研究与开发

600 MPa和700 MPa级热轧汽车大梁用钢板疲劳性能研究

时晓光[1,2],王俊雄[1,2],董毅[1,2],孙成钱[1,2],苏洪英[1,2]
(1.海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室,辽宁 鞍山 114009;
2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009)

摘要: 采用低C及Nb、Ti复合成分设计,试制了600 MPa级别(600L)和700 MPa级别(700L)两种超高强汽车大梁钢,并给出了其生产试制过程及工艺参数。对两个级别钢种进行了疲劳性能测试,以及制造成大梁零件的台架疲劳对比试验。结果表明,700L大梁钢板的疲劳极限略高于600L大梁钢板,而疲劳比低于600L大梁钢板,但制成大梁零件台架后,600L大梁钢板的疲劳寿命远高于700L大梁钢板。这表明不同强度等级的材料的抗疲劳性能不能仅用疲劳极限来比较。而疲劳比通过关联材料的疲劳极限和静态强度,间接反映了材料在循环载荷下的关键特性,能更科学、全面地表征材料的疲劳性能。600L大梁钢板采用Cr+N组合设计,通过固溶强化+细晶强化+环境抗力的协同作用,实现其疲劳性能的阶跃式提升。

关键词: 大梁钢;疲劳性能;疲劳比;汽车
中图分类号: TG335 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)05-0039-04
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.05.006

Study on the Fatigue Properties of 600 MPa and 700 MPa Grade Hot Rolling Automobile Beam Steel Sheets

SHI Xiaoguang[1,2], WANG Junxiong[1,2], DONG Yi[1,2], SUN Chengqian[1,2], SU Hongying[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: Based on low carbon and Nb-Ti complex designing to trial-produce the two degrees ultra high strength automobile beam steels of 600 MPa grade(600L) and 700 MPa grade(700L), the produce processes and parameters of ultra high strength beam steels of 600 MPa grade and 700 MPa grade were also mentioned. Fatigue tests were performed on the steel sheets of both grades, along with bench fatigue tests on fabricated beam parts. The results showed that the fatigue limit of 700 L beam steel sheet was slightly higher than that of 600L beam steel sheet, while the fatigue ratio of 600L beam steel sheet was higher than that of 700L beam steel sheet. However, the bench fatigue life of the beam parts made from 600L beam steel sheet was much longer than that of 700L beam steel sheet. This indicated that the fatigue resistance of materials with different strength grades couldn't be simply compared by fatigue limit alone. Instead, the fatigue ratio, by correlating the fatigue limit and static strength of materials, indirectly reflected the key characteristics of materials under cyclic loading, providing a more scientific and comprehensive characterization of the fatigue performance. The Cr+N micro-alloyed design in 600L beam steel sheet enhanced its fatigue performance through a triple mechanism of solid solution strengthening, fine grain strengthening and resistance improvement, which

时晓光,教授级高级工程师,1989年毕业于沈阳工业大学金属材料及热处理专业。E-mail: xiaoguangshi@163.com

enabled the 600L beam steel sheet to achieve a stepwise improvement in fatigue performance.

Key words: beam steel; fatigue property; the fatigue ratio; automobile

随着汽车轻量化需求的不断提升,热轧汽车大梁钢势必朝着超高强度方向发展。自20世纪70年代开始,欧洲、日本等发达国家和地区就已经开始研发低C、微合金高强度汽车大梁钢,较为著名的有德国蒂森克虏伯钢铁公司的QSTE650TM、QSTE690TM Nb、Ti复合钢,瑞典SSAB钢板有限公司的特高强度钢板DOMEX600MC、DOMEX700M,日本新日铁株式会社的Welten70、Welten80系列等[1]。目前,商用车大梁钢主要以屈服强度500 MPa为主,600 MPa及700 MPa超高强大梁钢主要应用于挂车大梁以及车厢板[2-3]。随着汽车大梁制造全自动辊压生产线的日趋完善,主机厂家正逐步采用屈服强度600 MPa以上的大梁钢板制造重型卡车的横纵梁。超高强度大梁钢的生产多采用低碳、微合金路线,辅以TMCP工艺,以控制奥氏体晶粒和最终组织,获得细小均匀的显微组织。该工艺充分利用Nb、Ti的细晶强化和V、Nb、Ti的析出强化作用,从而使钢板获得高的强韧匹配和较好的焊接性能[4-6]。从组织控制方面来看,传统的铁素体+珠光体已无法满足大梁钢韧性提高的需求,而铁素体+贝氏体组织在大梁钢的强、韧化过程中扮演了重要角色[7]。对于超高强汽车大梁钢而言,除了良好的综合性能及机械性能外,疲劳性能同样非常重要,本文结合超高强大梁钢强韧化性能设计及制造,对600 MPa及700 MPa两个强度级别大梁钢进行了钢板疲劳性能以及对应的大梁零件台架疲劳性能试验研究。

1 生产试制

1.1 成分设计

高强度汽车大梁钢的发展趋势是采用低C的成分设计,通过单独或复合添加V、Nb、Ti等微合金元素,其强度提升不只依赖于C的间隙固溶强化,而是利用晶粒细化、相变强化、第二相粒子沉淀析出和位错增殖等几种手段结合来获得较高的强、韧性匹配[8-9]。本试验钢的成分设计同样采用低C以及Nb、Ti微合金化的思路,以Ti的析出强化为主要提高强度的手段,同时控制轧制得到铁素体+贝氏体组织以满足超高强大梁钢性能的要求。

分别设计屈服600 MPa(600L)及700 MPa(700L)两个强度级别钢种进行试验,汽车大梁钢工业试制冶炼成分(质量分数)见表1。

表1 汽车大梁钢工业试制冶炼成分(质量分数)

Table 1 the Melting Chemical Compositions of the Automobile Beam Steel on Industry Trail (Mass Fraction) %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Als	Mo	Cr	N
600L	0.070	0.18	1.70	0.015	0.002	0.050	0.055	0.040	0	0.30	0.003 0
700L	0.080	0.15	1.80	0.013	0.001	0.055	0.085	0.040	0.15	0	0.003 0

1.2 冶炼及轧制工艺

两个级别钢板的试验钢炼钢生产工艺相同,经转炉顶底吹炼、LF处理、RH真空精炼以保证形成高纯净连铸坯。浇注过程中采用连铸坯轻压下技术控制中心偏析,铸坯规格为230 mm×1 500 mm。试验钢铸坯通过1 780 mm热连轧机组轧制成钢卷,规格为7 mm×1 300 mm,试验钢热轧轧制工艺参数设定见表2。

2 试制结果

2.1 钢板性能

对600 MPa及700 MPa两个强度级别钢种进行力学性能测试,超高强大梁钢力学性能见表3。

表2 试验钢热轧轧制工艺参数设定

Table 2 Hot Rolling Process Parameters of Test Steels

钢种	加热温度/℃	精轧入口温度/℃	终轧温度/℃	卷取温度/℃
600L	1 220~1 250	1 030~1 060	860~900	620~650
700L	1 230~1 260	1 030~1 060	860~900	600~630

其中600 MPa级大梁钢的成分中没有添加Mo元素,主要强化手段是细晶强化以及Ti的析出强化,而700 MPa级大梁钢的成分中有0.15%的Mo,增加了强度的稳定性,600 MPa及700 MPa两

个强度级别钢种的力学性能均满足标准设计要求。

表3 超高强大梁钢力学性能

Table 3 the Mechanical Properties of the Ultra Strength Beam Steels

钢种	$R_{p0.2}$/MPa	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	A/%
600L	664	645	744	21.5
标准	≥600	≥600	650~820	≥15.0
700L	770	765	873	21.5
标准	≥700	≥700	750~950	≥16.0

2.2 钢板组织

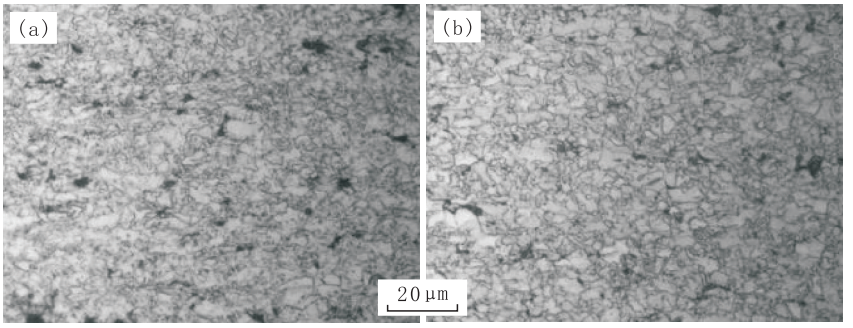
试验钢显微组织均为铁素体和贝氏体及少量珠光体，不同强度级别下大梁钢板的500倍金相组织如图1所示，从图1可以看出两个强度级别钢板组织细小均匀，无带状分布，为典型超高强汽车大梁钢组织，晶粒度均在11级以上。

2.3 疲劳性能研究

2.3.1 疲劳性能对比

选用厚度均为7 mm的600 MPa及700 MPa两个强度级别汽车大梁钢板作为试验材料，依据GB/T 3075—2021，在Instron 8802型轴向疲劳试验机进行全厚度应力比Rs=−1的轴向应力控制疲劳试验，测试环境为室温、空气，试验波形采用正弦波，按轧制方向制作疲劳试样，疲劳试样见图2。

采用成组法与升降法相结合的方式测定600L和700L大梁钢板的S–N曲线，用升降法求得的



(a) 600L大梁钢；(b) 700L大梁钢

图1 不同强度级别下大梁钢板的500倍金相组织

Fig. 1 500× Microstructure of the Beam Steel Sheets at Ddifferent Strength Levels

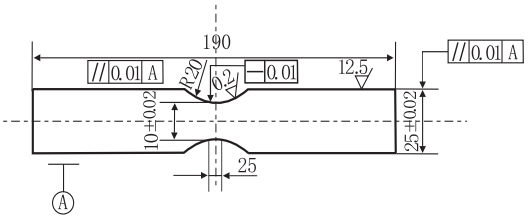


图2 疲劳试样（mm）

Fig. 2 Fatigue Specimen (mm)

条件疲劳强度作为S–N曲线上最低应力水平点，其它3~4级较高应力水平用成组法确定，各级应力水平上试样的数量分配应随着应力水平的降低而逐渐增加。升降法所需试样个数以及成组法每一应力水平下所需的试样个数，取决于试验数据的分散程度和所要求的存活率、置信度[10]。

将600L大梁钢板和700L大梁钢板的疲劳性能进行对比分析，600L大梁钢板和700L大梁钢板的疲劳性能对比见图3。一般来说，疲劳极限随静态强度（包含屈服强度和抗拉强度）的提高而提高，因此700L大梁钢板的静态强度高于600L大梁钢板，由图3可知，在相同的应力幅下，700L大梁钢板的疲劳寿命更长。

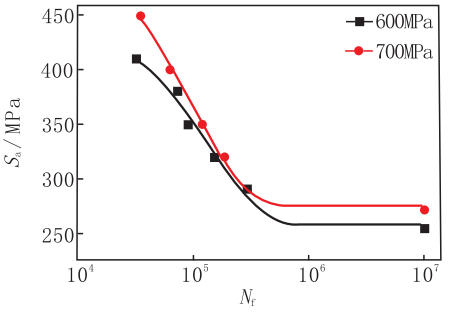


图3 600L大梁钢板和700L大梁钢板的疲劳性能对比

Fig. 3 Comparison of Fatigue Performance between 600L Beam Steel Sheet and 700L Beam Steel Sheet

600L和700L大梁钢板的疲劳极限及疲劳比见表4。

表4 600L和700L大梁钢板的疲劳极限及疲劳比
Table 4 Fatigue Limit and Fatigue Ratio of 600L and 700L Beam Steel Sheets

钢种	疲劳极限/MPa	疲劳比
600L	255	0.343
700L	273	0.313

疲劳极限是材料无限寿命设计的安全应力阈值,与材料微观组织对局部滑移(位错运动)的抑制能力直接相关。从表4可知,600L大梁钢板的疲劳比高于700L大梁钢板,说明600L大梁钢板的疲劳性能应优于700L大梁钢板的疲劳性能。疲劳比是指材料的疲劳强度与拉伸强度之比,是评估材料疲劳性能的一个重要指标,它反映了材料在交变应力作用下的行为,这个数值越小,说明材料抵抗疲劳作用的能力越差。而抗拉强度主要取决于材料整体强度,但对内部缺陷(如夹杂、孔隙)的敏感性较低,而疲劳极限对微小缺陷极为敏感。疲劳比通过关联材料的疲劳极限和静态强度,间接反映了材料在循环载荷下的关键特性。消除材料绝对强度差异的影响,使不同强度等级的材料能在同一基准下比较抗疲劳能力。

2.3.2 大梁零件台架疲劳测试

大梁零件台架试验采用MTS零部件试验台50 kN作动器,试验载荷为±21.7 kN,试验频率1 Hz,并在空气室温的环境下测试。两种强度级别大梁台架疲劳试验结果见表5。

表5 两种强度级别大梁台架疲劳试验结果
Table 5 Fatigue Test Results of Two Strength-level Beam Benches

材质	疲劳寿命					
	1	2	3	4	5	均值
600 L	89 190	53 883	77 721	82 173	77 502	76 094
700 L	60 034	66 755	66 757	43 883	52 371	57 960

从表5可知,600L大梁零件的疲劳寿命远高于700L大梁零件,高出约31.3%。两钢种钢板疲劳极限接近,600L大梁零件的疲劳极限仅比700L的疲劳极限低约6.6%,而疲劳比高约9.6%,更加说明了疲劳比表征疲劳性能的优劣更加科学、全面。

3 讨论分析

影响汽车大梁疲劳性能的因素较多,包括材料的化学成分、杂质元素以及微观组织中晶粒的尺寸、相组成等诸多因素,同时与样件的表面状态以及疲劳试验的条件都是紧密相关的。

就两种强度级别大梁钢成分而言,700L大梁钢板中的Ti比600L大梁钢板中的Ti高出0.03%,同时含有Mo,600L大梁钢板为无Mo设计,在两个钢种的轧制参数基本相同的情况下,700L大梁钢板的静态强度要高于600L大梁钢板。两者的组织均为铁素体和贝氏体及少量珠光体,晶粒度均在11级以上,并没有太大区别。

700L大梁钢板为无Cr设计,600L大梁钢板添加了0.30%的Cr。Cr通过固溶强化基体,提高位错运动阻力,抑制循环载荷下的滑移带形成,从而减少裂纹源。而N的添加,形成Cr+N组合。相比C,N不形成脆性渗碳体,避免疲劳裂纹沿碳化物扩展。Cr+N组合通过固溶强化+细晶强化+环境抗力三重机制,使600L大梁钢板实现了疲劳性能的阶跃式提升。其核心创新在于利用N的间隙强化弥补Cr单一合金化的不足,形成“1+1>2”的协同效应。因此,600L大梁钢板的疲劳性能优于700L大梁钢板的疲劳性能,也更加说明了疲劳比是衡量钢板疲劳性能的科学而全面的重要指标。

4 结论

(1)对比分析了600 MPa及700 MPa两个强度级别大梁钢板的疲劳性能,结果表明,700L大梁钢板的疲劳极限稍高于600L大梁钢板的疲劳极限,而600L大梁钢板的疲劳比要比700L大梁钢板更高一些。

(2)对600 MPa及700 MPa两个强度级别钢种的实际大梁零件台架疲劳测试,结果显示600L大梁钢板的疲劳寿命远高于700L大梁钢板,说明大梁钢板静态强度与零件疲劳寿命并非一一对应,而疲劳比是衡量钢板疲劳性能的科学而全面的重要指标。

(3)相比于700L大梁钢,600L大梁钢采用Cr+N组合设计,通过固溶强化+细晶强化+环境抗力实现了钢板疲劳性能的阶跃式提升。

(4)含Nb、Ti的600L及700L级大梁钢板具有晶粒细小,组织均匀等特点,同时兼具超高的强

(下转第59页)

[3] 张艳利,彭西高,程庆先.连铸钢包及炉外精炼钢包用耐材技术的研究与发展[J].耐火与石灰,2023,48(6):5-17.
[4] 郝明,孙凯明,张建平,等.基于红外热成像的钢包监测系统设计[J].自动化技术与应用,2024(6):32-34.
[5] 何平,李勇,张海风,等.钢包温降规律与全程加盖保温节能技术研究[C]//第十八届全国炼钢学术会议论文集,西安:中国金属学会,2014:81-85.
[6] 孙晓婷,田琳,李国栋,等.基于ANSYS模拟钢包壁耐火层温度分布及优化设计[J].冶金能源,2018(3):21-24.
[7] 秦永坤,赵艳宇,程树森.钢包热状态数学模型[J].中国冶金,2025,35(6):54-56.
[8] 秦志伟,张萌.我国金属材料工业节能减排与环境保护分析[J].黑龙江环境通报,2024(7):41-43.
[9] 张利民,朱立光,肖鹏程,等.钢包保温层数值模拟分析及应用[J].铸造技术,2020,41(9):852-856.
[10] 张利民,朱立光,张利军,等.钢包保温层优化及应用[J].中国冶金,2020,30(5):11-16.
[11] 徐海强,王胜,郭士萌,等.钢包钢水保温技术效果对比[J].河北冶金,2020(3):61-65.
[12] 温巨文,武晓阳,路博勋,等.降低钢包全流程钢水温度损失的措施与实践[J].天津冶金,2022(4):14-17.

(编辑 许营)
修回日期:2025-04-10

(上接第38页)

[8] 吴红艳,翁镭,魏子荐.铁路车辆用高Cr耐蚀钢的组织和性能[J].材料热处理学报,2018,39(4):93-99.
[9] 曹国良,李国明,陈珊,等.Cu对低合金钢耐海水腐蚀的影响[J].材料工程,2011(9):62-67.
[10] 马丽微,王向东,陈小平,等.铜对碳钢耐大气腐蚀性能的影响[J].天津冶金,2007(5):21-24.
[11] 李琳,钟斌,高鹏,等.Q690qENH钢暴晒两年的大气腐蚀性能[J].腐蚀与防护,2015,36(9):869-872.

(编辑 白璐)
修回日期:2024-07-24

(上接第42页)

度及良好的韧性,是重型卡车大梁的优选材料。

参考文献

[1] 郑东升.汽车大梁板P510L生产工艺优化研究[D].沈阳:东北大学,2008:3-15.
[2] 李光瀛,马鸣图.我国汽车板生产现状及展望[J].轧钢,2014,31(4):22-32.
[3] 刘丽萍,关晓光.700 MPa级高强汽车用钢热轧工艺研究与应用[J].轧钢,2018,35(2):20-25.
[4] 李永亮.700 MPa级高强度汽车大梁钢成分设计与组织控制研究[D].北京:北京科技大学,2017.
[5] 张智刚,刘妍,宿成.Ti微合金化700 MPa级大梁钢组织和性能研究[J].包钢科技,2022,48(2):42-45.
[6] 杨栋,李超.微钛处理对钒氮微合金H型钢组织性能影响[J].山西冶金,2022,45(8):1-2,29.
[7] 惠亚军,潘辉,周娜.650 MPa级V-N微合金化汽车大梁钢化机制研究[J].金属学报,2015,51(12):1481-1488.
[8] 雍岐龙,刘正东,孙新军.钛微合金钢中碳氮化钛固溶量及化学组成的计算与分析[J].钢铁钒钛,2005,26(3):12-16.
[9] 田云生,孙拓,王佰双.安钢700 MPa低碳高强钢碳氮控制工艺研究[J].特钢技术,2020,26(2):16-20.
[10] 中华人民共和国国家质量监督检验疫总局中国国家标准化管理委员会.GB/T 3075—2021 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法[S].北京:中国标准出版社,2022.

(编辑 白璐)
修回日期:2025-07-03