

E+级钢及其在重载车钩中的应用

王浩江, 向尚林, 刘 涛

(中车长江车辆有限公司, 湖北武汉 430212)

摘要: 对重载车钩发展进行了回顾, 分析了其关键承载件的裂纹类型及产生的原因。介绍了重载车钩的最新研究成果与应用情况, 对重载车钩, 特别是钩舌的研究与开发, 提出几点建议。

关键词: 重载列车; 重载车钩; 主要承载件; E+级钢

重载列车技术在越来越多的国家得到推广应用, 同时各国一直围绕降低运输成本展开研究和创新。我国在2万吨重载组合列车多年成功运营的基础上, 于2014年在大同至秦皇岛运煤铁路专线上成功进行了3万吨的重载组合列车试验; 澳大利亚FMG公司开行了牵引重量达4万吨单元列车; BHP在纽曼山—海德兰铁路线上创造了牵引重量10万吨的最高组合列车试验纪录。2万吨重载组合列车采用AAR标准E级钢F型及FR型铸造车钩的运用表明, 在使用两年后钩舌裂纹比例较高。随着重载列车牵引吨位越来越大, 钩舌、钩体及钩尾框等承载件甚至发生断裂, 因此对重载车钩亟需进一步研究及优化, 延长其使用寿命, 保证重载列车运行安全。

1 重载车钩在运用中存在的主要缺陷

重载车钩装置(见图1)由钩舌、钩体、钩尾框、缓冲器构成, 其作用是连接机车车辆、传递纵向力、减缓列车纵向冲击。国内重载车钩的运用情况表明, 铸造钩舌、钩体、钩尾框裂纹是16、17号车钩和AAR标准F型在运用中存在的主要问题。曾对湖东车辆段的16、17号铸造车钩进行过调查, 运用两年后相关承载件的裂纹率(裂纹件数/检查件数)调查统计数据见表1。

现场检查发现的裂纹近80%为探伤性裂纹, 即大多数裂纹还没有扩展至铸件表面, 因此裂纹起源于铸件内部, 并由内向外扩展。对运用及模拟翻车机拨车交变载荷疲劳试验中断裂的钩舌断面目测, 无明显铸造缺陷, 见图2。

目测表面裂纹, 钩舌、钩体、钩尾框裂纹部位基本集中, 钩舌裂纹主要发生在内S面, 见图3a, 少量在牵引台处, 见图3b; 钩体裂纹主要在钩尾销孔牵引弧面, 见图3c, 少量在钩耳孔处和冲击台右下处; 钩尾框裂纹主要位于后弯角处, 见图3d, 少部分在前弯角处。

2 E+级钢的研制

长江车辆有限公司根据钩舌、钩体、钩尾框裂纹主要起源于铸件内部, 并由内向外扩展, 且断面无明显铸造缺陷特点, 拟定提高重载车钩的承载件材料强度, 延长裂纹萌生阶段时间, 以达到延长其使用寿命的目的。在AAR M-201《铸钢件》标准的E级钢基础上, 通过两年研究和试验, 研制了E+级钢。E级与E+级两者的主要力学性能见表2。

研制过程中, 反复调整化学成分、热处理工艺参数, 在保证强度情况下, 尽可能提高其塑性和韧性。主要措施如下。

(1) 较E级钢, 适当提高Ni含量并控制在1.0%左右。基于Ni是较稳定元素, 其

作者简介:

王浩江(1965-), 男, 高级工程师, 从事重载列车技术研究。
E-mail:010100101544@ccrcgc.cc

中图分类号: TG245

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2020)03-0273-04

收稿日期:

2019-10-14 收到初稿,
2019-11-12 收到修订稿。

含量在冶炼过程中容易控制,并强化 α 相和 γ 相,细化 α 相晶粒,改善钢低温韧性、提高淬透性。试验测试表明Ni含量在0.90%~1.35%,热处理工艺参数相同,随Ni含量增加,强度上升,但塑性和韧性无明显提高。

(2) 较E级钢,降低S、P含量并严格控制S、P含量不高于0.020%。因S、P均是在钢中偏析严重元素,易造成组织不均匀;S化合物在晶间析出,破坏基体连续性,降低钢的塑性;P与铁形成较稳定的磷化铁,在固体中溶解度极低,以 Fe_2P 或 Fe_3P 等形式析出,使晶格产生歪扭,造成钢的冷脆,同时P严重降低钢的冲击韧性。试验测试结果显示S为0.025%、P为0.032%与S、P含量为0.020%两种试棒,热处理工艺参数相同,强度上升,但塑性和韧性明显下降。

(3) 采用合适的热处理工艺参数。试棒测试结果表明,当成分和回火温度一定时,适当提高淬火温度(860℃提高到880℃),各项性能指标并无明显变化,但当Ni含量一定时,随回火温度提高,强度下降,塑性和韧性上升。因此,对于不同Ni含量,应有合适的回火温度。为了确定不同Ni含量材料相对应的最佳回火温度,试验时各不同Ni含量试棒选取的回火温度在570~620℃,且相同Ni含量各试棒回火温度间隔为5℃或10℃。根据淬火温度为860℃的试棒测试数据来看,Ni含量0.97%、Ni含量1.35%的两种试棒在580℃和590℃回火时,各项指标满足E+级钢的要求,同时伸长率 A 基本稳定在14%左右,断面收缩率 Z 均达到30%以上,冲击吸收功 $A_{kv}(-40℃)$ 均达到30J以上,同时表明随Ni含量增加,塑性和韧性没有明显上升。

综上所述,控制Ni在1.0%左右(0.90%~1.10%)、S和P不大于0.020%,其余成分保持与E级钢一致的材料,采用淬火温度为860℃及回火温度580~590℃热处理工艺,能够满足E+级钢性能要求。

3 E+级钢的应用

E+级F、FR型铸造车钩钩舌、钩体和钩尾框,在E级钢钩舌、钩体极限载荷2 890 kN、4 000 kN基础上,分别提高到3 940 kN、4 600 kN,并按AAR M211-1992《货车车钩、尾框采购和验收技术条件》试验、检查、验收后,安装在4万吨单元列车上。钩体、钩尾框、转动套运用情况比较理想,但钩舌过早产生裂纹甚至断裂。

在4万吨单元列车运用期间,由两家美国供应商提供的E级铸造钩舌、长江公司提供的E+级铸造钩舌,分别各安装一列总计三列4万吨单元列车进行运用对比,铸造钩舌裂损统计数据见表3。

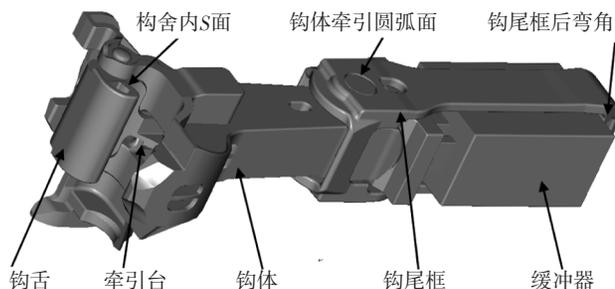


图1 重载车钩三维示意图

Fig. 1 3D schematic diagram of heavy-duty coupler

表1 裂纹率统计
Table 1 Crack rate statistics

部件	裂纹率/%			备注
	2006年2—7月	2006年1—11月	2008年1—11月	
钩舌	64.5	65.3	87.4	E级, 铸造, 2万吨组合列车
钩体	16.6	22.3	31.3	E级, 铸造, 2万吨组合列车
钩尾框	26.1	61.5	77.4	E级, 铸造, 2万吨组合列车



(a) 使用中断裂钩舌

(b) 疲劳试验断裂钩舌

图2 钩舌断裂图

Fig. 2 Fractured knuckles

表3中数据清晰显示,使用7个月的E级钢铸造钩舌,裂损率分别达到41.6%、75%,而E+级的裂损率仅为1.25%,远低于E级铸造钩舌,表明E+级钢的抗疲劳性能明显占优。E级钢铸造钩舌在使用7个月因裂损率较高,不得不全部更换为E+级钢铸造钩舌。但E+级钢铸造钩舌在使用一年后,断裂数明显增加,严重影响列车运行安全。

为确定E+级钢铸造钩舌断裂性质和机制,对钩舌断裂部位进行电镜扫描分析(SEM)。因测试断裂钩舌断口时间较长,表面氧化严重,并有少量污染,所以取原始断口附近试块,在其表面锯出一个浅口,再用锤子敲断,得到新鲜断口试样,新鲜断口SEM照片

见图4a,同时将原始断口试样的一个面磨平抛光,用苦味酸腐蚀后,磨光断口SEM照片见图4b。

图4显示钩舌断裂部位存在大量葡萄状树枝晶,树枝晶间存在发达的疏松、空隙,因此推断断口为解理脆性断口和准解理脆断口组成,晶间疏松部位是裂纹萌生源,裂纹经过形核和缓慢扩展,最终失稳快速断裂。

针对E+级铸造钩舌断口为解理脆性断口和准解理脆断口,对其应力状态展开分析研究。对其应力状态分析,基于原有车钩仿真分析,试验结果满足AAR标准及双方签认的技术规范要求,重点对钩舌实际运用环境与AAR标准及技术规范符合性展开调研、分析。

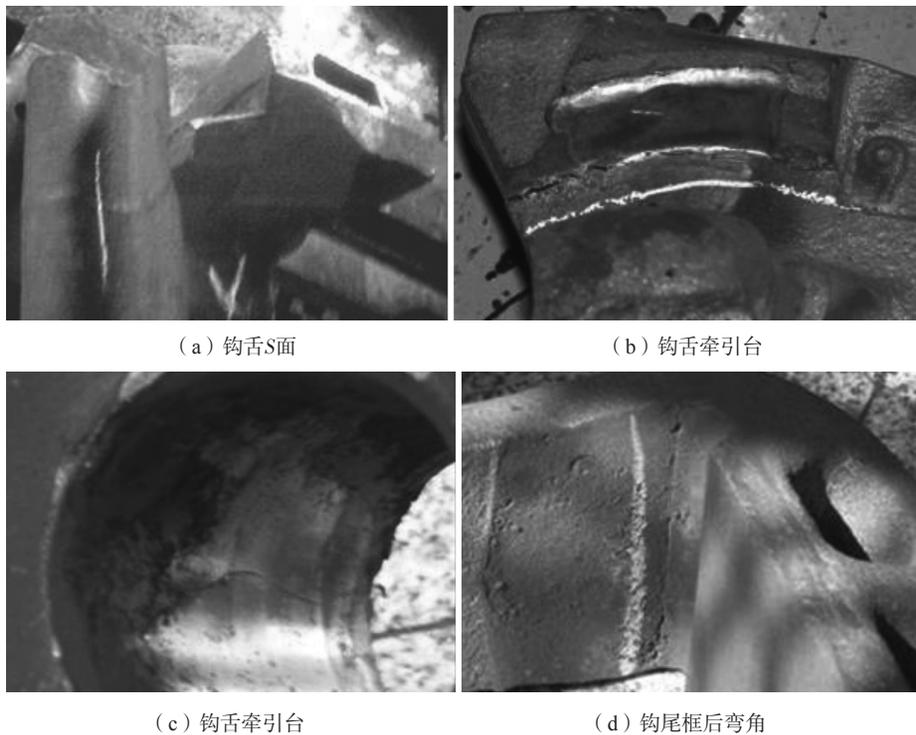


图3 裂纹部位

Fig. 3 Crack locations of couplers

表2 E和E+级钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of E and E+ grade steels

刚类型	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A /%	断面收缩率 Z /%	冲击吸收功 A_{KV} /J (-40 °C)
E级钢	≥690	≥830	≥14	≥30	≥27
E+级钢	≥800	≥950	≥10	≥24	≥27

表3 钩舌裂损数据

Table 3 Knuckle fracture data

材料	7个月		9个月		12个月		13个月	
	裂损数	裂损率/%	裂损数	裂损率/%	裂损数	裂损率/%	裂损数	裂损率/%
E级1	100	41.6			全部更换为E+钩舌			
E级2	180	75			全部更换为E+钩舌			
E+级	6	1.25	14	2.92	30	6.25	39	8.12

通过对在翻车机卸货工况下240辆整列拨车作业时拨车力测试，车钩承受的拉-压交变载荷峰值超过双方签认的技术规范中的规定值，其中拉伸载荷超过50%，压缩载荷超过25%。拨车作业线路不是正常的平直线路，而为大曲线上坡线路，导致拨车力过大。依据测试数据展开的仿真分析及疲劳试验均表明，拨车工况下车钩载荷过大是造成钩舌过早产生裂纹或断裂的根本原因。

基于E+级铸造钩舌断裂部位存在大量葡萄状树枝晶，树枝晶间存在发达的疏松、空隙，考虑到锻造工艺既能使原坯件铸态组织中的粗大枝晶和柱状晶粒变为晶粒较细、大小均匀的等轴再结晶组织，又可使得原铸态中的偏析、疏松、气孔、夹渣等压实，有效保证这些关键承载件内部组织的紧致、均匀性，研制了E+级锻造钩舌，并安装在4万吨单元列车上，运用两年无钩舌断裂。

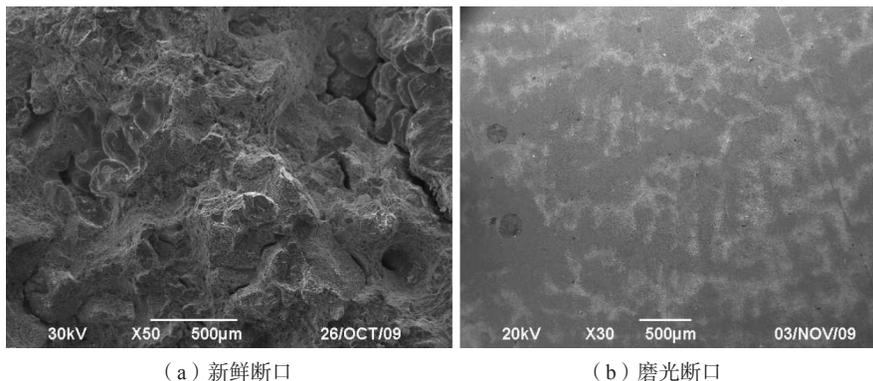


图4 断口SEM图

Fig. 4 SEM images of fractures

4 结语及建议

我国货车车钩经过从仿制到独立研制开发的发展过程，重载车钩的技术至今可以满足2万吨重载列车需求。但随着国内3万吨重载组合列车即将开行，同时要满足海外市场多元化需求，因此开展重载列车不同牵引质量和编组方式下的车钩与承载力及性价比的研究分析，开发与市场需求相适应的系列化车钩产品尤为必要。建议从以下几方面进行重点研究。

(1) 围绕改善车钩关键承载部件铸态微观组织，开展铸造材料及工艺研究，提升既有AAR标准车钩中

的关键承载部件的铸造内在微观组织质量，延长2万吨重载列车的铸造车钩使用寿命，降低运用成本。

(2) 对E+级钢的拉伸-压缩疲劳载荷匹配进行综合研究，进一步优化强度等级（即强度-韧性）选择，提高关键承载铸件承载能力及运用可靠性，既满足4万吨重载列车需求，又具有较佳的性价比。

(3) 对重载车钩的钩舌、钩体、钩尾框以及车辆底架整个系统进行综合分析，并对结构、工艺、材料进行综合改进，极大提高其承载能力和运用可靠性，满足更大吨位的重载列车需求。

E+ Grade Steel and Its Application to Heavy-Duty Couplers

WANG Hao-jiang, XIANG Shang-lin, LIU Tao
(CRRC Yangtze Co., Ltd., Wuhan 430212, Hubei, China)

Abstract:

The development of heavy-duty couplers is reviewed, and the crack types and causes of the key bearing parts are analyzed. The latest research results and application of heavy-duty couplers are presented, and some suggestions on the research and development of heavy-duty couplers, especially coupler knuckles, are put forward.

Key words:

heavy-duty train; heavy-duty coupler; main bearing parts; E+ grade steel