

汽车用220 MPa级超低碳烘烤硬化钢耐时效性能研究

肖景江 郭强 吴庆美 卜凡征 郑连辉

(鞍钢蒂森克虏伯汽车钢有限公司,大连 116600)

摘要:以220 MPa级超低碳烘烤硬化钢为研究对象,对比分析Nb单加体系(H220BD-1)与Nb+Ti双加体系(H220BD-2)的试验钢,通过固溶碳计算及内耗法测定,探究2种成分体系下固溶碳对时效行为的影响,并结合微观组织晶粒尺寸分析,阐明晶粒尺寸与烘烤硬化(BH)值、耐时效性能的关联机制。结果表明:Ti的添加显著降低固溶碳含量,抑制时效过程中碳原子的动态偏聚,同时双加体系细化晶粒,通过Hall-Petch效应提升强度并改善耐时效稳定性。为优化烘烤硬化钢成分设计及解决时效问题提供了理论依据。

关键词:烘烤硬化钢 固溶碳 耐时效性 晶粒细化

中图分类号: TG142 文献标志码: B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250088

Research on Aging Resistance of 220 MPa Grade Ultra-Low Carbon Bake-hardening Steel for Automotive Applications

Xiao Jingjiang, Guo Qiang, Wu Qingmei, Bu Fanzheng, Zheng Lianhui

(TKAS Auto Steel Co., Ltd., Dalian 116600)

Abstract: Taking 220 MPa grade ultra-low carbon bake-hardening steels as the research object, this paper compares and analyzes test steel with Nb single-addition (H220BD-1) and Nb+Ti dual-addition (H220BD-2) systems. Through solid solution carbon calculations and internal friction method determination, the paper explores the influence of solid solution carbon on aging behavior under different composition systems, and combines with microstructure grain size characterization to elucidate the correlation mechanism between grain dimensions and Bake-Hardening (BH) value with aging resistance. Results demonstrate that Ti addition significantly reduces solid solution carbon content, effectively suppressing dynamic carbon segregation during aging. The dual-addition system achieves grain refinement, enhancing strength via Hall-Petch effect while improving aging stability.

Key words: Bake-hardening steels, Solid solution carbon, Aging resistance, Grain refinement

1 前言

超低碳烘烤硬化钢板(UCL-BH)是车身覆盖件的理想材料,因具有优异的冲压成形性能、良好的塑性、抗凹陷性能及抗冲击性能等,可以很好地解决汽车面板成形性能与抗凹陷性能间的矛盾,

其是在超低碳IF钢的成分基础上通过加入Ti、Nb、V等稳定化元素,使钢中的绝大部分C、N原子被固定成碳氮化物,以获得较好的深冲性能^[1-4],后经退火工艺使得基体内残留一定数量的固溶C原子,冲压钢板在经过烤漆处理后,获得性能的提升,从而提高了汽车的抗凹陷性能。

作者简介:肖景江(1991—),男,硕士学位,研究方向为汽车用钢开发。

参考文献引用格式:

肖景江,郭强,吴庆美,等.汽车用220 MPa级超低碳烘烤硬化钢耐时效性能研究[J].汽车工艺与材料,2025(8):56-60.

XIAO J J, GUO Q, WU Q M, et al. Research on Aging Resistance of 220 MPa Grade Ultra-Low Carbon Bake-hardening Steel for Automotive Applications[J]. Automobile Technology & Material, 2025(8): 56-60.

国内外BH钢产品均存在不同程度的时效问题,如何在保证烘烤硬化特性的同时,保证钢板的耐时效性,是当前的行业难题,BH钢主要成分体系包括Ti体系、Nb体系及Nb+Ti双加体系,均存在不同程度的性能波动,核心在于钢中固溶C的稳定化控制,研究钢中固溶C与烘烤硬化特性及耐时效性能的对对应关系^[4-5],通过合理的成分设计及工艺控制,实现钢中固溶C的稳定化控制,是解决当前问题的关键。

本文通过成分体系对比、微观组织分析及性能评价,分析220 MPa级烘烤硬化钢耐时效性能及烘烤硬化性能的影响机理,为后续优化烘烤硬化钢成分设计及解决时效问题提供理论依据,支撑具有良好加工性能和使用性能的耐时效超低碳热镀锌烘烤硬化钢板的开发。

2 试验料与方法

试验所用的材料为工业化生产的热镀锌烘烤硬化钢板H220BD,选取的试验钢采用Nb体系及Nb+Ti双加体系,H220BD-1及H220BD-2成分如表1所示,其他相关的强化元素成分一致,表中未列出。

钢号	C	N	Al	Nb	Ti
H220B D-1	0.001~ 0.003	0.001~ 0.003	0.02~ 0.08	0.001~ 0.006	≤0.005
H220B D-2	0.001~ 0.003	0.001~ 0.003	0.02~ 0.08	0.001~ 0.006	0.001~ 0.006

对2个试验钢采用相同的退火工艺,在热镀锌产线上进行退火试验,其中退火温度为820℃,具体工艺如图1所示,后续采用固溶碳检测仪,通过内耗法(Snoek峰分析)定量表征试验钢中固溶碳含量。同时对试样进行时效性能及BH值测定,将试样在100℃下分别时效0h、24h、168h,测试屈服强度变化用于表征时效性能,对拉伸试样进行预应变2%后,在170℃下烘烤20min,计算烘烤硬化增量,烘烤硬化值为试样经过保温处理后的下屈服强度或者非比例延伸0.2%对应的屈服强度与烘烤前同一试样2%预应变对应的屈服强度的差值,用BH值表

示。最后通过光学显微镜和扫描电镜观察试验钢H220BD-1及H220BD-2的组织差异性,通过晶粒尺寸和晶粒的均匀性探索成分、组织及性能的关联性。

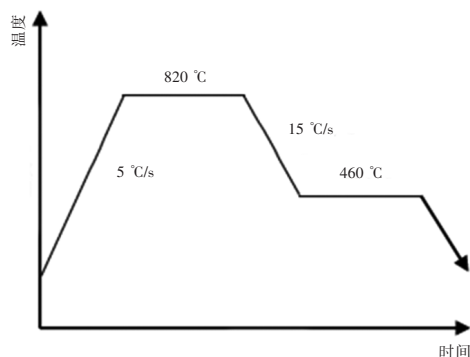


图1 试验钢H220BD退火工艺制度

3 试验结果与讨论

3.1 固溶碳对时效行为的影响

钢中固溶碳含量与钢的成分密切相关,通过钢中C、N、Nb、Ti的含量及各元素间反应的优先级,考虑到氮化物和碳化物的析出顺序,按照如下方式进行钢中固溶碳的核算^[5]:

a. Ti/N原子比 ≤ 1时,N主要与Ti、Al结合,C主要与Nb结合:

$$W(C)_{\text{unstabilized}} = W(C)_{\text{total}} - \frac{12.011W(\text{Nb})}{92.9064} \quad (1)$$

式中: $W(C)_{\text{unstabilized}}$ 为钢中固溶碳含量理论计算值, $W(C)_{\text{total}}$ 为钢中碳含量, $W(\text{Nb})$ 为钢中Nb元素碳含量。

b. Ti/N原子比 > 1时,N主要与Ti结合,C与Ti、Nb结合:

$$W(C)_{\text{unstabilized}} = W(C)_{\text{total}} - \frac{12.011W(\text{Nb})}{92.9064} - \frac{12.011W(\text{Ti})}{47.9} + \frac{12.011W(\text{N})}{14.0067} \quad (2)$$

式中: $W(\text{Ti})$ 为钢中Ti元素碳含量, $W(\text{N})$ 为钢中N元素碳含量。

以上计算过程,可通过化学成分对钢中固溶碳含量进行初步估计,但实际上钢中固溶碳含量还与热轧、冷轧及退火工艺紧密相关,涉及钢中碳化物的析出及回溶,因此可通过固溶碳检测仪对钢中晶内固溶碳进行检测,理论计算及实际检测结果如表2所示。

表2 试验材料中的固溶碳含量(质量分数) $\times 10^{-6}$

试验钢	理论计算结果	试样编号	内耗法检测结果
H220BD-1	13	1#	9.1
		2#	8.5
		3#	8.9
H220BD-2	7	1#	5.4
		2#	5.8
		3#	5.5

同时对试样进行时效性能检测,将试样在100 °C下分别时效0 h、24 h、168 h后,检测屈服强度的变化,试验结果如表3所示。

表3 试验材料屈服强度检测结果 MPa

试验钢	常温屈服强度	加热100 °C不同时效后屈服强度		
		0 h	24 h	168 h
H220BD-1	232	233	249	267
H220BD-2	240	242	248	258

结果显示,H220BD-1的固溶碳含量理论计算结果为 13×10^{-6} ,内耗法检测晶内固溶碳含量约为 9×10^{-6} ,而H220BD-2因Ti的碳化物形成作用使晶内固溶碳含量降至 5.5×10^{-6} 。时效过程中,H220BD-1屈服强度增幅达35 MPa(168 h),显著高于H220BD-2的18 MPa。在H220BD-1(Nb体系)中,由于只有Nb的存在,碳原子更倾向于与Nb结合形成细小的NbC析出相。这些析出相在时效过程中逐渐形成,钉扎位错,从而提高屈服强度。此外,较高的固溶碳含量(13×10^{-6})可能提供了更多的碳原子参与析出,增强时效强化效果。在H220BD-2(Nb+Ti体系)中,Ti的加入改变了碳的分配。Ti与C的结合能力可能比Nb更强,因此会优先形成TiC析出相。然而,TiC的形成消耗了一部分碳原子,导致可用于NbC析出的碳减少。以上分析表明,钢中Ti的添加通过固定残余碳原子有效降低了钢中固溶碳含量,抑制了时效初期碳-位错交互作用,从而延缓强度波动,提高了材料的耐时效性能。

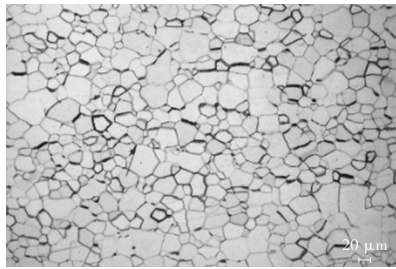
同时,钢中固溶碳含量与钢的成分及微观结构密切相关。除Nb、Ti对碳的固定作用外,晶粒细化导致的晶界密度增加亦显著影响C、N原子的扩散与偏聚行为。研究表明,晶界作为高能区

域,易成为间隙原子(如C、N)的偏聚场所^[6]。H220BD-2中因Nb、Ti的添加,会实现晶粒细化,导致晶界面积增加,为C、N提供了更多偏聚位点。晶界偏聚的C、N原子可与Ti、Nb结合形成稳定的碳氮化物(如TiC、NbC、TiN),从而降低晶内固溶碳含量。此外,晶界偏聚的C原子在时效初期可能优先参与晶界附近析出相的形核,抑制晶内碳原子向位错线的扩散,延缓动态应变时效(Dynamic Strain Aging, DSA)进程^[7]。这一机制进一步解释了H220BD-2中固溶碳含量降低(5.5×10^{-6})但时效强度增幅较小(18 MPa)的原因:晶界偏聚不仅减少晶内固溶碳,还通过局域析出消耗部分碳原子,削弱了碳-位错交互作用的时效强化潜力。

3.2 晶粒尺寸与成分体系的关联性

对基板的显微组织进行观察,显微组织照片($\times 200$ 倍)如图2所示,试验钢H220BD-1的晶粒尺寸约为22 μm ,而H220BD-2通过Nb+Ti双加的成分体系,有效实现了晶粒细化,晶粒尺寸约为16 μm ,Nb和Ti在钢中优先与C、N结合,形成稳定的纳米级碳氮化物(如NbC、TiC、TiN等)^[8]。这些析出物在高温奥氏体化过程中(如连铸或热轧加热阶段)仍能保持稳定。同时,析出的碳氮化物颗粒(尤其是TiN)在奥氏体晶界处形成物理障碍,通过Zener钉扎机制阻碍晶界迁移,从而有效抑制奥氏体晶粒的粗化,奥氏体晶界处的碳氮化物(如NbC)可作为铁素体形核的有效位置,增加形核密度,细化铁素体晶粒,最终使退火后的基体晶粒尺寸发生了明显细化。

对试验钢进行背向散射电子衍射(Electron Back Scatter Diffraction, EBSD)微观分析,进一步统计晶粒尺寸的分布情况,如图3所示,可见H220BD-2实现了整体晶粒尺寸细化的同时,均匀性也明显提高,有效改善了晶粒异常长大的情况。Nb和Ti的添加通过形成多尺度、高稳定性的析出相,在高温至低温的不同阶段持续抑制晶界迁移,同时与控制轧控冷工艺协同,促进高密度均匀形核并限制晶粒生长速率差异,最终实现晶粒细化与均匀性的双重提升,这种机制对烘烤硬化钢的强度、韧性及成形性能优化具有重要意义^[9]。

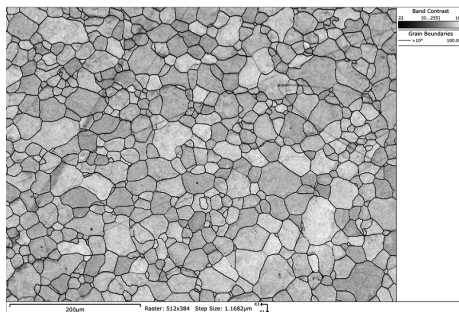


(a) 试验钢 H220BD-1 微观组织

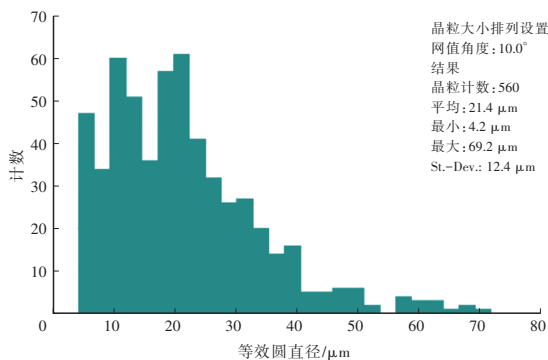


(b) 试验钢 H220BD-2 微观组织

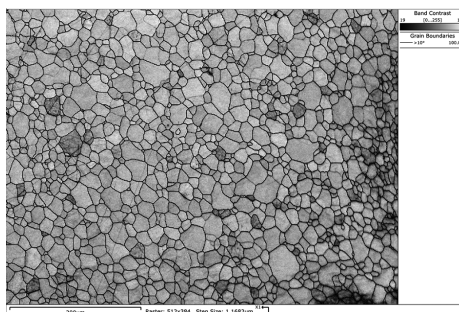
图2 试验钢微观组织



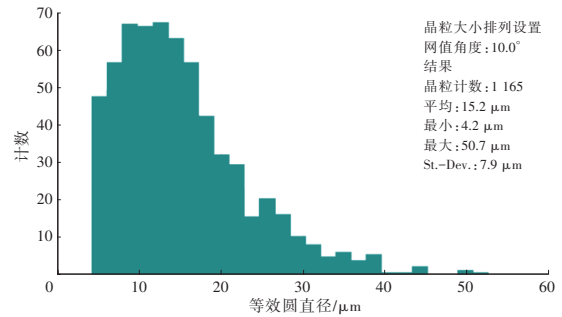
(a) 试验钢 H220BD-1 EBSD 结果



(b) 试验钢 H220BD-1 EBSD 结果统计



(c) 试验钢 H220BD-2 EBSD 结果



(d) 试验钢 H220BD-2 EBSD 结果统计

图3 试验钢 EBSD 结果

3.3 时效性能优化机制

烘烤硬化钢性能的关键在于烘烤硬化特性与耐时效性能的兼顾,对上述试验钢 H220BD-1 及 H220BD-2 选取 3 个不同位置的试样,进行预应变 2% 后,在 170 °C 下烘烤 20 min,测量 BH 值^[10],结果如表 4 所示,同时结合表 3 中的耐时效性能,分析 2 种不同的成分体系下 BH 值及耐时效性能的优化机制。

表 4 试验材料 BH 值检测结果		MPa
试验钢	试样编号	BH 值检测结果
H220BD-1	1#	45
	2#	42
	3#	43
H220BD-2	1#	41
	2#	40
	3#	44

结果显示,试验钢 H220BD-2 因 Nb+Ti 的添加,导致钢中的固溶碳含量降低,但 BH 值未明显下降。Nb 和 Ti 的复合添加显著细化了钢的晶粒尺寸^[11]。Nb 和 Ti 作为强碳氮化物形成元素,在热轧或退火过程中通过抑制奥氏体晶界迁移,显著细化最终铁素体晶粒尺寸^[11]。根据 Hall-Petch 关系,晶粒尺寸的减小直接提升材料屈服强度,H220BD-2 中晶粒细化带来的强度增益部分抵消了因固溶碳减少导致的时效强化潜力损失。此外,细晶材料在预应变(2%)时,由于晶界对位错运动的阻碍作用更为显著,位错在晶界附近堆积密度更高,导致位错增殖速率加快^[12]。高密度位错网络不仅为烘烤过程中碳原子扩散提供了更多通道,还通过“位错-碳原子”交互作用形成更均匀的 Cottrell 气团。这种形变强化效应与析出强化的协

同作用,使得 H220BD-2 在固溶碳较低 (5.5×10^{-6}) 时仍能维持较高 BH 值,细化晶粒导致的位错密度提升可能部分抵消因固溶碳减少造成的时效强化损失,从而实现强度与耐时效性的平衡^[13-14]。H220BD-2 中 Nb 与 Ti 的复合添加通过“细晶强化-位错调控-析出相协同”的多级机制,在固溶碳含量降低的条件下仍维持了高 BH 值与强度。这一设计策略突破了单一析出强化路径的局限性,为兼顾高成形性、耐时效性及烘烤硬化的烘烤硬化钢开发提供了理论依据。

4 结论

a. Nb+Ti 双加体系通过 TiC 析出固定碳原子,降低固溶碳含量,同时晶粒细化诱导的 C、N 晶界偏聚进一步抑制时效强度波动。

b. 双加体系细化晶粒至 $16 \mu\text{m}$, 可有效实现晶粒细化,并改善晶粒均匀性,通过 Hall-Petch 效应保证 BH 值,同时晶界密度增加延缓碳扩散,改善耐时效性能。

c. 综合调控固溶碳与晶粒尺寸是优化烘烤硬化钢时效稳定性的有效途径,可通过“细晶强化-位错调控-析出相协同”的多级机制实现烘烤硬化特性及耐时效性能的均衡。

参考文献:

- [1] 刘光明, 康永林, 陈继平, 等. 390MPa 级 Ti+Nb 超低碳高强度 BH 钢组织性能研究[J]. 材料工程, 2010(4): 5-9.
- [2] 陈继平, 康永林, 郝英敏, 等. Ti+Nb 超低碳烘烤硬化钢的组织 and 性能研究[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(6): 13-16.
- [3] 段小平, 胡吟萍. 烘烤条件对超低碳烘烤硬化钢 BH 值的影响[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2009, 21(4): 8-10.
- [4] 张理扬, 张利祥. 烘烤硬化钢热镀锌镀层 450°C 合金化退火模拟[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(9): 33-39.
- [5] 崔岩, 王瑞珍, 魏星, 等. 连续退火工艺对超低碳烘烤硬化钢烘烤硬化性能的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(9): 86-90.
- [6] LI Y. Grain Boundary Segregation of Interstitial Atoms in Ultra-Low Carbon Steels[J]. Acta Mater, 2018, 150: 76-85.
- [7] LI X, ZHANG Y, WANG L, et al. Effect of Grain Refinement on Dynamic Strain Aging Behavior in Bake Hardening Steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772.
- [8] 赵虎, 康永林, 江海涛, 等. 终轧温度对超低碳 BH 钢板组织和性能的影响[J]. 汽车工艺与材料, 2016(11): 6-8.
- [9] 佟皓男, 缪心雷, 吴庆美, 等. 一种连续热镀锌烘烤硬化钢板提升耐时效性能的生产方法: CN 202010573401.1[P]. 2022-03-15[2025-04-07].
- [10] 金兰, 李维娟, 张永衡. 预变形量对超低碳钢烘烤硬化性能的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(12): 37-39.
- [11] 吴学亮, 史文, 陈超, 等. 退火温度和时间对新型超低碳 BH 钢再结晶织构的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(2): 74-77.
- [12] HANSEN N. Hall-Petch Relation and Boundary Strengthening[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(8): 801-806.
- [13] TSUJI N, UEJI R, MINAMINO Y, et al. Strengthening Mechanisms in Nanostructured Steels[J]. ISIJ International, 2008, 48(8): 1114-1121.
- [14] 卜凡征, 吴庆美, 郭强, 等. 180MPa 级超低碳烘烤硬化汽车钢板烘烤硬化稳定性研究[J]. 汽车工艺与材料, 2022(12): 37-41.