



## 时速400 km高疲劳性能高铁车轴钢研发

汪开忠, 胡芳忠, 陈世杰, 杨志强, 周大元  
(马鞍山钢铁股份有限公司技术中心, 马鞍山 243000)

**摘要:**基于时速400 km高铁对车轴高疲劳性能的要求,分析了车轴超高疲劳性能的机理,细小的碳化物尺寸及马氏体板条尺寸是高疲劳性能的关键,确定了马氏体板条束宽度、析出相的分布等组织参量为影响高铁车轴钢屈服强度的关键控制单元,设计了高铁车轴钢的目标组织,通过高通量计算确定了时速400 km高铁车轴钢的最优合金成分。研发的时速400 km高铁车轴,经850~950 °C淬火、620 °C高温回火时具有较好的强韧性匹配,抗拉强度>880 MPa,-40 °C冲击功达180 J。该工艺处理车轴的晶粒度和碳化物尺寸细小,晶粒细化至9.0级,高周及超高周疲劳性能均达标。车轴经整体热处理后小尺寸试样超高周疲劳试验稳定为3级,10<sup>8</sup>循环周次下疲劳极限为517 MPa,疲劳极限高。通过车轴微缩样品预测了车轴整体疲劳性能,预测值与实际值一致性好,车轴整体在320 MPa试验力下通过10<sup>7</sup>周次疲劳考核。

**关键词:**时速400 km高铁车轴钢;高周疲劳;超高周疲劳;微观组织

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2023-00101 **中图分类号:**TG142

## Research and Development of 400 km/h High-speed Rail Axle Steel with High Fatigue Performance

Wang Kaizhong, Hu Fangzhong, Chen Shijie, Yang Zhiqiang, Zhou Dayuan  
(Technology center, Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China)

**Abstract:** Based on the requirements of 400 km/h high-speed railway for high fatigue properties of axles, the mechanism of ultra-high fatigue performance of axle was analyze, the key to high fatigue performance was the size of fine carbide and martensite lath. The microstructure parameters such as the width of martensitic lath sheaf, the distribution of precipitated phases were determined as key control units affecting the yield strength of high-speed railway axle steel. The target microstructure of high-speed railway axle steel was designed, and the optimal alloy composition of 400 km/h high-speed railway axle steel was determined by high-throughput calculation. The developed high-speed rail axle with a speed of 400 km/h had good strength and toughness matching after quenching at 850-950 °C and high-temperature tempering at 620 °C, with a tensile strength greater than 880 MPa and an impact energy of 180 J at -40 °C. At the same time, the grain size and carbide size of the axle treated by this process are fine, and the grain size is refined to 9.0 level. Both high cycle and ultra-high cycle fatigue performance met the standards. After the overall heat treatment of the axle, the ultra-high cycle fatigue test of the small-sized sample was stable to level 3, and the fatigue limit was 517 MPa at 10<sup>8</sup> cycles, indicating a high fatigue limit. The overall fatigue performance of the axle was predicted through the sample reduction of the axle, and the predicted values were in good agreement with the actual values. The axle as a whole passed 10<sup>7</sup> cycles of fatigue assessment under a test force of 320 MPa.

**Key Words:** 400 km/h High-speed Railway Axle Steel; High Cycle Fatigue; Ultra-high Cycle Fatigue; Microstructure

高铁技术将继续提升运行速度,推动高铁时速突破更高的纪录,据报道,列车时速达到400 km时能够节能约10%。车轴是铁道机车车辆走行部的关键部件之一,承受着来自车体及轨道的各种载荷,随着铁路客运提速战略的实施,为了保证在所规定的运营条件下具有足够的安全可靠性和长使用寿命,对车轴材料相关技术提出了越来越高的要求<sup>[1-3]</sup>。时速300 km列车车轴的疲劳寿命达到1亿周次,时速350 km列车车轴的疲劳寿命达10亿次,

针对时速400 km列车车轴的疲劳寿命将达百亿次,这对车轴钢的性能提出了更高要求。高性能的车轴钢对于车轴的减重节能,绿色制造均有利。为解决高铁车轴的高疲劳性能难题,国内外诸多研究机构对高铁车轴钢、高铁车轴开展了研究<sup>[4-9]</sup>,获得了关键成分设计思路、关键热处理创新方法等,促进了高铁关键材料的发展进步。随着列车速度的提高,车轴承受的冲击载荷也相应提高,对钢的强度、韧性、裂纹门槛值等都提出了更高的要求。目前,

作为新一代时速 400 km 高速列车车轴的相关研究报道较少,针对时速 400 km 高铁车轴高疲劳寿命的要求,开展了成分优化设计及制约高疲劳性能关键因素研究,以期为更高速新型列车的研制提供材料保障,以确保中国高速列车技术在未来的几十年具备足够的国际竞争力。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验材料设计

根据前期研究结果<sup>[10]</sup>,确定了马氏体板条束宽度、析出相的分布等组织参量为影响高铁车轴钢屈服强度的关键控制单元,结合疲劳强度与屈服强度之间的经验关系,初设目标组织为马氏体板条束宽度 $\leq 3 \mu\text{m}$ 、析出相平均直径 $\leq 70 \text{ nm}$ 的全回火索氏体组织。并根据模拟计算筛选计算输出最优的化学成分见表 1。

#### 1.2 试验材料制造

车轴生产过程为:110 t 超高功率电弧炉 $\rightarrow$ 120 t 高效钢包精炼炉(LF) $\rightarrow$ 120 t 真空循环脱气精炼炉(RH) $\rightarrow$ 5 机 5 流圆坯连铸机连铸 $\rightarrow$ 方坯轧制 $\rightarrow$ 车轴锻造。试验材料为未经热处理的车轴毛坯,对车轴毛坯进行热处理工艺、力学性能、疲劳性能等研究。

#### 1.3 试验方法

按照 GB/T 228.1—2021《金属材料室温拉伸试验方法》,在 UTM5305SYXL 型试验机上进行室温光滑试样拉伸试验。试验温度为室温 20 °C,应变速率 0.000 25 s<sup>-1</sup>,在拉伸试样头部未变形位置取金相试样在光学显微镜和扫描电镜下进行微观组织和晶粒度分析。

采用国产 PQ1-6 型旋转弯曲疲劳机按照 GB/T 4337—2015 进行试验,利用升降法得到疲劳升降图,获得其疲劳极限,并绘制 S-N 曲线。试验温度为室温 20 °C,轴向应变控制,应力循环比  $R$  为 -1,频率为 83 Hz,疲劳试样取自于试制车轴表面,取样方式如图 1 所示,试样加工尺寸如图 2 所示。疲劳试验后的试样经线切割、酒精清洗后,在 Sigma500 型 ZESSI 扫描电子显微镜下进行断口形貌观察,并分析其破坏机制。

按 EN13261 标准在 SincoTec-250 KNm 疲劳试

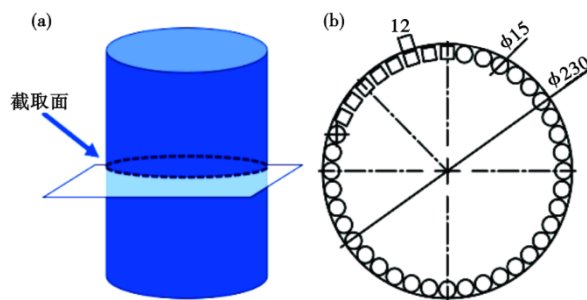


图 1 取样示意图:(a)取样截面,(b)取样位置  
Fig. 1 Sampling schematic diagram: (a) sampling cross section, (b) sampling point

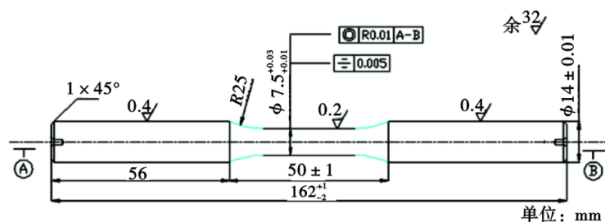


图 2 光滑疲劳试样图  
Fig. 2 Smooth fatigue sample diagram

验台上进行车轴整体疲劳试验,试验应力为 320 MPa,频率设定为 24.86 Hz。

采用专用腐蚀剂腐蚀以显现原奥氏体晶界,然后使用 Axio Imager M2m 金相显微镜观察,回火后组织采用 Sigma500 型 ZESSI 扫描电子显微镜、APOLLOX 能谱仪等分析。TEM 分析采用 FEI Tecnai G2 F20 透射电子显微镜进行观察。相分析采用电解液电解试样,电解后所得的粉未经 Philips APD-10 型 X 射线衍射仪进行定性分析。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 力学性能

试验钢经过调质热处理工艺后,研究不同回火温度车轴的力学性能。调质热处理温度 850 ~ 950 °C,水冷淬火,不同温度回火后空冷。不同回火温度条件下力学性能如图 3 所示。由图 3 可见,时速 400 km 高铁车轴钢强度均随着回火温度的升高而逐渐降低,-40 °C 低温冲击韧性则逐渐提高。时速 400 km 高铁车轴钢在 600 ~ 660 °C 回火时,强度达到 880 ~ 1 100 MPa,在 580 ~ 620 °C 回火时,时

表 1 时速 400 km 车轴钢化学成分设计(质量分数)

Table 1 Chemical composition design of axle steel at speed 400 km/h

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr+Ni+Mo+V	T.O
DZ400	0.20 ~ 0.30	0.20 ~ 0.30	0.60 ~ 0.90	$\leq 0.015$	$\leq 0.010$	2.0 ~ 3.0	$\leq 0.002 0$

速 400 km 高铁车轴钢冲击韧性可提高 30% 以上。

### 2.2 疲劳性能

试验钢热处理后抗拉强度为 890 MPa, 试验钢疲劳试验结果如图 4 所示。试验钢的疲劳强度比 0.51, 缺口疲劳敏感系数 1.10。

试验钢的超高周疲劳性能如图 5 所示。负载超过额定载荷 60%, 即为 3 级应力载荷, 数据较稳定,  $10^8$  超高循环周次下, 疲劳极限为 517 MPa, 疲劳强

度比约为 0.51。试验钢存在明显的疲劳极限, 随着外加应力的增加, 试样的疲劳寿命显著降低。

利用扫描电镜观察疲劳断口, 其典型断口形貌如图 6 所示。由图 6 可见, 试验钢疲劳断口上基本存在三个区域: 裂纹源区、扩展区和瞬断区<sup>[11-12]</sup>。试样的疲劳断口起裂源附近存在摩擦痕迹, 如图 6(b) 所示, 低倍观察呈一定宽度的灰暗环状; 扩展区呈放射状形貌特征, 以准解理形貌特征为主, 伴随着

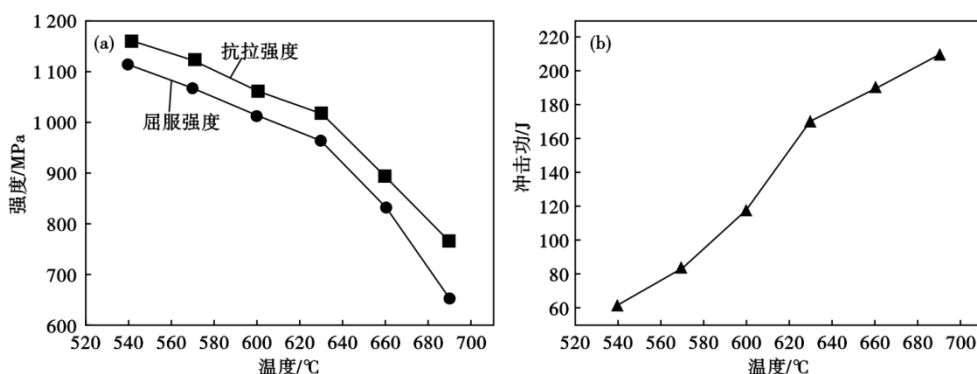


图 3 试验钢不同回火温度的性能: (a) 屈服强度和抗拉强度, (b)  $-40^{\circ}\text{C}$  冲击功

Fig. 3 Performance of test steel at different tempering temperatures : (a) yield strength and tensile strength , (b) impact at  $-40^{\circ}\text{C}$

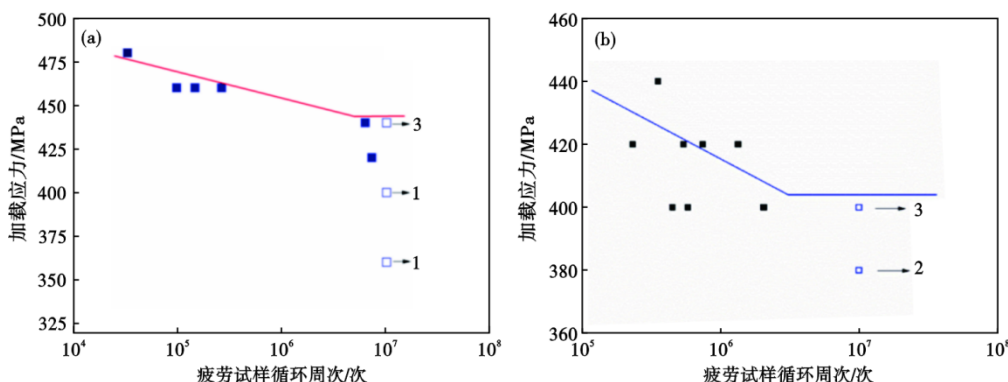


图 4 试验钢 S-N 曲线: (a) 光滑试样, (b) 缺口试样

Fig. 4 S-N curve of test steel : (a) smooth samples , (b) notched samples

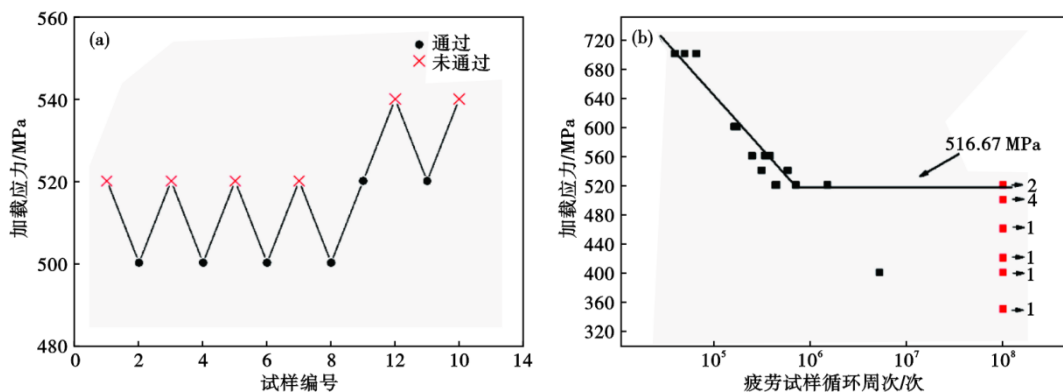


图 5 光滑疲劳试样 (a) 升降图和 (b) S-N 曲线

Fig. 5 Smooth fatigue sample (a) rise and fall chart and (b) S-N curve

二次裂纹形貌,如图 6(c)所示。瞬断区以韧性断裂为主,断口呈现韧窝形貌,其原因是微观孔隙的集结、生长与合并。

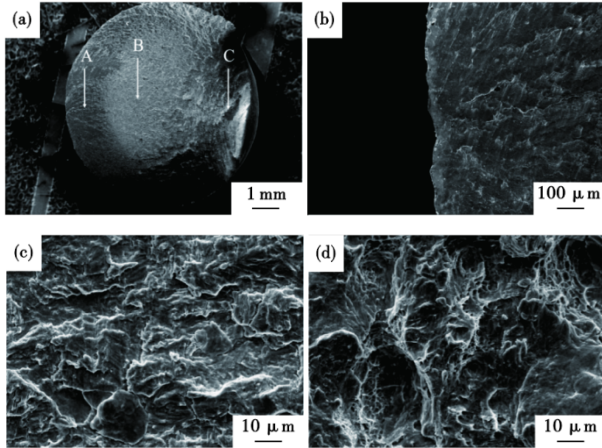


图 6 疲劳试样断口的形貌:(a)低倍形貌,(b)裂纹源区,(c)扩展区,(d)瞬断区

Fig. 6 Morphology of the fracture surface of the fatigue sample : (a) macrostructure morphology , (b) crack source area , (c) expansion area , (d) transient zone

在 SEM 下对所有疲劳试样断口进行观察和统计,结果表明,试验钢试样的断裂方式均为表面基体起裂。表面基体起裂认为主要是从晶界或者晶粒内部靠近晶界的软相组织起裂,在循环应力作用下,晶界及软相区形成大量的微孔洞,微孔洞逐渐变大并相互连接形成微裂纹,导致最终疲劳试样的失效。

### 2.3 车轴整体疲劳性能及预测

为预测车轴整体疲劳性能,开展了 3 种尺寸的微缩样品疲劳性能检测。完成了在  $10^7$  次循环载荷下的旋转弯曲疲劳性能测试,确定了试样可承受最大循环弯矩随着试样尺寸的增大而呈现稳定递增的规律,如图 7 所示。从数据的分布规律判断,尺寸对三种样品的影响具有显著的规律性,采用弯距法能更准确反映尺寸效应对新型车轴钢疲劳强度的影响。

根据微缩构件样品,可得到全尺寸车轴疲劳性能,如图 8 所示。采用外推法最终预测结果应沿着红色虚线变化,当尺寸增加至全尺寸车轴时,车轴的弯曲疲劳极限将达到 650 MPa 以上,而采用弯距法预测的实际车轴的旋转弯曲疲劳极限明显小于以上数值,采用弯距法预测全尺寸车轴旋转弯曲疲劳强度如式(1)所示,为 327 MPa。欧洲 EA4T 车轴

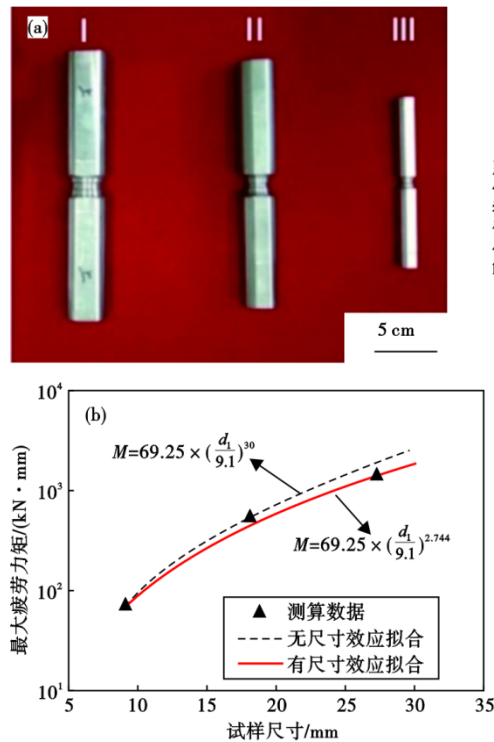


图 7 车轴微缩试样弯曲疲劳强度测试结果:(a)车轴微缩试样,(b)随着尺寸变化的最大承载疲劳弯矩规律

Fig. 7 Bending fatigue strength test results of axle miniature shrink specimens : (a) axle miniature shrink specimens , (b) maximum load-bearing fatigue bending moment law with size variation

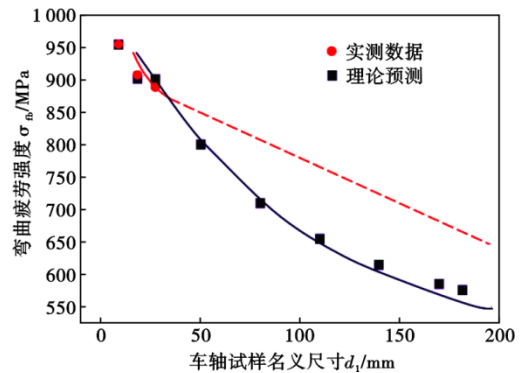


图 8 小尺寸微缩样品疲劳强度预测全尺寸车轴疲劳强度曲线

Fig. 8 Fatigue strength prediction of small-sized miniature shrink samples full size axle fatigue strength curve

轴身的疲劳强度为 304 MPa。

$$\begin{aligned} \sigma_{-1} &= \sqrt{\frac{1 - 0.35}{2}} \times \text{FEM} \left[ 69.25 \times \left( \frac{182}{9.1} \right)^{2.744} \right] \quad (1) \\ &= 0.570 \times \text{FEM} (257\,427.092) \\ &= 327.558 \text{ MPa} \end{aligned}$$

为验证理论计算的可靠性,在 SincoTec-250 KNm

疲劳试验台上进行车轴整体疲劳试验,在试验力 320 MPa 条件下,试验的 3 根车轴经  $10^7$  周次循环后均未发生失效。表面车轴整体疲劳性能计算值与实际值一致性高。

### 2.4 高疲劳性能机理分析

车轴钢的奥氏体晶粒形貌如图 9 所示,采用微合金化<sup>[13-14]</sup>的时速 400 km 高铁车轴钢晶粒度达到了 9.0 级。

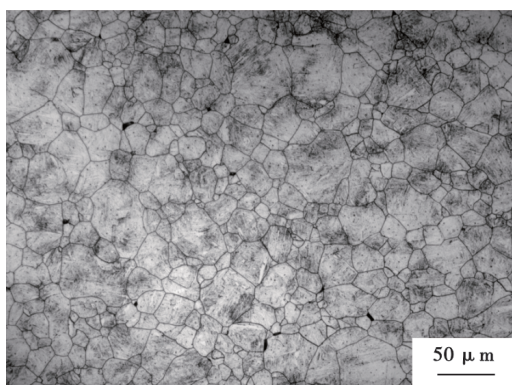


图 9 试验钢奥氏体晶粒形貌  
Fig. 9 Austenite grain size morphology of test steel

对车轴钢进行了 TEM 分析,结果如图 10 所示。经统计确定车轴钢马氏体板条宽度为 0.19 μm。碳化物大部分呈方块状,广泛分布于晶内,通过能谱确定为渗碳体。

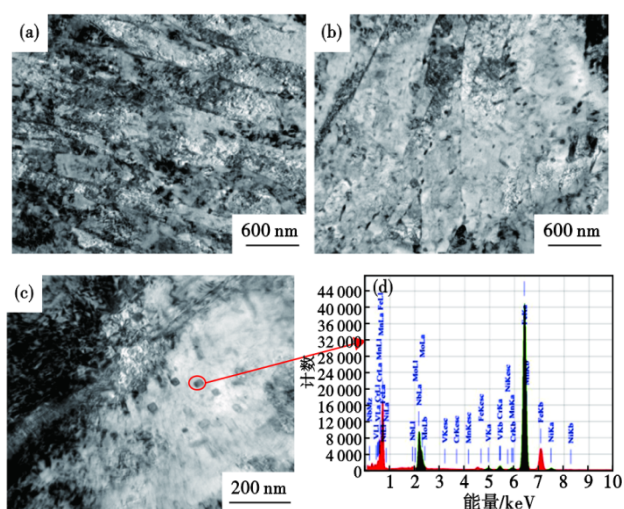


图 10 试验钢透射电镜分析:(a)板条形貌,(b)板条与析出相形貌,(c)析出相形貌,(d)析出相能谱  
Fig. 10 Transmission electron microscopy analysis of test steel : (a) lath morphology , (b) morphology of lath and precipitate , (c) precipitate morphology , (d) energy spectrum of precipitates

碳化物的种类及尺寸经相分析的结果见表 2。车轴钢析出相有  $M_3C$  和  $MX$ ,  $MX$  以  $V(CN)$  为主。析出相粒径分析如图 11 所示,析出相尺寸较小,主要集中在 60 nm 以下,较大尺寸 (>100 nm) 所占比例较低,约 21.7%。

表 2 试验钢析出相分析结果

Table 2 Analysis results of precipitated phase of test steel

M <sub>3</sub> C 相中各元素占相量的原子分数/%							
Fe	Mn	Cr	Mo	Ni	V	C	Σ
59.14	4.48	9.74	1.10	0.41	0.13	25.00	100.00
M(CN)相中各元素占相量的原子分数/%							
Nb	V	Mo	Cr	N	C	Σ	
1.23	30.76	8.32	9.69	6.63	43.37	100.00	

注:  $M_3C$  相组成:  $(Fe_{0.789}Mn_{0.060}Cr_{0.130}Mo_{0.015}Ni_{0.005}V_{0.002})_3C$ ;  
M(CN)相组成:  $(Nb_{0.026}V_{0.615}Mo_{0.166}Cr_{0.133})(C_{0.867}N_{0.133})$

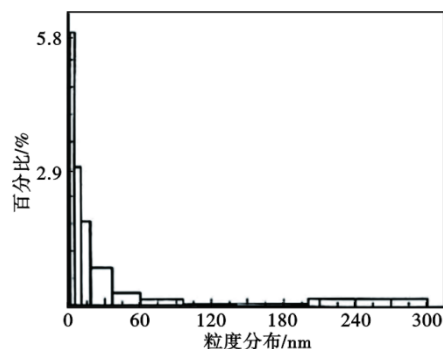


图 11 析出相粒径统计  
Fig. 11 Precipitation phase particle size statistics

通过分析可知,车轴钢具有细小的马氏体板条尺寸、并且碳化物尺寸分布均匀弥散,碳化物尺寸主要集中在 60 nm 以内。细小的微观组织使车轴具有高强度、高韧性、高疲劳性能的关键因素。

### 3 结论

(1) 开发时速 400 km 高疲劳性能高铁车轴钢中试后各项性能均良,工业试制后力学性能、高周及超高周性能均达标,试制钢种满足 400 km/h 高铁车轴钢需求。

(2) 时速 400 km 高铁车轴钢高周疲劳强度比为 0.51,缺口疲劳敏感系数 1.10。超高周疲劳试验为 3 级应力,数据较稳定,  $10^8$  循环周次下,疲劳极限为 517 MPa,存在明显的疲劳极限。超高周疲劳的断裂方式均为表面基体起裂。

(3) 高铁车轴整体疲劳理论计算值为 327 MPa,整体车轴在 320 MPa 应力  $10^7$  周次下未发生失效,表面车轴疲劳性能理论计算值与实际值一致

性高。

(4)车轴的马氏体板条宽度为0.19 μm,碳化物

尺寸主要集中在60 nm以下,细小的微观组织是车轴具有高强韧、高疲劳性能的关键因素。

参考文献

[1] 杜松林,汪开忠,胡芳忠. 国内外高速列车车轴技术综述及展望[J]. 中国材料进展, 2019, 38(7):641-650.

[2] Tian Z, Yin H, Meng Y, et al. On the fatigue ductile-brittle transition of EA4T steel for high-speed railway axle [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 162:974-981.

[3] 朱 静,顾家琳,周惠华,等. 高速列车空心车轴国产化的选材和试制[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(2):60-67.

[4] 郭中华,郭 波,王松伟,等. 保护气氛电渣重熔对DZ2高速车轴钢成分及夹杂物的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 15-24.

[5] 曹燕光,李昭东,丁灿灿,等. 钕微合金化对高铁车轴钢淬透性的影响[J]. 钢铁, 2020, 55(6):107-112.

[6] 张锦文,王文先,郭中华,等. 氩气保护ESR对EAF-LF-VD-CC冶炼的高速车轴钢DZ2轧坯质量的改善[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 25-29.

[7] 王之香,高建兵,王玉玲,等. 镍含量对国产化高铁车轴钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 64-67.

[8] 汪开忠,胡芳忠,陈世杰,等. 回火工艺对高速列车用DZ2车轴钢组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(16): 162-168.

[9] Luo Y, Qin T Y, Jia X, et al. Fatigue life enhancement of foreign object impacted railway axle EA4T steel with surface shot peening [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106782.

[10] 国家重点研发计划《材料基因工程关键技术与支撑平台》专项,高端装备典型构件用特殊钢的示范应用研究[R], 2022.

[11] 尹鸿祥,吴 毅,李 翔,等. 过盈量和套管长度对EA4T车轴钢微动疲劳行为的影响及其微动疲劳极限的预测[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(9): 155-164.

[12] 杨 冰,廖 贞,李一帆,等. 低温对LZ50车轴钢短裂纹行为的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1867-1876.

[13] 吴 毅. 铁路车轴用微合金化钢强韧机理研究与分析[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(1): 50-55.

[14] 吴 毅,项 彬,刘鑫贵,等. 钒微合金化车轴钢中析出相的观察和分析[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(S1): 41-46.

《特殊钢》期刊官方投稿网站

www.specialsteeljournal.com

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢有限公司《特殊钢》杂志社

邮编:435001 咨询电话:15961618632 0714-6297386 0510-80673212

《特殊钢》编辑部邮箱:E-mail:tsghs@sina.com