Nb、Ti微合金化高强车轮钢焊接失效分析*

刘 妍, 宿 成, 张智刚, 刘德勤

(内蒙古包钢稀土钢板材有限责任公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用低碳Nb、Ti微合金化成分体系和控轧控冷工艺开发650 MPa级高强度车轮轮辋用钢, 重点围绕材料经焊接热循环后的力学性能、金相组织以及Nb、Ti碳氮化物的析出与溶解的变化进行了研究。得出结论, 材料基体析出物越细小, 位错密度越大, 热影响区强度相比基体和焊缝降幅越大, 当其低于轮辋扩径整形过程材料协调形变力时, 导致热影响区开裂或缩颈质量缺陷的发生。

关键词: 高强车轮钢; 焊接热影响区; 显微组织; 开裂

中图分类号: TG441; TG142.1 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2021)05-0053-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.05.014

Analysis on Welding Failure of Nb-Ti Microalloying High Strength Wheel Steel

Liu Yan, Su Cheng, Zhang Zhi-gang, Liu De-qin

(*Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Steel Plate Co., Ltd., Baotou* 014040, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: The 650 MPa grade high strength wheel rim steel is developed with the low carbon Nb-Ti microalloying component system as well as controlled rolling and cooling process. The changes of mechanical properties and metallographic structure of materials after weld thermal cycle as well as the precipitation and dissolution of Nb and Ti carbonitrides are mainly studied. It is concluded that the finer the precipitates of material matrix, the greater the dislocation density and the greater the decrease of strength of heat affected zone compared with the matrix and weld joint. When it is lower than the coordinated deformation force of material in the process of hole enlargement and shaping for rim, the cracking of the heat affected zone or the quality defect of necking is occured.

Key words: high strength wheel steel; heat affected zone; microstructure; cracking

随着社会的快速发展, 汽车保有量逐年增加, 给人们出行带来方便快捷的同时, 动力能源短缺及环境污染问题已成为制约我国汽车产业可持续发展的突出问题, 无论是从社会效益还是经济效益来考虑, 低油耗、低排放的汽车生产技术正是契合节约型社会发展的需要。因此, 汽车轻量化技术是汽车节油降耗的重要手段, 研究表明: 汽车重量每下降10%, 油耗约下降3%~5%。近几年, Nb、Ti微合金化高强钢技术研发和生产工艺的日趋成熟, 成功应用于工业生产的各行各业, 取得了良好的经济社会效益。所以, 汽车用高强度钢已成为颇具竞争力的轻量化材料, 车辆的主要部分如悬架、底盘、车轮和车身结构需要高强度钢减轻材料的重量。目前在抗拉强度590 MPa低合金高强车轮钢已实现成熟应用的基础上, 逐步开展研发650 MPa产品用于制作商用车车轮, 进一步探索轻量化的发展方向。

* **收稿日期**: 2021-08-06

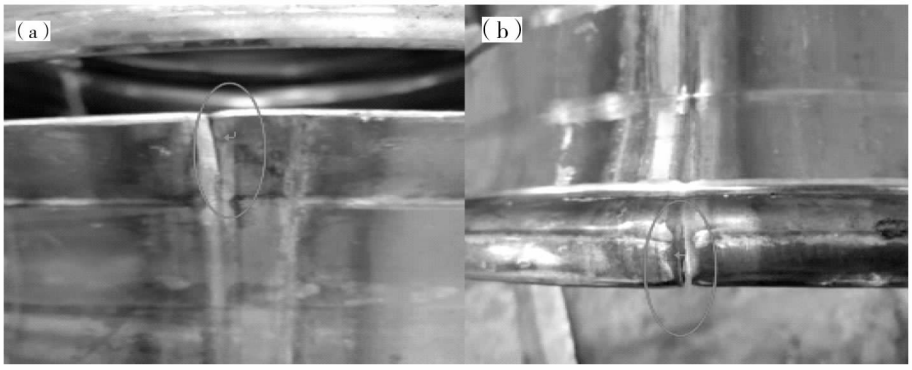
作者简介: 刘 妍(1972-), 女, 内蒙古包头市人, 正高级工程师, 现从事新产品研发与管理工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本文围绕不同成分设计抗拉强度650 MPa级低合金高强钢制作车轮轮辋，重点从力学性能、金相组织以及Nb、Ti碳氮化物的析出与溶解的变化，分析导致轮辋扩径整形变形时焊接热影响区发生开裂或缩颈缺陷产生的原因。

1 材料加工及开裂现象

低合金高强热轧钢带用于制作商用车车轮轮辋，其主要加工流程：热轧钢卷→表面酸洗→剪切落料→闪光焊接→扩径→滚型→精整。由于材料经历焊接热循环后，焊接热影响区成为轮辋整体性能不稳定区域，在扩径和滚型过程中易发生开裂或缩颈缺陷，导致轮辋报废，缺陷见图1。



(a) 扩径开裂　　(b) 滚型开裂

图1 650 MPa级高强车轮钢成型时热影响区开裂

2 材料设计与检测方法

低合金高强车轮用钢采用低碳、Nb、Ti微合金化成分设计体系[1]，两种成分系主要区别在于微合金化元素(Nb和Ti)含量不同，见表1。冶炼工序采用双精炼(LF+RH)工艺保证钢质的纯净度，热轧工序采用2 250 mm热轧机组的控轧控冷工艺实现产品的高性能要求，产品力学性能和成型性能见表2。

表1 材料成分设计(质量分数) %

成分系	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti
1#	0.06~0.08	0.05~0.15	1.40~1.55	≤0.015	≤0.003	0.050~0.060	0.045~0.055
2#	0.06~0.08	0.05~0.15	1.40~1.55	≤0.015	≤0.003	0.040~0.050	0.035~0.045

拉伸试验是室温下在德国Zwick试验机上进行的，拉伸速率为1 mm/s，拉伸试样采用GB 228—2010中的板状试样；硬度使用日本岛津HMV-2T显微硬度计检测($HV_{0.1}$，压力：980 mN，保持时间15 s)。金相试样用4%硝酸酒精溶液腐蚀10~15 s，用德国蔡司金相显微镜观察显微组织。

表2 材料力学性能和可焊性

成分系	力学性能				焊接失效率(平均)/%
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率A/%	屈强比	
1#	680	725	27	0.94	8
2#	635	685	28	0.93	3

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　检测结果分析及讨论

由表 1 和表 2 数据可知，1#材料相比 2#材料含有较多的微合金元素 Nb 和 Ti，热轧采用了相近的控轧控冷工艺，前者强度明显高于后者，塑性指标相当。但是，材料经相同工艺参数的闪光焊接后，1#材料相比 2#材料热影响区开裂失效率明显偏高。围绕高强轮辋焊接热影响区开裂附近位置，分别进行了显微硬度以及不同组织形态的对比分析。

3.1　材料的硬度变化分析

针对热影响区开裂分析其与相邻区域的硬度变化，间接反映材料经热循环后其强度的变化趋势。材料基体、热影响区以及焊缝处的维氏硬度见图 2，1#和 2#材料经焊接热循环后硬度变化规律相近，基体硬度大于焊缝硬度，焊缝硬度大于热影响区硬度，开裂率较大的 1#材料热影响区硬度最小，其基体降低的幅度明显大于 2#材料，在材料协同变形过程中，热影响区成为性能薄弱区域，易导致变形开裂。

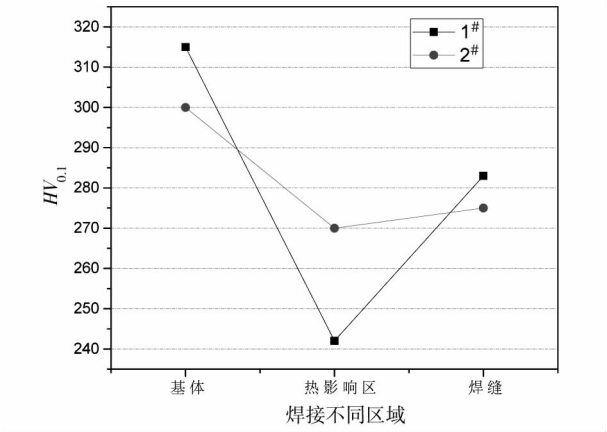


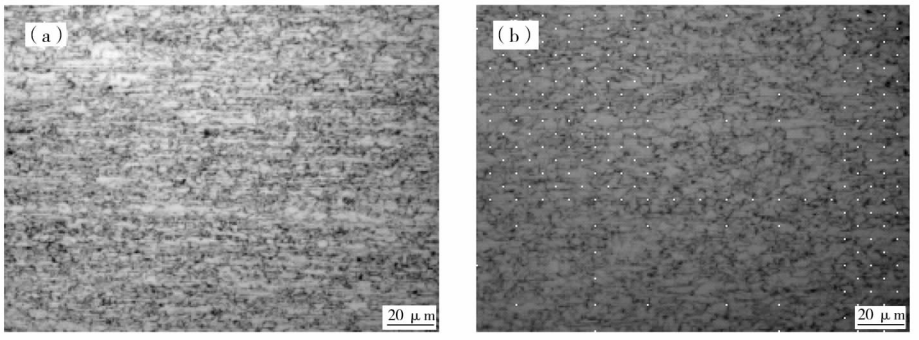
图 2　焊接不同区域的硬度变化趋势

3.2　材料金相组织变化分析

高强钢在焊接热循环过程中所遇到的不可避免的问题是焊接热影响区晶粒粗化，焊接热循环造成的析出相的变化，从而引起热影响区的局部软化。对 650 MPa 级两种高强钢采用闪光对焊后三个区域的金相组织进行检测分析，组织形态见图 3—图 5。

图 3 显示材料基体组织，1#和 2#材料组织形貌均以铁素体为主，珠光体为辅，伴随着微合金元素的碳氮化物第二相的析出物。由于 1#材料相比 2#材料含有较多的微合金化元素，相近 C 和 N 含量，在溶解和析出热力学和动力性条件下，碳氮化物的第二相析出物随微合金元素含量的增加，尺寸减少，数量增加[2]。微合金元素析出物的数量较为密集，对奥氏体晶粒再结晶阻碍或钉扎作用更为明显，所以 1#材料组织纤维状突出，材料的强度和硬度指标均高于 2#材料。

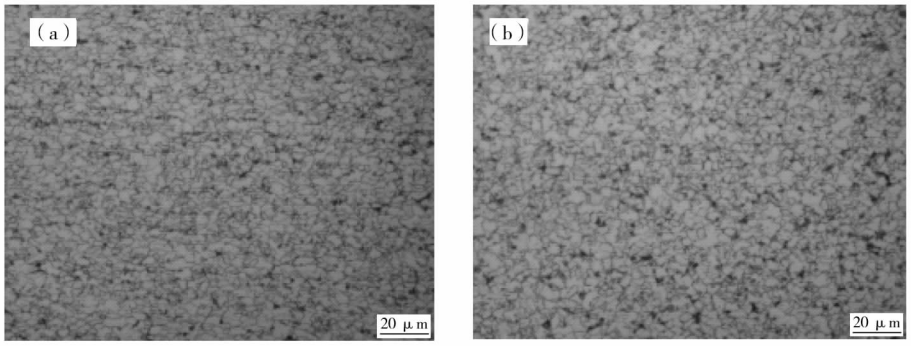
焊接过程热影响区可分为 4 个区域，即界面区、粗晶区、重结晶区与部分重结晶区[3]。图 4 显示材料焊接重结晶区的组织形貌，重结晶温度范围区间（A_{c3}到 1 100 ℃），该区域晶粒在加热和冷却过程中经历了重结晶，因此晶粒变得等轴均匀，消除了母材经轧制变形的纤维组织形态。所以，1#和 2#材料组织均以等轴状铁素体为主，珠光体为辅，微合金元素的碳氮化物析出物相比基体明显减少，且 1#材料铁素体晶内第二相析出物相比 2#材料要少。依据第二相析出物在热影响区的热循环影响下变化行为[4-6]，研究表明，10 nm 以下析出强化相全部溶解，析出强化效果消失，10 ~ 20 nm 析出相部分溶解，而 20 nm 以上析出相则不溶解。析出强化相弥散度越高的材料经焊接热循环后，第二相析出物回溶比例越高，导致材料析出强化效果消退幅度越大，所以 1#材料热影响区的硬度低于 2#材料。



（a）1#材料　　（b）2#材料

图 3　材料基体的组织形貌

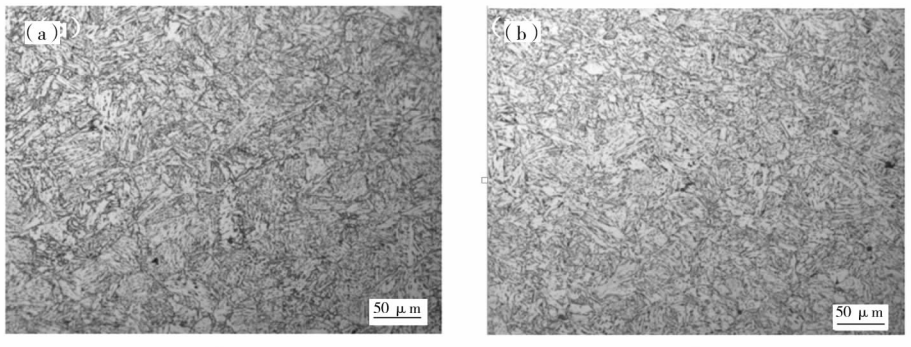
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 1#材料 (b) 2#材料

图4 材料热影响区的组织形貌

闪光对焊是将材料高温熔融后,在一定外力的挤压和一定的局部冷速下,金属重新凝固。所以焊缝组织为原材料的非平衡态结晶产物,组织以粒状贝氏体为主,多边形铁素体为辅,见图5,1#与2#材料相比,焊缝组织形貌相近,晶粒略显粗大,硬度指标($HV_{0.1}$)相差8。



(a) 1#材料 (b) 2#材料

图5 材料焊缝的组织形貌

3.3 开裂原因的讨论

由图2可知,1#材料基体与热影响区的维氏硬度($HV_{0.1}$)变化幅度为70,较2#材料的维氏硬度($HV_{0.1}$)变化幅值25而言,降幅大45。结合图3—图5可以看出,降幅差距主要来源于两个方面:一是1#材料基体硬度($HV_{0.1}$)为315,而2#材料基体硬度($HV_{0.1}$)为300,1#材料制成轮辋后基体硬度($HV_{0.1}$)高于2#材料15;二是1#材料焊接热影响区硬度($HV_{0.1}$)为240,2#材料热影响区硬度($HV_{0.1}$)为270,1#材料制成轮辋后热影响区硬度($HV_{0.1}$)低于2#材料30。另一方面,1#和2#材料基体屈强比分别为0.94和0.93,两者相近;当经焊接制成轮辋后,热影响区与基体硬度比1#和2#材料分别为0.77和0.90,由此可知,1#材料焊接热影响区软化程度明显高于2#材料。所以,在采用相近的外力变形时,1#材料在轮辋变形扩径过程中施加的外力易超出热影响区承受极限,是导致1#材料缩颈或开裂的比率明显高于2#材料的主要原因。

材料的强度主要取决于组织形态、晶粒度以及析出物,材料受焊接热循环影响后,纤维状组织逐渐转变为等轴状,位错消失。所以,1#材料与2#材料的热影响区组织形貌相近,见图4,强度变化区别主要体现在析出相尺寸和占比。从成分设计方面可以看出,相比2#材料,1#材料添加了相对较多的易形成碳氮化物元素Nb和Ti,且晶粒尺寸较2#材料细小。根据析出物回溶合长大的研究结论可知,正是由于1#材料析出物相比2#更为密集细小,在相同的焊接热循环过程受热溶解比例较高,因此,导致2#材料

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

热影响区强度降幅较大且低于 1#材料。

4　结论

(1) 采用低碳 Nb、Ti 微合金化成分设计原则，配合控轧控冷工艺得到以针状铁素体为主的抗拉强度 650 MPa 热轧钢带，产品性能满足车轮轻量化需求。

(2) Nb、Ti 微合金化高强钢 650 MPa 级产品以细晶强化和析出强化为主要强化机制，材料经焊接热循环后，组织分别经历不同程度的回复、再结晶和晶粒长大以及析出物的回溶和二次析出，析出物越细小、位错密度越大、热影响区强度降幅越大。

(3) 高强钢经闪光焊和滚压等工序制作轮辋，热影响区硬度相比基体和焊缝降幅大，导致其低于轮辋扩径整形过程材料协调形变力时，产生热影响区开裂或缩颈质量缺陷。

参　考　文　献

[1] Jun Hu, Lin – Xiu Du, Jian – Jun Wang. Cooling Process and Mechanical Properties Design of Hot – Rolled Low Carbon High Strength Microalloyed Steel for Automotive Wheel Usage [J]. Materials and Design, 2014, 53(12): 332 – 337.

[2] 李晓林，肖宝亮，崔阳，等. Ti、Nb 微合金钢中碳氮化物固溶与再析出的研究 [J]. 材料导报，2017，31(1): 107 – 109.

[3] 张洪博，谭峰亮，陈志国. 闪光留量对 510 MPa 级车轮钢闪光对焊接头组织与性能的影响 [J]. 材料研究学报，2017，31(2): 154 – 155.

[4] 董现春，张楠，陈延清，等. 高 Ti、Nb 析出强化高强钢接头强度及焊接热影响区软化行为分析 [J]. 焊接学报，2012，33(11): 75 – 77.

[5] 陈茂爱，孙文涛，唐逸民，等. 焊接热循环对 Ti – V – Nb微合金钢中第二相粒子的影响 [J]. 机械工程学报，2000，36(10): 99 – 103.

[6] 尹桂丽，周立岱，林成，等. 微合金钢中第二相粒子在焊接 HAZ 溶解行为的价电子结构分析 [J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版)，2014，34(2): 124 – 127.

(上接第 21 页)

对应关系，衡量铁水物理温度是否处于合理范围，结合炉缸活性指数，监测炉缸活性的变化。物理温度指数的计算方法:

$$K_{tp} = [(tp - 1400)/100] \times 2/\omega[Si]$$

式中: tp 为铁水物理温度，℃; $\omega[Si]$ 为铁水硅含量(化学热)。

这一指数的变化趋势，能够及时反映铁水物理温度的变化趋势，$K_{tp} > 1.9$ 得满分。通过高炉炉温的监管能有效的预测炉温趋势，为炉前出铁操作提供有效的技术支持。

4　结束语

随着高炉进入炉役后期，炉前铁口维护难度进一步加大，加强铁口的维护是高炉护炉措施的一项重要内容。6#高炉通过稳定铁口深度，杜绝铁口喷溅，改进炮泥质量，进行不断的技术创新，为高炉炉役后期生产提供了有力的支撑。良好的铁口维护是保证高炉安全顺行、稳定长寿的关键之一。

参　考　文　献

[1] 孙树峰，程朝晖. 马钢 10 号高炉冷却壁漏水影响及应对措施 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报，2016，26(3): 15 – 18.

[2] 尹卫国，罗晓兵，刘向辉，等. 重钢 5 号高炉频繁塌料的原因及处理 [J]. 炼铁，2010，29(6): 49 – 51.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net