

300 mm × 300 mm EA4T 车轴钢坯生产工艺实践

张春红 杨接明 唐雪萍

(首钢贵阳特殊钢有限责任公司技术中心, 贵阳 550005)

摘要 EA4T 车轴钢(∕% : 0.22 ~ 0.29C, 0.15 ~ 0.40Si, 0.50 ~ 0.80Mn, ≤0.020P, ≤0.015S, 0.90 ~ 1.20Cr, 0.15 ~ 0.30Mo, ≤0.06V) 采用 30 t EBT 电弧炉-40 t LF/VD-5 t 铸锭工艺生产, 并经 8 MN 油压机锻成 300 mm × 300 mm 钢坯, 锻造比 ≥9。结果表明, EA4T 钢[O] 为 $(12 \sim 15) \times 10^{-6}$, [H] 为 $(1.2 \sim 1.6) \times 10^{-6}$, 经 900 ~ 920 °C 淬火, 600 ~ 650 °C 回火后, 抗拉强度 R_m 721 ~ 745 N/mm², 屈服强度 R_{eH} 463 ~ 470 N/mm², 伸长率 A_5 19.0% ~ 19.5%, 纵向冲击功 53 ~ 73 J, 横向冲击功 36 ~ 41 J, 组织为贝氏体-回火马氏体, 10⁷ 循环疲劳极限为 350 N/mm²。

关键词 300 mm × 300 mm EA4T 车轴钢坯 30 t EBT 电弧炉-40 t LF/VD-5 t 铸锭 多向锻造 力学性能 疲劳极限

Practice of Production Process for 300 mm × 300 mm EA4T Axle Steel Bloom

Zhang Chunhong, Yang Jieming and Tang Xueping

Technology Center, Shougang-Guiyang Special Steel Co Ltd, Guiyang 550005)

Abstract The EA4T axle steel (∕% : 0.22 ~ 0.29C, 0.15 ~ 0.40Si, 0.50 ~ 0.80Mn, ≤0.020P, ≤0.015S, 0.90 ~ 1.20Cr, 0.15 ~ 0.30Mo, ≤0.06V) is produced by 30 t EBT arc furnace-40 t LF/VD-5 t ingot process, and forged by 8MN oil-hydraulic press to 300 mm × 300 mm bloom with forging ratio ≥9. Results show that of the EA4T steel, [O] is $(12 \sim 15) \times 10^{-6}$, [H] is $(1.2 \sim 1.6) \times 10^{-6}$, with quenching at 900 ~ 920 °C and tempering at 600 ~ 650 °C, tensile strength R_m 721 ~ 745 N/mm², yield strength R_{eH} 463 ~ 470 N/mm², elongation A_5 19.0% ~ 19.5%, longitudinal impact energy 53 ~ 73 J, transverse impact energy 36 ~ 41 J, structure is bainite-tempered martensite, and 10⁷ cycle fatigue limit is 350 N/mm².

Material Index 300 mm × 300 mm EA4T Axle Steel Bloom, 30 t EBT Arc Furnace-40 t LF/VD-5 t Ingot, Multi-Direction Forging, Mechanical Properties, Fatigue Limit

近几年来,中国铁路运行进行多次提速,有条件的线路列车运行时速可达 300 km/h。目前国内机车车轴用钢主要是 JZ40、JZ50 钢,个别厂家在用 35CrMo 钢,但无法满足高速、重载铁路机车的要求。

车轴是车辆承受动载荷的关键零件,受力状态复杂,主要承受弯曲载荷、扭转载荷或弯扭复合载荷,并可能受到一定冲击。车轴在工作中可因疲劳、弯曲、扭转或拉伸应力而断裂,但疲劳断裂(Fretting Fatigue)是高速铁路车轴的普遍断裂形式,尤其是在与轮座接触处。本文所述车轴用钢 EA4T 采用欧洲标准 EN13261-2003,对化学成分、力学性能、非金属夹杂物、显微组织等质量指标要求严格,并要求光滑小样经 10⁷ 循环疲劳极限达 350 N/mm²,实物试样经 10⁷ 循环加载后超声波探伤无裂纹。

目前,国内钢厂有采用连铸和模铸两种浇铸方式生产机车车轴原料。首钢贵阳特殊钢厂采用 30 t EBT 电弧炉 + 40 t LF/VD 精炼 + 浇铸 5 t 以上八角锭工艺生产的 EA4T 钢锭经锻造,材料的质量检测

结果符合 EN13261-2003 要求,制成的车轴已成功应用在大秦铁路上的 8 轴大功率交流机车上。

1 EN13261 与国标、行标的差别

EN13261-2003 规定的车轴材料在 1/2 半径位置的技术指标见表 1。与 GB/T5068-1999、TB/T3093-2004 标准相比,EN13261-2003 对材料的力学性能、非金属夹杂等检验项目要求更严。特别是材料的力学性能指标,除规定了 1/2 半径处材料的技术指标外,还对材料近表面及中心位置的力学性能提出了要求。具体对比结果见表 2。

2 生产工艺

2.1 冶炼

从表 1、表 2 可以看出,为了铁路车辆的安全运行,EN13261-2003 对 EA4T 材料的技术指标要求很高。从化学成分上看,EA4T 与我国牌号 25CrMo 相近,属低碳合结钢系列,其淬透性不高。要想在截面 ~ Φ270 mm 车轴的 1/2 半径处获得良好均匀的纵、

表1 EA4T 车轴钢化学成分和气体含量
Table 1 Chemical composition and gas content of EA4T axle steel

炉号/ 标准	化学成分/%										气体含量/ 10^{-6}	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	[O]	[H]
9245	0.29	0.33	0.74	0.014	0.002	1.18	0.25	0.03	0.09	0.09	12	1.6
9253	0.26	0.33	0.72	0.010	0.003	1.18	0.23	0.03	0.06	0.06	15	1.2
EN13261- 2003	0.22~ 0.29	0.15~ 0.40	0.50~ 0.80	≤ 0.020	≤ 0.015	0.90~ 1.20	0.15~ 0.30	≤ 0.06	≤ 0.30	≤ 0.30	-	<2

表2 不同标准车轴材料技术指标的对比
Table 2 Comparison between different specifications for technical index of axle materials

标准	夹杂物					力学性能热处 理样坯/mm	拉伸试样 件数	试样缺口、件数		显微 组织	疲劳 特性
	A	B	C	D	B+C+D			纵冲	横冲		
GB/T5068- 1999	≤3.0	≤2.5	与A类合并 评严重者	与B类合并 评严重者	无要求	140×140	1	U ₂ ,4	无要求	无要求	无要求
TB/T3093- 2004	≤2.0	≤1.5	≤1.0	≤1.0	无要求	140×140	2	U ₂ ,4	无要求	无要求	无要求
EN13261- 2003	粗≤1.5、 细≤1.5	粗≤1.0、 细≤1.5	粗≤1.0、 细≤1.5	粗≤1.0、 细≤1.5	粗≤2.0、 细≤3.0	~Φ270	3	U ₅ ,9	U ₅ ,9	贝氏体/ 退火马氏体	有

横向性能,钢材化学成分和纯净度的控制是关键。同时后期的加工工艺及热处理也很重要。因此试生产中采用EBT电弧炉+LF/VD+氩保浇铸5 t以上八角锭+多向热加工工艺,以确保材料性能达到标准要求。

EBT电弧炉炉料由清洁、干燥的专用废钢、低磷生铁组成,废钢占70%,生铁30%。装料分2次,先装废钢料,全程吹氧,氧化期钢水温度≥1540℃。随后装入30%生铁,送电8 min后再吹氧助熔。全熔后,测温,钢水温度≥1540℃方可深吹氧脱碳、升温,并保证氧化期连续脱C量≥0.30%。氧化过程保证流动性良好的泡沫渣,确保钢液良好的沸腾去气、去夹杂。

EBT电弧炉氧化操作在保证脱C量及处理好P的前提下,控制吹氧,严格控制过氧化操作,确保出钢前氧活度≤ 450×10^{-6} ,EBT出钢条件:钢水温度≥1660℃,钢水中P≤0.010%、0.06%~0.12% C,出钢量控制~35 t。用清洁且透气性良好的红包出钢,出钢至3 t以上开始向钢包中依次加入规定量的钨铁、碳化硅、铝锭、硅钡、铬铁、锰铁、精炼渣(其主要成分如表3所示)和石灰。

LF/VD精炼炉初始钢水温度≥1560℃,钢包入LF工位,送电加热15 min以上,以SiC粉调渣,待炉渣变白,且流动性良好时停电,取样全分析,根

表3 精炼渣主要成分/%
Table 3 Main ingredient of refining slag/%

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaC ₂	其它
45.0	35.0	4.0	5.3	3.7

据分析结果补加合金。测钢液氧活度≤ 25×10^{-6} ,否则喂入铝线强化脱氧。进真空前喂钛线2 m/t_钢,温度≥1640℃时,钢包入VD工位抽真空,真空度≤67 Pa,保持15 min。出真空控制钢液温度1565~1570℃吊钢包至开浇。

浇铸系统清洁、干燥。浇铸过程采用氩封保护,氩气压力0.4 MPa,浇铸温度1550~1555℃,浇铸速度:锭身≥580 s,补缩≥370 s。锭模温度控制在50~100℃。试验炉号钢锭化学成分见表1。

2.2 锻造

锻造在锻钢厂8 MN液压快锻机上进行,该设备最大锻造力800 t,工作行程1000 mm,系统额定压力31.5 MPa,允许负载偏心距120 mm,锻造最大钢锭为5 t钢锭。钢锭加热温度的选择以材料不过热、过烧且具有良好的可锻性,锻造时单次大压下量的情况下无撕裂现象,文献[1]对EA4T材料的锻造进行了研究。因此参照25CrMo材料确定EA4T的锻造温度范围1150~850℃,加热时间根据铸锭规格计算确定,钢锭的平均断面尺寸为710 mm。采用大压下,多向锻造成300 mm×300 mm,保证锻造比≥9。

2.3 热处理

由于EA4T近两年才引进到国内铁路机车上使用,因此国内少有研究报告。参照文献[2]并与国外材料进行多次对比试验,最终确定淬火温度900~920℃,回火温度600~650℃。300 mm×300 mm EA4T车轴钢坯改锻成Φ270 mm的车轴毛坯经调质处理后,1/2半径处力学性能和显微组织要达到了

表 4 EA4T 车轴钢的非金属夹杂物检验结果

Table 4 Examination results of non-metallic inclusions in EA4T axle steel

炉号	A(硫化物)		B(氧化物)		C(硅酸盐)		D(球状夹杂)		B+C+D	
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
9245	1.0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	2.0	1.0
9253	1.5	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	2.5	1.0

表 5 EA4T 车轴钢力学性能

Table 5 Mechanical properties of EA4T axle steel

炉号/ 标准	力学性能			冲击功(20℃)	
	R_m / ($N \cdot mm^{-2}$)	R_{eH} / ($N \cdot mm^{-2}$)	A_5 /%	纵向 (K_{U5})/J	横向 (K_{U5})/J
9245	745	463	19.5	55/61/53	40/40/38
9253	721	470	19.0	59/73/65	36/38/41
EN13261	650~800	≥ 420	≥ 18	≥ 50	≥ 25

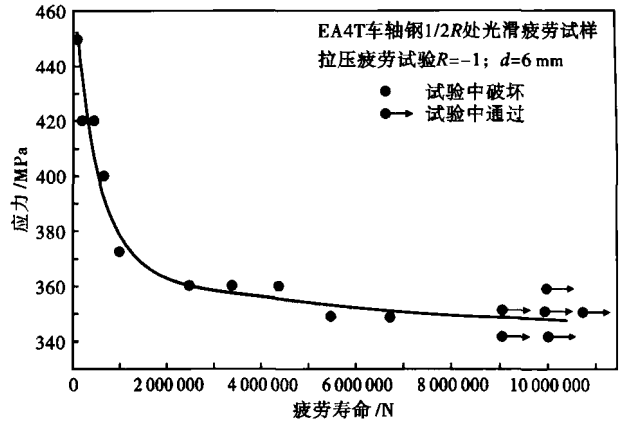


图 2 EA4T 车轴钢 1/2 半径处应力-疲劳寿命曲线
Fig.2 Stress-fatigue life curve of EA4T axle steel at 1/2 radius

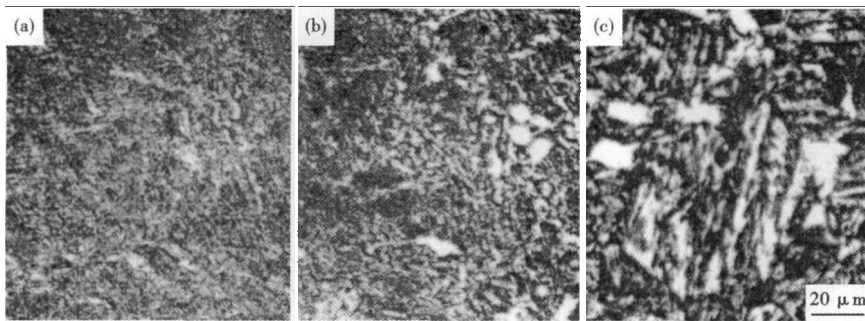


图 1 $\Phi 270$ mm EA4T 车轴毛坯调质处理后的组织形貌:(a)表面;(b)1/2 半径;(c)心部
Fig.1 Morphology of structure of quenched and tempered $\Phi 270$ mm EA4T axle bloom:
(a) surface; (b) 1/2 radius; (c) center

EN13261-2003 标准的要求。

3 检验结果与分析

从成品钢坯上取样检验非金属夹杂物结果见表 4。300 mm × 300 mm 车轴钢坯改锻成 $\Phi 270$ mm 车轴毛坯经调质处理后,在其 1/2 半径处取样检测力学性能,结果见表 5。9245 炉号的车轴毛坯从表面到心部的显微组织如图 1 所示。

从图 1 不同取样部位(表面、1/2 半径、心部)的显微组织可以看出,车轴表层的显微组织基本为回火索氏体,1/2 半径位置开始出现贝氏体和少量块状铁素体,随着与表层距离的增加,铁素体块尺寸增大,数量增多。但从图片可以看出,1/2 半径处显微组织主要为回火贝氏体组织,符合 EN13261-2003 中车轴 1/2 半径处应以贝氏体/马氏体为主的要求。采用直线截点法测定 1/2 半径处奥氏体晶粒度为 6 ~ 7 级。

贵州大学对贵钢 EA4T 车轴钢测试了光滑小样弯曲疲劳寿命如图 2 所示,光滑小样在 350 MPa 加载情况下循环 10^7 未发生断裂。同时,用户使用贵钢 EA4T 材料制成的成品车轴由青岛四方车辆研究所进行了实物疲劳测试,结果也达到标准要求。

4 结论

(1)采用 EBT 电弧炉-LF/VD 精炼真空脱气-浇铸 5 t 以上铸锭工艺冶炼 EA4T 车轴钢,其车轴制品的疲劳寿命达到标准要求。

(2)EA4T 材料经过淬火 + 高温回火,即淬火温度 900 ~ 920 $^{\circ}C$,回火温度 600 ~ 650 $^{\circ}C$ 后,1/2 半径处可获得贝氏体/退火马氏体组织。

国家科技支撑计划,编号 2007BAE11B01;黔科合重大专项,编号 20066031

参考文献

- 1 杨 军,余毅云. 高速电力机车车轴锻造工艺探讨. 电力机车技术,2000(3):29
- 2 刘庚武. EA4T 材料的锻造与热处理工艺研究. 锻压技术,2010,35(1):162

张春红(1971-),女,主任工程师,硕士,1993 年北京科技大学毕业,锻造工艺研究及产品标准管理。

收稿日期:2011-09-05