copper/steel composite plates, large-scale ultra-thick (13+85) mm copper/steel composite plates were successfully fabricated by precisely controlling material properties of C46200 copper cladding and ASTM A283 GrC steel substrate, explosion parameters, and composite processes. Results show that the composite interface exhibits typical wavy metallurgical bonding with 100% bonding rate (excluding detonator zone). Shear strength (245, 261 MPa) exceeds current standard requirements. Bend specimens show no cracks and delamination, confirming excellent interfacial mechanical stability. Post-welding substrate steel strength increased by 30~50 MPa with 3% reduction in elongation. Copper cladding showed less than 40 MPa decrease in tensile and yield strength and less than 7% reduction in elongation due to explosive impact, indicating slight hardening and embrittlement tendency. Interface hardness displays gradient distribution (copper side: 74~79 HV, steel side: 150~192 HV) without significant hardened zones. This study breaks the traditional 6 mm thickness limit for copper cladding, providing an innovative process for engineering applications of ultra-thick copper/steel composite plates.

Key words: copper/steel composite plate; explosive cladding; interfacial microstructure; mechanical properties

收稿日期:2024-11-14　**修回日期**:2025-03-20

0 引言

铜/钢复合板通过结合铜合金优异的耐腐蚀性与钢材的高强度特性，在降低设备制造成本、减轻结构质量及延长服役寿命等方面展现出显著优势。然而，由于铜与钢在热膨胀系数、晶体结构及冶金相容性等方面存在巨大差异，采用常规焊接方法易在界面形成脆性金属间化合物或未结合区，导致接头力学性能及耐蚀性急剧劣化。异种材料之间的连接，其界面连接处优异的组织和力学性能是保证其工程应用的前提[1-5]。

针对上述问题，国内外学者相继开发了轧制复合、扩散焊、摩擦焊及爆炸焊接等固态连接技术。其中，爆炸焊接又称爆炸复合，通过炸药爆轰产生的高压冲击波驱动覆板高速撞击基板，二者倾斜碰撞后在界面形成冶金结合；因其适用于大面积异种金属复合且无需中间过渡层，被视为铜/钢复合板制备的最有效方法[2-8]。杨明等[7]以厚度为2/10 mm的铜/钢复合板为研究对象，揭示了界面微观组织与晶粒细化机制，证实爆炸冲击下铜/钢界面可实现无缺陷冶金结合。SHAN等[8]系统对比了轧制、扩散焊与爆炸焊接工艺对铜/钢界面性能的影响，指出爆炸焊接界面剪切强度显著优于其他方法，且工艺稳定性更高。然而，现有研究多聚焦于覆板厚度≤6 mm的薄层铜/钢复合板，对于大厚度铜层的爆炸焊接，尚存在以下技术瓶颈：（1）铜材质软且导热快，炸药冲击瞬间铜覆板与钢面结合时位移增加，易导致损伤；（2）厚覆板与基板位移协调困难，爆炸参数（如爆速、基覆板间距）容差范围较窄，工艺窗口难以控制[4-11]。

随着海洋装备大型化与化工容器高压化的发展，市场对超厚铜/钢复合板的需求日益迫切。铜覆层因耐磨性不足，在服役过程中易发生疲劳、缝隙腐蚀及磨损等问题，而增加覆层厚度可显著延缓壁厚减薄，从而延长设备使用寿命[12-14]。此外，超厚复合板兼具结构强度与耐蚀性优势，能够满足复杂工况下设备一体化成型的技术需求。基于此，本文以C46200锡黄铜（厚度13 mm）为覆板、ASTM A283 GrC钢（厚度85 mm）为基板，通过优化原材料及爆炸参数，制备尺寸为（13+85）mm×3 000 mm×3 000 mm的大尺寸铜/钢复合板；同时，结合超声波检测、界面显微组织表征及力学性能测试，系统研究超厚铜层爆炸焊接界面形成机制与性能规律，以期为厚壁铜/钢复合板工程化应用提供理论与技术支撑。

1 试验过程

1.1 原材料准备

覆板材料为C46200铜，其制造标准符合ASTM B21M—2018《海军黄铜棒材、板材规范》规定，原材料状态为软化退火态（O60）；基板材料为ASTM A283 GrC钢，其原材料状态为正火态。覆板和基板的原材料化学成分及力学性能如表1~3所示。其中，铜板的尺寸为13 mm×3 040 mm×3 040 mm，钢板的尺寸为85 mm×3 000 mm×3 000 mm。在爆炸结合前，使用千叶轮对覆板和基板的表面进行多道处理，使其表面粗糙度Ra≤2.0 μm。爆炸复合前，对基板和覆板进行超声检测，检测结果满足NB/T 47013.3—2015《承压设备无损检测超声检测》中Ⅰ级要求。

表1 C46200铜板化学成分

Tab.1 Chemical composition of C46200 copper plate %

元素	Cu	Sn	Pb	Fe	Zn
含量	63.7	0.64	0.001	0.010	余量

表2 ASTM A283 GrC钢板化学成分

Tab.2 Chemical composition of ASTM A283 GrC steel plate %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti	Alt
含量	0.15	0.21	0.71	0.013	0.003	0.02	0.024	0.042	0.007	0.003	0.003	0.0022	0.031

表3 C46200铜板和ASTM A283 GrC钢板的力学性能

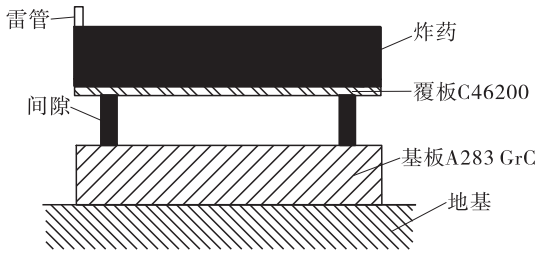
Tab.3 Mechanical properties of C46200 copper plate and ASTM A283 GrC steel plate

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	0 ℃冲击吸收能量/J
C46200	387	160	57.5	—
ASTM A283 GrC	405	228	45	283，326，320

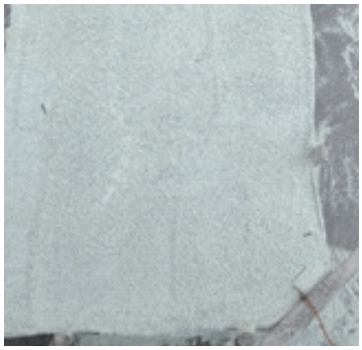
1.2 爆炸参数控制

爆炸焊接采用平行法，安装平面图如图1所示。基、覆板间距设定为14 mm，间隙材料选用镀铜材料。炸药类型为铵油类炸药，其爆速为3 000 mm/s，密度为0.6 g/cm^3，炸药高度为85 mm。起爆点设置在铜板角部，雷管区尺寸控制在≤∅50 mm，成品切割时可避开该区域，以

确保复合板结合率达到100%。爆炸复合完成后，对铜/钢复合板进行540 ℃+4 h的消应力热处理，后续用于组织和性能检验的试样均从热处理后的板面选取。



（a）安装平面图



（b）现场布药图

图1 复合板安装示意

Fig.1 Composite plate installation schematic

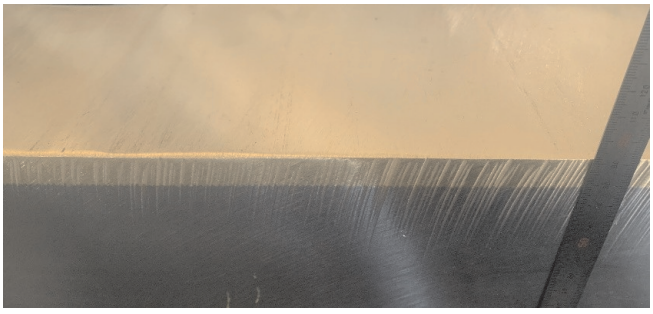
1.3 复合板组织与性能检验

根据NB/T 47002.4—2019《压力容器用爆炸焊接复合板 第4部分：铜-钢复合板》进行取样检验。为确保复合板成品尺寸，检验用试样均取自复合板四周边部。需对复合板的覆板、基板进行棒状拉伸试验，并在覆板和基板的结合面处取样进行界面的板状拉伸，通过剪切性能和弯曲性能检验铜/钢界面的结合质量，其中，弯曲试验包括180°单面复合板内弯曲（覆板表面受压）、180°外弯曲（覆板表面受拉）、侧弯曲，弯曲直径D=4a（a为试样厚度），弯曲前试样厚度从基板面减薄至30 mm，同时对覆板、基板和界面分别进行HV5硬度测试，使用光学显微镜对覆板、基板和界面进行组织观察。

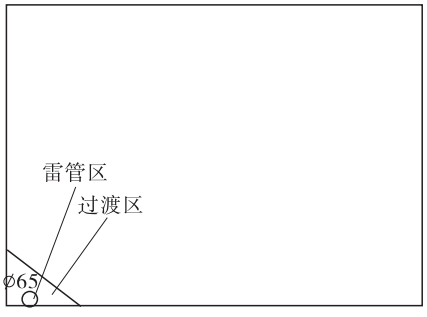
2 结果与讨论

2.1 无损检测

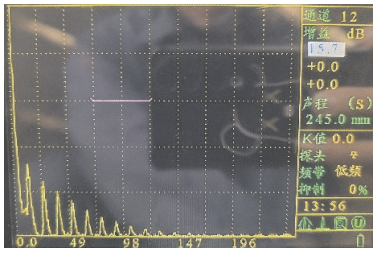
对于大尺寸超厚复合板，超声波无损探伤是检测复合板结合率及缺陷的有效手段。为确保后续使用时的尺寸完整性，复合板的性能组织取样仅能从四周边部及角部获取，而如何实现有效取样，同样需要依赖超声波探伤。图2示出复合板结合，以及UT检测下雷管区、过渡区和结合区的波形显示。



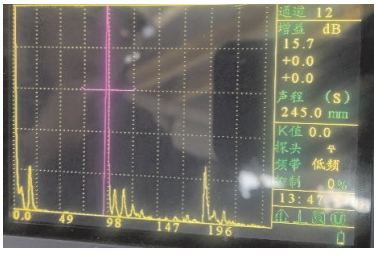
（a）复合板结合示意



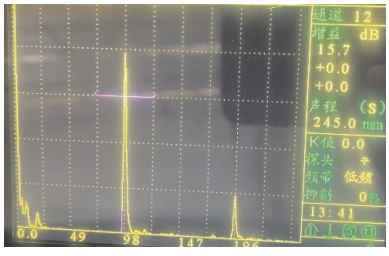
（b）整板UT记录



（c）雷管区



（d）过渡区



（e）结合区

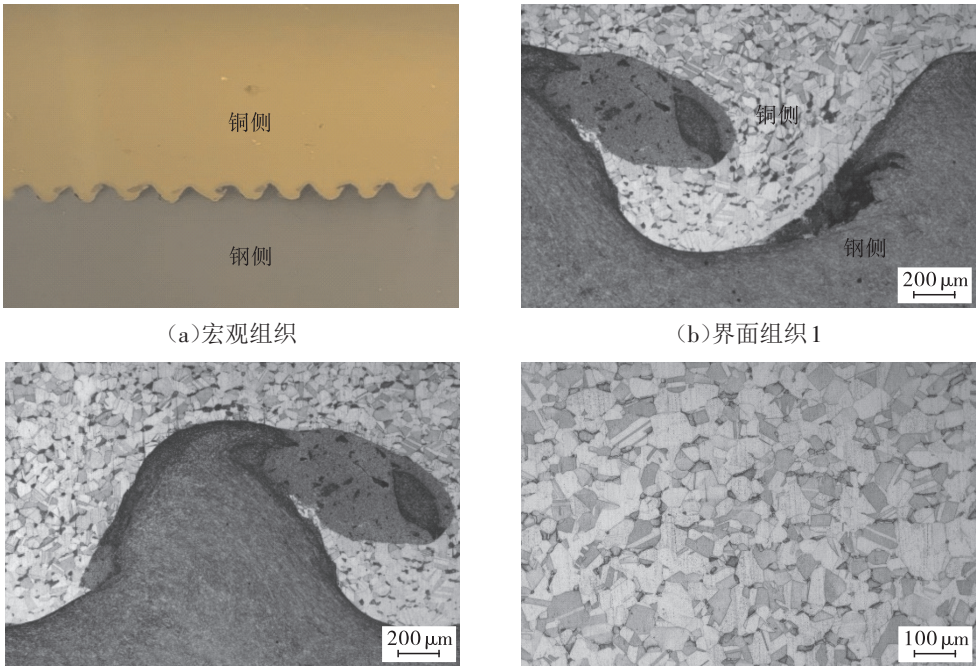
图2 复合板UT结果

Fig.2 UT Results of composite plate

依据NB/T 47013.3—2015对复合板进行100%超声检测。如图2(b)(c)所示，起爆点UT探伤直径为∅60~65 mm，较∅50 mm的设计尺寸略有增大。这种现象源于炸药起爆时的能量传播特性：起爆点作为能量起始位置，其区域会形成凹坑，该区域内基覆板未发生粘结反应，且从凹坑到结合平面区存在小范围斜坡角过渡区域，如图2(d)所示。由于UT对凹坑的探测存在局限性，过渡区域通常被定义为雷管区范围，这使得爆炸复合后雷管区的UT检测直径大于设计值。将起爆点设置在角部，能够最大限度保证有效切割尺寸，且除起爆点外，复合板不存在可记录的缺陷。

2.2 金相组织

图3示出铜/钢复合后的覆板、基板及界面的宏观与微观组织图像。铜与钢的结合界面整体呈现波浪状相互嵌入的金属结合形态，界面两侧金属发生曲线变形，变形高度约为1 mm，波纹数为4~5个波/cm。波浪形界面的结合区除包含基板和覆板金属外，还存在熔化区，这是爆炸焊接结合过程的典型特征之一。在复合过程中，结合界面处基覆板的分界线清晰可见，钢侧形成了明显的金属熔化区或熔化腔，这可能是由于铜具有较高的导热性，在爆炸焊接过程中能够迅速将产生的热量传导至周围区域所致。



(a)宏观组织 (b)界面组织1

(c)界面组织2 (d)覆板组织

图3 界面、覆板及基板金相组织

Fig.3 Interface, cladding and substrate microstructure

界面结合过程呈现出类似宏观滑移变形的特征〔见图3(a)〕，可观察到波纹具有平行性和周期性，在二维平面呈波浪状分布。将覆板与基板剥离后，其结合面展现出三维台阶状分布特征，接触面在滑移过程中产生类似浮凸的反应，界面处可观察到沿线形轨迹形成的台阶。结合瞬间，大量滑移面同时作用，使得滑移带以波纹形式而非直线形式出现，这种滑移过程在微观尺度上是从一个面向另一个面移动的过程。

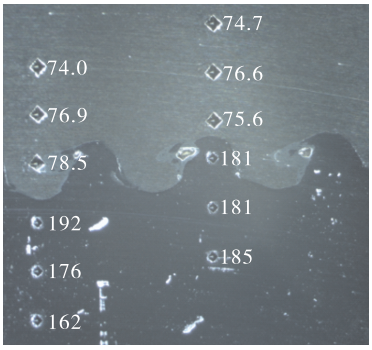
在覆板铜侧原材料中间厚度处取样观察，如图3(d)所示。覆板组织呈现清晰的退火孪晶分布，晶粒通过晶界清晰连接且分布均匀。由图3(c)可以看出，界面波纹区的铜、钢组织未出现交叉分布，界面滑移完全局限于各自基体中。铜侧晶粒组织因碰撞发生变形与硬化，距结合界面越近的区域，晶粒畸变程度逐步加剧，部分区域晶界明显消失(表现为浸蚀反差与晶界清晰度显著降低)，晶粒间的表面能与界面能因此改变。经消应力热处理后，界面处组织仍未恢复至原材料状态。

爆炸瞬间，能量向四周及下方扩展，板面随能量产生微量塑性延展变形。结合后，覆板与基板厚度减少0.5~1.5 mm，板面长、宽增至3 080，3 080 mm。界面处金属除四周延展变形外，还存

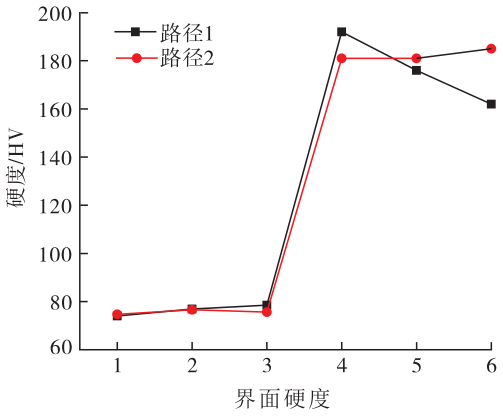
在碰撞结合的曲面变形，爆炸焊接过程中同时产生多方向塑性变形。

2.3 力学性能

界面两侧硬度分布如图4所示。界面附近铜侧硬度值为74~79 HV，钢侧硬度值为150~192 HV，铜侧表面平均硬度值达85 HV。钢侧硬度波动范围大于铜侧，这是由于钢的应变硬化程度高于铜。覆板铜表面作为炸药爆炸能量的最先接触区域，其表面产生了一定的变形硬化。随着单侧金属距界面距离的增加，显微硬度值呈下降趋势，界面两侧的硬度值达到最大。界面区域硬度值增加是因为爆炸瞬间覆板与基板高速碰撞引发冷变形，这表明爆炸焊接时两种金属表面在碰撞过程中承受了最大变形。由于板面在碰撞结合过程中变形受到间距限制，靠近界面的厚度变形范围较窄，从硬度分布可知，界面处变形硬化厚度约为200 μm。



(a)硬度测试取点示意

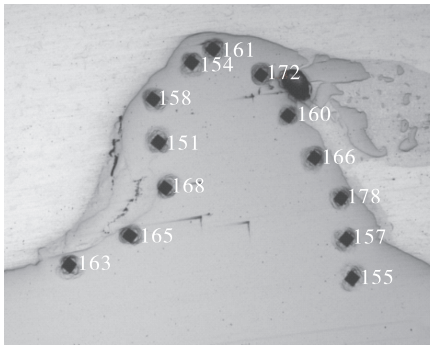


(b)硬度分布

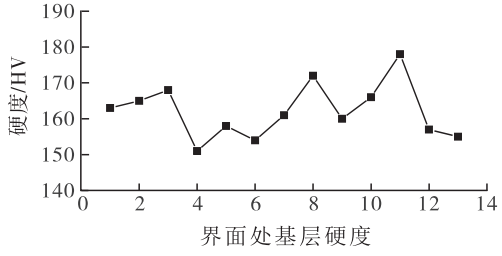
图4 界面硬度分布

Fig.4 Interface hardness distribution

当层状复合材料用作压力容器时，覆板、基板和结合界面的硬度不允许存在高度硬化区域。因为容器在变形过程中，硬度分布的均匀性决定了设备变形的均匀性，在弯曲成形时能保证界面不分层；若存在高度硬化区域，钻孔时会导致钻头受力不均匀，进而引发钻头断裂或结合层开裂。图5示出界面基板侧的硬度分布。可以看出，界面处硬度相比基覆板硬度仅有少量增加，不存在明显的硬化区域，这对复合板的实际应用至关重要。



(a)硬度测试取点示意



(b)硬度分布

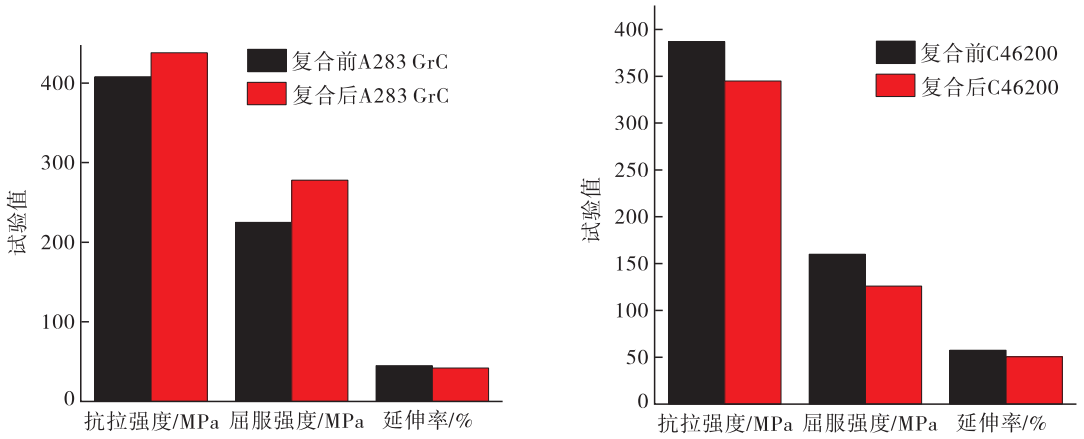
图5 界面基板侧硬度分布

Fig.5 Interface substrate side hardness distribution

图6示出C46200覆板与ASTM A283 GrC基板爆炸复合前后的拉伸性能对比。可以看出，覆板的强度变化幅度不超过40 MPa，延伸率变化幅度不超过7%，复合后的拉伸性能依然符合ASTM B21M—2018标准要求，并未出现影响覆板使用的参数；基板强度提高了30~50 MPa，延伸率降低了3%，呈现出少量的加工硬化现象。对铜/钢复合板结合界面进行剪切强度测试时，在复合板边部不同位置进行了2次取样，测得数值分别为245，261 MPa，远高于NB/T 47002.4—2019标准规定的100 MPa最低要求，满足工程应用需求。

对试样进行弯曲检验是评估复合板界面性能的关键环节。当复合板用于筒体等容器时，通常会承受覆板在内、基板在外的内弯曲变形。文中对复合板开展了内弯、外弯及侧弯检验，如图7所示。界面波纹在不同方向弯曲力作用下，其平行性和周期性特征消失。以覆板侧为例，复合界面承受不同方向的拉弯与压弯应力，实现了对结合

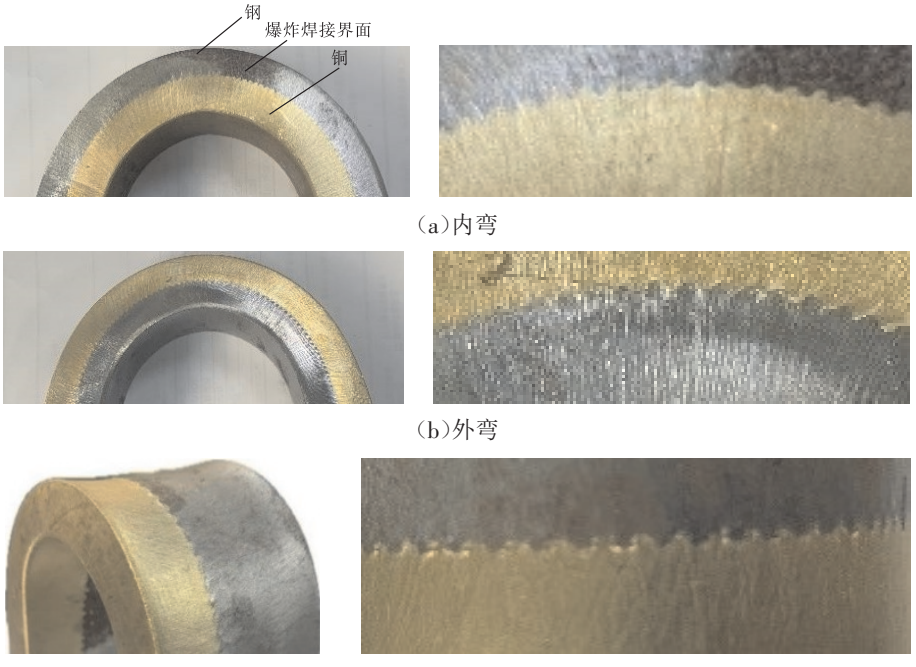
界面的全方位受力检验。由于受到不同方向的弯曲力，结合界面变形后，波纹表面形貌由规则的同向波纹转变为多向不规则起伏的结构。3个方向的弯曲检验结果显示，弯曲外表面未出现裂纹，复合界面亦无分层现象，充分证明了基覆板间优异的粘结延展性。



（a）基层A283 GrC拉伸性能对比　（b）覆层C46200拉伸性能对比

图6　爆炸复合前后基覆板拉伸性能对比

Fig.6　Comparison of tensile properties of substrate and cladding plate before and after explosive composite



（a）内弯

（b）外弯

（c）侧弯

图7　弯曲后试样的宏观形貌

Fig.7　Macroscopic morphology of samples after bending

3　结论

通过爆炸焊接工艺，成功制备了规格为（13+85）mm×3 000 mm×3 000 mm的C46200/ASTM A283 GrC铜/钢复合板。经UT检测，除雷管区外，铜/钢复合板的界面结合率达100%。在复合板边部取样进行抗剪强度测试，测得结果为245，261 MPa，显著高于相关标准要求。按弯曲角度180°、弯曲直径D=3a进行内弯（覆板受压）、外弯（覆板受拉）和侧弯（结合界面受拉）试验，所有试样弯曲外表面无裂纹，复合界面未出现分层现象。

此外，复合界面呈现典型的波浪状冶金结合，波纹密度为4~5个波/cm，试样中未发现缺陷或未

结合区域。与原材料相比，基板复合后强度提升30~50 MPa，延伸率下降3%；覆板的抗拉强度和屈服强度降低≤40 MPa，延伸率下降≤7%，材料呈现轻微硬脆倾向。爆炸复合后，界面铜侧硬度为74~79 HV，钢侧硬度为150~192 HV；同一张板面中，界面处覆板硬度与覆板侧硬度差值≤10 HV。

参考文献：

[1] FEHIM F. Recent developments in explosive welding [J]. Materials & Design, 2010, 32(3): 1081-1093.

[2] ACARER M, GÜLENÇ B, FINDIK F. The influence of some factors on steel/steel bonding quality on there characteristics of explosive welding joints [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(21): 6457-6466.

[3] BINA H M, DEHGHANI F, SALIMI M. Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel [J]. Materials & Design, 2013, 45(5): 504-509.

[4] GULENC B. Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method [J]. Materials & Design, 2008, 29(1): 275-278.

[5] 林东. 钛-钢冶金复合直缝焊管制造技术[J]. 压力容器, 2024, 41(10): 79-86.
LIN D. Manufacturing of titanium-steel metallurgical composite straight seam welded pipe [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(10): 79-86.

[6] LEI Z, QIANG Z, CONGBIN S, et al. Microstructure and mechanical properties of T2 copper/316L stainless steel explosive welding composite with small size wavy interface [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28(1): 668-682.

[7] 杨明，张冰原，马宏昊，等. 铜/钢爆炸焊接复合界面的显微组织及晶粒结构演化机理（英文）[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(5): 1588-1605.
YANG M, ZHANG B Y, MA H H, et al. Microstructure and grain evolution mechanisms of copper/steel explosive welding interface [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(5): 1588-1605.

[8] SHAN S J, LIU Y X, ZHANG J L, et al. Explosive welding research on large-size ultra-thick copper-steel composites: A review [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 4130-4142.

[9] 李岩，王贵成，杨海娟，等. 爆炸焊接铜/钢复合管界面组织表征与性能研究[J]. 压力容器, 2024, 41(7): 17-24.
LI Y, WANG G C, YANG H J, et al. Characteriaztion and performance study of the interface structure of explosion welded copper/steel composite tube [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(7): 17-24.

[10] 李玉龙，杨泓，刘冠鹏，等. 铜/钢爆炸焊接头界面组织及力学性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(1): 39-45.
LI Y L, YANG H, LIU G P, et al. Microstructure and mechanical properties of explosive welded joint of copper/steel [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(1): 39-45.

[11] 晏祖根，陈召，朱迪，等. 基于机器视觉的铜板垛捆扎带定位技术研究[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(4): 76-83.
YAN Z G, CHEN Z, ZHU D, et al. Research on positioning technology of copper plate stack strapping belt based on machine vision [J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(4): 76-83.

[12] 李欣琳，金国，康丽霞，等. 黄铜在酸碱盐腐蚀介质中的腐蚀研究[J]. 材料导报, 2018, 32(2): 228-233.
LI X L, JIN G, KANG L X, et al. Study of corrosion behavior of HSn62-1 in acid, alkali and salt solution [J]. Materials Reports, 2018, 32(2): 228-233.

[13] 郭渊，周俊. 基于机器视觉的轴承缺陷检测研究进展[J]. 机电工程, 2024, 41(5): 761-774.
GUO Y, ZHOU J. Research progress of bearing defect detection based on machine vision [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(5): 761-774.

[14] 周庆东. 冷油器、冷却器抗腐蚀养护技巧[J]. 产业与科技论坛, 2015, 14(18): 70-71.
ZHOU Q D. Anti-corrosion maintenance skills of oil cooler and cooler [J]. Industrial & Science Tribune, 2015, 14(18): 70-71.

作者简介：任倩玉（1993），女，工程师，主要从事层状金属复合材料的生产工艺研究工作，通信地址：710200 陕西省西安市高陵区西金路19号西安天力金属复合材料股份有限公司，E-mail：1379364558@qq.com。

本文引用格式：
任倩玉，黄杏利，张鹏辉，等. 大尺寸超厚C46200铜/ASTM A283 GrC钢复合板组织与性能研究[J]. 压力容器, 2025, 42(4): 34-40.
REN Qianyu, HUANG Xingli, ZHANG Penghui, et al. Study on microstructure and properties of large-sized ultra-thick C46200 copper/ASTM A283 GrC steel composite plates [J]. Pressure Vessel Technology, 2025, 42(4): 34-40.