

EA4T 车轴钢的高周和超高周疲劳性能研究

陈一萍¹ 李亚波¹ 张晓乐² 孙成奇³ 洪友士³

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司工程实验室 山东 青岛 266111;

2. 北京奔驰汽车有限公司 北京 100176;

3. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 研究了2组EA4T车轴钢的高周和超高周疲劳性能,一组是现车用的欧系EA4T车轴试样,一组是试验用车轴钢25CrMo4试样。采用旋转弯曲疲劳试验机进行疲劳试验,结果表明,当应力水平较低时,2批试样均未发生 10^8 周次的疲劳断裂。疲劳断口的扫描电子显微镜观测显示,裂纹均从试样表面起源。S-N试验数据结果比较表明,试验用的车轴钢25CrMo4具有更好的疲劳性能。

关键词: EA4T; 25CrMo4; 高周疲劳; 超高周疲劳

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B

DOI:10.13711/j.cnki.cn32-1836/u.2017.01.008

EA4T是一种欧洲标准EN 13261规定的高速重载列车车轴用钢,应用于欧洲高速列车车轴。我国部分高速列车也采用此车轴钢。同时高速列车车轴实际服役寿命在 2×10^9 周次左右^[1],属于超高周疲劳范畴,因此,研究车轴材料的超高周疲劳性能对于高速列车的安全、可靠运行具有十分重要的意义^[2]。本研究主要对2组EA4T车轴钢的试样、欧

系车轴直接切下的试样和具有相似成分和微结构的国产车轴钢25CrMo4试样进行高周和超高周范畴的疲劳试验,以获得EA4T车轴钢的高周和超高周疲劳性能。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

材料1为现车使用的实际欧系车轴截取的EA4T材料;材料2为从市场购买的试验用的国产EA4T材料(25CrMo4)。2种材料的化学成分(委托国家有色金属及电子材料分析测试中心化验)如表

收稿日期: 2016-04-12

作者简介: 陈一萍(1984-),女,硕士研究生学历,工程师,从事动车组转向架、轮轴的静强度及疲劳试验,车体静强度及碰撞试验研究。

项目来源: 国家自然科学基金项目(11172304,11202210)。

顺序进行焊接。焊接过程中严格控制预热温度及道间温度,焊接完毕后进行探伤。

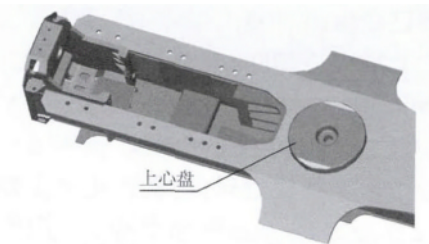


图6 上心盘压装示意图

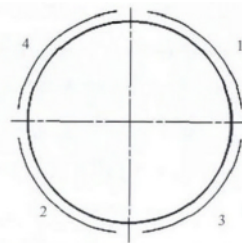


图7 上心盘焊接顺序要求

中梁旁弯、牵引梁下垂、牵引梁甩头、中梁主要结构尺寸和焊接情况等进行了测量记录。结果表明:中梁的组装、焊接质量均达到了技术要求,该制造工艺切实可行。□

4 结束语

中梁组焊完成后,在中梁检测胎上对中梁挠度、

(编辑: 李琳琳)

1 所示。

1.2 试验方法

从材料 1 直接截取的材料组织为回火索氏体 (见图 1)。为了比较 2 组 EA4T 材料的疲劳性能,将材料 2 试样进行淬火 + 高温回火处理:加热至 900 °C,保温 1 h,油淬,再经过 600 °C 回火,得到与材料 1 类似的回火索氏体组织(见图 2)。

表 1 现车用欧系车轴 EA4T 化学成分 /%

试样	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Fe
欧系车轴钢	0.25	0.30	0.65	0.95	0.20	0.010	0.012	余
国产车轴钢	0.22	0.26	0.85	0.54	0.17	0.027	0.016	余

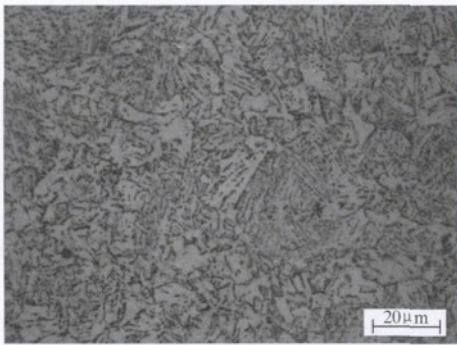


图 1 现车用 EA4T 微结构光学显微镜图片

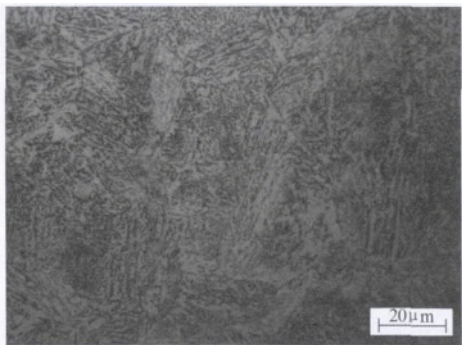


图 2 试验用 25CrMo4 微结构光学显微镜图片

疲劳试验在旋转弯曲疲劳试验机上进行,加载频率为 80 Hz,应力比 $R = -1$,疲劳加载周次最长 2×10^8 。旋转弯曲疲劳试样试验段的最小直径为 4 mm,应力集中系数为 1.06。所有试样试验段均经研磨和抛光,消除机加工痕迹的影响。

疲劳试验前,对 2 组试样均进行基本力学性能测试。拉伸试验在 MTS810 材料试验机上进行,应变速率为 5×10^{-4} /s,拉伸试样每组共有 3 件;显微硬度测试,每组试样各测 10 个点。获得的 2 组试样的抗拉强度、屈服强度、屈强比、延伸率(标距长度为直径的 5 倍)、断面收缩率和显微硬度等参数如表 2 所示。屈服强度采用求 $\sigma_{0.2}$ 的方法来获得。从表 2 可以看出,材料 1 试样的强度比具有类似微结

构的材料 2 试样的低,抗拉强度低 78 MPa,屈服强度低 123 MPa。

表 2 两组试样的基本力学性能

试样	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	屈强比 σ_s / σ_b	延伸率 δ_5 /%	收缩率 ψ /%	硬度 HV
EA4T	519 ± 3	674 ± 2	0.77 ± 0.01	19.1 ± 1.5	73.2 ± 0.7	216 ± 7
25CrMo4	642 ± 8	752 ± 10	0.85 ± 0.01	16.1 ± 1.8	73.4 ± 0.5	238 ± 5

2 疲劳试验结果与分析

2.1 S-N 数据

图 3 给出了 2 组 EA4T 车轴钢试样旋转弯曲疲劳试验的 S-N 数据,最高疲劳周次超过 2×10^8 。从 S-N 数据中看出 2 组试样呈现类似特征:在某一应力区间,部分试样在 10^7 周次之前发生断裂,另一部分试样直至 10^8 周次也不发生疲劳破坏。从图 3 可以看出,材料 2 试样比材料 1 试样具有更好的疲劳性能。

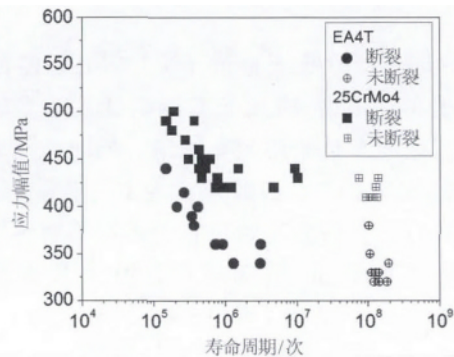


图 3 S-N 数据

2.2 疲劳试样断口形貌

2 组试样疲劳断口的扫描电子显微镜观测结果显示,所有试样的疲劳裂纹均从表面萌生,未观察到疲劳裂纹从试样内部萌生的现象。

2.3 升降法测试疲劳极限

根据已获得的材料 1 的 S-N 数据,按照国家标准 GB/T 24176—2009,采用升降法测试其疲劳极限。取 340 MPa 为估计的疲劳极限,以该强度的 2.5% 作为试验施加应力的台阶。被测试样按逐渐增加的应力水平顺序进行,直到发生疲劳断裂。对试样旋转弯曲加载的最高加载周次为 10^8 。超过 10^8 周次未发生断裂的试样标记为“通过”;未至 10^8 周次发生断裂的试样标记为“失效”。按规定,以第 1 个发生断裂试样的前一个试样作为第 1 个有效数据,如表 3 中试样“1”为计入的第 1 个试样。按升降法所获得的试验数据如表 3 所示。

表 3 升降法试验数据

应力 Si/MPa	试样系列号																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
374.0			×				×						×					
365.5		○	×		○	×					○		×					
357.0	○*			○			×			○				×			×	
348.5	○*									○						○		○
340.0	○*																	

× 失效 ○ 通过 ○* 按标准不计入

不同应力水平下按照被测试样失效或非失效的计算频率安排试验数据,仅对于失效和非失效时间进行统计分析,对最少的观测数进行了分组分析。将应力水平按升序排列 $S_0 < S_1 < \dots < S_l$, 这里 l 是应力水平数。疲劳强度的平均值 μ_y 和标准偏差 δ_y 由下列式子给出,用于疲劳强度统计分析:

$$\mu_y = S_0 + d \left(\frac{A}{C} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

$$\delta_y = 1.62 \times d \times (D + 0.029) \quad (2)$$

$$\text{且 } A = \sum_{i=1}^l i f_i, B = \sum_{i=1}^l i^2 f_i, C = \sum_{i=1}^l f_i$$

$$D = \frac{BC - A^2}{C^2} \quad (3)$$

这里 f_i 是指定事件数, d 是指定应力台阶, d 、 μ_y 、 S_0 的单位均为 MPa。在式 (1) 中,被分析事件失效时取 $-1/2$; 被分析事件非失效时取 $1/2$ 。

根据表 3 中的试验结果,不发生失效的第 1 个有效数据为 365.5 MPa。在这一系列试验中,有 9 个试样发生失效,8 个试样未发生失效。失效试样在分析过程中被当作一种情况。因此只分析 3 个应力水平,如表 4 所示, $S_0 = 357$ MPa, 应力台阶 $d = 8.5$ MPa。并由式 (3) 得到 $A = 9$, $B = 15$, $C = 9$, $D = 0.67$ 。

表 4 升降法数据分析

应力 S_i /MPa	应力 水平数 i	数值/次数		
		f_i	$i f_i$	$i^2 f_i$
374.0	2	3	6	12
365.5	1	3	3	3
357.0	0	3	0	0
总和	-	9	9	15

疲劳强度的平均值和标准偏差根据式 (1) 和式 (2) 计算:

$$\mu_y = 357 + 8.5 \times \left(\frac{9}{9} - \frac{1}{2} \right) = 361.25 \text{ MPa}$$

$$\delta_y = 1.62 \times 8.5 \times (0.67 + 0.029) \approx 9.625 \text{ MPa}$$

$$\text{疲劳强度的变动系数 } \eta_s = \frac{\delta_y}{\mu_y} = \frac{9.625}{361.25} = 0.0266。$$

一般情况下,疲劳强度符合正态分布,在置信度为 $1 - \alpha$, 失效概率为 P 下的疲劳强度下极限按 (4) 式估计:

$$Y_{(p, 1-\alpha)} = \mu_y - k_{(p, 1-\alpha)} \delta_y \quad (4)$$

式中,系数 $k_{(p, 1-\alpha)}$ 是正态分布的单边误差限。本试验共有 7 对相反事件,自由度 v 为 7。

对于失效概率为 10%, 置信度为 95%, 对应的 $k_{(0.1, 0.95)}$ 为 2.582。由式 (4) 得到失效概率 10%、置信度 95% 时的疲劳强度下极限为:

$$Y_{(0.1, 0.95)} = 361.25 - (2.582 \times 9.625) \approx 336.40 \text{ MPa}。$$

同理,对于失效概率为 1%, 置信度为 95%, 对应的 $k_{(0.01, 0.95)}$ 为 4.353。由式 (4) 可以得到疲劳强度下极限为:

$$Y_{(0.01, 0.95)} = 361.25 - (4.353 \times 9.625) \approx 319.35 \text{ MPa}。$$

3 结论

(1) 当应力水平较低时,2 批试样均未发生 10^8 周次以上的疲劳断裂,即存在传统的疲劳极限。

(2) $S - N$ 数据结果比较表明,相对于现车用的 EA4T 直接切下的试样,试验用国产车轴钢 25CrMo4 试样具有更好的疲劳性能。

同时也可以看出,这 2 种不同的车轴钢试样在化学成分上存在一定的差别,而且对于现车用的欧系 EA4T 车轴钢回火索氏体的形成过程尚不清楚。因此,如果将来要大批量对车轴钢 25CrMo4 投产应用时,建议对车轴的微观化学成分以及车轴的热加工和热处理进行更深入的研究,回火索氏体的形成可能会对结构性能产生显著的影响。

此外,通过升降法测得了现车用的欧系车轴直接切下的 EA4T 试样在 10^8 周次的疲劳极限,即对应失效概率为 10%、置信度为 95% 的疲劳强度下极限为 336 MPa; 对应失效概率为 1%、置信度为 95% 的疲劳强度下极限为 319 MPa。该研究结果对了解 EA4T 车轴钢的疲劳性能以及对其将来的应用能够提供一些重要的参考。

参考文献:

[1] 翟婉明, 金学松, 赵永翔. 高速铁路工程中若干典型力学问题[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 358-373.
 [2] 黄国, 黄海明, 王超, 等. 45# 车轴钢疲劳性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 71-76. □

(编辑: 林素珍)