

NM450D 耐磨钢-Q235B 碳钢复合板的轧制和热处理工艺 对组织、性能的影响

邱俊¹ 程晓茹¹ 兰昆¹ 雷冬¹ 王煜¹ 黄大军²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 武汉钢铁股份有限公司, 武汉 430083)

摘要 10 mm NM450D 低合金耐磨钢板(/% : 0.22C, 0.70Cr, 1.50Mn, 0.30Si, 0.012Ti, 0.030Nb) 和 10 mm Q235B 碳钢板(/% : 0.19C, 0.25Mn, 0.04Si) 经表面处理和四角焊接成 20 mm 复合板, 在 180 mm 二辊实验轧机上经 1 150 °C, 60% 压下率和 930 °C, 30% 压下率两次轧制成 5.6 mm 复合板, 再经 800 ~ 1 000 °C 淬火, 250 °C 回火处理。结果表明, 经 900 °C 淬火 + 250 °C 回火的低合金耐磨钢-碳钢复合板的 5.6 mm 复合界面接触良好, Q235B 钢组织为板条马氏体 + 铁素体和少量贝氏体和珠光体, NM450D 钢组织为回火马氏体, 其 HV 值为 500, 复合钢板抗剪强度为 367 MPa, 均达到标准要求。

关键词 NM450D 耐磨钢-Q235B 碳钢复合板 复合界面 控制轧制 热处理 组织 剪切强度

Effect of Rolling and Heat-Treatment on Structure and Properties of Wear-Resistant Steel NM450D-Carbon Steel Q235B Clad Plate

Qiu Jun¹, Cheng Xiaoru¹, Lan Kun¹, Lei Dong¹, Wang Yu¹ and Huang Dajun²

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resource Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel Co Ltd, Wuhan 430083)

Abstract The 20 mm clad plate of surface-treated 10 mm plate of low alloy wear-resistant NM450D steel (/% : 0.22C, 0.70Cr, 1.50Mn, 0.30Si, 0.012Ti, 0.030Nb) and 10 mm plate of carbon steel Q235B (/% : 0.19C, 0.25Mn, 0.04Si) is welded at four-corner of plate and double-rolled by a lab 180 mm two-high mill with reduction 60% at 1 150 °C and with reduction 30% at 930 °C to 5.6 mm clad plate, then quenched at 800 ~ 1 000 °C and tempered at 250 °C. Results show that the clad interface of 5.6 mm clad plate of low alloy wear-resistant steel-carbon steel quenched at 900 °C + tempered at 250 °C has nice contact, the structure of steel Q235 is lath martensite + ferrite and minor bainite and pearlite, the structure of steel NM450D is tempered martensite with HV hardness value 500, the shearing-strength of clad plate is 367 MPa, all meet the requirement of standard.

Material Index Wear-Resistant Steel NM450D-Carbon Steel Q235B Clad Plate, Clad Interface, Control-Rolling, Heat Treatment, Structure, Shearing-Strength

随着科技的不断进步与新型产业的不断出现,人们对材料性能的要求越来越高,在很多情况下单一的材料已经无法满足人们的要求,于是新型复合材料的研究和开发将成为材料加工领域的重要课题^[1]。其中金属复合板集结构与概念为一体,具有高强度,高韧性,耐磨,耐腐蚀的优异性能^[2]。此外,研究金属复合板还具有节约贵重金属材料、降低成本的重要意义。目前,国内金属复合板主要采用爆炸复合法、扩散复合法和轧制复合法制备,但是爆炸复合法和扩散复合法普遍存在界面结合率低、界面结合强度不均匀、污染环境等缺点,已经严重制约了金属复合板的发展和應用。相比前两种工艺,轧制复合法制作的复合板具有板型优良、生产效率高、

低污染低能耗等优点,是金属复合板制造的主流研究方向^[3]。相较于其他金属复合材料,国内对耐磨钢的复合板制造研究还较少;本文以低合金耐磨钢 NM450D 和普通碳素结构钢 Q235B 作为原料,通过两阶段控制轧制及离线热处理的工艺方案研制出的耐磨钢复合板,在保证组织性能的情况下,大大降低了成本。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验采用 NM450D 低合金耐磨钢和 Q235B 碳钢,其厚度均为 10 mm,化学成分如表 1 所示。

1.2 实验方法与方案

表1 实验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested steels /%

实验钢	C	Cr	Mn	Si	Ti	Nb	S	P
NM450D	0.22	0.70	1.50	0.30	0.012	0.03	≤0.015	≤0.025
Q235B	0.19	-	0.25	0.04	-	-	≤0.010	≤0.020

(1) 采用线切割将实验用钢加工规格为 130 mm(L) × 宽 40 mm(W) × 厚 10 mm(H), 保证一定加工精度。

(2) 将切割好的实验用钢接触界面进行表面处理, 采用砂轮机打磨, 去除表面的油渍、杂质以及氧化物, 直至露出新鲜的金属, 并将表面沿轧制方向打磨出一定数量的机械划痕, 使复合面粗糙度增大, 有利于界面结合; 最后使用无水乙醇清洗打磨好的表面。

(3) 用夹具将两块原料叠整齐并夹紧, 采用手工电弧焊的焊接方式, 将结合四周焊牢在一起, 焊接后复合钢板的规格为 130 mm(L) × 宽 40 mm(W) × 厚 20 mm(H)。

(4) 将制备好的实验钢放入加热炉中加热, 加热到 1 200 °C, 保温 0.5 h, 然后在 Φ180 mm × 200 mm 二辊实验轧机上进行两阶段控制轧制, 第一阶段压下率为 60%, 轧制温度 1 150 °C, 然后放到 950 °C 的加热炉中待温 10 min。第二阶段压下率为 30%, 轧制温度 930 °C。轧制完成后通过层流冷却至 650 °C, 然后空冷至室温, 最终轧制成 5.6 mm 厚的复合钢板。此时耐磨钢层得到的是贝氏体组织, 碳钢层得到的是珠光体加铁素体组织。

采用控制轧制和轧后控制冷却的主要目的是改变实验钢在离线热处理前的组织及结构, 细化组织, 而得到的组织越细小, 离线再加热过程中组织的扩散速度越快, 越有利于复合界面的结合, 同时也有利于抑制晶粒尺寸的长大, 之后热处理能得到耐磨钢层细小的马氏体组织^[4]。

(5) 将轧制完成之后的实验钢用线切割切成小块试样, 进行离线热处理实验, 采用“淬火 + 低温回火”的热处理

工艺; 其中淬火温度分别为 800、900、1 000 °C, 保温时间为 18 min; 回火温度统一为 250 °C, 保温时间为 15 min。

(6) 用 HV-1000B 型维氏硬度计对热处理之后的实验钢测量硬度; 用 Nova 400 nano 扫描电镜以及能谱仪观察复合板的基层、复层及结合界面组织; 使用 WAW-1000C 电液伺服万能试验机进行拉剪实验。

2 实验结果与分析

2.1 Q235B 侧的显微组织分析

图 1 和图 2 分别为淬火温度 800、900、1 000 °C; 回火温度 250 °C 的基层 Q235 侧组织形貌; 为了更全面的表示出得到的组织形貌, 分别做出基层近中心位置及复合界面处的组织图谱。

800 °C 淬火, 250 °C 回火条件下 Q235 侧的组织分别为铁素体加珠光体以及在晶界处极少数的贝氏体, 从基层中心到结合界面处存在组织梯度。在基层中心位置, 珠光体均匀分布, 如图 1(a) 所示; 而到结合界面处, 界面较为清晰平直, 而珠光体明显减少, 全部为铁素体组织, 证明在结合界面处存在一定厚度的脱碳层, 如图 2(a) 所示。

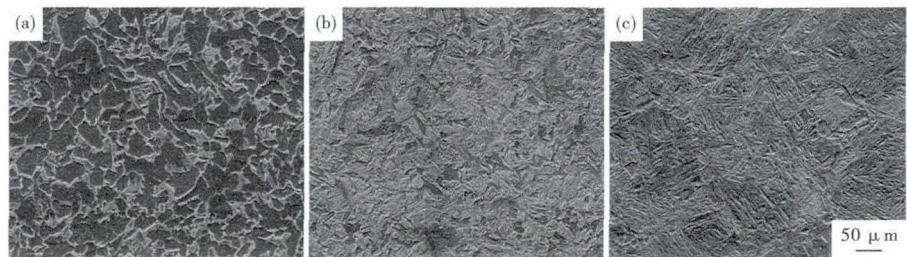


图 1 800 °C-250 °C (a), 900 °C-250 °C (b) 和 1 000 °C-250 °C (c) 淬火-回火后复合板 Q235B 钢侧的组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of clad plate steel Q235B side quenched-tempered at 800 °C-250 °C (a), 900 °C-250 °C (b) and 1 000 °C-250 °C (c)

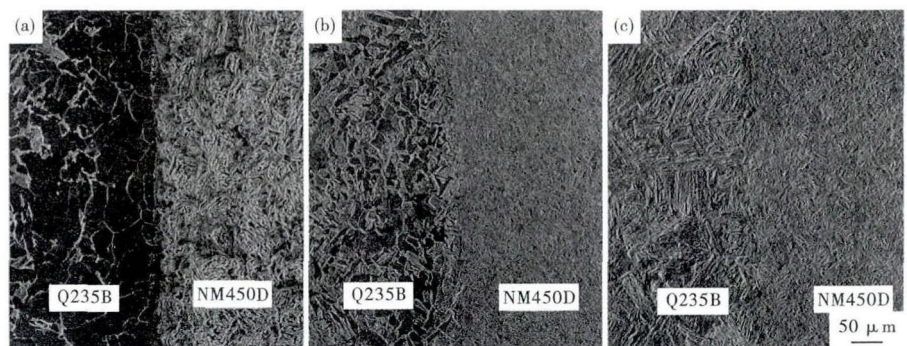


图 2 800 °C-250 °C (a), 900 °C-250 °C (b) 和 1 000 °C-250 °C (c) 淬火-回火后复合界面的组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure of clad interface quenched-tempered at 800 °C-250 °C (a), 900 °C-250 °C (b) and 1 000 °C-250 °C (c)

图 1(b) 中, 900 °C 淬火, 250 °C 回火条件下 Q235B 侧的组织分别为板条马氏体加铁素体和极少部分贝氏体和珠光体。图 2(b) 与图 2(a) 相比, 不存在组织梯度, 界面较为模糊, 部分区域已很难看见界面, 说明结合良好, 且结合界面位置脱碳层大幅减少。

1 000 °C 淬火, 250 °C 回火条件下 Q235B 侧的组织分别为上贝氏体加马氏体基体, 如图 1(c) 所示。与 900 °C 淬火工艺相比, 界面结合情况相似, 但得到的马氏体板条束粗大, 如图 2(c) 中所示, 这将大幅度降低韧性, 影响基层力学性能。

作为耐磨钢复合板的基层组织, 需要的是良好的综合性能^[5], 即在保证原 Q235B 碳钢良好塑韧性的前提下, 适当增加其硬度。而通过上述不同淬火温度的基层及结合界面显微组织对比可知, 900 °C 淬火, 250 °C 回火条件下所得到的基层组织为软相和硬相结合的复合组织, 它具有马氏体组织的高强硬度以及铁素体组织的良好塑韧性, 这能够改善基层侧的力学性能。而参考之前学者提出的低中碳钢奥氏体化经验公式以及对 Q235B 强韧化热处理工艺的研究^[6-7], 可以得出 Q235B 碳钢最佳奥氏体化温度应该在 896 °C 左右, 与本实验所得 900 °C 淬火温度的结果相符合。

2.2 耐磨钢层的显微组织

从图 3(a) 中可以看出, 实验钢在 800 °C 淬火条件下由于处在奥氏体化的两相区, 还没有完全奥氏体化, 所以还存留铁素体组织, 且马氏体板条束还不明显。

随着加热温度的进一步提高, 到 900 °C 淬火, 250 °C 回火条件下得到的组织均为回火马氏体。图 3(b) 中可以隐约看到原始奥氏体晶界, 且各组织中的马氏体为典型的板条状分布, 各马氏体板条束之间交叉分割, 具有较大的位相差, 马氏体板条清晰, 组织细小均匀。并且在马氏体板条束内部和各个板条束之间有一定数量细小均匀的碳化物析出, 碳化物可以有效的提高基体硬度^[8]。

淬火温度达到 1 000 °C 时, 如图 3(c) 所示, 原始奥氏体晶粒尺寸明显变大; 对比 900 °C 淬火条件下得到的马氏体组织, 可以明显看出马氏体组织变的粗大模糊, 部分马氏体板条出现合并的现象, 这将会



图 3 800 °C-250 °C (a), 900 °C-250 °C (b) 和 1 000 °C-250 °C (c) 淬火-回火后复合板 NM450D 钢侧的组织形貌

Fig. 3 Morphology of structure of clad steel NM450D side quenched-tempered at 800 °C-250 °C (a), 900 °C-250 °C (b) and 1 000 °C-250 °C (c)

使耐磨钢层的硬度和韧性都有所下降。

综合上述对不同淬火温度下的耐磨钢复层的组织分析, 可以知道耐磨钢复层在 900 °C 淬火和 250 °C 回火的条件下, 所得到的回火马氏体组织清晰细小, 符合对耐磨钢复层的组织要求。这主要得益于两阶段控制轧制和对热处理温度及保温时间的有效控制; 两阶段控制轧制及轧后冷却工艺主要起到改变热处理前组织结构, 细化奥氏体晶粒。淬火温度、回火温度以及保温时间的有效控制, 为得到均匀细小的回火马氏体组织提供了保障。

2.3 复合板能谱分析

在经过 900 °C 淬火, 250 °C 回火热处理之后的耐磨钢复合板上取部分厚度做能谱 (EDS) 线扫描, 结果表明, C, Cr, Mn 等元素沿耐磨钢厚度方向由于成分含量不同出现波动, 但在结合界面附近出现了坡度变化, 不是骤然的增加或减少; 根据扩散理论, 可以知道通过前期合理的轧制及热处理工艺设计, 结合点原子相互扩散而形成了共有的结合区。其中在 NM450D 一侧, C, Cr, Mn 的含量较高, 界面两侧形成了浓度梯度, NM450D 中元素向 Q235B 中逐渐扩散, 并且在界面区域形成了扩散层。扩散层的形成将极大增加复合强度, 可以说明复合界面处已经形成了牢固可靠的冶金结合。

2.4 界面两侧硬度分析

显微硬度作为分析界面结合的重要手段, 可以有规律的反映出耐磨钢层与碳钢层以及界面结合处的组织情况。本实验显微硬度采用斜线梯度法测量, 以结合界面处为原点, 分别在距离界面位置的 40, 80, 150, 300 μm 处的耐磨钢及碳钢层打点, 其中原点左侧 (0 ~ -300 μm) 为 NM450D 钢, 原点右侧 (0 ~ 300 μm) 为 Q235B 钢, 测得硬度值如图 4 所示。

综合不同淬火温度下的耐磨钢侧硬度值以及上文中给出的微观组织图片可知, 800 °C 淬火下由于

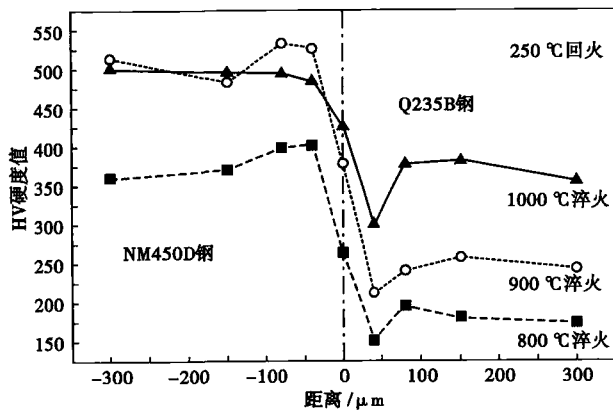


图4 实验复合钢板断面的硬度分布

Fig.4 Distribution of hardness of tested clad steel plate cross section

奥氏体化不完全,马氏体板条束不明显,所以得到的硬度普遍较低,最高 HV 硬度值为 403。而在 900 °C 淬火条件下得到的马氏体板条束清晰,组织均匀细小,所对应的组织硬度值也在 3 种不同温度中最高,远超 GB/T 24186-2009《工程机械用高强度耐磨钢板》中对 NM450 的硬度要求,最高 HV 硬度值达到了 533。而在 1 000 °C 淬火条件下得到的马氏体组织粗大,硬度值出现明显的下降,最高 HV 硬度值为 501。

3 种不同温度下的结合界面位置的硬度值都处在耐磨钢层硬度值和碳钢层硬度值之间,说明实验钢界面位置组织相互交错,在该区域内形成结合区,已经很好的结合在一起。靠近界面位置的碳钢由于存在脱碳,组织均为硬度较小的铁素体,而超过脱碳层之后硬度趋近与基层 Q235B 的原始硬度值。基层硬度随着淬火温度的提高而提高, HV 硬度平均值分别为 182, 247, 371; 与上文中基层显微组织相符合。

2.5 力学性能分析

拉剪实验是衡量复合钢板结合强度的重要标准,依据 GB/T 6396-2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》标准规定,在 900 °C 淬火, 250 °C 回火的复合钢板上取拉剪试样。由于目前还没有专门规定耐磨钢复合板结合强度的国标,所以参考其他钢种复合及实际应用中的经验,复合板结合界面的剪切强度应不小于复合板中低强度组元材料的剪切强度,才能保证界面的良好结合^[9]。Q235B 的抗剪强度(σ_c) 在 304 ~ 373 MPa, 所以耐磨钢复合板的抗剪强度应该在 304 MPa 以上, 才能确保复合板已经很

好的结合。而结果显示,复合钢板的抗剪强度为 367 MPa 已经超过 Q235B 抗剪强度的下限标准,可以说明复合板界面结合良好。

3 结论

(1) 通过合理对两阶段控制轧制、轧后冷却工艺以及离线热处理工艺中各个工序的精确把握, 所得试样的界面结合良好, 基复层显微组织成分合理, 硬度达到或超过 NM450D 和 Q235B 各自的标准, 力学性能满足复合板要求; 成功验证了这一工艺方案的可行性。

(2) 淬火温度对于实验钢基复层组织和性能影响显著, 在 900 °C 淬火, 250 °C 回火时, 所得到的复层组织为细小均匀的马氏体组织, 硬度超过 NM450 级别标准; 基层组织为软相和硬相结合的复合组织, 硬度适中, 能够改善基层侧的力学性能。而在较低的淬火温度下, 基层和复层组织都未完全奥氏体化, 组织转变不完全, 所得硬度较低。而在较高的淬火温度下, 复层马氏体组织粗大, 硬度开始下降, 基层马氏体板条束粗大, 大幅度降低韧性。

参考文献

- [1] 田雅琴, 秦建平, 李小红. 金属复合板的工艺研究现状与发展[J]. 材料开发与应用, 2006, 21(1): 40-43.
- [2] 李红, 韩静涛. 金属板材轧制-扩散复合机理研究进展[J]. 材料工程, 2006(S1): 507-514.
- [3] 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学). 真空制坯复合轧制技术与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 1-10.
- [4] 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学). 高强度低合金耐磨钢研制开发与工业化应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 46-55.
- [5] 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.
- [6] 李刚. 中低碳钢的淬火温度选择[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(4): 26-28.
- [7] 戴涛. Q235 钢的强韧化热处理工艺[J]. 航天工艺, 1994(4): 24-26.
- [8] 邓想涛, 王昭东, 张遯, 等. HB450 低合金超高强耐磨钢回火过程中的组织性能演变[J]. 钢铁, 2011, 46(5): 60-63.
- [9] 李龙, 张心金, 刘会云, 等. 热轧不锈钢复合板界面剪切强度测定[J]. 钢铁, 2013, 48(12): 52-56.

邱俊(1992-), 男, 硕士研究生(武汉科技大学), 2014 年长江大学(本科)毕业, 复合轧制复合板组织及性能研究。
E-mail: 260630687@qq.com

收稿日期: 2016-10-26