

高频电流在线加热对不锈钢 / 碳钢复合带 组织与性能的影响 *

祖国胤 李红斌 李兵 于九明 温景林

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘要 在自制的高频电流在线加热复合轧制装置上进行了不锈钢 / 碳钢复合带的制备工艺研究. 根据温度场数值模拟的结果确定了高频电流的主要参数, 结合常规热轧复合的对比实验, 分析了高频电流在线加热工艺对不锈钢 / 碳钢复合带的组织与性能的影响. 结果表明: 该工艺可在 (25—30)% 的压下率下制备出高性能的不锈钢 / 碳钢复合带, 复合带的硬化程度较低, 避免了常规热轧复合带在高温退火后界面出现的脆性“贫碳层”, 退火后复合带的延伸率可达 40% 以上. 高频电流在线加热工艺有效解决了各阶段母材氧化的问题, 不锈钢表面的氧化程度很低. 该工艺的加热区温度分布合理, 具有加热速度快, 热效率高的特点.

关键词 高频电流在线加热工艺, 不锈钢 / 碳钢复合带, 氧化, 压下率

中图分类号 TB331

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2007)10-1048-05

EFFECT OF HIGH-FREQUENCY CURRENT HEATING ONLINE PROCESS ON MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTY OF STAINLESS STEEL/CARBON STEEL CLADDING STRIP

ZU Guoyin, LI Hongbin, LI Bing, YU Jiuming, WEN Jinglin

College of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: ZU Guoyin, lecturer, Tel: (024)83682289, E-mail: zugy@smm.neu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50174019) and Natural Science

Foundation of Liaoning (No.20061017)

Manuscript received 2006-11-22, in revised form 2007-04-26

ABSTRACT By using a self-manufactured high-frequency current heating on-line/roll-bonding device the preparation technology of stainless steel/carbon steel cladding strip was studied. The main parameter of high-frequency current was determined according to the results of simulation of temperature field. The effect of on-line process on the microstructure and property of cladding strip were analyzed by comparing with the general hot rolling bonding. The results showed that the prepared cladding strip has high properties, such as the reduction rate of (25—30)%, low work-hardening, no brittle “carbon-poor layer” on the interface, and the elongation exceeding 40% after annealing. The oxidation problem of base metal under all the stages was solved and only a little oxidation appeared on the surface of stainless steel. The distribution of temperature in heating zone is reasonable, so the process has the predominant characteristic of quick heating rate and high heat efficiency.

KEY WORDS high-frequency current heating on-line process, stainless steel/carbon steel cladding strip, oxidation, reduction rate

双金属复合带具有良好的综合性能, 廉价的成本, 并在资源的合理利用方面表现出明显的优势, 围绕双金属复

合带的工艺开发及理论研究已成为材料研究者当前关注的热点^[1-3]. 不锈钢 / 碳钢复合带在建筑、电力、汽车等领域具有广阔的应用前景, 是不锈钢薄带理想的替代品, 可有效地降低材料成本, 节约 Ni, Cr 等稀缺金属^[4,5]. 轧制复合工艺是目前不锈钢 / 碳钢复合带的主要制备工艺, 但冷轧复合中两种母材很高的变形抗力对轧机的刚度提出了极高的要求, 一般设备条件下无法完成不锈钢 / 碳钢的有效复合^[6]. 热轧复合法是当前不锈钢 / 碳钢复合

* 国家自然科学基金项目 50174019 和辽宁省博士启动基金项目 20061017 资助

收到初稿日期: 2006-11-22, 收到修改稿日期: 2007-04-26

作者简介: 祖国胤, 男, 1977 年生, 讲师, 博士

带主要的生产工艺,但在轧制过程中存在着母材氧化的难题,退火热处理时界面“贫碳层”的形成也会严重影响材料的力学性能^[7]。板叠热轧法^[8]虽然避免了母材氧化,但生产效率低,板型精度差。爆炸+轧制复合则存在着生产流程长,不能制备高精度薄带的问题。因此,研究和开发高性能不锈钢/碳钢复合带的新型制备技术,以满足国民经济发展需求,具有重要的理论和实际应用价值。

鉴于以上问题,本文作者依据高频电流所特有的集肤效应和邻近效应的原理,在综合考虑复合轧制各环节特点的基础上,提出了高频电流在线加热复合轧制工艺。利用自制的实验装置在实验室范围内进行了不锈钢/碳钢等复合带材料的制备研究,在低压力、小变形的条件下制备出了高性能的不锈钢/碳钢复合带。在线加热方式及高频电流加热的特点很好地解决了轧前加热母材氧化的问题,显著低于常规热轧复合工艺的压下率使后续的退火热处理得以简化。本研究表明,高频电流在线加热复合轧制技术是一种适合工业规模生产不锈钢/碳钢复合带的高效、低能耗的复合新技术,研究成果为下一阶段的中试实验提供了必要的理论依据和工艺参数。

1 实验装置

高频电流流过导体时,集中于导体表面很浅的深度内流动的现象称为高频电流的集肤效应^[9]。随着高频电流频率的升高,集肤效应表现得愈加明显。不同材料在高频电流作用下其渗入深度存在着较大差异。高频电流的邻近效应是指高频电流在两导体中彼此反向流动(或在一个往复导体中流动)时,电流会集中流动于导体邻近侧^[10]。通过合理地设计实验装置,控制高频电流的流动路径,改变高频电流的主要参数即能够实现加热效果的可控调节。本实验中根据高频电流及复合轧制的特点自行设计制造了高频电流在线加热复合轧制装置,装置简图如图 1 所示。

结合图 1,复合带的制备过程可简述为:经过简单表面清理的两种母带卷送入开卷机,通过张力控制可以保证带材的平直和良好对中。两种母带接触导电辊后,高频电流对带材进行在线加热,加热的范围是从导电辊到导卫装置入口这一回路。高频电流从两个导电辊导入,对带材表面浅层进行在线快速加热,之后两种母带在导卫装置内

进行热传导均热,热传导后获得适宜加热温度的两种母带进行轧制复合,复合带在收卷装置上收卷。在图中的加热区域内,根据高频电流集肤效应和邻近效应的特点,高频电流将只对从导电辊到导卫装置入口这一区域的带材进行加热,并且加热过程中高频电流会集中于母材待复合表面很浅的深度内流动。根据邻近效应的特点,加热区域内两种母带越接近时加热温度越高,在进入导卫装置前加热温度达到最高。为了防止加热过程中母带被氧化,实验装置特别设计了 4 个高压吹嘴,加热时向加热区吹送足量的氩气。由于两种母带电导率及磁导率等存在一定差异,因此经过高频电流加热后温度会有所不同,通过在导卫装置内进行的热传导过程可以调节最终的轧制温度。实验中通过改变高频电流的强度、频率、轧制速度,导卫装置长度等可以灵活地调控加热温度,以获得最优的加热效果。

2 实验方法

实验原料为 304 不锈钢带与 Q235A 低碳钢带。奥氏体 304 不锈钢带的规格为:宽 100 mm,厚 0.27 mm。主要化学成分(质量分数,%)为:C 0.05, Si 0.47, Mn 1.22, Cr 18.19, Ni 8.34, Fe 余量。Q235A 低碳钢带的规格为:宽 100 mm,厚 1.85 mm。主要成分(质量分数,%)为:C 0.1, Si 0.5, Mn 0.8, Fe 余量。

本工作在前期进行了高频电流在线加热过程数值模拟部分的研究,以使实验具有更强的指向性。动态温度场的模拟所使用的简化模型中,热传导的离散采用隐式差分法,区域离散采用内节点法。模拟过程中考虑到了铁磁性物质在温度跨越 Curie 点时磁导率的突变,通过推导得出的 Maxwell 方程的一般解模拟得到了不锈钢/碳钢等轧制复合过程的温度场分布,后续研究表明,模拟结果具有较高的精度。

肖楠等^[11]进行的模拟研究结果显示,由于碳钢的磁导率和电导率都很大,因此在高频电流在线加热过程中,电流会集中分布于碳钢加热表面很浅的深度,集肤效应表现得非常明显。而不锈钢则由于电导率远小于碳钢,因此加热时其电流分布要比碳钢分散得多。当加热温度达到 Curie 点时,由于碳钢的磁导率降为零,导致其电流密度瞬间变小,表层温升速度显著变慢。综合考虑模拟结果及实验条件,确定本实验采用的高频电流参数为:电流频率 2.3 MHz,电流强度 5.5×10^3 A。

轧前将两种母带经机械清刷后上卷,在高频电流在线加热复合轧制装置上进行轧制复合,导电辊至导卫装置入口的距离为 1 m。高频电流参数输入值为以上模拟结果,轧制压下率为(20—50)%,轧制速度为 0.1 m/s。轧后的复合带在 6 kW 电阻炉内进行退火,退火温度为 600 °C,退火时间 30 min。

为了更直观地反映高频电流在线加热复合轧制工艺的特点,进行了常规热轧复合的对比实验。碳钢及不锈钢

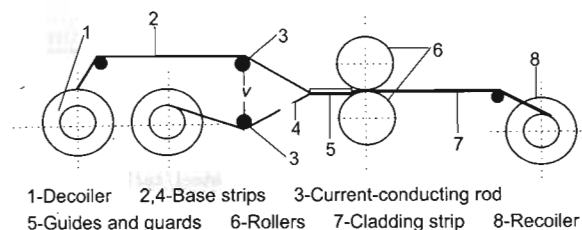


图 1 高频电流在线加热复合轧制装置简图

Fig.1 Abridged general view of high-frequency current heating on-line/roll-bonding device

经过表面清刷后将头部点焊, 制成轧制坯料. 轧制坯料在 10 kW 电阻炉中进行加热, 加热温度为 500—600 °C, 加热时间 15 min, 加热过程中向炉内通入足量的氩气. 加热后的轧制坯料从炉中取出后迅速送入直径 300 mm 轧机进行轧制复合, 轧制压下率为 (40—70)%. 为了完成复合带的再结晶退火, 消除轧制过程产生的严重的加工硬化, 退火热处理制度为 750 °C, 60 min.

采用 OLYMPUS GX71 金相显微镜观察不同工艺下复合带的界面结合情况与母材的显微组织, 在 SSX-550 扫描电镜 (附带能谱分析仪) 上分析复合界面的化学成分, 对比研究不同工艺下的母材氧化情况. 利用 Instron 4206 电子万能试验机测试复合带的剪切强度、延伸率等主要力学性能.

3 实验结果与分析讨论

3.1 金相组织分析

不锈钢 / 碳钢常规热轧复合的难点主要在于母材的高强度及加热过程中待复合表面的氧化. 不锈钢表面的氧化膜具有良好的塑性, 轧制时会同基体一起变形^[12], 使两种母材表面的新鲜金属不能直接接触, 无法形成理想的冶金结合. 在常规热轧对比实验中, 压下率低于 45% 时, 不锈钢与碳钢无法完成复合.

高频电流在线加热工艺很好地解决了轧前加热母材氧化的问题, 更为有利的是, 高频电流在加热的同时还具有一定的去除氧化膜的作用^[13]. 对加热后即将进入轧辊进行轧制复合的不锈钢与碳钢母材取样进行金相图像分析. 结果表明, 不锈钢带加热表面氧元素分布的百分比仅为 (5—8)%, 而碳钢带加热表面氧元素分布的百分比仅为 (3—5)%. 待复合表面是热量最为集中、加热温度最高的区域, 这使不锈钢与碳钢在较低的压下率下即可实现良好复合. 实验中发现压下率为 20% 时, 两种母材即可完成复合, 但剪切强度仅为 217.6 MPa, 因此可将 20% 视为本工艺下不锈钢 / 碳钢复合的临界压下率. 继续提高轧制压下率, 则复合效果明显改善, 界面结合强度达到了较为理想的水平, 压下率为 30% 时, 复合带的剪切强度可达 290.2 MPa. 图 2 为采用高频电流在线加热工艺在 30% 压下率条件下获得的不锈钢 / 碳钢复合带的显微组织形貌. 由图 2a 可见, 轧后两种母材达到了理想的复合效果, 复合界面平直, 界面区域无明显的轧制缺陷存在. 图 2b 为轧后碳钢的高倍金相组织, 可见此时晶粒较为细小, 由于压下率较小, 未形成大压下率下出现的纤维状轧制态组织形貌, 晶粒仍呈均匀的等轴晶. 采用高频电流在线加热工艺在低压力、小变形的条件下实现了不锈钢与碳钢的良好复合, 这使后续的退火热处理工序得以简化, 避免了常规热轧工艺制备的复合带需要在高温 (超过 700 °C) 条件下完成再结晶退火所产生的界面“贫碳层”.

3.2 扫描电镜分析

采用热轧复合工艺制备不锈钢 / 碳钢复合带时, 避免两种母材的氧化可以有效地提高结合强度. 热轧复合过程母材的氧化主要发生在两个阶段, 分别为在加热炉中加热及从加热炉中取出至送入轧机的过程. 后一阶段由于轧件温度很高, 并且直接暴露在空气中, 因此氧化问题是不容忽视的. 深入分析高频电流在线加热工艺的特点, 不难发现该技术从根本上解决了热轧复合工艺中所存在的两阶段母材氧化问题.

高频电流在线加热工艺中, 加热区同轧制复合区紧密相连, 两种母材在加热后直接进入轧机进行轧制复合, 在空气中停留的时间极短, 这就解决了常规热轧复合中从加热炉中取出至送入轧机过程中出现的氧化. 通过文献 [11] 对加热区内温度分布特点的分析可见, 整个加热区内存在着明显的温度梯度, 靠近轧辊的区域温度较高, 远离轧辊靠近导电辊的区域温度较低. 实验中采用氩气对加热区

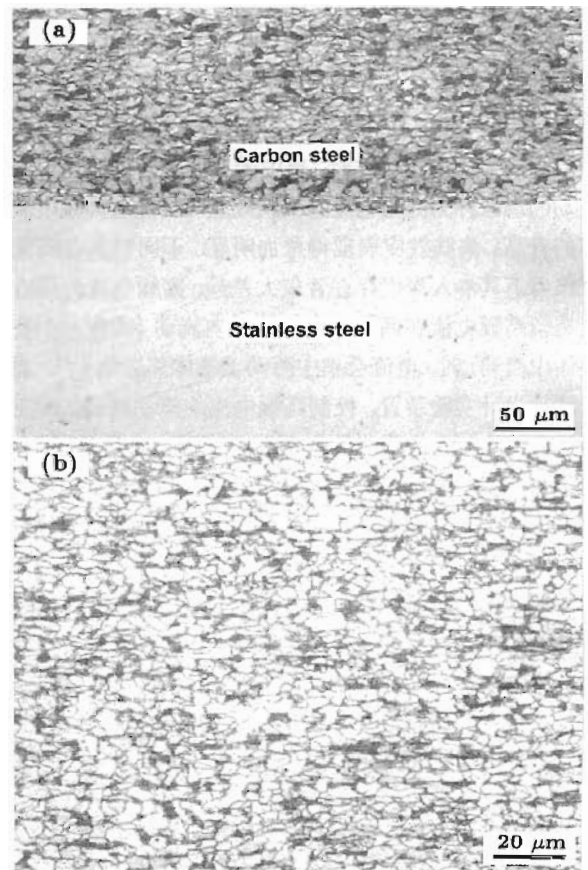


图 2 高频电流在线加热工艺制备的不锈钢 / 碳钢复合带的显微组织形貌

Fig.2 Microstructures of stainless steel/carbon steel cladding strip prepared by high-frequency current heating on-line process

(a) perfect interface of cladding strip

(b) carbon steel, grains still are equiaxial

进行保护，并将喷嘴直接吹向两种母带的接触区。实验结果显示，本工艺在防止母材氧化方面取得了很好的效果。图 3 为不同工艺条件下不锈钢 / 碳钢复合带剥离后不锈钢表面氧元素的面扫描形貌。图 3a 为高频电流在线加热工艺，可见不锈钢表面上氧元素的分布数量很少，表明轧制复合前不锈钢母材基本未发生氧化。图 3b 为常规热轧复合，加热温度 600 ℃，加热过程采用氩气保护。对比图 3a 可见，此时不锈钢的氧化要更严重一些，而这种氧化在非在线加热工艺条件下是不可避免的。

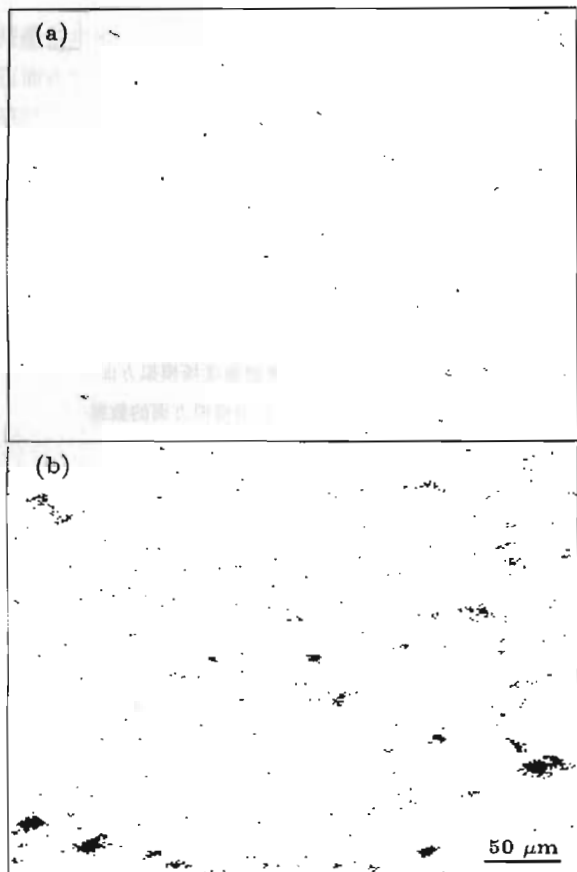


图 3 不同工艺条件下不锈钢表面氧元素的面扫描形貌

Fig.3 Scanning maps of oxygen on the surface of stainless steel under different processes
(a) high-frequency current heating on-line process
(b) general hot rolling bonding process

图 4 为高频电流在线加热工艺制备的复合带剥离后不锈钢表面的能谱分析结果。可见不锈钢表面主要有 Fe、Ni、Cr、Mn 等原料的成分元素，而未见 O 元素存在，这进一步证明了不锈钢在加热过程中的氧化程度很低。另外值得注意的是，常规热轧复合工艺制备的复合带退火后在不锈钢的剥离面上存在着一定质量分数的 C 原子，这是因为高温条件下，长时间的退火热处理易造成界面附近碳钢一侧的 C 原子大量扩散到不锈钢一侧，使界

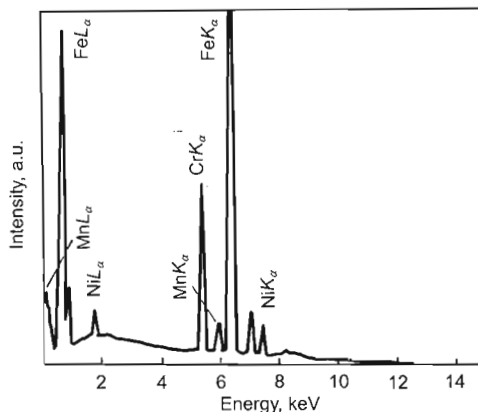


图 4 不锈钢表面的能谱分析结果

Fig.4 EDX analysis result of stainless steel surface after the cladding strip to be peeled off

面区域形成一层厚度为 5—10 μm 的脆性很高的“贫碳层”，“贫碳层”沿复合界面呈连续带状分布。“贫碳层”是界面结合强度最低的区域，复合带的剪切破坏主要发生在不锈钢 / “贫碳层”界面，因此在对不锈钢表面进行能谱分析时明显可以观察到 C 元素的存在。高频电流在线加热工艺制备的复合带仅需在低温条件下进行去应力退火，界面区域 C 原子的扩散进行得很微弱，不至于形成有害的“贫碳层”，保证了复合带具有良好的综合力学性能。

3.3 复合带的力学性能

实验中测试了不同工艺条件制备的不锈钢 / 碳钢复合带的剪切强度与延伸率，以对比分析不同制备工艺的优劣，具体实验结果见图 5(图中工艺 1 为高频电流在线加热工艺，工艺 2 为常规热轧工艺)。由图 5a 可见，不同的结合工艺中，复合带的剪切强度均是随压下率的提高而上升，退火热处理可使剪切强度得到进一步提高。常规热轧复合工艺中，母带在轧前发生了一定的氧化，轧制后在复合界面上会存在一定的氧化膜残留区域。在这些区域两种母带的新鲜金属无法实现有效接触并形成强度较高的冶金结合，造成复合带结合效果不佳，材料的力学性能存在一定的各向异性。通过退火热处理，复合带的剪切强度会有所提高，这主要是依靠已实现有效结合区域的扩散作用，在复合界面上形成一定的金属键而完成的，但热处理对轧后有氧化膜覆盖的界面部分意义不大。另外，常规热轧复合工艺中压下率较大，两种母材发生了明显的加工硬化，产生了严重的晶格畸变，位错等缺陷相互缠结，需要通过再结晶退火才能使复合带的力学性能得以改善。由于高频电流在线加热工艺中母带的氧化程度很低，轧后在整个复合界面上实现了理想的冶金结合，压下率为 40% 时，轧后复合带的剪切强度已经达到了 316.5 MPa。退火热处理后，复合带的剪切强度得到进一步提升，最高可以达到 350.8 MPa，显著优于常规热轧法制备的复合带的性能水平。

图 5b 为不同工艺下复合带延伸率的测试结果。由图

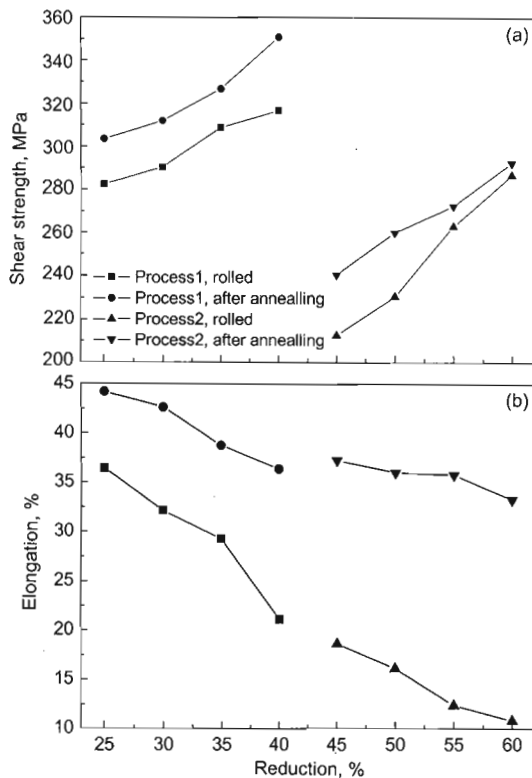


图 5 不同工艺下不锈钢 / 碳钢复合带的剪切强度与延伸率

Fig. 5 Shear strengths (a) and elongations (b) of stainless steel/carbon steel cladding strip under different processes

可见, 轧制压下率对材料的延伸率具有明显的影响, 随轧制压下率的升高, 延伸率指标急剧下降, 高频电流在线加热工艺制备的复合带轧后的延伸率明显高于常规热轧工艺, 而退火热处理后复合带的延伸率均得到了显著改善。

采用高频电流在线加热工艺, 在 30% 压下率下制备的复合带的延伸率可达 32.15%, 退火后其延伸率更可高达 42.64%, 复合带完全可以满足冲压, 冷弯等冷加工过程。而常规热轧复合产品在 55% 的压下率下可以实现两种母材的较好复合, 但较高的轧制压下率导致此时复合带的延伸率仅为 12.37%, 材料的冷加工变形能力很差。经过高温退火后, 复合带延伸率升高到 35.97%, 然而退火后的复合带在冷加工时常出现界面分层破坏的问题。这是由于高温退火时界面区域形成的“贫碳层”脆性很高, 在承受弯曲及剪切变形时, “贫碳层”极易同基体分离而破坏, 导致材料失效。

通过以上分析可见, 采用高频电流在线加热工艺制备的复合带具有优异的综合力学性能。复合带的延伸率指标明显优于常规热轧产品, 这对复合带的后续冷加工变形具有重要意义。综合复合带的界面结合效果及力学性能的要

求, 本工艺中轧制压下率在 (25—30)% 时复合带的组织与性能最佳。

4 结论

(1) 高频电流在线加热复合轧制工艺能够在低压力、小变形条件下制备出高性能的不锈钢 / 碳钢复合带。轧制压下率为 (25—30)% 时, 不锈钢与碳钢即可实现理想的界面结合, 复合带的硬化程度较低, 避免了常规热轧复合带在高温退火后界面区域出现的脆性“贫碳层”。退火后, 复合带的延伸率可达 40% 以上, 材料具有优异的综合力学性能。

(2) 高频电流在线加热工艺充分利用了高频电流集肤效应与邻近效应的特点, 加热时高频电流只对复合表面进行集中加热, 加热区内存在着合理的温度梯度, 具有加热速度快、热利用率高的突出特点。

(3) 高频电流在线加热工艺从根本上解决了不锈钢 / 碳钢等易氧化材料复合中各阶段的氧化问题。对复合带界面进行的扫描电镜分析显示, 不锈钢表面的氧化程度明显低于常规热轧工艺。

感谢东北大学陈海耿教授在本课题温度场模拟方面的关键性指导, 感谢硕士研究生肖楠提供温度场数值模拟方面的数据。

参考文献

- [1] Yu J M, Xiao Y Z, Wang Q J, Fang X Y, Cui G Z. *J Chin Mater Res*, 2000; 14: 13
(于九明, 孝云祯, 王群骄, 方晓英, 崔光洙. 材料研究学报, 2000; 14: 13)
- [2] Padron T, Khan T I, Kabir M J. *Mater Sci Eng*, 2004; A385: 221
- [3] Mizuhara Y, Masahashi N. *Mater Trans*, 2000; 41: 429
- [4] Paschold R. *Svetsaren*, 2001; 56: 63
- [5] Saji N, Nagai S, Tsuchiya K, Asakura H, Obata M. *Physica*, 2001; 354C: 148
- [6] Xu X M, Zhang W Z, Zong J F, Hou Y W. *J Iron Steel Res*, 2004; 16: 37
- [7] Jauhari I, Ogiyama H, Tsukuda H. *Mater Sci Res Int*, 2003; 9: 156
- [8] Kacar R, Acarer M. *J Mater Process Technol*, 2004; 152: 92
- [9] Huang L Z. *The Principle of Electromagnetic Field*. Beijing: People's Education Press, 1980: 307
(黄礼镇. 电磁场原理. 北京: 人民教育出版社, 1980: 307)
- [10] Ni G Z. *The Principle of Engineering Electromagnetic Field*. Beijing: Higher Education Press, 2002: 190
(倪光正. 工程电磁场原理. 北京: 高等教育出版社, 2002: 190)
- [11] Xiao N, Chen H G, Sun S G, Wang S G, Wang S J, Cui M, Yu J M. *Acta Metall Sin*, 2006; 42: 989
(肖楠, 陈海耿, 孙世刚, 王成军, 崔苗, 于九明. 金属学报, 2006; 42: 989)
- [12] Bouquet F, Cuntz J M, Coddet C. *J Adhes Sci Technol*, 1992; 6: 236
- [13] Yamasaki K, Sugano T. *J Vac Soc Jpn*, 1980; 23: 29