

屈服强度 650 MPa 级高强高韧桥壳钢研制

郭冬青, 王少炳, 杨雄

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 桥壳是汽车行驶系统的主要构件之一, 实验室研制的 650QK 采用中碳系成分设计, 且添加微量 Nb、Ti、V 合金元素, 组织为细小均匀的铁素体、珠光体和贝氏体, 晶粒度为 12 ~ 13 级, 屈服强度在 664 ~ 671 MPa, 抗拉强度在 762 ~ 794 MPa, 延伸率为 20.0% ~ 21.5%, 冷弯性能良好, 低温冲击韧性良好, -60 °C 低温冲击韧性达到 127 J, 韧脆转变温度低于 -60 °C, 疲劳极限强度为 270 MPa, 材料的综合机械性能良好, 为工业化生产提供了材料的基础性能技术指标。

关键词: 桥壳试验钢; 力学性能; 组织夹杂物; 冲击韧性

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438 (2023) 02 - 0011 - 04

Development of High Strength and Toughness Axle Housing Steel with Yield Strength of 650 MPa

Guo Dong - qing, Wang Shao - bing, Yang Xiong

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The axle housing is one of the main components of traveling system for vehicle. The 650QK steel developed in laboratory is with the component design of medium carbon as well as trace amount of Nb, Ti and V alloy elements are added, the microstructure is fine and even ferrite, pearlite and bainite, grain size is grade 12 ~ 13, yield strength is 664 ~ 671 MPa, tensile strength is 762 ~ 794 MPa, elongation is 20.0% ~ 21.5%, cold bending property and low temperature impact toughness are good, low temperature impact toughness at -60 °C reaches 127 J, ductile - brittle transition temperature is lower than -60 °C, ultimate fatigue strength is 270 MPa as well as synthesized mechanical properties of material are good, which could provide the technical index of basic performances of material for industrial production.

Key words: axle housing test steel; mechanical properties; inclusion of microstructure; impact toughness

桥壳是汽车行驶系统的主要构件之一, 它是重要的承载部件。壳体冲压成形时要承受很大的弯曲和膨胀塑性变形, 冲压成形后的壳体需要经过焊接组合成桥, 以保护传动系统中的各部件^[1]。

随着中、重型卡车逐步向节能、轻量化的方向发展, 鉴于桥壳的特殊服役环境, 要求桥壳钢具备塑韧

性好、强度适当、焊接性能和耐疲劳性能优良的性能。国内各钢厂桥壳钢的成形工艺略有差别, 既有热冲压桥壳钢也有冷冲压桥壳钢, 而且各钢厂桥壳钢牌号命名规则并不统一, 数字含义也不相同, 有的表征屈服强度, 有的表征抗拉强度。首钢桥壳钢为冷冲压成形产品, 其屈服强度达到 550 MPa, 分别设

计了 Mn + Ti 系和 Nb + 微 Ti 系桥壳钢成分体系^[2]。宝武开发出一系列高强度冷冲压及热冲压桥壳钢,冷冲压桥壳钢抗拉强度已经达到 800 MPa 级别以上,为桥壳的轻量化提供了多种解决方案^[3]。宝武开发的冷冲压桥壳钢具有强度高、易冲压、易焊接等特点,生产效率高,适用于薄规格轻卡桥壳的生产。热冲压桥壳钢适用于热冲压成形工艺,其特殊设计的组织能够保证热冲压以后获得高强度及良好的抗疲劳性能。

为了形成桥壳用钢产品的系列化,本研究以开发屈服强度 650 MPa 高级别桥壳用钢为目标,在实验室开展了成分体系、工艺模拟、组织调控、力学性能、疲劳性能等一系列研究,基本摸清了 650QK 桥壳钢的成分、工艺及组织性能之间的关系,为开展工业试制奠定了基础。

1 总体设计及试验设备

桥壳钢要求具有高强度、良好的塑韧性及延展性,因此研究设计必须充分考虑各因素的影响,需要在冶炼、轧制、轧后处理等环节精确控制。考虑降低成本,

成分设计应以中碳含量、微合金化为基本出发点,并充分运用细晶强化、析出强化等高强钢生产技术。

试验所用的冶炼、轧制设备主要为 25 kg 真空中频感应炉、 $\Phi 750$ mm \times 550 mm 二辊可逆热轧轧机及层流冷却机组。试验步骤为冶炼钢锭 \rightarrow 热轧钢板(厚度 12 mm) \rightarrow 层流冷却 \rightarrow 加工试样 \rightarrow 检测分析。

2 试验过程

2.1 冶炼

桥壳钢按中碳低硅钢设计,除了加入 Nb、V、Ti 等微合金元素外,还对钢中 Al 含量作出定量要求。加入的合金元素当中, Mn 具有固溶强化作用,可提高钢的强度和塑性^[4]; Nb、V 具有细晶强化作用,可提高钢的强韧性和疲劳性能^[5]。

将切割抛丸处理的低磷($\leq 0.010\%$)、低硫($\leq 0.005\%$)、低氧($\leq 0.004 0\%$)、低氮($\leq 0.006 0\%$)优质废钢和计算配比好的铁合金加入实验室 25 kg 真空中频感应炉,待废钢和铁合金全部熔化后浇注到钢锭模中,钢锭尺寸为 220 mm \times 250 mm \times 300 mm 的矩形,共冶炼三炉,具体化学成分见表 1。

表 1 650QK 化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti	V
0.20 ~ 0.22	≤ 0.030	1.65 ~ 1.75	≤ 0.018	≤ 0.006	0.020 ~ 0.050	0.050 ~ 0.060	0.015 ~ 0.025	0.045 ~ 0.055

2.2 热轧及冷却

钢锭加热温度要求 1 200 $^{\circ}\text{C}$,加热时控制好炉内各区温度分布,保证钢锭温度的均匀性,待温度达到设定要求并保温一定时间,用机械手将钢锭置于机前辊道上,自动输送至 $\Phi 750$ mm \times 550 mm 轧机进行轧制,轧制成厚度 12 mm 的钢板。

轧制工艺采用两阶段控制轧制,即奥氏体再结晶区轧制和奥氏体再结晶区轧制。在奥氏体再结晶区轧制四道次,开轧温度设定为 1 135 ~ 1 185 $^{\circ}\text{C}$ 。为细化原始奥氏体晶粒,第一和第二道次的压下率都大于 10%。根据化学成分的目标值计算,650QK 的奥氏体再结晶临界温度为 960 $^{\circ}\text{C}$,所以奥氏体未

再结晶区的轧制必须在奥氏体再结晶区轧制结束后,钢坯待温到 960 $^{\circ}\text{C}$ 开始精轧,第五、第六道次的压下率控制在 25% 以上,后几道次的轧制压下率在 15% 左右。奥氏体未再结晶区轧制主要目的是使奥氏体晶粒伸长、晶界面积增加,轧制使得晶粒内部导入大量的变形带,可以增加相变形核密度和形核点,具有细化晶粒的作用,终轧温度控制在 820 ~ 840 $^{\circ}\text{C}$ 。

轧制完成后,钢板进入层流冷却机组以 20 ~ 25 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷却速度冷却,待表面温度达到 400 ~ 450 $^{\circ}\text{C}$ 后进入冷床空冷。主要轧制工艺参数见表 2。

表 2 轧制冷却工艺

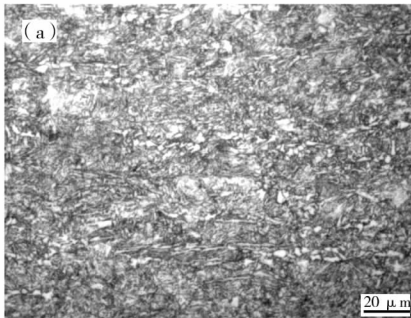
钢锭厚度 /mm	加热温度 / $^{\circ}\text{C}$	加热时间 /h	轧制道次	辊道速度 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	冷却水开启 组数	终轧温度 / $^{\circ}\text{C}$	终冷温度 / $^{\circ}\text{C}$
110	1 200	4	11	0.55	4	820 ~ 840	400 ~ 450

3 试验结果及分析

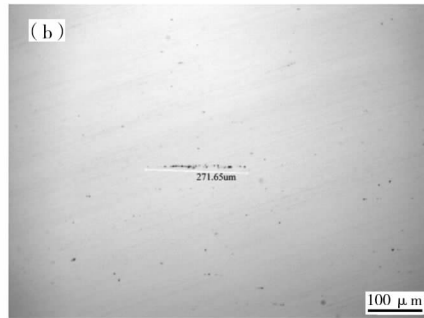
3.1 力学性能

按照 GB/T 228.1—2001《金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法》^[6],沿钢板纵向取样,使用 WAW-600C 拉伸试验机检测钢板的力学性能,检测结果见表 3。由表 3 可见,钢板的屈服强度为 664~671 MPa,抗拉强度为 762~794 MPa,延伸率为 20.0%~21.5%,屈服强度、抗拉强度和延伸率均符合设计要求,并且强度存在一定的富余量。

3.2 显微组织及夹杂物



(a) 金相组织



(b) 夹杂物

图 1 金相组织及夹杂物

试验钢显微组织为铁素体 + 珠光体 + 贝氏体,如图 1 所示。按照 GB/T 6394—2002《金属平均晶粒度测定方法》^[7],试验钢晶粒度评级为 12~13 级,B 类夹杂物评级为 1.5 级,Ds 类夹杂物评级均为 1.0 级。

表 3 650QK 试验钢力学性能

项目	R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	180° 冷弯 ($d = 2.0a$)
650QK	664~671	762~794	20.0~21.5	合格
设计要求	≥ 600	≥ 700	≥ 14	合格

3.3 冷弯性能

650QK 冷弯试验取矩形试样,宽度 30 mm,180° 冷弯,弯芯直径 $d = 2.0a$ (a 为试样厚度),冷弯结果合格,冷弯试样照片如图 2 所示。

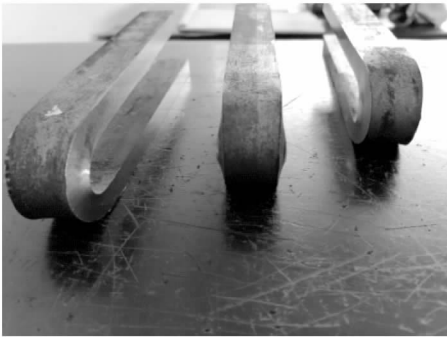


图 2 冷弯照片

3.4 冲击韧性

在板宽四分之一处取纵向试样,加工成 10.0 mm × 10.0 mm × 5.0 mm 的 V 型缺口半尺寸冲击试样,按照 GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤

冲击试验方法》^[8],使用 NI750 冲击试验机进行 20 °C、0 °C、-20 °C、-40 °C、-60 °C 等五个不同温度的冲击试验,结果如图 3 所示,可以看出试验钢的韧脆转变温度低于 -60 °C,表明低温冲击韧性良好。

利用扫描电镜观察 650QK 试验钢系列温度冲击断口形貌,如图 4 所示。由图 4 可见,试验钢 20 °C、0 °C、-20 °C 的冲击断口形貌为韧窝状,-40 °C 的断口形貌为准解理 + 韧窝,-60 °C 的断口形貌为准解理。

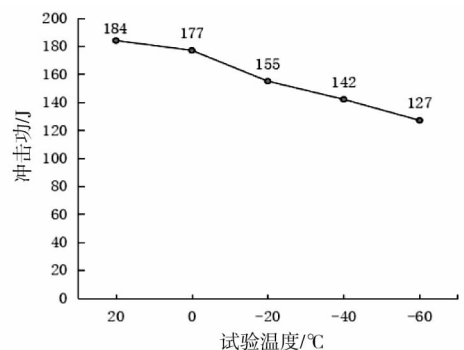


图 3 冲击韧性

3.5 疲劳性能测试

沿钢板纵向取矩形试样,按照 GB/T 3075—2008《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》^[9] 标准要求进行疲劳特性测试。本研究试验钢的疲劳寿命设计目标为 5×10^6 次。试验加载应力取 230 MPa、250 MPa、260 MPa、270 MPa、280 MPa、290 MPa、300 MPa、310 MPa、330 MPa、350 MPa 等 10 个数值,将试验结果应用 Minitab 软件拟合绘制曲线,以图形

法示于图 5。试验结果表明,当加载应力在 280 ~ 350 MPa 之间时,试样最高循环周次达到 120 万次发生断裂;加载应力在 230 ~ 270 MPa 之间时,试样循环周次达到 500 万次仍然未断裂,可以认定试验钢的疲劳强度为 270 MPa。实际上从拟合曲线走向来看,平台大致位于 230 MPa,与试验结果有近 40 MPa 的差距,这个与试样数量不足有关系,试验结果可能略高于材料实际疲劳强度。

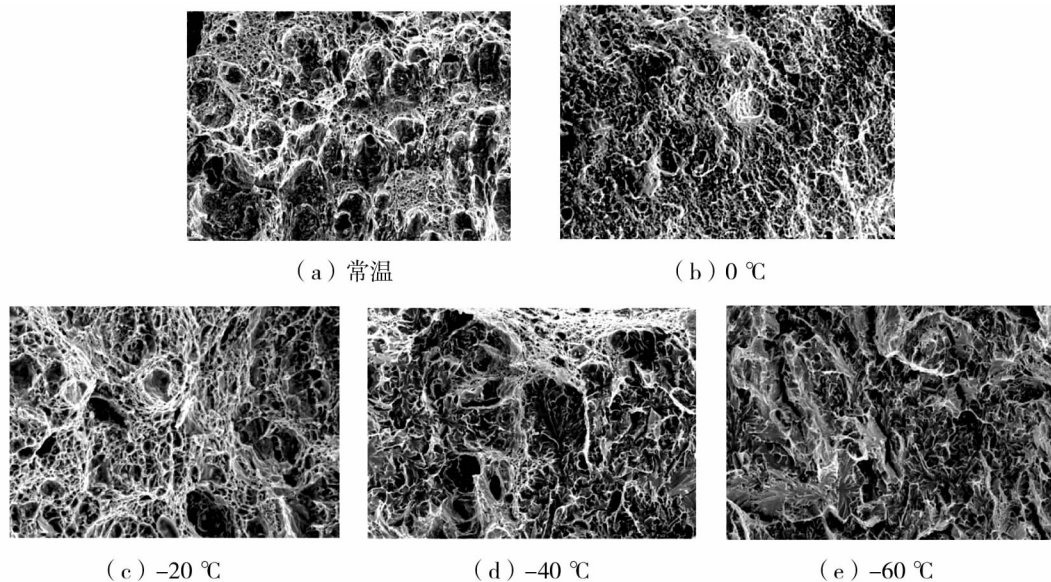


图 4 冲击断口扫描电镜照片

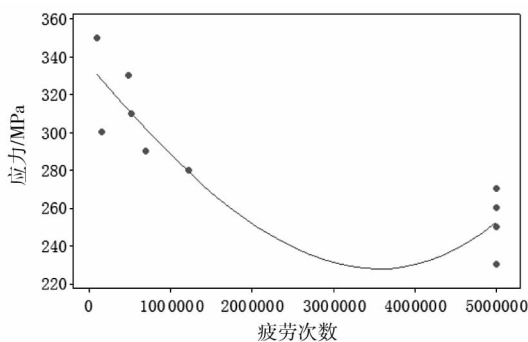


图 5 650QK 疲劳性能

4 结束语

按照设计的试验方案,在实验室制备获得的 650QK 样品各项性能满足设计要求,强韧性匹配良好,具有良好的耐低温冲击韧性,应用 Minitab 软件拟合绘制曲线得到材料疲劳极限强度为 270 MPa。

实验室研究探索出 650QK 桥壳钢的成分、工艺及组织性能之间的对应关系,为工业试制奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 宋振官. 60 kg 级冲压桥壳钢 600QK 的生产实践和应用[J]. 宽厚板, 2014, 20(4): 28-31.
- [2] 李晓林, 肖宝亮, 缪成亮. 卡车驱动桥壳用轻质高强度钢的研发[J]. 上海金属, 2020, 42(5): 9-14.
- [3] 刘东升, 宋丹, 王国栋. 汽车桥壳用热连轧微合金高强钢板的研究[J]. 钢铁, 2020, 35(2): 41-46.
- [4] 张中平. 高强汽车大梁钢微观组织控制与 TMCP 工艺开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2007.

(下转第 35 页)

4 结语

通过前期一系列的试验研究,成功开发出满足 AREMA—2019 标准的中强度钢轨,并进行了工业试制。该强度钢轨品种的增加,为包钢出口美洲钢轨市场提供了产品储备。

在成分设计过程中,设计出不添加 V、Nb 等价格较高合金元素的低成本化学成分,通过调整 C、Si、Mn 元素含量,添加碳化物形成元素 Cr,提高钢轨的淬透性,由此获得了符合标准的热处理性能。

参 考 文 献

[1] 张银花,周清跃,陈朝阳,等. 北美重载铁路钢

轨技术及发展趋势[J]. 铁道技术监督,2015, 43(7):1-6.

[2] 李平,周乐育,梁正伟,等. 美标 SS310HB 钢轨的试制[J]. 轧钢,2018,35(1):42-45.

[3] AREMA—2019,美国铁路工程和保养协会工程师手册[S].

[4] TB/T 2344—2020,43 kg/m~75 kg/m 钢轨订货技术条件[S].

[5] EN 13674—2011,43 kg/m 及以上 T 型钢轨 [S].

(上接第 14 页)

[5] 卢军辉,王晓春,张慧,等. Nb-Ti 微合金化 610 MPa 级汽车大梁钢板工艺研究[J]. 炼钢,2011,27(4):61-64.

[6] GB/T 228.1—2001,金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法[S].

[7] GB/T 6394—2002,金属平均晶粒度测定方法

[S].

[8] GB/T 229—2020,金属材料夏比摆锤冲击试验方法[S].

[9] GB/T 3075—2008,金属材料疲劳试验轴向力控制方法[S].