

22MnB5 高强钢与 201 不锈钢温轧复合板组织性能研究

李占富, 陈 龙, 刘 发, 姚圣杰, 赵洪运, 初冠南

(哈尔滨工业大学(威海) 材料科学与工程学院, 山东 威海 264209)

摘要: 采用温轧工艺制备 22MnB5 高强钢与 201 不锈钢的复合板, 通过扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射、拉伸实验等方法研究了复合板的界面组织及力学性能。结果表明, 温轧工艺制备的不锈钢复合板从基层到覆层之间依次为脱碳层、结合界面、渗碳层 3 种组织形貌。脱碳层的厚度随着压下率的增加而增大, 覆层的奥氏体组织发生了形变诱发马氏体相变, 热处理后的基层组织为板条马氏体。复合板界面处出现元素的相互扩散, 且 C、Cr、Mn 元素的扩散能力较强, 热处理后扩散层厚度增加。随着压下率的逐渐增加, 复合板的抗拉强度增加、伸长率降低。热处理后复合板的抗拉强度达到 1160 MPa 以上, 伸长率有所提高。

关键词: 温轧工艺; 不锈钢复合板; 界面组织; 力学性能; 压下率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2021.07.033

中图分类号: TG335.81

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2021) 07-0199-09

Study on microstructure and properties of warm-rolled cladding plate for 22MnB5 high-strength steel and 201 stainless steel

Li Zhanfu, Chen Long, Liu Fa, Yao Shengjie, Zhao Hongyun, Chu Guannan

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: The cladding plate of 22MnB5 high-strength steel and 201 stainless steel was prepared by the warm rolling process, and the interfacial microstructures and mechanical properties of the cladding plate were studied by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction and tensile test. The results show that the cladding plate prepared by the warm rolling process has three microstructures, namely, the decarburized layer, the bonding interface and the carburized layer from the base layer to the cladding layer. The thickness of the decarburized layer increases with the increasing of reduction ratio, the deformation induced martensite transformation is found in the austenite structure of the cladding layer, and the microstructure of the base layer after heat treatment is lath martensite. In addition, there is mutual diffusion of elements at the interface of the cladding plate, and because of the strong diffusion ability of C, Cr and Mn elements, the thickness of the diffusion layer increases after heat treatment. Furthermore, the tensile strength of the cladding plate increases and the elongation decreases with the increasing of reduction ratio, and after heat treatment, the tensile strength of the cladding plate reaches more than 1160 MPa and the elongation is also improved.

Key words: warm rolling process; stainless steel cladding plate; interfacial microstructure; mechanical properties; reduction ratio

不锈钢复合板是一种由基层 (合金钢或其他金属材料) 和覆层 (不锈钢) 组成的层状金属复合材料^[1]。不锈钢复合板兼顾了不锈钢的耐腐蚀性能以及合金钢等材料的力学性能和加工性能, 具有同规

格纯不锈钢无法比拟的价格优势^[2]。目前, 不锈钢复合板的制造工艺主要有爆炸复合法和轧制复合法。爆炸复合法技术要求高, 难于精确控制, 不能生产较薄的复合板, 且存在噪音处理、安全无法保障及污染严重等一系列问题, 限制了爆炸复合法的推广和应用^[3-4]。轧制复合法具有工艺简单、生产效率高、适合规模化生产等优点, 获得了科研人员的广泛关注。吕泽华等^[5]采用真空热轧法实现了碳钢、304 奥氏体不锈钢和 410 马氏体不锈钢的 3 层复合板轧制复合, 界面实现了牢固的冶金结合, 板材复合良好。陈林恒等^[6]采用液-固相复合法-包覆浇铸+轧制复合法获得了剪切强度达到 380 MPa 的 304 不锈钢/Q345 复合板。郭秀斌等^[7]采用真空制

收稿日期: 2021-04-07; 修订日期: 2021-05-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U1937205); 国家自然科学基金资助项目 (51775134); 山东省重大科技创新工程项目 (2019TSLH0103, 2020CXGC010303, 2019JZZY020324); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2020ME146)

作者简介: 李占富 (1987-), 男, 硕士研究生

E-mail: zhanfulee@163.com

通信作者: 姚圣杰 (1982-), 男, 博士, 副教授

E-mail: shj_yao2010@hit.edu.cn

坯复合热轧技术制备的 Q345R/304 不锈钢复合板,其结合界面复合良好,界面抗剪切强度达到 450 MPa 以上,具有良好的抗剪切性能。目前,轧制复合法主要采用热轧复合或冷轧复合:热轧复合是通过加热增大材料活化能,以较小的轧制力实现复合,适合强度高、塑性低的材料,但能耗较高;冷轧复合是采用较大的轧制力和压下量在较低温度下产生冶金结合,适合强度低、塑性高的材料,但轧制负荷较大,对轧制设备要求高^[8]。而针对再结晶温度以下的温轧复合板的研究和应用较少,有些也是针对钛/铝复合板、不锈钢复铝板、钢铝复合板等的研究^[9-11],针对高强钢与不锈钢温轧复合板的研究鲜有报道。

本文制备的不锈钢复合板以 22MnB5 高强钢作为基层,以 201 不锈钢作为覆层。22MnB5 高强钢作为目前汽车用高强钢的首选材料,已被广泛应用于汽车 A/B 柱、保险杠、防撞梁、中通道等热成形件^[12-13]。钢中加入的微量硼起到了固溶强化的作

用,提高了钢的淬透性,使其成形件的抗拉强度达到 1500 MPa 以上,符合轻量化技术发展的需求。201 不锈钢是 Cr-Mn-Ni 系不锈钢,以锰、氮代镍,符合低成本化思路,且锰、氮元素的加入一定程度上提高了不锈钢的强塑性^[14]。深入探究 22MnB5 高强钢和 201 不锈钢复合板的温轧制备工艺,旨在获得一种兼顾耐蚀性、高强度、高塑性且低成本化的复合薄板。

1 实验材料及方法

本实验采用国内某钢厂生产的 22MnB5 高强钢作为基层材料,初始厚度为 1.7 mm。采用改进型 201 奥氏体不锈钢作为覆层材料,初始厚度为 2.4 mm。利用线切割设备将两种材料均切割为 100 mm×30 mm 的矩形板,两种材料的化学成分如表 1 所示。两种材料初始态的拉伸应力-拉伸应变曲线如图 1 所示。同时,测定了 22MnB5 高强钢淬火热处理后的拉伸应力-拉伸应变曲线。

表 1 实验材料的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of experimental materials(%, mass fraction)

实验材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	Ti	Co	B	Fe
201 不锈钢	0.068	0.43	9.96	14.36	1.07	0.16	0.006	0.15	-	余量
22MnB5 高强钢	0.220	0.28	1.25	0.23	-	-	0.020	-	0.02	余量

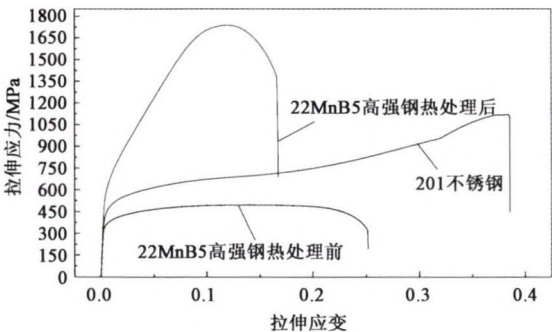


图 1 两种材料拉伸实验测定的拉伸应力-拉伸应变曲线

Fig. 1 Tensile stress-tensile strain curves for two kinds of materials by tensile experiment

本文制备不锈钢复合板的流程为:表面处理→

组坯→真空电子束焊接→感应加热→温轧→热处理,主要步骤示意图如图 2 所示。组坯前,对矩形板进行机械抛光和丙酮清洗,以清除试件表面的氧化层和污染物。组坯后,试样 4 个边的密封采用真空电子束焊接,真空室的真空度为 5×10^{-2} Pa,电子束焊接束流为 17~19 mA,焊接速度为 $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采用配有纵向感应线圈的感应加热设备(80 kW),将密封的试样加热至 720 ℃左右,然后进行多道次温轧。达到预设的压下率后,对温轧后的复合板进行热处理,热处理工艺为:在 900 ℃盐浴中加热,保温 5 min,然后进行水淬快速冷却。

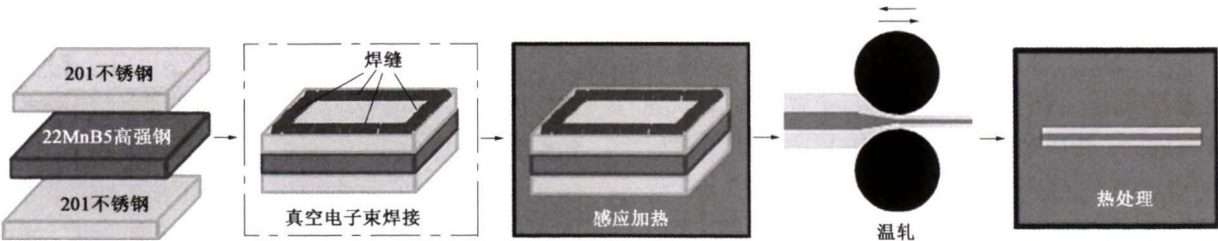


图 2 温轧不锈钢复合板主要步骤示意图

Fig. 2 Schematic diagram of main steps for warm-rolled stainless steel cladding plate

对温轧不锈钢复合板进行金相组织观察, 将复合板断面用砂纸打磨后, 用金刚石抛光剂进行机械抛光, 采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液作为腐蚀剂对基层组织进行腐蚀, 时间为 5 ~ 10 s, 用无水乙醇冲洗干净后烘干。采用质量分数为 10% 的草酸溶液对覆层组织进行电解腐蚀, 电解腐蚀仪的阴极材料采用石墨板, 将复合板作为阳极, 电解腐蚀直流电压为 5 ~ 10 V, 两电极的距离为 15 ~ 30 mm, 电解腐蚀时间为 60 ~ 100 s, 腐蚀完成后用无水乙醇冲洗干净后烘干, 得到不锈钢/锰硼钢复合板金相组织。采用 Zeiss 场发射扫描电子显微镜观察 SEM 组织形貌, 加速电压为 20 ~ 30 kV, 主要观察界面及两侧材料的微观组织, 并对界面处元素的成分、两侧元素的扩散情况进行探究。采用 DX-2700 型 X 射线衍射仪对界面区进行物相分析, 靶材为铜靶, 加速电压为 4 kV, 实验电流为 30 mA, 步进扫描速度为 $0.03 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 。采用线切割设备将复合板样品加工为拉伸试样, 拉伸试样的规格尺寸如图 3 所示, 并在万能电子拉伸实验机上进行测试, 根据拉伸试样平行段长度, 将拉伸速率确定为 $0.9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

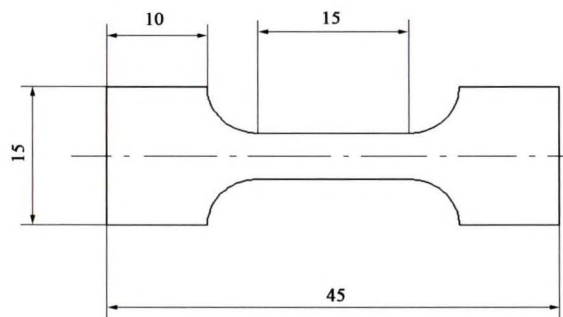


图3 拉伸试样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tensile specimen

2 实验结果及分析

图 4 为不同压下率下不锈钢复合板的 SEM 界面组织形貌。由图 4 可见, 复合板界面清晰, 随着压下率的增加, 22MnB5 高强钢的晶粒沿轧制方向显著伸长, 出现了细条状的纤维组织。22MnB5 高强钢界面附近的组织由原来的铁素体 + 珠光体逐渐变为单一的铁素体, 出现脱碳现象。脱碳层的形成是由于 C、Cr、Ni 等元素在 22MnB5 高强钢和 201 不锈钢中的浓度差别很大, 导致在温轧过程中较高的温度及较大的轧制力为扩散提供了动力, 使 C 元素从 22MnB5 高强钢侧扩散至 201 不锈钢侧, Cr、Ni 等元素从 201 不锈钢侧扩散至 22MnB5 高强钢侧。

压下率为 50%、60%、70% 和 80% 时分别对应的脱碳层厚度约为 7.5、10.0、13.0 和 17.0 μm 。温轧复合板相比于常规热轧复合板的脱碳层厚度有明显的减少, 如丁海民等^[15]采用热轧复合制备的不锈钢复合板的脱碳层厚度为 50 ~ 70 μm , 主要是由于温轧复合相较热轧复合的温度低, 导致元素活化能较低, 不利于元素的扩散和迁移。脱碳层厚度减少有助于提高复合板的变形加工性能, 主要是由于脱碳形成的铁素体区域和渗碳形成的富含碳化物区域的塑性差异较大, 使得结合界面的变形协调能力降低, 从而对结合界面的结合强度有不利影响^[16]。

图 5 为不同压下率下不锈钢复合板在热处理后的 SEM 界面组织, 热处理后的基层组织主要为板条状马氏体组织。实现充分马氏体相变的 22MnB5 高强钢具有超高的抗拉强度和硬度, 是获得高强度不锈钢复合板的关键要素。

图 6 为不锈钢复合板 70% 压下率下 201 不锈钢侧表面的 XRD 图谱分析。在轧制后的 201 不锈钢中发现奥氏体与马氏体并存, 证明了在一定轧制变形量条件下, 201 不锈钢的奥氏体组织发生了形变诱发马氏体相变。不稳定奥氏体是形成诱发马氏体的重要因素, 节镍型 201 不锈钢中 Ni 元素含量低, 奥氏体稳定性差, 易发生诱发相变。此外, Ni 元素能提高奥氏体层错能, Cr、Mn 元素能降低层错能, 层错能越低, 越容易发生诱发马氏体^[17]。

图 7 为压下率 70% 下不锈钢复合板热处理前后的线扫描结果。可以看到, 界面两侧的 Fe、Cr 和 Mn 元素存在较大的浓度差, 在界面处呈现有一定的浓度梯度的过渡层, 说明界面两侧的元素存在 Cr、Mn 元素的扩散。经过热处理前后的扩散距离对比, 可以发现热处理后界面的元素扩散层较深, Fe、Cr、Mn 元素的扩散层厚度增加了 5 μm 左右, 这说明热处理可以使界面处的元素进一步相互扩散, 从而使复合板之间的结合强度得到进一步的提高。

图 8 为不锈钢复合板在不同压下率下温轧及热处理后的拉伸性能。从图 8 中可以直观地看出, 不锈钢复合板的抗拉强度随着压下率的增加逐渐升高, 伸长率随着压下率的增加而降低。经过热处理后, 不锈钢复合板的抗拉强度显著提高, 不同压下率下温轧 + 热处理后不锈钢复合板的抗拉强度达到 1165 MPa 以上, 伸长率有所改善, 伸长率的变化趋势与未热处理前保持一致, 均随着压下率的增加有所下降。201 不锈钢原始板材的抗拉强度为 1120 MPa, 而 22MnB5 高强钢热处理前的抗拉强度

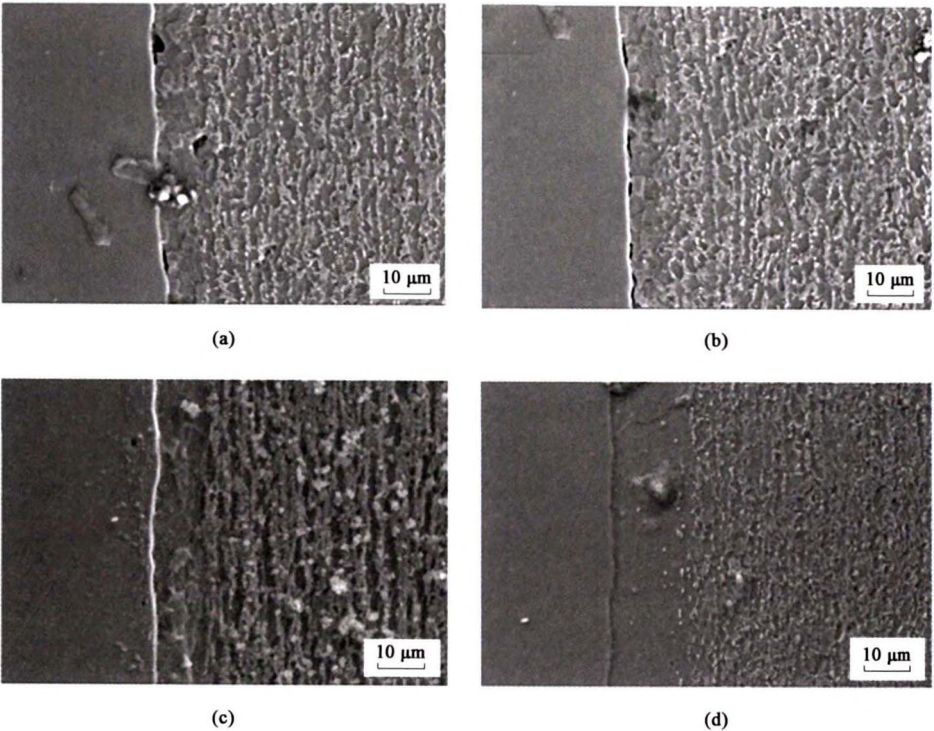


图 4 不同压下率的不锈钢复合板的 SEM 界面组织
(a) 50% (b) 60% (c) 70% (d) 80%

Fig. 4 SEM interface structures of stainless steel cladding plate with different reduction ratios

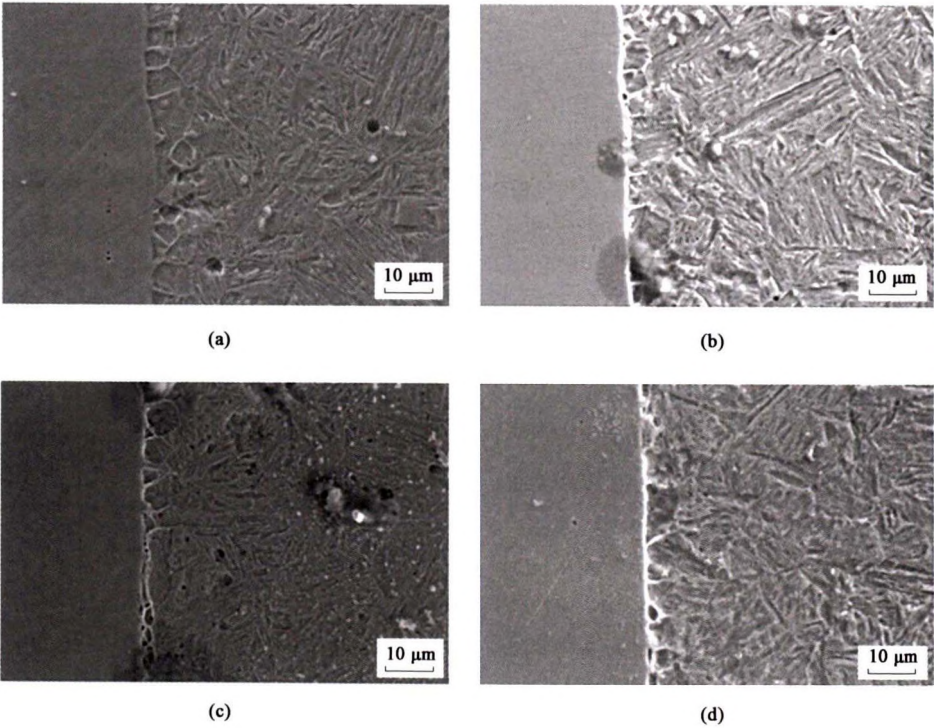


图 5 不同压下率的不锈钢复合板热处理后的 SEM 界面组织
(a) 50% (b) 60% (c) 70% (d) 80%

Fig. 5 SEM interface structures of stainless steel cladding plate after heat treatment with different reduction ratios

仅为 500 MPa 左右，所以，201 不锈钢发生马氏体相变是温轧后复合板获得较高抗拉强度的关键因素。

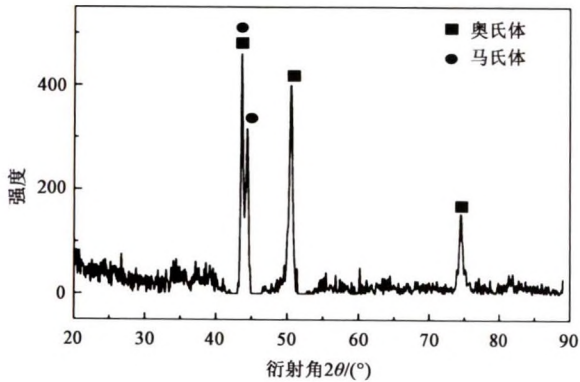


图 6 复合板中 201 不锈钢侧的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD pattern of 201 stainless steel side for cladding plate

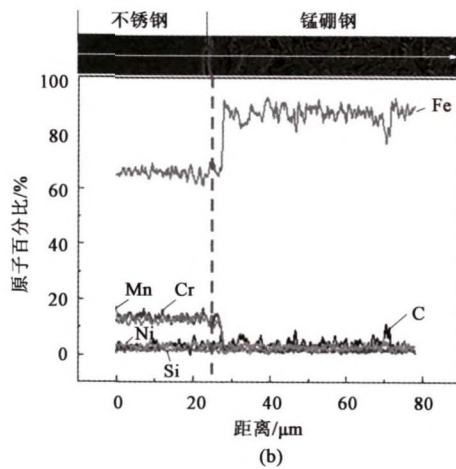
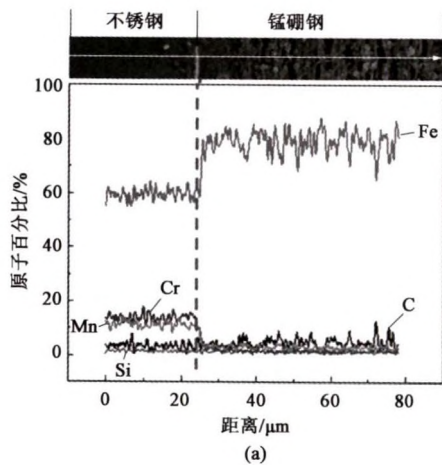


图 7 界面元素分布

(a) 热处理前 (b) 热处理后

Fig. 7 Element distributions at interface

(a) Before heat treatment (b) After heat treatment

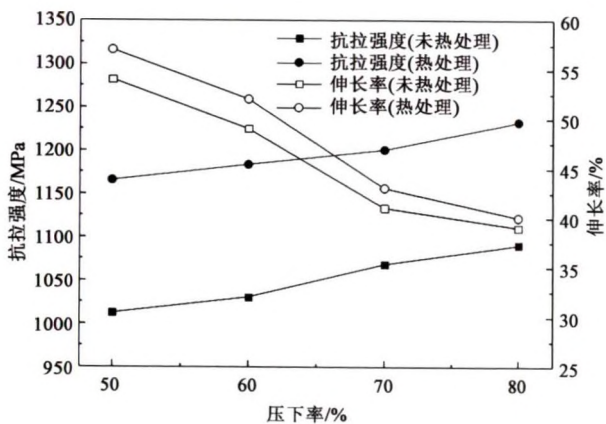


图 8 不同压下率下温轧及热处理后不锈钢复合板的拉伸性能

Fig. 8 Tensile properties of stainless steel cladding plate after warm rolling and heat treatment with different reduction ratios

理后复合板抗拉强度提升的关键因素, 强度最高可达 1232 MPa。热处理后 201 不锈钢组织转变为奥氏体, 是复合板具有良好塑性的重要因素。奥氏体不

随着压下率的增加, 马氏体相变的量增多, 直观表现为抗拉强度逐渐提高, 强度最高为 1090 MPa, 伸长率逐渐下降, 伸长率最低为 39%。由于 201 不锈钢的变形量超过 50% 时马氏体转变率较低^[18], 当压下率超过 50% 后, 抗拉强度的增加幅度较小。虽然 22MnB5 高强钢经多道次温轧后具有良好的塑性, 对复合板整体塑性提升有影响, 但因基/覆层整体厚度比差值 (约为 1:2.8) 较大, 在不同压下率的对比中, 201 不锈钢的塑性下降作用更为显著。热处理后, 基层 22MnB5 高强钢发生马氏体相变, 强度大幅提升, 由原来的 500 MPa 左右提升至 1700 MPa, 是热处

锈钢在拉伸时会发生形变诱发的马氏体相变, 抗拉强度提升, 伸长率有所下降。复合板的力学性能综合了 22MnB5 高强钢和 201 不锈钢的特点, 获得了强塑性相对均衡的优异性能。此外, 随着压下率增加, 中间的脱碳层和渗碳层厚度与复合板厚度的比值逐渐增大, 降低了变形的协调性, 进而降低了复合板的塑性, 导致复合板的强塑积值呈下降趋势。图 9 为不同压下率下温轧及热处理后复合板的强塑积变化曲线。

为了进一步分析拉伸断裂的机理以及热处理前后强度和塑性变化的理论依据, 对拉伸试样的断口形貌进行分析。图 10 为 201 不锈钢侧的拉伸断口形貌。断裂基本发生在试样的中间部位, 且试样断裂的部位发生了颈缩。201 不锈钢侧的拉伸断裂方式主要为韧性断裂, 随着压下率的增加, 当压下率达到一定程度时, 在拉伸断口中会同时出现韧性断裂与脆性断裂现象, 由 XRD 分析可知, 奥氏体在轧制

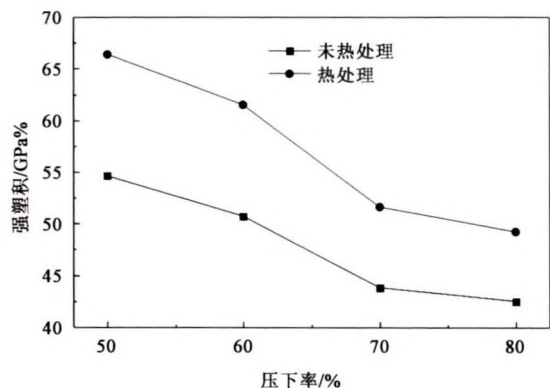


图 9 不同压下率下温轧及热处理后不锈钢复合板的强塑性

Fig. 9 Strength-ductility of stainless steel cladding plate after warm rolling and heat treatment with different reduction ratios

过程中发生了马氏体相变, 压下率的增加会使马氏体的含量增加, 并且在拉伸过程中奥氏体也会转变

为马氏体, 马氏体为硬脆相, 其会导致脆性断裂。因此, 不锈钢侧拉伸断口形貌中观测到的结果为: 随着压下率的不断增加, 韧窝的数量减少, 并且在一定压下率条件下还会出现解离台阶。

图 11 为 22MnB5 高强钢侧的拉伸断口形貌, 其正面形貌为韧窝形态, 韧窝数量多、尺寸较小且大小均匀, 说明 22MnB5 高强钢一侧为韧性断裂, 其塑性较好。22MnB5 高强钢侧的主要成分为铁素体与珠光体, 在感应加热复合板升高至居里点温度附近以及在进行温轧的过程中, 铁素体组织发生了多次回复再结晶和加工硬化, 铁素体晶粒会不断细化, 由于铁素体具有较好的塑性, 因此, 22MnB5 高强钢一侧的断口形貌为韧性断裂。根据断口的扫描照片, 随着压下率的增加, 铁素体、碳化物的晶粒变得细小, 碳钢侧拉伸断口中的韧窝数量逐渐变多。

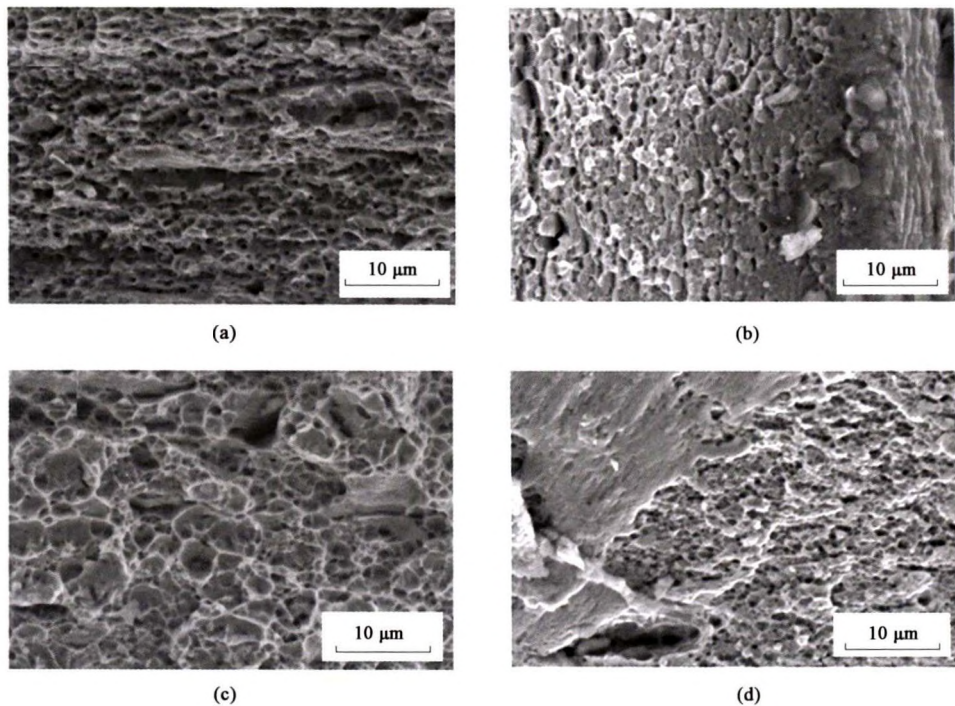


图 10 不同压下率下覆层断口的组织形貌

(a) 50% (b) 60% (c) 70% (d) 80%

Fig. 10 Fracture morphologies of cladding layer with different reduction ratios

热处理后的不锈钢侧拉伸断口由脆性断裂转变为韧性断裂, 如图 12 所示, 热处理后的不锈钢组织又转变为奥氏体, 形成的韧窝较浅, 压下率越大, 韧窝数量越多, 主要原因为: 随着拉伸的不断进行, 奥氏体不锈钢形变诱发马氏体相变, 使得韧窝特征不是特别明显。热处理后的 22MnB5 高强钢侧由韧性断裂逐渐转变为脆性断裂, 如图 13 所示, 由温轧态的铁素体和珠光体组织转变为板条马氏体, 拉伸

断口主要为脆性断裂形成的解理台阶。

3 结论

(1) 温轧制备出的不锈钢复合板 22MnB5 高强钢一侧由于碳元素扩散导致存在一定程度的脱碳层, 组织由原来的铁素体 + 珠光体逐渐变为单一的铁素体, 脱碳层的厚度随着压下率的增加而增大。201

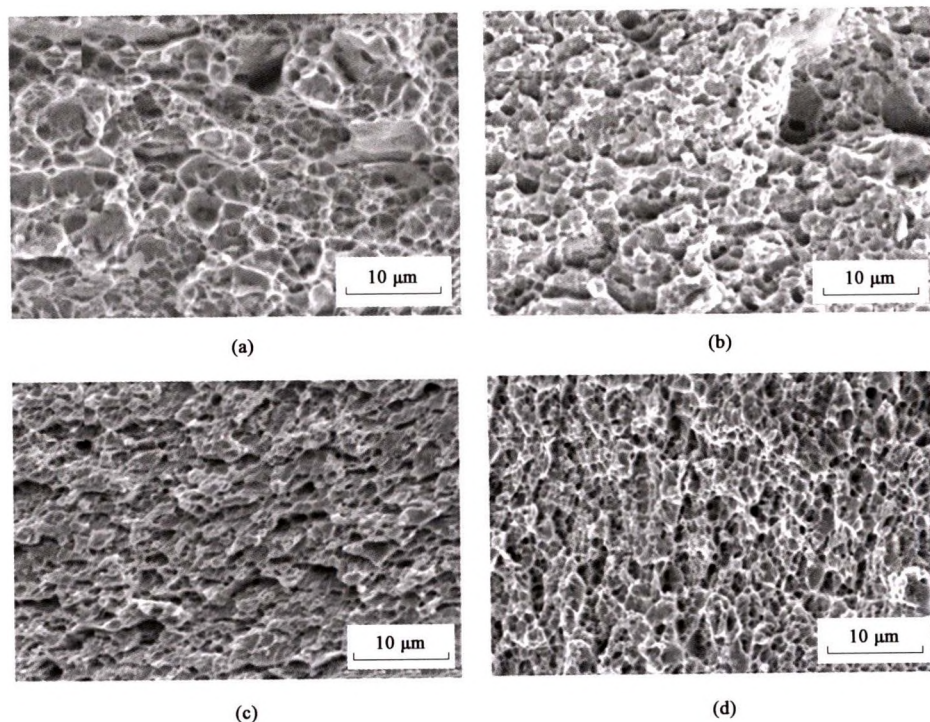


图 11 不同压下率下基层断口的组织形貌

(a) 50% (b) 60% (c) 70% (d) 80%

Fig. 11 Fracture morphologies of base layer with different reduction ratios

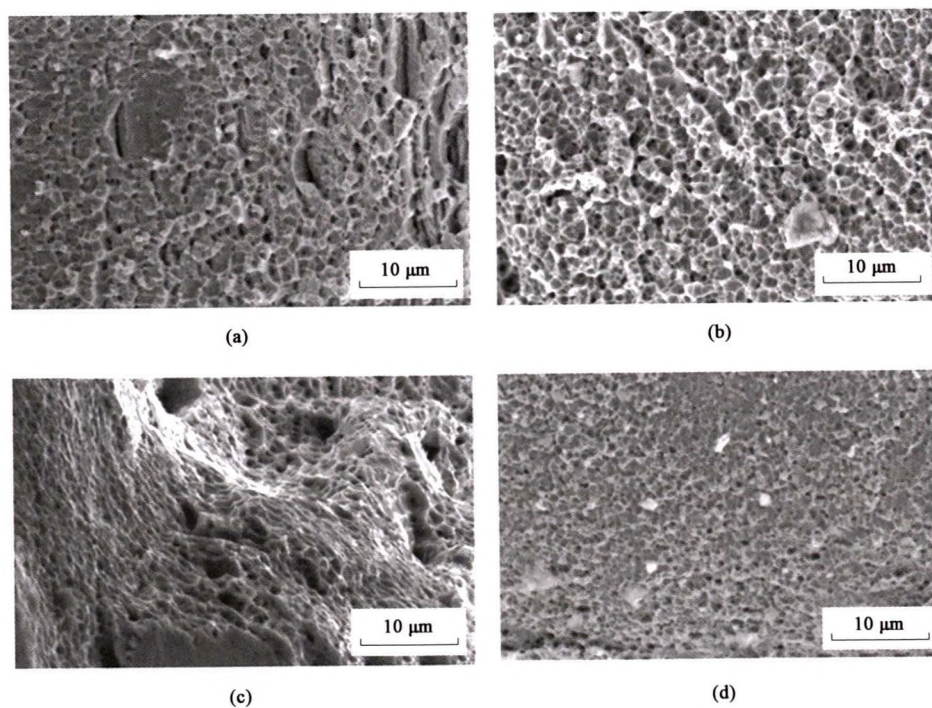


图 12 不同压下率下热处理后覆层断口组织形貌

(a) 50% (b) 60% (c) 70% (d) 80%

Fig. 12 Fracture morphologies of cladding layer after heat treatment with different reduction ratios

不锈钢一侧界面处出现渗碳层, 在温轧过程中奥氏体发生形变诱发马氏体相变。热处理后不锈钢复合

板的基层 22MnB5 高强钢由铁素体和珠光体转变为板条马氏体。

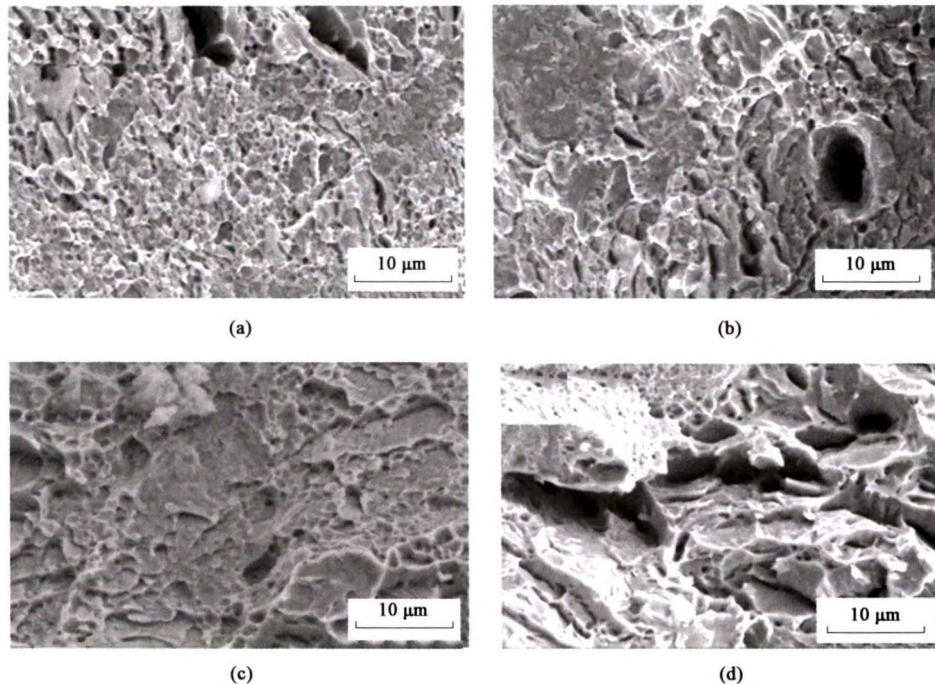


图 13 不同压下率下热处理后基层断口组织形貌

(a) 50% (b) 60% (c) 70% (d) 80%

Fig. 13 Fracture morphologies of base layer after heat treatment with different reduction ratios

(2) 根据扫描及能谱结果, 复合板界面处出现元素相互扩散的情况, C、Cr、Mn 元素的扩散能力较强, 经过热处理后扩散层厚度增加, 提高了层间金属的结合力。

(3) 随着压下率的增加, 温轧制备的不锈钢复合板的抗拉强度随之增加, 伸长率随之降低。复合板热处理后, 抗拉强度和伸长率均有所提升。热处理前复合板抗拉强度在 1000 ~ 1100 MPa 之间, 热处理后抗拉强度达到 1165 MPa 以上, 最高达到 1232 MPa; 压下率为 50% 时, 综合性能最好, 热处理前后的伸长率分别为 54% 和 57%; 强塑积分别达到 54.6 和 66.4 GPa%。

参考文献:

- [1] Jiang W C, Luo Y, Zhang G D, et al. Experimental to study the effect of multiple weld-repairs on microstructure, hardness and residual stress for a stainless steel clad plate [J]. *Materials and Design*, 2013, 51: 1052 - 1059.
- [2] 井玉安, 王晨宇. 不锈钢复合板生产技术综述 [J]. *鞍山科技大学学报*, 2007, (6): 590 - 594.
Jing Y A, Wang C Y. Manufacturing technology for clad plate of stainless steel [J]. *Journal of Anshan University of Science and Technology*, 2007, (6): 590 - 594.
- [3] 刘越, 张太正, 孙爱新, 等. 铜/钢双金属复合制备工艺技术研究现状 [J]. *材料导报*, 2015, 29 (15): 10 - 14, 21.
Liu Y, Zhang T Z, Sun A X, et al. Research status of compounding technology for Cu/steel bimeta [J]. *Materials Reports*, 2015, 29 (15): 10 - 14, 21.
- [4] 杨要杰. 金属复合板的加工技术和设备研制现状 [J]. *有色金属加工*, 2013, 42 (2): 4 - 6.
Yang Y J. Present situation of processing technology and equipment development for metals composite sheet [J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2013, 42 (2): 4 - 6.
- [5] 吕泽华, Agamuradov D, 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.
Lyu Z H, Agamuradov D, 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.
- [6] 陈林恒, 牛刚, 武会宾, 等. 轧制工艺对 304 不锈钢/Q345 复合板组织和性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (2): 148 - 153.
Chen L H, Niu G, Wu H J, et al. Effect of rolling process on microstructure and properties of 304 stainless steel/Q345 composite plate [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47 (2): 148 - 153.
- [7] 郭秀斌, 何毅, 张心金, 等. 热轧不锈钢/碳钢复合板结合界面的组织性能 [J]. *一重技术*, 2015, (5): 52 - 55.
Guo X B, He Y, Zhang X J, et al. Microstructure and mechanical properties of binding interface between hot-rolled stainless steel/carbon steel clad plates [J]. *CFHI Technology*, 2015, (5): 52 - 55.
- [8] 班慧勇, 梅德潇, 石永久. 不锈钢复合钢材钢结构研究进展 [A]. 第 29 届全国结构工程学术会议论文集 (第 I 册) [C]. 武汉, 2020.

(下转第 213 页)

- high entropy alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45 (12): 7–12.
- [5] Wang J L, Huang M H, Xi X H, et al. Characteristics of nucleation and transformation sequence in deformation-induced martensitic transformation [J]. *Materials Characterization*, 2020, 163: 110234.
- [6] He Z F, Jia N, Ma D, et al. Joint contribution of transformation and twinning to the high strength-ductility combination of a FeMn-CoCr high entropy alloy at cryogenic temperatures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, A759: 437–447.
- [7] 吕昭平, 蒋虽合, 何骏阳, 等. 先进金属材料的第二相强化 [J]. *金属学报*, 2016, 52 (10): 1183–1198.
- Lu Z, Jiang S, He J Y, et al. Second phase strengthening in advanced metal materials [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52 (10): 1183–1198.
- [8] Wang Z, Baker I, Cai Z, et al. The effect of interstitial carbon on the mechanical properties and dislocation substructure evolution in Fe₄₀. 4Ni₁₁. 3Mn₃₄. 8Al₇. 5Cr₆ high entropy alloys [J]. *Acta Materialia*, 2016, 120: 228–239.
- [9] Guo W, Su J, Lu W, et al. Dislocation-induced breakthrough of strength and ductility trade-off in a non-equiatom high-entropy alloy [J]. *Acta Materialia*, 2020, 185: 45–54.
- [10] 李航, 李杰, 褚延朋, 等. 冷轧退火对 FeMnCoCrAl 高熵合金组织和力学性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2020, 45 (11): 105–114.
- Li H, Li J, Chu Y P, et al. Effect of cold rolling annealing on microstructure and mechanical properties of high entropy FeMnCoCrAl alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45 (11): 105–114.
- [11] 李延超, 李来平, 高选乔, 等. 难熔高熵合金研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49 (12): 4365–4372.
- Li Y C, Li L P, Gao X Q, et al. Research progress of refractory high entropy alloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49 (12): 4365–4372.
- [12] 王文文, 田权伟, 王铁农. 退火对冷轧 Al(0.2)CoCrFe₂Ni 高熵合金组织和力学性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2020, 45 (11): 132–138.
- Wang W W, Tian Q W, Wang Y N. Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of cold-rolled Al(0.2)-CoCrFe₂Ni high entropy alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45 (11): 132–138.
- [13] 李安敏, 王美华, 史君佐, 等. 锻造对 FeMnCrCoNi 高熵合金组织与性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2019, 44 (2): 173–181.
- Li A M, Wang M H, Shi J Z, et al. Effect of forging on microstructure and properties of high entropy FeMnCrCoNi alloy [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2019, 44 (2): 173–181.
- [14] Lei Z F, Wu Y, He J Y, et al. Snoek-type damping performance in strong and ductile high-entropy alloys [J]. *Science Advances*, 2020, 6 (25): eaba7802.
- [15] Seol J B, Bae J W, Li Z, et al. Boron doped ultrastrong and ductile high-entropy alloys [J]. *Acta Materialia*, 2018, 151: 366–376.

(上接第 206 页)

- Ban H Y, Mei Y X, Shi Y J. Research advances of stainless-clad bimetallic steel structures [A]. *Proceedings of the 29th National Conference on Structural Engineering (No. 1)* [C]. Wuhan, 2020.
- [9] 韩银娜, 张小军, 李龙, 等. 温轧钛/铝复合板退火过程的组织与性能 [J]. *金属热处理*, 2017, 42 (11): 45–51.
- Han Y N, Zhang X J, Li L, et al. Microstructure and properties of warm rolled Ti/Al clad plate during annealing [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42 (11): 45–51.
- [10] 于九明, 李河宗, 黄素霞. 有助复剂温轧不锈钢复铝板实验研究 [J]. *东北大学学报*, 2002, (6): 563–565.
- Yu J M, Li H Z, Huang S X. Effect of a bonding assistant coat on stainless steel/aluminum complex sheets produced by moderate temperature rolling [J]. *Journal of Northeastern University*, 2002, (6): 563–565.
- [11] 王晨阳. 钢-铝复合板界面力学性能温轧后处理研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- Wang C Y. Study on Interfacial Property of Steel-Al Bonding Plate with Warm Rolling Post Treatment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [12] Turetta A, Bruschi S, Ghiotti A. Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177 (1–3): 396–400.
- [13] Merklein M, Lechler J. Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177 (1–3): 452–455.
- [14] 徐效谦. 开发和推广 200 系列不锈钢 [J]. *金属制品*, 2003, (3): 26–27.
- Xu X Q. Development and promotion of 200 series stainless steel [J]. *Steel Wire Products*, 2003, (3): 26–27.
- [15] 丁海民, 范孝良, 王进峰, 等. 热轧复合不锈钢-碳钢复合板界面特征 [J]. *材料热处理学报*, 2011, 32 (11): 18–22.
- Ding H M, Fan X L, Wang J F, et al. Interface characterization of hot-rolled stainless steel/carbon steel clad [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32 (11): 18–22.
- [16] 陈建泰, 陈育生, 杜顺林, 等. SUS304 + Q235B 复合板卷冷轧工艺技术研究 [J]. *钢铁研究*, 2017, 45 (2): 39–43.
- Chen J T, Chen Y S, Du S L, et al. Research on cold rolling technology of SUS304 + Q235B clad strip coil [J]. *Research on Iron & Steel*, 2017, 45 (2): 39–43.
- [17] 杨春芳. 浅谈形变诱发马氏体相变对奥氏体系不锈钢的强化作用 [J]. *太钢科技*, 1991, (4): 10–14.
- Yang C F. Strengthening effect of deformation induced martensitic transformation on austenitic stainless steel [J]. *Taigang Science & Technology*, 1991, (4): 10–14.