

轧后热处理对 316L/Q370qE 不锈钢复合板组织性能的影响

李小兵¹, 陈民¹, 蒋国民¹, 郑传波¹, 镇凡², 邵春娟², 麻晗²

(1. 江苏科技大学冶金工程学院, 江苏 苏州 215600; 2. 江苏省(沙钢)钢铁研究院, 江苏 苏州 215625)

摘要: 研究了轧后控制冷却和回火处理对 316L/Q370qE 不锈钢复合板组织和性能的影响。采用金相显微镜、扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 和背散射电子衍射仪 (EBSD) 分析复合板的显微组织, 通过拉剪和拉伸试验测试复合板的界面结合强度和力学性能。结果表明: 与水冷-空冷的冷却方式相比, 轧后快速水冷至室温的不锈钢复合板脱碳层和渗碳层厚度分别减小至 40 和 20 μm ; 水冷加速碳钢发生低温转变, 碳钢脱碳层组织为细晶铁素体和贝氏体, 不锈钢渗碳层中的奥氏体晶粒细化, 复合界面的拉剪强度显著提高; 水冷复合板经回火处理后, 复合界面的脱碳层和渗碳层厚度稍有增加, 碳钢组织在 500 $^{\circ}\text{C}$ 以上回火时转变为粗晶铁素体和回火索氏体, 不锈钢奥氏体组织发生均匀化, 复合界面剪切强度降低, 但仍高于轧后水冷-空冷的复合板; 轧后水冷至室温后再经 450 $^{\circ}\text{C}$ 回火 1 h 制备的不锈钢复合板具有较好的综合力学性能, 界面拉剪强度为 364 MPa, 屈服强度和抗拉强度分别为 594 和 661 MPa, 断后伸长率为 18%。

关键词: 不锈钢复合板; 热轧复合; 热处理; 界面; 脱碳层

中图分类号: TG335.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2025)09-0010-12

Effect of post rolling heat treatment on microstructure and properties of 316L/Q370qE stainless steel clad plate

LI Xiao-bing¹, CHEN Min¹, JIANG Guo-min¹, ZHENG Chuan-bo¹,
ZHEN Fan², SHAO Chun-juan², MA Han²

(1. School of Metallurgical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou 215600, China;

2. Jiangsu (Shagang) Iron and Steel Research Institute, Suzhou 215625, China)

Abstract: The effect of controlled cooling and tempering treatment after rolling on microstructure and properties of 316L/Q370qE stainless steel clad plate was studied. The microstructure of the clad plate was analyzed using metallographic microscope, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), and backscattered electron diffraction (EBSD) technique. The interfacial bonding strength and mechanical properties of the clad plate were tested by tensile shear and tensile tests. The results show that compared with the water cooling and air cooling, the thickness of the decarburization layer and carburized layer of the stainless steel clad plate quickly cooled to room temperature after rolling is reduced to 40 and 20 μm , respectively. Water cooling accelerates the low-temperature transformation of carbon steel, the microstructure of the decarburization layer of carbon steel is composed of fine-grained ferrite and bainite, the austenite grains in the carburized layer of the stainless steel are refined, and the tensile and shear strength of the composite interface is significantly improved. After tempering treatment, the thickness of the decarburization layer and carburized layer at the composite interface of the water-cooled clad plate slightly increases. The carbon steel structure transforms into coarse-grained ferrite and tempered sorbite when tempered above 500 $^{\circ}\text{C}$, and the stainless steel austenite structure becomes uniform. The shear strength at the composite interface decreases, but it is still higher than that of the water-and-air-cooled clad plate after rolling. The stainless steel clad plate prepared by water cooling to room temperature after rolling and tempering at 450 $^{\circ}\text{C}$ for 1 h has good comprehensive mechanical properties, with the interface tensile shear strength of 364 MPa, the yield strength and tensile strength of 594 MPa and 661 MPa, respectively, and the elongation of 18%.

收稿日期: 2024-10-31 **修订日期:** 2024-12-25

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20210889); 江苏省研究生实践创新计划项目 (SJYC24_2615); 张家港市科技计划项目 (ZKYY2412)

作者简介: 李小兵 (1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事研究方向为层状金属复合材料研究, E-mail: lxbing2009@126.com。

引用格式: 李小兵, 陈民, 蒋国民, 等. 轧后热处理对 316L/Q370qE 不锈钢复合板组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2025, 46(9): 10–21.

LI Xiao-bing, CHEN Min, JIANG Guo-min, et al. Effect of post rolling heat treatment on microstructure and properties of 316L/Q370qE stainless steel clad plate [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(9): 10–21.

Keywords: stainless steel clad plate; hot roll bonding; heat treatment; interface; decarburized layer

不锈钢与碳钢组合形成的层状复合材料显著改善了碳钢的耐蚀性能和使用寿命,使碳钢能够突破严苛的环境条件限制,因而广泛应用于桥梁工程、船舶制造、化工容器、核电装备等领域^[1-2]。目前,国内主要采用堆焊、爆炸焊接和真空热轧复合的方法生产不锈钢复合板^[3]。而轧制复合法制备的复合板具有良好的板形和丰富的尺寸规格,生产效率和自动化程度高,逐渐成为制备不锈钢复合板的主要方法^[4-6]。

热轧复合时,不锈钢和碳钢组成的板坯经过高温加热后进行多道次的轧制,不同钢种之间形成牢固的冶金结合界面。复合板厚度方向上的组织具有明显的差异性,一般划分为碳钢基体、碳钢界面过渡区、复合界面、不锈钢界面过渡区 and 不锈钢覆层^[7]。界面过渡区是由于碳扩散而形成的,而强的界面结合归因于 Fe、Cr 和 Ni 合金元素的充分扩散^[8]。过渡区富集了 C、Cr,有碳化物形成,其硬度最高,脱碳层为铁素体组织,其硬度最低^[9]。为了提高复合板的综合性能,复合界面是一个十分重要的影响因素^[10]。于涛等^[11]研究发现,增加轧制道次促进了 304 不锈钢与碳钢之间的界面嵌合和元素扩散,提高了复合界面的剪切强度,但造成不锈钢侧的奥氏体晶界产生少量 $M_{23}C_6$ 型碳化物。然而,轧制复合过程对界面组织性能进行调控时,碳钢和不锈钢难以实现协同优化,因此仍需进行不锈钢复合板的热处理工艺研究^[12]。

真空热轧的复合板不锈钢侧存在较多的 $Cr_{23}C_6$ 析出物,通过控制热处理时的冷却速率,Cr 元素发生固溶和均匀化,碳钢基体形成贝氏体,复合板的力学性能和耐蚀性能提高^[13]。李龙等^[14]对热轧后的 316/Q345R 不锈钢复合板,以 $0.2 \sim 7 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 的速率冷却至 $450 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以下后空冷,Q345R 基体形成铁素体和贝氏体混合组织,复合界面的结合性能高于 350 MPa 。李国鹏等^[15]研究发现,真空热轧的 N08367/Q345R 超级奥氏体不锈钢复合板在不同轧后冷却速度下剪切强度均远超国家标准,其中水冷工艺下的复合板性能最佳,达到 466 MPa 。轧制后的控制冷却能够调控复合界面和基层覆层的组织性能,但因复合板终轧完成时的温度较低调控作用有限,仍需进行后续热处理来改善综合性能。

真空热轧的不锈钢复合板进行热处理时,脱碳区明显增大,界面元素互扩散,形成明显的界面马氏体区,通过回火后界面残余应力降低,界面马氏体转变

为回火马氏体,提高了复合板的性能^[16]。刘海璋等^[17]发现,对 2205/X65 双金属复合板,采用 $1050 \text{ } ^\circ\text{C}$ 固溶回火工艺,即加热至 $1050 \text{ } ^\circ\text{C}$,保温 30 min ,喷水冷却至 $450 \text{ } ^\circ\text{C}$,然后空冷至室温,复合板具有优异的力学性能和耐腐蚀性能。Li 等^[18]用 $1150 \text{ } ^\circ\text{C}$ 热轧固溶后进行 1 h 回火的工艺制备不锈钢复合板,通过热轧和热处理促进碳原子扩散,使其碳钢基体力学性能良好,而且不锈钢覆层具有优异的耐腐蚀性能。Hang 等^[19]通过研究热轧 304 不锈钢复合板的腐蚀性能,发现经过 $850 \text{ } ^\circ\text{C}$ 淬火 0.5 h 后回火 1 h 的复合板,碳化铬在其晶界和晶粒内广泛析出,导致严重的晶间敏化,且越靠近结合界面,碳化铬析出越多。对复合板进行退火处理,可以使屈服强度降低,同时抗拉强度、伸长率和耐腐蚀性提高。退火显著增加了 Cr、Fe、Ni 元素的扩散距离^[20]。刘燕平等^[21]对爆炸复合的 2205/Q345R 不锈钢复合板进行去应力退火,发现在 $540 \sim 560 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间退火,复合板的耐蚀性、强度及弯曲性能均满足使用要求,同时能最大限度地消除复合板残余应力,有利于后续加工。沈春豫等^[22]对爆炸焊接的 316L/Q235B 复合板进行退火热处理,得出随着热处理温度升高,复合板强度降低,塑性提高,性能都满足标准。Ding 等^[23]通过对热轧的马氏体/奥氏体不锈钢复合板在 $950 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下退火 2 min ,然后水淬,发现热处理促进界面扩散,提高界面结合强度,可以有效提高复合材料板材的整体塑性。Li 等^[24]对不锈钢复合板进行了 $700 \text{ } ^\circ\text{C}$ 不同时间的退火工艺研究,在退火过程中,不锈钢的碳含量不断增加,碳含量的增加会使表面形成更多贫铬区,导致表面耐腐蚀性能变差。

由此可见,不锈钢复合板由于具有两种材质差异明显的基层和覆层金属,在轧制控制冷却和后续热处理过程需要兼顾各金属的组织转变,使基层覆层和界面的性能达到协同优化^[25],但这方面的微观机制仍不明确。本文针对真空热轧不锈钢复合板的轧后热处理开展实验研究,分析轧后冷却方式和回火热处理对复合板组织性能的影响,研究复合板整体性能优化的热处理工艺。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

基层原材料为碳钢 Q370qE,厚度 $(32 \pm 0.2) \text{ mm}$,

覆层原材料为不锈钢 316L,厚度(10±0.1) mm。试验材料的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 不锈钢复合板基层与覆层的主要化学成分(质量分数,%)

Table 1	Main chemical compositions of the base and cladding of the stainless steel clad plate (mass fraction, %)									
Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Ti	Mo	N	Fe
Q370qE	0.15	0.22	1.39	0.11	0.12	0.017	0.013	—	—	Bal.
316L	0.025	0.55	1.35	16.91	10.03	—	—	2.02	0.015	Bal.

1.2 试验方法

碳钢和不锈钢板经过锯切后,对待复合表面进行铣削加工,去除表面的氧化皮及污染物。按对称方式将 4 块钢板叠放,最外层为碳钢,内层为不锈钢,内层的长宽尺寸小于外层。两层不锈钢之间加入 Al₂O₃ 与腻子粉混合制成的隔离剂,方便轧后分离得到两块复合板。采用手工电弧焊将两层碳钢板和密封钢条进行焊接,使不锈钢完全被密封,制得复合板坯。然后用真空泵从板坯端部预留的细管中抽出钢板层间的空气,使真空度达到 10⁻³ Pa 以下,随后将管口压扁密封。

将复合板坯放进电阻式加热炉中,加热至 1200 ℃并保温 90 min,在 ϕ550 二辊可逆轧机上进行七道次热轧,总压下率 85%,终轧温度 880 ℃。轧制得到的复合板厚度为 6 mm,其中不锈钢厚度为 1.5 mm。轧后复合板进入水冷辊道,通过层流冷却方式快速降温。一种方式为 15 s 内水冷至室温,一种是 5 s 内水冷至 570 ℃后再在空气中冷至室温。随后将单纯水冷的复合板进行回火处理以改善组织稳定性,回火温度选取范围为 400~550 ℃,保温 1 h 后空冷。

复合板经过切割之后,沿横截面取样进行机械研磨和抛光,先采用体积分数 4% 的硝酸酒精腐蚀碳钢,再用王水腐蚀不锈钢。采用 Axioscope A1 型金相显微镜、JSM-6510LA 型扫描电镜(SEM)与背散射电子衍射仪(EBSD)对复合板的界面区、基层和覆层组织进行表征。采用 UTM5205X 型电子万能试验机进行复合板的力学性能测试,界面拉剪试验按照国家标准 GB/T 6396—2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》进行,复合板拉伸试验按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》进行,试验机夹头的移动速度为 2 mm/min,随后通过扫描电镜观察试样的断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 轧后冷却方式对不锈钢复合板组织性能的影响

图 1 所示为轧后不同冷却方式时复合板中

Q370qE 碳钢的显微组织,碳钢和不锈钢之间均形成了致密的复合界面,在靠近界面的位置碳钢发生脱碳现象,而远离界面的碳钢基体发生不同类型的组织转变。由图 1(a)可知,水冷至 570 ℃,碳钢在高温快冷过程几乎不发生珠光体型转变,随后在空冷过程发生中温贝氏体转变,形成块状或针状的铁素体,渗碳体呈颗粒状不连续分布于铁素体基体中。由于复合界面两侧的碳元素存在较大的浓度差,在两阶段冷却过程碳原子扩散程度较大,造成碳钢形成约 65 μm 厚的脱碳层。离界面越近,碳钢失去的碳原子越多,因此在紧邻界面位置很少有渗碳体生成,碳钢组织为纯铁素体。如图 1(c)所示,轧后采用层流冷却至室温的复合板,超快冷却使碳钢中的 Fe、C 等原子难以扩散,奥氏体发生低温转变,形成板条马氏体和贝氏体,并有少量残留奥氏体存在。此时,在近界面的区域,碳原子扩散行为受到快速冷却的影响被抑制,碳钢形成了厚度约 40 μm 的脱碳层,由铁素体和少量渗碳体组成,并具有明显的梯度分布特征^[26]。

图 2 所示为轧后不同冷却方式时复合板中 316L 不锈钢的显微组织,不锈钢均获得奥氏体组织,不锈钢靠近界面的区域产生渗碳组织。如图 2(a)所示,两阶段缓慢冷却的复合板中,奥氏体晶粒尺寸约 15 μm,晶界轮廓比较平滑,局部夹杂有细小的再结晶晶粒。而在图 2(c)所示的快速冷却复合板中,奥氏体晶粒尺寸稍有减小,晶粒形态保留了变形时的不规则性,晶界线条不光滑,晶粒尺寸的不均匀性明显,其中含有较多的再结晶晶粒。这种奥氏体晶粒的结构差异主要与轧后冷却过程有关,快速水冷至室温可以抑制奥氏体的晶界迁移和晶粒生长,降低了轧态组织的回复再结晶程度。与碳钢的脱碳情况相似,不锈钢的渗碳行为也受到冷却时碳原子扩散程度的影响,两阶段冷却时渗碳层厚度约 40 μm,单纯水冷时厚度约为 20 μm。不锈钢中渗入的碳原子易和 Cr 元素发生反应形成铬的碳化物,并在奥氏体晶界析出,易造成不锈钢出现晶间腐蚀缺陷。同时,这些含铬析出物阻碍了晶界迁移,使复合板界面区的奥氏体晶粒细化^[27]。

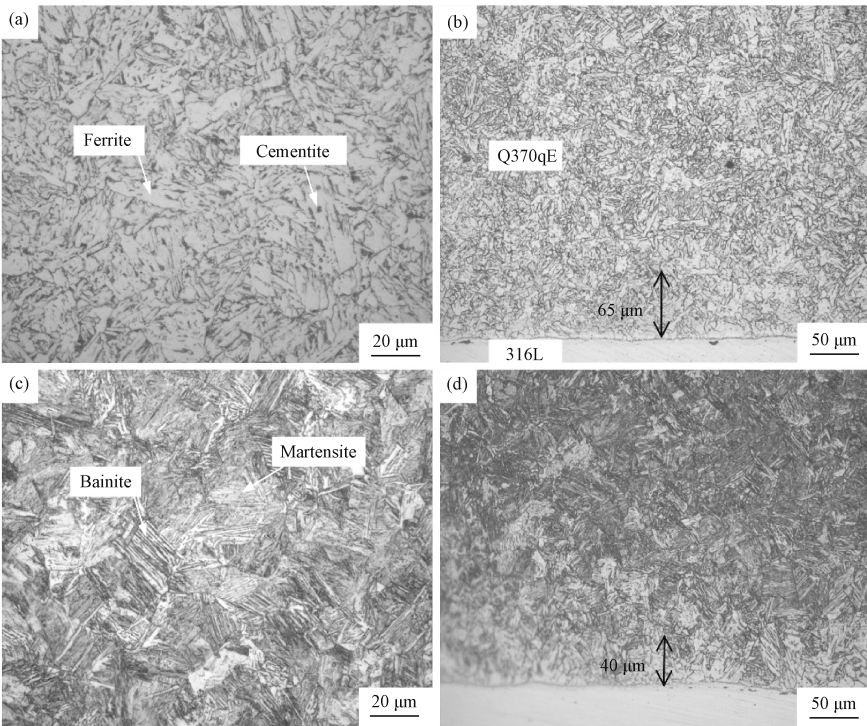


图 1 轧后不同冷却方式时复合板中 Q370qE 碳钢的显微组织

(a) 水冷-空冷的 Q370qE; (b) 水冷-空冷的界面区; (c) 水冷的 Q370qE; (d) 水冷的界面区

Fig. 1 Microstructure of Q370qE carbon steel in the clad plate under different cooling methods after rolling (a) water-and-air-cooled Q370qE; (b) water-and-air-cooled interface area; (c) water-cooled Q370qE; (d) water-cooled interface area

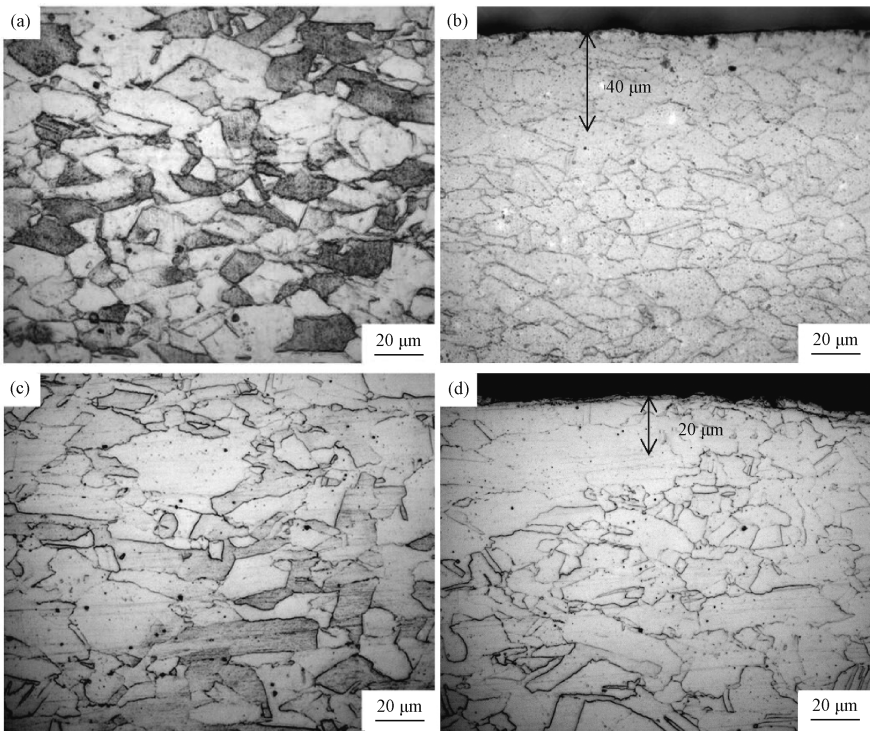


图 2 轧后不同冷却方式时复合板中 316L 不锈钢的显微组织

(a) 水冷-空冷的 316L; (b) 水冷-空冷的界面区; (c) 水冷的 316L; (d) 水冷的界面区

Fig. 2 Microstructure of 316L stainless steel in the clad plate under different cooling methods after rolling (a) water-and-air-cooled 316L; (b) water-and-air-cooled interface area; (c) water-cooled 316L; (d) water-cooled interface area

图3所示为不锈钢复合板界面区的SEM形貌和EDS线扫描分析结果,由图可知,界面区发生了合金元素扩散,其中Cr、Ni由不锈钢向碳钢扩散,而且碳钢脱碳层组织及界面元素扩散距离与轧后冷

却方式有一定关系。在水冷-空冷的冷却过程,降温速度较慢,碳钢脱碳层晶粒粗大,组织应力较小,这有利于合金元素的跨界面扩散,因此形成的扩散距离较大。

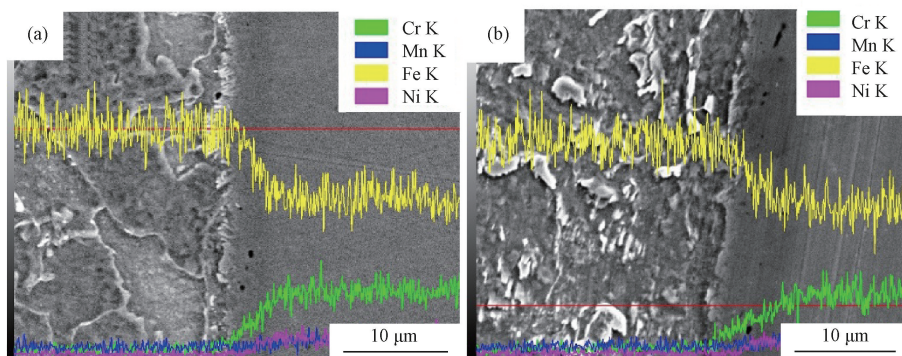


图3 轧后不同冷却方式时复合板界面的元素线扫描分析 (a) 水冷-空冷; (b) 水冷
Fig. 3 Element line scanning analysis of the clad plate interface under different cooling methods after rolling
(a) water-and-air-cooled; (b) water-cooled

图4为轧态不锈钢复合板界面区的EBSD形貌。由图4可知,水冷-空冷冷却后,Q370qE/316L复合界面区存在一个由细小晶粒组成的过渡层组织,而快速水冷的复合界面仅在局部位置存在细小再结晶晶粒,无明显过渡层组织。此外,水冷-空冷冷却时碳钢脱碳层的铁素体晶粒尺寸较大,而纯水冷时脱碳层的晶粒

组织细小,其中保留了一些再结晶晶粒,如图4(b)中白色圆圈所示。对比不锈钢层的组织可知,奥氏体晶粒在两阶段冷却过程发生回复和长大,晶粒尺寸的均匀度明显高于水冷试样,而在快速水冷过程由于组织回复行为被抑制,奥氏体晶粒中含有较多的亚晶界,如图4(b)中箭头所示,靠近界面的奥氏体晶粒更为细小^[28]。

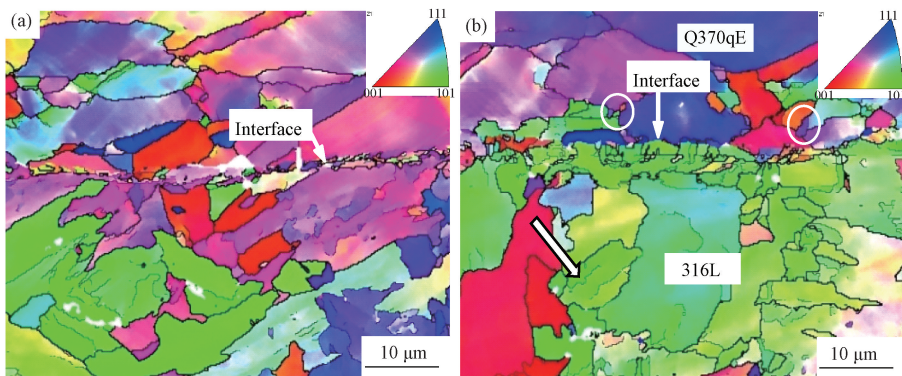


图4 轧后不同冷却方式时 Q370qE/316L 复合界面区的 EBSD 形貌 (a) 水冷-空冷; (b) 水冷
Fig. 4 EBSD morphology of the Q370qE/316L composite interface area under different cooling methods after rolling
(a) water-and-air-cooled; (b) water-cooled

轧态不锈钢复合板的界面拉剪试验结果显示,两阶段冷却时界面剪切强度为 304 MPa,而单纯水冷时界面剪切强度为 400 MPa。界面拉剪断口宏观形貌如图5所示,可以观察到拉剪断裂面更靠近碳钢一侧。断口表面SEM形貌如图6所示,不同冷却方式的碳钢和不锈钢断口表面均呈现出剪切变形特征。在两阶段冷却的复合板断口表面,碳钢和不锈钢的形

貌相似,经能谱分析发现二者成分接近,均含有 2 mass%左右的Cr元素和 96 mass%以上的Fe元素,且通过图5的不同冷却方式时复合界面拉剪断口的宏观截面形貌可以看到界面断裂处靠近碳钢一侧,推测断裂发生在碳钢侧的脱碳层,通过图6(a)和6(b)断口两侧微观形貌判断出复合界面的拉剪断裂面位于碳钢的脱碳层。由于脱碳层厚度较大,铁素体组织

粗化,断裂韧性低,导致复合界面的拉剪性能下降,断裂后局部形成裂口,如图 6(a)箭头所示位置。在纯水冷复合板的断口表面,存在大小不一、分布不均匀的韧窝,还存在少量尺寸较大的凹坑,如图 6(c)和

6(d)箭头所示。结合显微组织可知,脱碳层厚度较小,铁素体晶粒细化,并夹杂一些细小的再结晶晶粒,渗碳体不连续分布于其中,因此脱碳层具有较高的抗剪切强度。

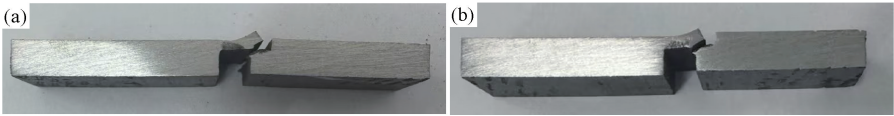


图 5 不同冷却方式时 Q370qE/316L 复合界面拉剪断口的宏观形貌 (a) 水冷-空冷; (b) 水冷
Fig. 5 Macroscopic morphology of tensile shear fracture surface of Q370qE/316L composite interface under different cooling methods (a) water-and-air-cooled; (b) water-cooled

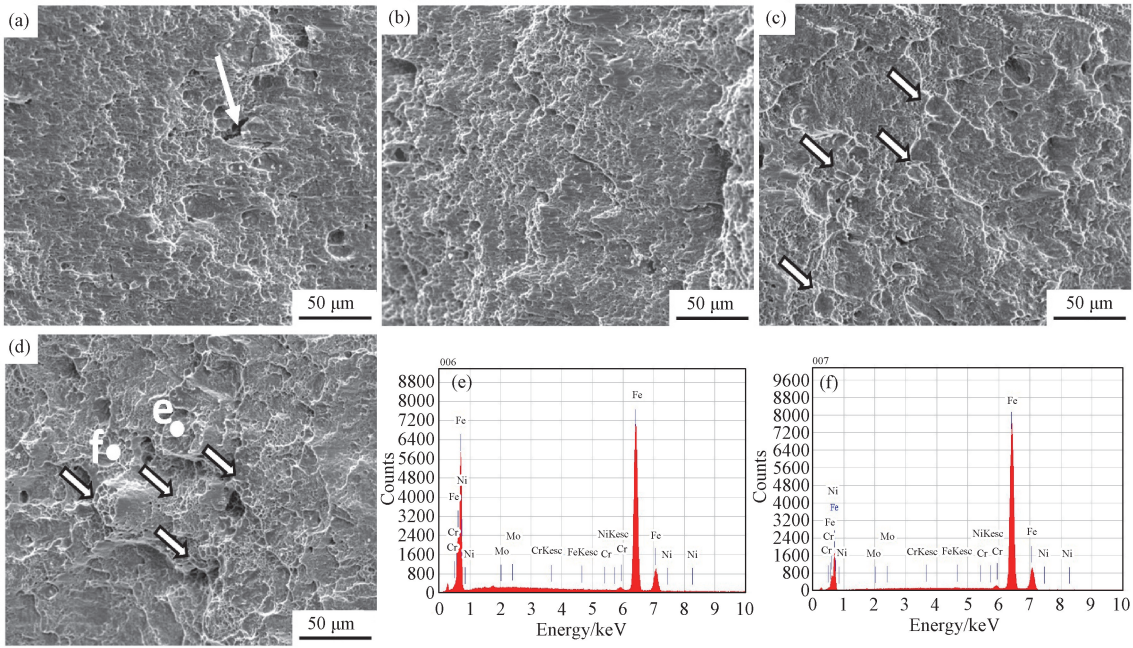


图 6 不同冷却方式时 Q370qE/316L 复合界面拉剪断口的 SEM 形貌和成分分析
(a, b) 水冷-空冷; (c, d) 水冷; (a, c) Q370qE; (b, d) 316L; (e, f) EDS 分析结果与(d)中 e、f 点对应
Fig. 6 SEM morphology and composition analysis of tensile shear fracture surface of Q370qE/316L composite interface under different cooling modes (a, b) water-and-air-cooled; (c, d) water-cooled; (a, c) Q370qE; (b, d) 316L; (e, f) EDS analysis results corresponding to points e and f in (d)

在复合界面的拉剪过程,脱碳层的晶粒之间因变形不一致产生应力集中,导致裂纹逐渐萌生,裂纹运动使脱碳层断口产生大量韧窝,并在晶粒变形协调性较差的位置,裂纹合并产生较大的孔洞^[29]。根据图 3 所示的界面区 SEM 形貌可知,在复合界面中存在少量黑色颗粒状夹杂物,这将导致界面局部位置的结合强度下降。当裂纹在脱碳层中扩展阻力较大时,进入碳钢和不锈钢复合界面的薄弱位置继续扩展,从而导致剪切断口形成明显的凹凸形貌。图 6(e)和 6(f)的 EDS 点分析结果显示,在不锈钢断口表面上的韧窝状形貌均为碳钢成分,结合该图中的孔洞,可以表明复

合界面拉剪时沿着碳钢脱碳层断裂,裂纹在更靠近不锈钢基体的界面夹杂物处扩展。
轧后不同冷却方式时不锈钢复合板的拉伸力学性能如表 2 所示,水冷-空冷的缓慢冷却方式使不锈钢复合板各部分组织软化,因此强度较低、塑性较好。而单纯水冷的复合板具有快速冷却组织特征,碳钢组织主要为板条马氏体和贝氏体,不锈钢组织为具有孪晶的细晶奥氏体,因此屈服强度和抗拉强度均明显升高。由于快速冷却降低了复合界面的脱碳层和渗碳层厚度,界面较高的结合强度也对复合板拉伸性能产生促进作用,尤其是对抗拉强度的改善明显,主要

表 2 不同冷却方式时不锈钢复合板的拉伸力学性能

Table 2 Tensile mechanical properties of stainless steel clad plate under different cooling methods

Post-rolling cooling method	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Yield-to-strength ratio
water-and-air-cooled	523	611	19	0. 86
water-cooled	637	804	14	0. 79

表现形式为拉伸断裂前复合界面紧密结合,使最大拉伸力提高,因此水冷的复合板获得了较低的屈强比 0. 79。

2. 2 回火处理对不锈钢复合板组织性能的影响

图 7 所示为经过不同温度回火后复合板碳钢侧的显微组织。由图 7 可知,回火温度越高,界面区的脱碳层越厚,紧邻界面的铁素体含量和尺寸越大,550 ℃时脱碳层厚度达到 100 μm 左右。在回火

过程,碳钢的碳原子继续向不锈钢层扩散,导致脱碳层增厚,而且紧邻界面的脱碳层主要组织为铁素体,晶粒生长受到第二相阻碍作用较少,铁素体晶粒容易发生长大。此外,碳钢在淬火时形成的马氏体发生分解,450 ℃及以下温度时转变为回火索氏体,组织为贝氏体和回火索氏体混合组织,在 500 ℃及以上温度时晶粒组织粗化,得到了铁素体和回火索氏体混合组织。

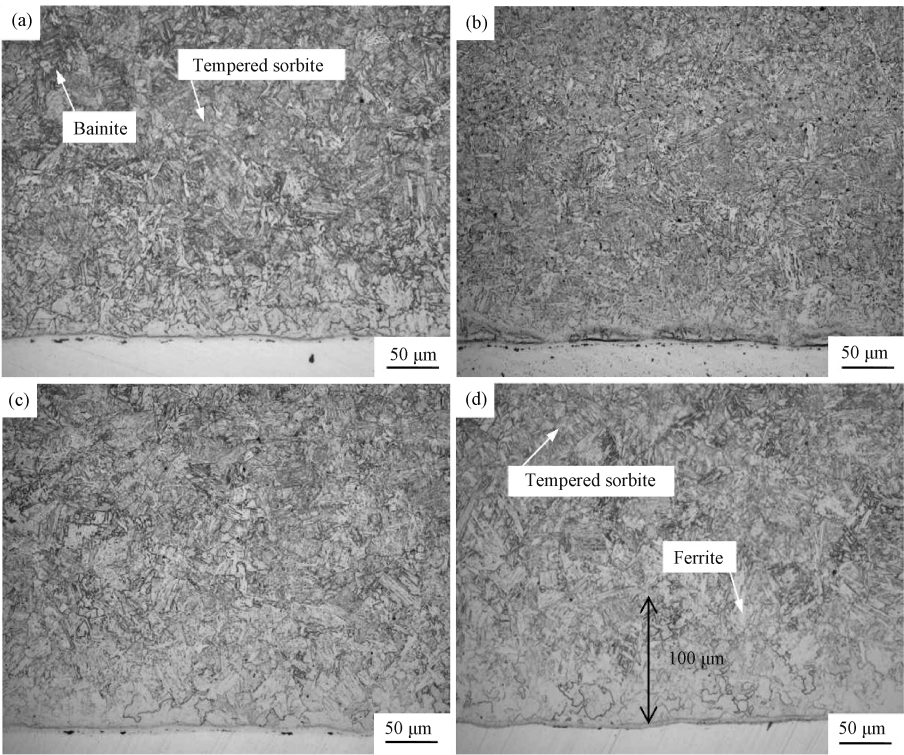


图 7 不同温度回火时复合板中 Q370qE 碳钢的显微组织 (a) 400 ℃; (b) 450 ℃; (c) 500 ℃; (d) 550 ℃

Fig. 7 Microstructure of Q370qE carbon steel in the clad plate tempered at different temperatures

(a) 400 ℃; (b) 450 ℃; (c) 500 ℃; (d) 550 ℃

图 8 所示为经过回火处理后复合板不锈钢侧的显微组织。由图 8 可知,在 400~550 ℃ 范围内回火,316L 不锈钢的奥氏体晶粒尺寸变化不明显,但晶粒形态发生改变,轧后快速冷却时获得的再结晶晶粒有所长大,使得奥氏体晶粒尺寸均匀性得到改善。同时,Q370qE/316L 复合界面区的元素互扩散程度加剧,不锈钢的渗碳层厚度增加,550 ℃时厚度达到 20 μm。

图 9 为回火处理对不锈钢复合板界面拉剪强度的影响,回火造成复合界面的拉剪强度下降。450 ℃ 以下回火时,界面拉剪强度缓慢下降,450 ℃ 回火后界面拉剪强度为 364 MPa,在 500 ℃ 时迅速降至最低值 311 MPa。当回火温度为 550 ℃ 时,拉剪强度又小幅回升至 320 MPa。尽管如此,轧后水冷复合板经回火后的界面拉剪强度仍比轧后水冷-空冷复合板的界面强度 304 MPa 偏高一些。结果表明,轧后冷却方式

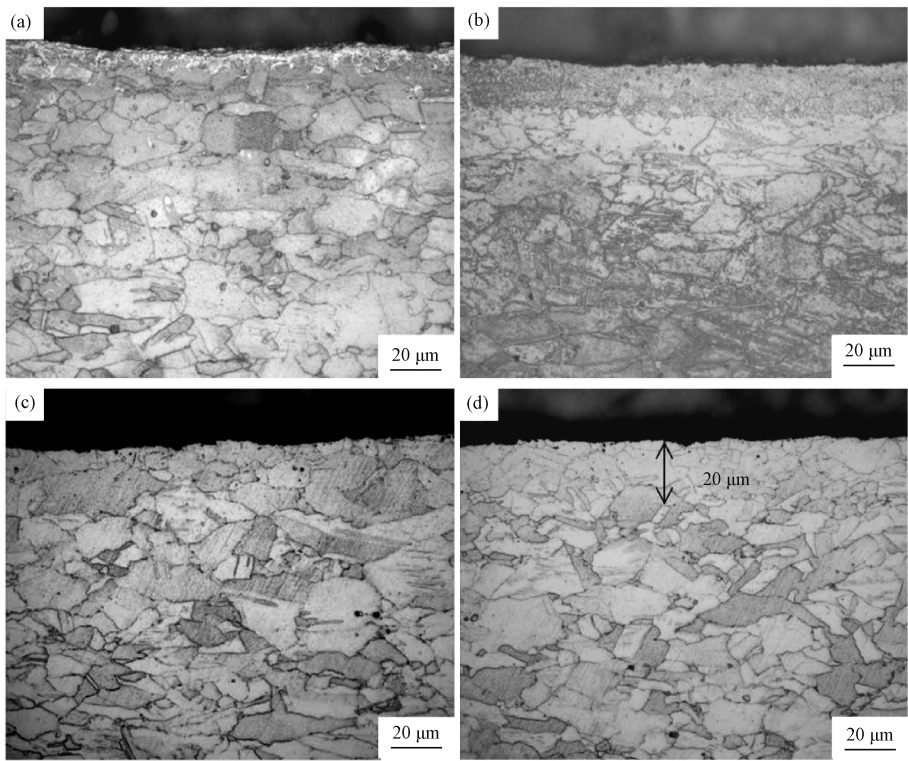


图 8 不同温度回火时复合板中 316L 不锈钢的显微组织 (a) 400 °C; (b) 450 °C; (c) 500 °C; (d) 550 °C

Fig. 8 Microstructure of 316L stainless steel in the clad plate tempered at different temperatures (a) 400 °C; (b) 450 °C; (c) 500 °C; (d) 550 °C

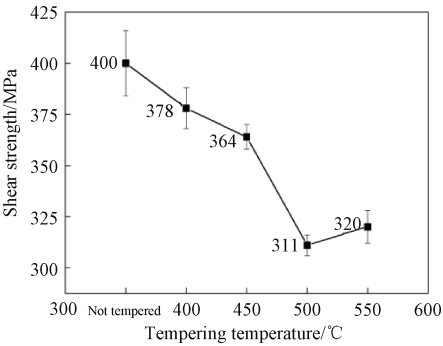


图 9 回火前后不锈钢复合板的界面拉剪强度

Fig. 9 Interfacial tensile shear strength of the stainless steel clad plate before and after tempering

对界面结合强度影响更大。

图 10 为不同温度回火时复合界面拉剪断口的宏观形貌,可以看出回火后复合板界面的拉剪失效位置均位于碳钢脱碳层区域。图 11 为碳钢侧断口的 SEM 形貌。由图 11 可知,400 °C 回火的碳钢断口表面与未回火前的断口相似,但表面凹凸程度更明显,表明回火后脱碳层的组织均匀度下降,拉剪断裂时裂纹扩展路径复杂,使断口表面不平整。当回火温度高于

450 °C,碳钢断口表面呈现大量微孔和一些凹坑,其中在 500 °C 回火试样中存在多处垂直于剪切方向的裂缝。

根据上述试验结果可知,回火使界面区的原子扩散加剧,碳钢侧的脱碳层增厚,且层内铁素体晶粒长大,脱碳层的梯度组织特征加剧,造成脱碳层的抗剪切韧性下降^[30]。在拉剪试验时,界面脱碳层成为不锈钢和碳钢塑性变形的应力过渡区,裂纹率先在脱碳层中萌生,逐渐引发复合界面的剪切断裂,因此回火后复合界面的拉剪强度下降。

当界面拉剪强度较高时,初始裂纹的扩展受到较大阻碍,会发生裂纹扩展路径偏转,形成如图 11(a)所示的凸凹断口形貌。当界面拉剪强度下降,剪切断裂行为较易进行,断口形貌表现出平滑特征,如图 11(b)~11(d)所示。当脱碳层厚度增加、铁素体组织粗化时,剪切裂纹易在粗晶区扩展合并,造成断裂表面形成图 11(c)箭头所示的剪切状凹坑。若界面抗剪切能力较差,剪切断裂的裂纹除了在剪切平面扩展,也会垂直于剪切面往脱碳层内部深入扩展,使断口中形成较大的裂缝,如图 11(c)左侧选框所示。

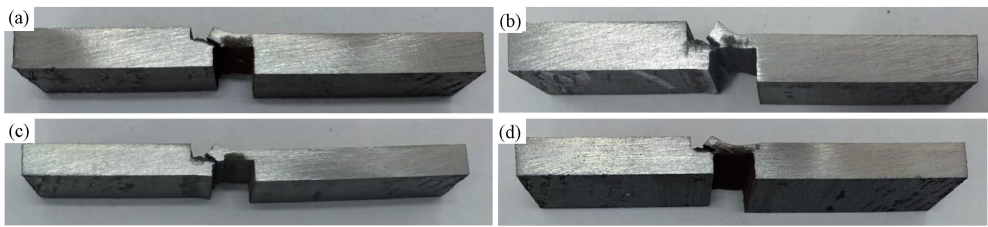


图 10 不同温度回火时复合界面拉剪断口的宏观形貌 (a) 400 °C ; (b) 450 °C ; (c) 500 °C ; (d) 550 °C

Fig. 10 Macroscopic morphology of tensile shear fracture surface of the composite interface tempered at different temperatures (a) 400 °C ; (b) 450 °C ; (c) 500 °C ; (d) 550 °C

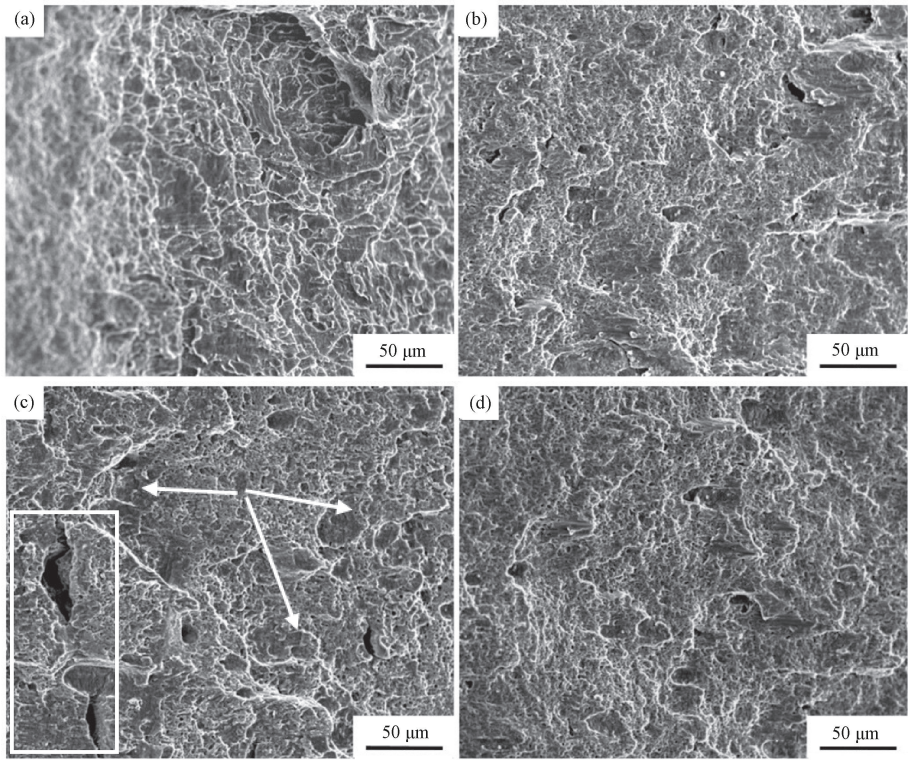


图 11 不同温度回火时复合板界面拉剪断口碳钢侧的 SEM 形貌 (a) 400 °C ; (b) 450 °C ; (c) 500 °C ; (d) 550 °C

Fig. 11 SEM morphology of tensile shear fracture on carbon steel side of the clad plate interface tempered at different temperatures (a) 400 °C ; (b) 450 °C ; (c) 500 °C ; (d) 550 °C

回火后复合板的拉伸力学性能列于表 3 中。复合板的屈服强度、抗拉强度随着回火温度升高而逐渐下降,在 500 °C 时降至最低值,在 550 °C 时强度值又有小幅上升。与未经回火处理的试样相比较,由于回火使显微组织发生回复软化,复合板断后伸长率有明显提高。经过回火处理之后,碳钢的马氏体组织发生分解转变,而且复合界面的结合强度也下降显著,基体组织软化以及界面强化作用减弱,导致复合板的抗拉强度大幅下降,因而不锈钢复合板的屈强比从 0.79 提高至 0.90。

不锈钢复合板回火后的拉伸性能较为接近,因此

表 3 回火处理后不锈钢复合板的拉伸力学性能

Table 3 Tensile mechanical properties of the stainless steel clad plate after tempering treatment

Tempering temperature/°C	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Yield-to-strength ratio
400	597	678	15	0.88
450	594	661	18	0.90
500	584	658	18	0.89
550	596	670	19	0.89

仅选择其中一组温度的拉伸试样进行断口分析。图 12 为 450 °C 回火后不锈钢复合板拉伸断口的 SEM 形貌。由图 12 可知,碳钢和不锈钢在界面处分离,这

是因为回火之后复合板的界面剪切强度降低,碳钢基体的马氏体组织发生了分解转变为索氏体,不锈钢的奥氏体晶粒组织均匀化,在拉伸颈缩过程中不锈钢和碳钢的塑性行为不协调,导致界面承受附加应力,引起复合界面产生裂缝。如图 12(b)所示,碳钢断口表

面形貌不均匀,存在明显的断裂脊和裂纹,且局部位置存在较大的韧窝。不锈钢断口表面呈现出均匀的韧窝形貌,表现为韧性断裂特征。表明回火处理改善了复合板基层和覆层材料的塑性,复合板整体断裂韧性提高。

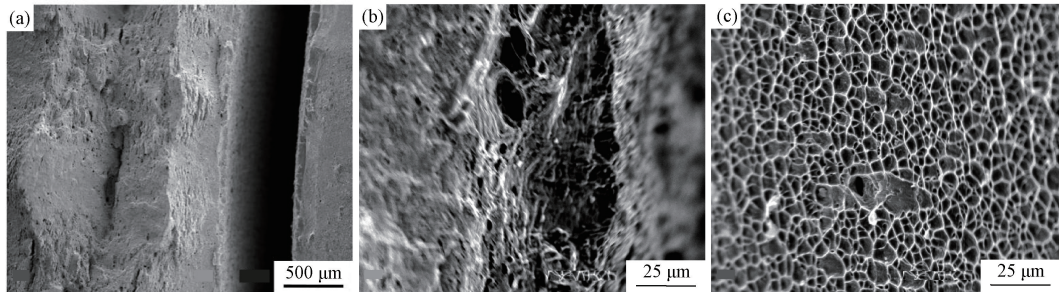


图 12 水冷+450 °C 回火的不锈钢复合板拉伸断口的 SEM 形貌 (a) 整体断口; (b) Q370qE 碳钢; (c) 316L 不锈钢

Fig. 12 SEM morphology of tensile fracture surface of water-cooled stainless steel clad plate after tempering at 450 °C

(a) integral fracture; (b) Q370qE carbon steel; (c) 316L stainless steel

3 结论

1) 316L/Q370qE 不锈钢复合板轧后快速水冷至室温,抑制了复合界面区的合金元素扩散,脱碳层和渗碳层厚度均低于水冷-空冷的两阶段冷却方式;水冷时,碳钢基体由板条马氏体、贝氏体和少量残留奥氏体组成,不锈钢为含孪晶的奥氏体,脱碳层组织为细晶铁素体和贝氏体,渗碳层组织细化;水冷复合板的界面拉剪强度为 400 MPa,剪切断裂位于碳钢脱碳层,屈服强度和抗拉强度分别为 637 和 804 MPa,断后伸长率为 14%,明显高于两阶段冷却方式的复合

板力学性能;

2) 轧后水冷复合板经过回火处理,脱碳层和渗碳层厚度略有增加,界面拉剪强度呈下降趋势;在 450 °C 回火 1 h 后,复合板的碳钢组织转变为回火索氏体和贝氏体混合组织,奥氏体组织发生均匀化,界面拉剪强度降至 364 MPa,屈服强度和抗拉强度分别为 594 和 661 MPa,断后伸长率为 18%,复合板具有较好的强韧性;

3) 316L/Q370qE 不锈钢复合板在 880 °C 终轧后快速水冷至室温,再经过 450 °C 回火 1 h,可以获得较好的综合力学性能。

参 考 文 献

- [1] 李龙,张心金,刘会云,等. 不锈钢复合板的生产技术及工业应用[J]. 轧钢,2013,30(3):43-47.
LI Long, ZHANG Xin-jin, LIU Hui-yun, et al. Production technology and application of stainless steel clad plate[J]. Steel Rolling, 2013, 30(3): 43-47.
- [2] 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, 32(10): 1398-1401.
XIE Guang-ming, LUO Zong-an, WANG Guang-lei, et al. Microstructure and properties of stainless steel clad plate by vacuum rolling cladding[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2011, 32(10): 1398-1401.
- [3] Chen Z Y, Qi J J, Liu H Q, et al. Research on production technology of asymmetrically hot rolled stainless steel clad plate[J]. Materials Science Forum, 2020, 996: 185-190.
- [4] 焦少阳,董建新,张麦仓,等. 双金属热轧复合的界面结合影响因素及结合机理[J]. 材料导报, 2009, 23(1): 59-62.
JIAO Shao-yang, DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, et al. Influencing factors and bonding mechanism of hot rolling bonded bi metals[J]. Materials Review, 2009, 23(1): 59-62.
- [5] 代响林,刘宝玺,马久乐,等. 真空热轧法制备不锈钢复合板组织和力学性能[J]. 钢铁, 2017, 52(2): 65-70.
DAI Xiang-lin, LIU Bao-xi, MA Jiu-le, et al. Microstructure and mechanical properties of stainless steel clad plate fabricated by

- vacuum hot rolling[J]. Iron and Steel, 2017, 52(2): 65–70.
- [6] 黄邴, 张明亚, 李景辉, 等. 热轧对 304 不锈钢/Q235 碳钢复合板界面组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(12): 100–106.
- HUANG Li, ZHANG Ming-ya, LI Jing-hui, et al. Effect of hot rolling on interface microstructure of 304 stainless steel/Q235 carbon steel composite plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(12): 100–106.
- [7] Liu B X, Wang S, Fang W, et al. Meso and microscale clad interface characteristics of hot-rolled stainless steel clad plate[J]. Materials Characterization, 2019, 148: 17–25.
- [8] Liu B X, An Q, Yin F X, et al. Interface formation and bonding mechanisms of hot-rolled stainless steel clad plate[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54: 11357–11377.
- [9] 邵春娟, 镇凡, 陆春洁, 等. 热轧 S31603/Q370q 不锈钢复合板界面特征分析[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(2): 181–188.
- SHAO Chun-juan, ZHEN Fan, LU Chun-jie, et al. Analysis on interface characteristics of hot-rolled S31603/Q370q stainless clad steel plate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(2): 181–188.
- [10] 镇凡, 刘静, 黄峰, 等. 变形率对 316L/Q420 不锈钢复合板界面结构和结合性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(1): 22–30.
- ZHEN Fan, LIU Jing, HUANG Feng, et al. Effect of deformation rate on interface microstructure and bonding properties of 316L/Q420 stainless steel clad plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(1): 22–30.
- [11] 于涛, 井玉安, 张亚樵, 等. 不锈钢复合板界面组织形貌[J]. 钢铁, 2018, 53(11): 63–69.
- YU Tao, JING Yu-an, ZHANG Ya-qiao, et al. Interfacial microstructure morphologies of stainless steel clad plate[J]. Iron and Steel, 2018, 53(11): 63–69.
- [12] 曾周燊, 江珊, 李东晖. TMCP 工艺轧制桥梁用不锈钢复合板的组织与性能[J]. 中国冶金, 2017, 27(6): 19–23.
- ZENG Zhou-yu, JIANG Shan, LI Dong-hui. Microstructures and properties of stainless steel clad plate used for bridge rolled by thermal mechanical control process[J]. China Metallurgy, 2017, 27(6): 19–23.
- [13] 金贺荣, 张春雷, 韩雪艳, 等. 热处理对 316L/Q345R 不锈钢复合板显微组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 952–958.
- JIN He-rong, ZHANG Chun-lei, HAN Xue-yan, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L/Q345R stainless steel clad plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(4): 952–958.
- [14] 李龙, 祝志超, 张心金, 等. 利用控轧控冷技术开发热轧不锈钢复合板的实验研究[J]. 材料工程, 2015, 43(7): 62–67.
- LI Long, ZHU Zhi-chao, ZHANG Xin-jin, et al. Experimental study on hot rolled stainless steel clad plate produced by TMCP[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(7): 62–67.
- [15] 李国鹏, 骆宗安, 杨子江, 等. 轧后冷却速度对真空热轧 N08367/Q345R 复合板组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(18): 76–79.
- LI Guo-peng, LUO Zong-an, YANG Zi-jiang, et al. Effects of cooling rate after rolling on the microstructure and properties of N08367/Q345R clad plate by vacuum hot rolling[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(18): 76–79.
- [16] 王明坤, 骆宗安, 曾周燊, 等. 热处理工艺对超级奥氏体不锈钢复合板组织与性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 777–782.
- WANG Ming-kun, LUO Zong-an, ZENG Zhou-yu, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel clad plate[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(6): 777–782.
- [17] 刘海璋, 毕宗岳, 田磊, 等. 不锈钢 2205/X65 复合板热处理工艺研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(2): 207–210.
- LIU Hai-zhang, BI Zong-yue, TIAN Lei, et al. Study on heat treatment process of 2205 stainless steel/X65 composite plate[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(2): 207–210.
- [18] Li L Y, Zhao B S, Chen Y T, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties evolution of stainless steel cladding plate[J]. Materials, 2023, 16(13): 4809.
- [19] Hang P, Zhao B, Zhou J, et al. Effect of heat treatment on crevice corrosion behavior of 304 stainless steel clad plate in seawater environment[J]. Materials, 2023, 16(11): 3952.
- [20] Yang Y H, Li H J, Jiang Z Z, et al. Simultaneously enhanced strength-ductility synergy and corrosion resistance in liquid-solid bonded stainless steel cladding carbon steel plate by hot rolling and annealing treatment[J]. Materials Science and Engineering A, 2023, 871: 144928.

- [21] 刘燕平,李平仓,刘凯,等. 热处理工艺对 2205-Q345R 爆炸复合板性能的影响[J]. 中国舰船研究,2016,11(3):128-132.
LIU Yan-ping,LI Ping-cang,LIU Kai,et al. Effect of heat treatments on the properties of explosive clad plates 2205 DSS-Q345R [J]. Chinese Journal of Ship Research,2016,11(3):128-132.
- [22] 沈春豫,樊科社,王俊,等. 热处理对爆炸焊接 316L/Q235B 复合板组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2019,44(9):204-208.
SHEN Chun-yu,FAN Ke-she,WANG Jun,et al. Effect of heat treatment on the microstructure and property of 316L/Q235B explosive welding clad plate[J]. Heat Treatment of Metals,2019,44(9):204-208.
- [23] Ding Y,Cao R,Yan Y. Effects of heat treatment on fracture mechanism of martensite/austenite MLS composite plates by hot roll bonding[J]. Materials Science and Engineering A,2020,773:138727.
- [24] Li H,Zhang L Y,Zhang B Y,et al. Effect of heat treatment on the microstructure and corrosion resistance of stainless/carbon steel bimetal plate[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2020(1):1280761.
- [25] 吕泽华,张志雄,赵敬伟,等. 热轧双覆层不锈钢/碳钢复合板组织与性能研究[J]. 塑性工程学报,2020,27(7):168-175.
LÜ Ze-hua,ZHANG Zhi-xiong,ZHAO Jing-wei,et al. Research on the microstructure and properties of double cladding stainless steel/carbon steel clad plate by hot rolling[J]. Journal of Plasticity Engineering,2020,27(7):168-175.
- [26] 金玉龙. 不锈钢复合板碳扩散及组织性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2019.
JIN Yu-long. Study on carbon diffusion and microstructure of stainless steel clad plates [D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2019.
- [27] 李龙,张心金,祝志超,等. 真空热轧不锈钢复合板界面结合行为的研究[J]. 材料与冶金学报,2014,13(1):46-50.
LI Long,ZHANG Xin-jin,ZHU Zhi-chao,et al. Investigation on bonding of stainless steel clad plate by vacuum hot rolling[J]. Journal of Materials and Metallurgy,2014,13(1):46-50.
- [28] 黄强. 轧制工艺对不锈钢复合板结合质量的影响[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2019.
HUANG Qiang. Influences of rolling process on bonding quality of stainless steel clad plate [D]. Maanshan: Anhui University of Technology,2019.
- [29] Chen C X,Liu M Y,Liu B X,et al. Tensile shear sample design and interfacial shear strength of stainless steel clad plate[J]. Fusion Engineering and Design,2017,125:431-441.
- [30] Liu B X,Wang S,Fang W,et al. Microstructure and mechanical properties of hot rolled stainless steel clad plate by heat treatment [J]. Materials Chemistry and Physics,2018,216:460-467.