引用格式：李小兵，金一澜，蒋国民，等.终轧温度对不锈钢/碳钢复合板组织与性能的影响[J].材料工程，2026，54(3)：181-190.
LI Xiaobing，JIN Yilan，JIANG Guomin，et al.Influence of final rolling temperature on microstructure and properties of stainless steel/carbon steel clad plate[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(3)：181-190.

终轧温度对不锈钢/碳钢复合板组织与性能的影响

李小兵[1*]，金一澜[1]，蒋国民[1]，郑传波[1]，镇　凡[2]，邵春娟[2]，曲锦波[2]，麻　晗[2]
（1 江苏科技大学 冶金工程学院，江苏 张家港 215600；2 江苏省（沙钢）钢铁研究院，江苏 张家港 215625）

摘要：针对316L不锈钢/Q370qE碳钢在热轧复合过程存在各层组织不协调、界面结构不易控制的问题，研究终轧温度对不锈钢复合板组织和性能的影响规律。通过金相显微镜、SEM、TEM和EDS分析复合板的显微组织，采用拉剪、拉伸实验测试力学性能。结果表明：终轧温度越高，复合板界面区的脱碳层和渗碳层厚度越大，而Cr、Ni元素扩散距离先增加后减少。840 ℃终轧时，碳钢层由先共析铁素体、贝氏体和索氏体组成，不锈钢层由部分再结晶的奥氏体组成，脱碳层厚度40 μm，渗碳层厚度35 μm。随着终轧温度的升高，复合板界面的拉剪强度先增加后降低，而屈服强度和抗拉强度均增加，在高温时增速减缓。复合板的拉剪断裂位置位于碳钢的脱碳层，拉伸断口产生分层现象。因此，840 ℃终轧复合板的综合力学性能最佳，界面拉剪强度、屈服强度和抗拉强度分别为339、497 MPa和594 MPa，断后伸长率为18.6%。

关键词：不锈钢复合板；终轧温度；界面；扩散；力学性能
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000790　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000790
中图分类号：TG335　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)03-0181-10

Influence of final rolling temperature on microstructure and properties of stainless steel/carbon steel clad plate

LI Xiaobing[1*]，JIN Yilan[1]，JIANG Guomin[1]，ZHENG Chuanbo[1]，ZHEN Fan[2]，SHAO Chunjuan[2]，QU Jinbo[2]，MA Han[2]
（1 School of Metallurgical Engineering，Jiangsu University of Science and Technology，Zhangjiagang 215600，Jiangsu，China；2 Institute of Research of Iron & Steel，Shagang，Jiangsu Province，Zhangjiagang 215625，Jiangsu，China）

Abstract：This paper focuses on the problems of uncoordinated microstructure in each layer and difficult control of interfacial microstructure during the hot roll-bonding process of 316L stainless steel and Q370qE carbon steel. The influence of the final rolling temperature on the microstructure and properties of the stainless steel clad plate is investigated. The microstructure of the clad plate is analyzed by metallographic microscope，scanning electron microscope，transmission electron microscope，and energy dispersive spectrometer. The mechanical properties are performed based on the interface tension-shear and tensile tests. The results show that the higher the final rolling temperature，the larger the thickness of the decarburization layer and carburization layer in the interface area of the clad plate，while the diffusion distance of Cr and Ni elements first increases and then decreases. When the final rolling temperature is 840 ℃，the carbon steel layer is composed of proeutectoid ferrite，bainite，and sorbite，and the stainless steel layer is composed of austenite with several fine recrystallized grains. The thickness of the decarburization layer is 40 μm，and the thickness of the carburization layer is 35 μm. With the increase of the final rolling temperature，the interface tension-shear strength of the clad plate first increases and then decreases，while the yield strength and tensile strength both increase，and the increase rate slows down at high temperatures. The tension-shear fracture position of the clad plate is located in the decarburization layer of the carbon steel，and the fracture morphology of tensile shows interface delamination. Therefore，the clad plate final rolled at 840 ℃ achieves the best mechanical performance，with the interface tension-shear strength of 339 MPa，the yield strength of 497 MPa，the tensile strength of 594 MPa，and the

elongation after fracture of 18.6%, respectively.

Key words: stainless steel clad plate; final rolling temperature; interface; diffusion; mechanical property

随着科技的进步和工业的发展,高性能复合材料不锈钢/碳钢复合板的需求正在不断增加。不锈钢与碳钢组合形成的层状复合材料能够显著改善碳钢的耐蚀性能和高温性能,使碳钢能够突破苛刻环境的限制,被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,不锈钢复合板的制备通常采用爆炸焊接法和轧制复合法,而后者制备的复合板具有良好的板形和丰富的尺寸规格,连续化、自动化程度高,逐渐成为主要的制备方法[3-4]。将不锈钢和碳钢组成的复合板坯加热至高温状态后,通过多道次轧制压下可使其界面实现牢固的冶金结合。不锈钢与碳钢在成分、组织结构、力学性能方面存在显著差异,热轧时二者之间形成的层状复合界面容易产生成分偏析,导致复合板形成明显的不同区域,分别为碳钢基层、碳钢界面过渡区、复合界面、不锈钢界面过渡区和不锈钢覆层。各部分的组织性能受热轧工艺的影响显著,因此需要深入研究热轧复合过程中的组织调控机制,以改善复合板的综合性能[5]。轧制温度是热轧复合过程中的重要工艺参数之一,其对板坯的晶粒尺寸、相变组织和力学性能均有较大影响,又是界面结合性能的重要影响因素。何天仁[6]研究发现,304/Q345R热轧正火制备的复合板获得了均匀平整的层状界面,各层组织结构稳定,不锈钢耐晶间腐蚀性能良好,复合板拉伸断口没有出现界面分层。终轧温度会促进合金元素的扩散,使界面处的合金元素浓度产生变化,进而影响界面的结合强度。于涛等[7]研究表明,增加轧制道次促进了304不锈钢/碳钢的界面嵌合和元素扩散,提高了复合界面的剪切强度,但造成不锈钢侧的晶界产生少量$M_{23}C_6$型碳化物相。An等[8]研究了轧制温度对304/Q235复合板组织性能的影响,发现随着轧制温度的升高,界面区合金元素充分扩散促进了界面冶金结合,但由于高温轧制条件下不锈钢和碳钢基体软化,造成复合板弯曲韧性和冲击韧性下降。终轧温度也影响着界面过渡区的厚度和成分均匀性。张永健等[5]研究发现,2205/Q345C复合板层状界面区的脱碳层和渗碳层厚度均随终轧温度的增加而增加,2205钢中的Cr、Ni元素向Q345C钢中连续扩散,二者的扩散距离均随终轧温度的升高而增加,当终轧温度为950～1100 ℃时,复合板界面结合良好。Jin等[9]采用DEFORM有限元软件对316L/Q345R不锈钢复合板的多道次轧制过程进行了模拟,建立了界面结合的形变判据和晶粒尺寸形态,当轧制温度为1150 ℃、压下率超过50%时,复合板获得了高强度结合界面。

轧制过程的变形温度和塑性流动程度对复合板的组织性能产生重要影响,除此之外,轧后冷却阶段的相转变行为也与轧制变形温度有着密切联系。李龙等[10]进行了316/Q345R不锈钢复合板的热轧制备工艺研究,在终轧温度为1000～1050 ℃、轧后以7 ℃/s的速率冷却至450 ℃以下后空冷的情况下,Q345R形成了铁素体和贝氏体混合组织,界面结合强度高于350 MPa。金贺荣等[11]研究发现,真空热轧316L/Q345R复合板未热处理时,不锈钢侧析出Cr的碳化物较多,经过高温快冷和低温缓冷处理后,Cr发生重新固溶且碳钢基体形成贝氏体,复合板力学性能和耐蚀性能提高。研究表明,不锈钢/碳钢在固态复合过程中时,温度对复合界面的演变和性能调控有着至关重要的影响[12]。不锈钢复合板的界面和基体在热轧复合过程中存在不协调的塑性变形与组织转变行为,如何优化轧制工艺参数,同步实现界面强化与基体性能优化,成为不锈钢复合板高性能化的关键。

随着钢铁生产中控制轧制技术的广泛应用,阐明不锈钢/碳钢热轧复合过程中温度对复合板的界面及基体组织性能的综合影响,合理设计热轧复合工艺的温度窗口,是提高复合板生产效率和产品性能的重要手段。但受制于界面与基体组织结构及成分特征存在的巨大差异,热轧温度对碳钢、不锈钢及其层状复合界面组织转变的影响机制仍不够清晰,使得不锈钢复合板的组织性能难以实现预测和精确控制。因此,本工作针对不锈钢复合板的真空热轧制备工艺开展实验研究,通过金相显微镜、SEM、TEM和EDS分析复合板的显微组织,采用拉剪、拉伸实验测试其力学性能,研究终轧温度(800、840、880 ℃)对复合板界面和基体组织性能的影响规律,探索复合板界面基体组织性能的协同优化方法。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

不锈钢复合板的基层材料为碳钢Q370qE,厚度为(32±0.2) mm,覆层材料为不锈钢316L,厚度为(10±0.1) mm,二者化学成分如表1所示。

表 1　不锈钢复合板的化学成分(质量分数/%)

Table 1　Chemical compositions of stainless steel clad plate(mass fraction/%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	Ti	Mo	N	Fe
Q370qE	0.15	0.22	1.39	0.01	0.0033	0.12	0.11	0.017	0.013	0	0	Bal.
316L	0.025	0.55	1.35	0.0333	0.0034	10.03	16.91	0	0	2.02	0.015	Bal.

1.2　实验方法

碳钢和不锈钢的原始厚度分别为 32mm 和 10 mm,对复合表面进行铣削加工和清洗,去除坯料表面的氧化铁皮及污染物后厚度分别为 31 mm 和 9.5 mm,然后对称组坯,坯料尺寸为 100 mm×170 mm×85 mm。最外层为碳钢,内层为不锈钢,不锈钢之间加入 Al_2O_3 与腻子粉混合制成的隔离剂。使用真空电子束焊接设备在真空环境下将四周焊接密封,完全密封后从预留的管道进行抽真空,真空度为 10^{-3} Pa。

将复合板坯放置到加热炉中,按照 8 ℃/min 的速度加热至 1200 ℃并保持 90 min,在二辊可逆轧机上进行多道次热轧,轧辊直径 750 mm,总压下率 85%,终轧温度分别为 800、840、880 ℃。轧后复合板在层流水的作用下冷却至 570 ℃,随后在空气中冷却至室温。轧制得到的复合板总厚度为 6 mm,其中不锈钢厚度为 1.5 mm,碳钢厚度为 4.5 mm,其示意图如图 1 所示。

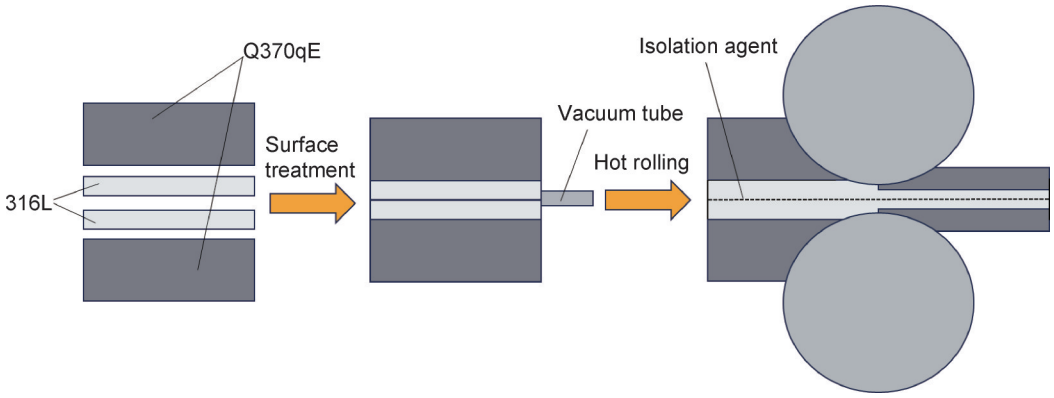


图 1　不锈钢复合板组坯与轧制示意图

Fig.1　Schematic diagram of billet assembly and rolling of stainless steel clad plate

对轧制复合板进行取样、研磨和抛光,并使用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀碳钢,随后再用由 HNO_3 与 HCl 分析纯溶液(体积比 1∶3)配置而成的混合酸腐蚀不锈钢。采用 Axioscope A1 金相显微镜、JSM-6510LA 扫描电镜(SEM)、JEM-2100F 透射电镜(TEM)和能谱仪(EDS)对复合板的成分结构进行表征分析。采用 UTM5205X 型电子万能试验机进行复合板的拉伸实验和界面拉剪实验,试样制备分别按照 GB/T228.1—2021、GB/T6396—2008 进行,十字夹头的移动速度分别为 2、5 mm/min。对测试后得到的拉伸断口和拉剪断口进行扫描电镜观察,分析复合板的力学性能。

2　结果与讨论

2.1　不锈钢复合板显微组织

图 2 为不同终轧温度时不锈钢复合板界面区的金相显微组织,双向箭头所示范围分别为碳钢近界面区的脱碳层、不锈钢近界面区的渗碳层。可知随着终轧温度的升高,脱碳层和渗碳层厚度均有所增加,说明高温时界面区的原子扩散程度比较剧烈,尤其是 C 原子尺寸较小,扩散阻力低,因而碳偏析严重[13]。在 800 ℃和 840 ℃终轧复合板的界面区,碳钢脱碳层都是铁素体组织,脱碳层厚度分别为 35 μm 和 40 μm。而在 880 ℃终轧时脱碳层除了铁素体外还有少量粒状渗碳体,脱碳层厚度达到 65 μm。这是因为,Q370qE 在 800～840 ℃时进入铁素体与奥氏体的两相区轧制,铁素体晶粒内部累积较高含量的位错,当碳钢近界面区的 C 原子因成分梯度扩散至不锈钢中时,C 含量大幅下降,而远离界面的 C 原子受温度和位错阻碍作用难以长程扩散至界面附近,造成碳钢近界面区完全形成铁素体组织。

而对于不锈钢近界面区,终轧温度为 800 、840、880 ℃时,不锈钢渗碳层厚度分别为 30、35、40 μm。终轧温度越高,奥氏体晶粒再结晶程度越大,位错等缺陷越少,C 原子越容易通过晶界扩散至不锈钢中,形成渗碳组织。Cr 与 C 之间电负性差异导致形成碳化物

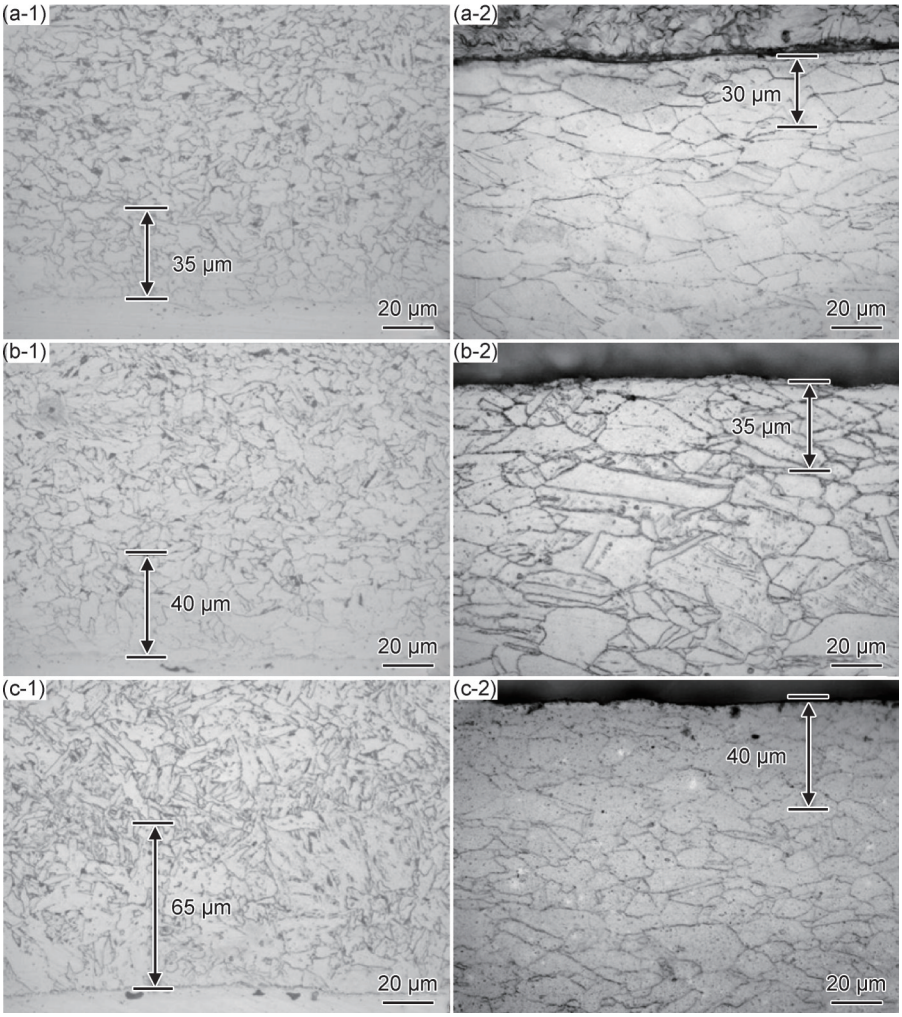


图2 不同终轧温度时不锈钢复合板界面区碳钢侧(1)和不锈钢侧(2)显微组织
(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

Fig.2 Microstructures of carbon steel side(1) and stainless steel side(2) in interface zone of stainless steel clad plate at different final rolling temperatures
(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

$Cr_{23}C_6$,并在奥氏体晶界析出,导致316L不锈钢近界面区产生黑色颗粒状的析出物。碳元素扩散进不锈钢中形成碳化铬,引起晶界附近产生贫铬现象,使得不锈钢易产生晶间腐蚀缺陷[14]。值得注意的是,在不锈钢近界面区存在少量黑色块状夹杂,能谱分析结果显示该类杂物主要含Mn、Si、O元素,推断是316L与Q370qE接触面上的微量杂质在轧制复合后残留在层间复合界面而形成氧化夹杂。

图3为不同终轧温度时不锈钢复合板界面区EDS线扫描结果。可知,不锈钢中的Cr、Ni元素跨越复合界面扩散至碳钢中,而且Cr元素的扩散距离要明显大于Ni元素,这与两种元素在界面两侧的浓度梯度以及原子半径大小有关。由表1元素含量可知,Cr在碳钢和不锈钢中的浓度差约是Ni的2倍,而且Cr与Fe的原子半径更接近,原子迁移形成固溶体引起的晶格畸变程度小,因此Cr原子扩散进Q370qE的距离更远。800 ℃和840 ℃时,复合界面区的成分梯度宽度分别为7 μm和10 μm,但在880 ℃时为6 μm,这种现象可归因于880 ℃时不锈钢和碳钢发生奥氏体再结晶,Cr、Ni原子因尺寸较大而被大量再结晶晶界抑制长程迁移。研究表明,各种元素的互扩散在一定程度上改善了复合界面的结合强度[6,15]。

图4为不同终轧温度(800 ℃和880 ℃)时不锈钢复合板界面区的TEM图。可知,316L和Q370qE之间获得了致密的冶金结合,复合界面位于脱碳层与不锈钢之间。在800 ℃终轧时,碳钢脱碳层厚度较小,脱碳层中的组织为纯铁素体,其与不锈钢层的强度、塑性比较接近,在透射样品制备过程中脱碳层与不锈钢复合界面保持了良好结合。在880 ℃终轧时,碳钢脱碳层与不锈钢渗碳层均增厚,二者之间存在显著性能差异,在制样过程容易引起复合界面产生应力集中,导致界面形成裂纹,如图4(b)所示。

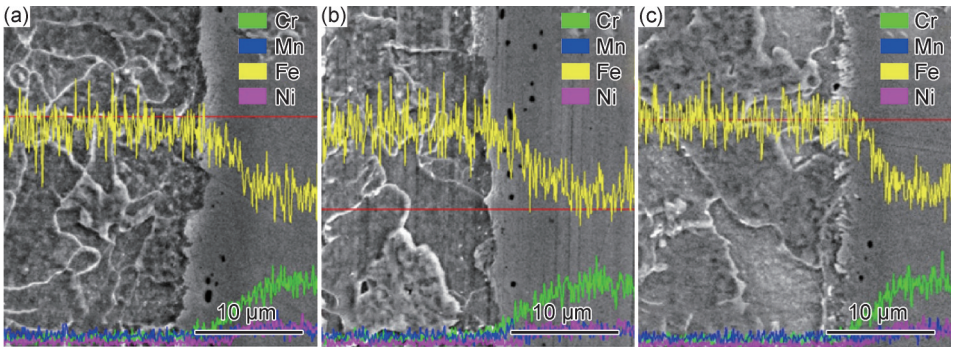


图3　不同终轧温度时不锈钢复合板界面区EDS线扫描结果

(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

Fig.3　EDS line scanning results in interface zone of stainless steel clad plate at different final rolling temperatures

(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

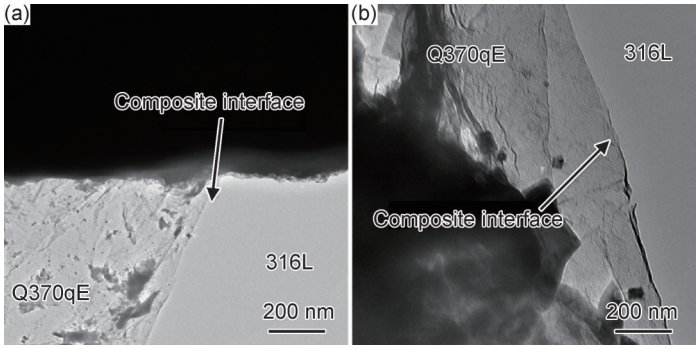


图4　不同终轧温度时不锈钢复合板界面区TEM图

(a)800 ℃;(b)880 ℃

Fig.4　TEM images of interface zone of stainless steel clad plate at different final rolling temperatures

(a)800 ℃;(b)880 ℃

图5为不同终轧温度时不锈钢复合板碳钢基体与不锈钢基体的显微组织。在800 ℃时,Q370qE组织由长条状的先共析铁素体、细晶铁素体与索氏体组成。终轧温度升高至840 ℃时,先共析铁素体和索氏体减少,形成少量贝氏体组织。继续升高终轧温度至880 ℃,Q370qE则有大量粒状贝氏体组成。由此可见,控制终轧温度会造成碳钢在冷却前具有不同的组织,而且终轧温度越高,引起冷却时的过冷度越大,促进了奥氏体的切变型相变。在不锈钢组织中,800 ℃时奥氏体组织不均匀,存在一些长条状的晶粒。840 ℃时不锈钢中发现一些微粒状的奥氏体再结晶晶粒。当终轧温度达到880 ℃时,316L由均匀的奥氏体等轴晶组成。实验表明,840 ℃为奥氏体再结晶区轧制的临界温度,温度越高,原子热激活程度越大,越有利于发生再结晶,以消除被轧制压扁的带状晶粒[16]。

2.2　不锈钢复合板界面结合性能

表2为不同终轧温度时不锈钢复合板界面的拉剪实验结果。可知终轧温度在880 ℃时,复合板的抗剪强度为最低值304 MPa,在840 ℃时达到最高值339 MPa,远超标准GB/T 8165—2008的规定值210 MPa,表明不锈钢与碳钢层间的结合性能良好。

图6为不同终轧温度时不锈钢复合板界面拉剪断口的SEM形貌。可以看出,在800 ℃终轧复合板的断口中,碳钢和不锈钢表面均有明显的浮凸形貌,断口由微孔和局部光滑面组成。对图6(a)中选区Ⅰ、Ⅱ放大,并进行能谱分析确定特征组织的成分,结果分别如图7和表3所示。碳钢断口表面凸起光滑面(点1)的EDS结果显示含有大量Cr、Ni与Mo元素,不锈钢断口表面凹坑的光滑面(点3)也含有大量Cr、Ni与Mo元素,且与316L不锈钢的成分含量十分接近,这表明以上两处形貌是界面拉剪断裂后暴露出的不锈钢材质。图7(b)不锈钢中凸起位置(点2)的韧窝状形貌含有约97.21%(质量分数,下同)Fe和2.79%的Cr元素,说明该处形貌是碳钢材质,属于碳钢近界面区的脱碳层,且有少量Cr元素跨越界面扩散进来。拉剪过程,碳钢脱碳层的纯铁素体率先发生韧性断裂,从而形成大量韧窝,当碳钢/不锈钢层间界面的结合强度较低时,铁素体中的拉剪裂纹进入层间界面继续扩展,使不锈钢暴露在断口中,形成脱碳层与不锈钢层共存的形貌。

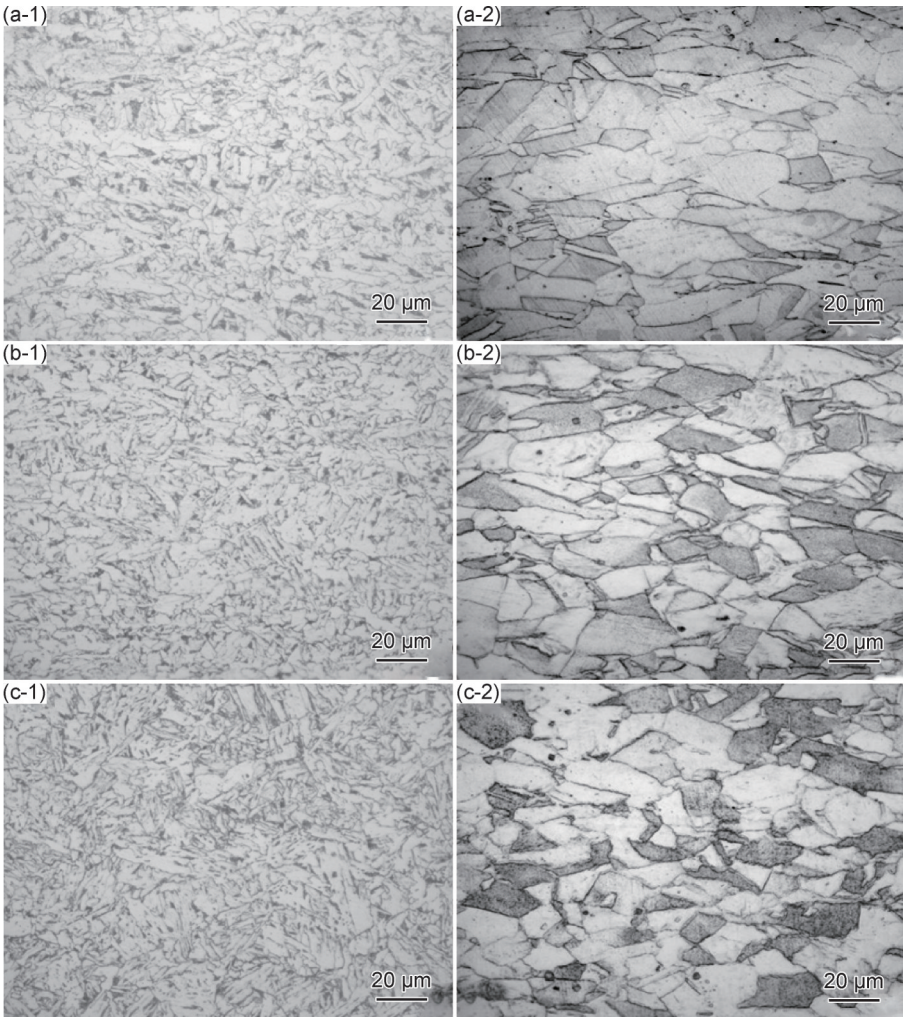


图5 不同终轧温度时不锈钢复合板碳钢基体(1)和不锈钢基体(2)显微组织
(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

Fig.5 Microstructures of carbon steel substrate(1) and stainless steel substrate(2) in stainless steel clad plate at different final rolling temperatures
(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

表2 不同终轧温度时不锈钢复合板界面拉剪性能

Table 2 Interfacial tension-shear properties of stainless steel clad plate at different final rolling temperatures

Final rolling temperature/℃	Tension-shear strength/MPa	Fracture position
800	310	Composite interface
840	339	Carbon steel decarburization layer
880	304	Carbon steel decarburization layer

由图6(b)可知,840 ℃终轧复合板的界面拉剪断口不存在光滑平面,局部放大图显示碳钢和不锈钢表面均为剪切状的浅韧窝,表明界面拉剪失效属于韧性断裂,断裂面位于碳钢脱碳层。在碳钢中含有少量与拉力方向垂直的裂纹,这是由于脱碳层中含有渗碳体,易诱发裂纹。当终轧温度为880 ℃时(图6(c)),拉剪断口表面变得光滑,韧窝明显减少,并含有尺寸较大的裂纹,这是由于该温度引起碳钢脱碳层增厚,脱碳层为铁素体与贝氏体的混合组织,在拉力作用下容易因组织应力产生裂纹,加剧了界面剪切断裂行为,界面抗剪强度下降[17]。

2.3 不锈钢复合板拉伸性能

表4为不同终轧温度时不锈钢复合板的拉伸力学性能。随着终轧温度的增加,复合板的屈服强度、抗拉强度及屈强比均上升,而断后伸长率下降。800 ℃终轧及冷却后碳钢组织中含有较多的带状铁素体,导致复合板的强度值较低,塑性较好。而880 ℃终轧冷却后得到不规则铁素体和贝氏体组织,同时不锈钢形成均匀的奥氏体等轴晶,从而显著提高复合板的屈服强度。由于位错运动受到碳钢中析出物的阻碍,可动位错减少塑性下降,使得断后伸长率减小。高温使复合板屈强比升高,是因为屈服强度与位错运动阻力有关,但抗拉强度受到组织缺陷的影响,复合板高温终轧冷却过程相变剧烈引起组织缺陷,导致抗拉强度增

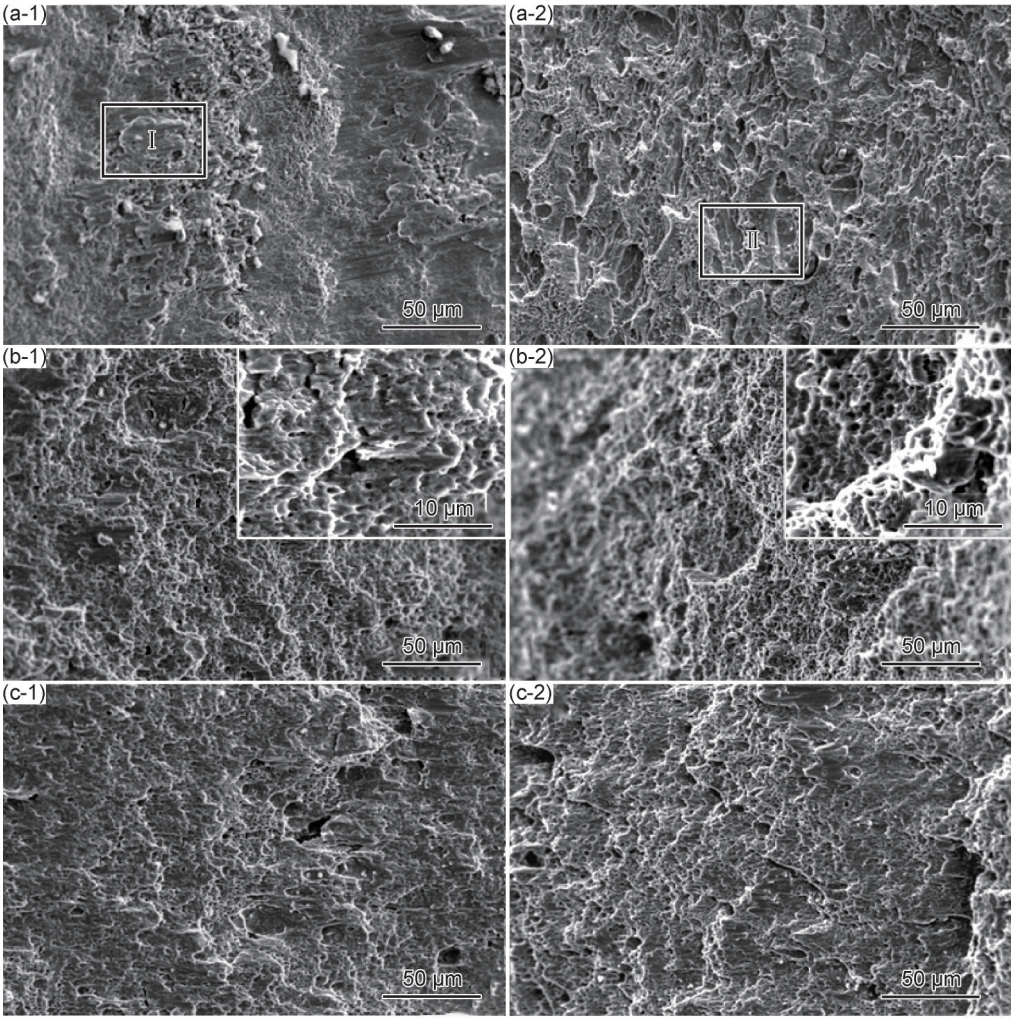


图6　不同终轧温度时不锈钢复合板界面拉剪断口碳钢侧(1)和不锈钢侧(2)形貌

(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

Fig.6　Morphologies of carbon steel side(1) and stainless steel side(2) in interface tension-shear fracture of stainless steel clad plate at different final rolling temperatures

(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

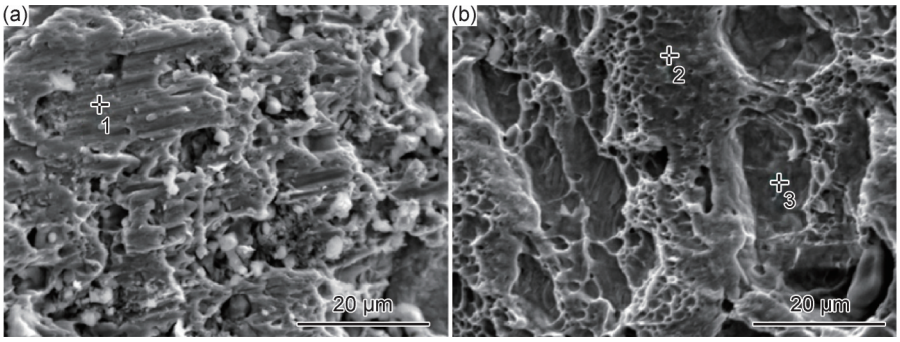


图7　终轧温度800 ℃时不锈钢复合板界面拉剪断口显微组织

(a)Q370qE;(b)316L

Fig.7　Microstructures of interface tension-shear fracture of stainless steel clad plate with 800 ℃ final rolling temperature

(a)Q370qE;(b)316L

幅小于屈服强度,因而屈强比有所增加。840 ℃终轧复合板的屈服强度、抗拉强度和屈强比分别为497、594 MPa和0.84,断后伸长率为18.6%,兼顾强度和塑性,因此具有较好的拉伸力学性能。

图8为不同终轧温度时不锈钢复合板拉伸断口的SEM形貌。可知,复合板拉伸断裂时碳钢与不锈钢之

表 3 终轧温度 800 ℃时不锈钢复合板界面拉剪断口表面的主要元素含量(质量分数/%)

Table 3 Main element content on interface tension-shear fracture of stainless steel clad plate with 800 ℃ final rolling temperature(mass fraction/%)

Point	Cr	Fe	Ni	Mo
1	10.70	78.53	8.56	2.21
2	2.79	97.21		
3	15.94	73.81	8.62	1.63

表 4 不同终轧温度时不锈钢复合板的拉伸力学性能

Table 4 Tensile mechanical properties of stainless steel clad plate at different final rolling temperatures

Final rolling temperature/℃	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation after fracture/%	Yield-to-strength ratio
800	427	574	19.8	0.82
840	497	594	18.6	0.84
880	523	611	16.0	0.86

间产生严重的分层现象,碳钢断口表面呈现明显的峰谷特征,而不锈钢断口表面相对较为光滑。经过800~880 ℃终轧和控制冷却,复合板中的碳钢主要由铁素体和渗碳体两相组成,而不锈钢中仅含有单一的奥氏体相。在拉伸过程中两种材质的力学性能差异显著,导致塑性变形不协调,颈缩不同时发生,使得复合界面承受附加拉应力。由于碳钢和不锈钢的抗拉强度均高于复合界面的结合强度,因而造成拉伸断口的界面分层。碳钢由不同类型的相结构组成,因此断口组织不均匀,而316L不锈钢由单相奥氏体构成,形成均匀的断口特征。

如图8中箭头所示,在复合板拉伸断口的结合界面区域,发现碳钢具有尺寸较大的韧窝,这是由于碳钢脱碳层的铁素体组织具有良好的断裂韧性。而不

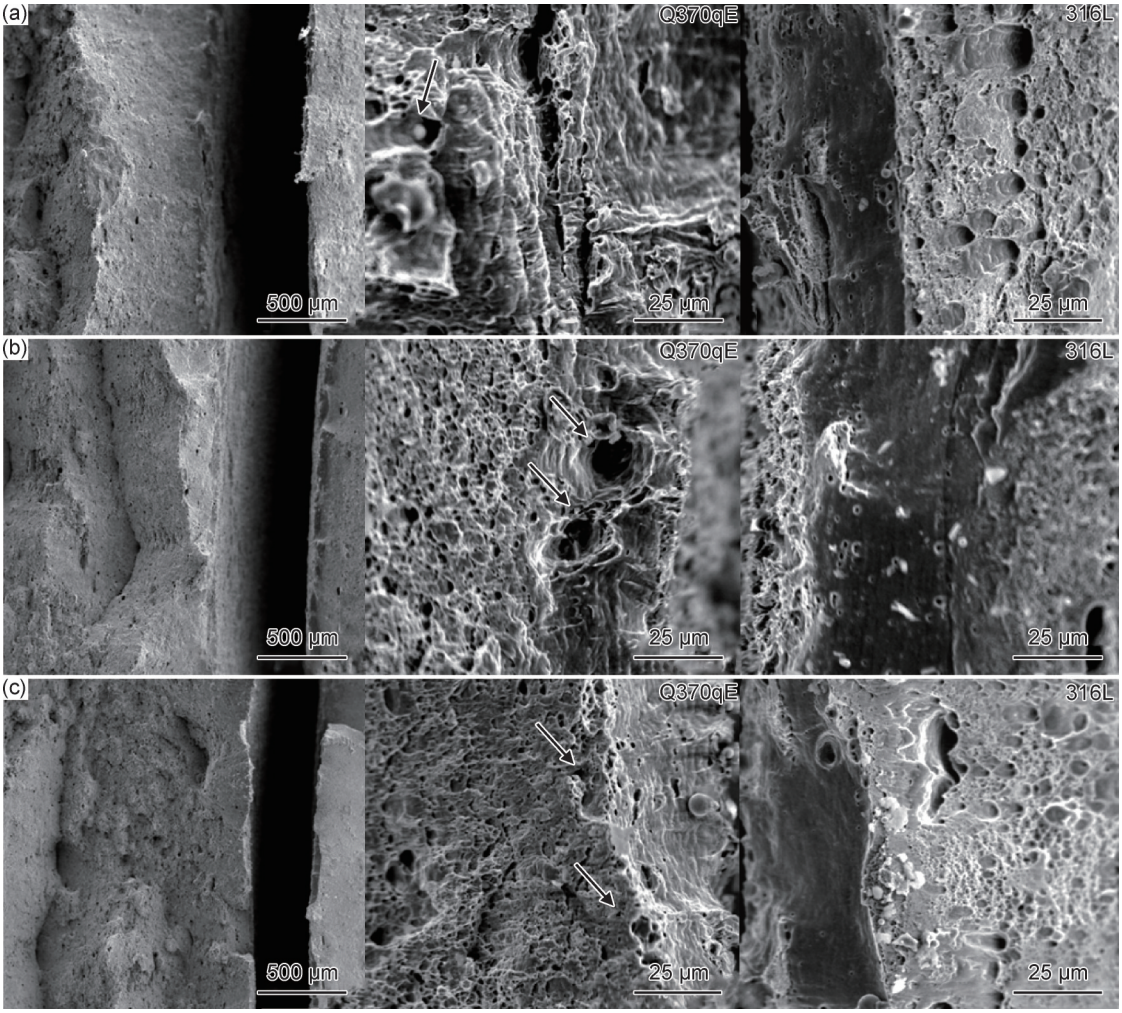


图8 不同终轧温度时不锈钢复合板拉伸断口形貌

(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

Fig.8 Tensile fracture morphologies of stainless steel clad plate at different final rolling temperatures

(a)800 ℃;(b)840 ℃;(c)880 ℃

锈钢层近界面区域呈现出光滑的解理断裂形貌，这是因为该区域存在渗碳现象，奥氏体晶界形成碳化铬，在拉伸过程大量裂纹容易在晶界形成，诱发不锈钢快速断裂，因而得到了光滑的解理断裂形貌。此外，解理断裂面的宽度反映了界面渗碳层厚度，这与图 2 所示结果相一致。

3　结论

(1)终轧温度越高，316L/Q370qE 复合板的界面区碳钢脱碳层和不锈钢渗碳层厚度越大，而 Cr、Ni 元素扩散距离先上升后下降。终轧温度改变碳钢冷却前的组织和相结构，影响复合板冷却过程的组织转变。840 ℃终轧时，碳钢层的组织由先共析铁素体、贝氏体和索氏体组成，不锈钢层由部分再结晶的奥氏体组成，脱碳层厚度 40 μm，渗碳层厚度 35 μm。

(2)终轧温度为 800～880 ℃时，随终轧温度的升高，复合板界面的拉剪强度先增加后下降，而屈服强度和抗拉强度均增加，在高温时增速减缓。界面拉剪过程中复合板在碳钢侧的脱碳层断裂，拉伸时复合板各层的变形不协调，断口产生分层现象。

(3)在 840 ℃终轧时，316L/Q370qE 复合板的综合力学性能最佳，界面拉剪强度、屈服强度和抗拉强度分别为 339、497 MPa 和 594 MPa，断后伸长率为 18.6%。

参考文献

[1] 井玉安，王晨宇. 不锈钢复合板生产技术综述[J]. 辽宁科技大学学报，2007，30(6)：590-594.
JING Y A, WANG C Y. Review on production technology of stainless steel composite plate[J]. Journal of Liaoning University of Science and Technology, 2007, 30(6): 590-594.

[2] 李志强. 桥梁用不锈钢复合板的开发与应用研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2018.
LI Z Q. The development and application of stainless steel composite plates for bridges[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.

[3] 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 L, ZHANG X J, LIU H Y, et al. Production technology and application of stainless steel clad plate[J]. Steel Rolling, 2013, 30(3): 43-47.

[4] 厉梁. 真空复合轧制不锈钢复合板的微观组织和力学性能[D]. 沈阳：东北大学，2011.
LI L. Microstructure and mechanical property of clad plate of stainless steel by vacuum composite rolling[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.

[5] 张永健，陈俊宏，陈祯，等. 终轧温度对 2205/Q345C 复合板界面组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理，2021，46(7)：108-113.
ZHANG Y J, CHEN J H, CHEN Z, et al. Effect of final rolling temperature on interfacial microstructure and mechanical properties of 2205/Q345C steel clad plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(7): 108-113.

[6] 何天仁. 轧制法生产不锈钢复合板工艺研究及应用[J]. 中国冶金，2014，24(1)：6-10.
HE T R. Analysis and application of stainless steel composite plate by hot rolling technology[J]. China Metallurgy, 2014, 24(1): 6-10.

[7] 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 T, JING Y A, ZHANG Y Q, et al. Interface microstructure of stainless steel composite plate[J]. Iron and Steel, 2018, 53(11): 63-69.

[8] AN Q, FAN K Y, GE Y F, et al. The bending, impact fracture behavior and characteristics of stainless steel clad plates with different rolling temperature[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2020, 66(1): 229-239.

[9] JIN H R, ZHANG L, DAI C, et al. Numerical simulation and experimental study on the interface bonding of stainless steel clad plate[J]. Strength of Materials, 2018, 50(1): 29-40.

[10] 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 L, ZHU Z C, ZHANG X J, et al. Experimental study on hot rolled stainless steel clad plate produced by TMCP[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(7): 62-67.

[11] 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 H R, ZHANG C L, HAN X Y, 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.

[12] 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 X L, LIU B X, MA J L, 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.

[13] 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 Y L. Study on carbon diffusion and microstructure of stainless steel clad plates[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

[14] 吕泽华，DAYANCH A，张志雄，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.
LV Z H, DAYANCH A, ZHANG Z X, et al. Research on 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.

[15] 曾周燏, 江姗, 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 Z Y, JIANG S, LI D H. 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.

[16] 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 G M, LUO Z A, WANG G L, 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.

[17] 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.

基金项目:江苏省自然科学基金项目(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)

收稿日期:2024-11-26;**录用日期**:2025-01-08

通讯作者:李小兵(1986—),男,副教授,博士,研究方向为层状金属复合材料制备理论与技术,联系地址:江苏省张家港市杨舍镇长兴中路8号江苏科技大学冶金工程学院(215600),E-mail:lxbing2009@126.com

(本文责编:王 晶)