

特约专栏

国内外高速列车车轴技术综述及展望

杜松林, 汪开忠, 胡芳忠

(马鞍山钢铁股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 高速动车组列车近年来在国内外获得广泛应用, 是铁路客运最为有效的运输工具之一。高速列车车轴是动车组走行部中非常重要的部件, 承受着源自车体及轨道的各种载荷, 其中主要是旋转弯曲载荷和扭转载荷。高速列车车轴要保证在所规定的使用条件下, 具有足够的安全性、可靠性和长使用寿命, 这就对车轴材料及相关技术提出了非常高的要求。对比研究了国内外高速列车车轴技术, 探讨国内外高速列车车轴的生产工艺流程、化学成分-组织-性能和结构设计等, 在此基础上, 对时速 400 km 以上的新一代高速列车车轴材料的发展方向进行了展望。目前, 我国正基于材料基因组技术研发时速 400 km 的高速列车车轴用钢, 这在世界上尚无先例。

关键词: 高速列车; 车轴技术; 车轴钢; 材料基因组技术

中图分类号: TG142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)07-0641-09

Overview and Prospect of Axle Technology for High Speed Trains at Home and Abroad

DU Songlin, WANG Kaizhong, HU Fangzhong

(Maanshan Iron and Steel Company Limited, Maanshan 243000, China)

Abstract: High speed electric multiple units (EMU) train has been widely used in recent years at home and abroad. It is one of the most effective conveyances for passengers. The axle for high speed train is a very important part, which suffers from various loads of body and track, mainly including rotating bending and torsion loads. Ensuring the EMU axle with sufficient security, reliability and long service life raises very high demands for the axle material technology. Based on careful comparison of EMU axle technology at home and abroad, this paper discusses the process, chemical composition-microstructure-property relation, structure design etc., and forecasts the technological development of new generation axle for EMU with more than 400 km/h speed. At present, the axle steel for EMU with more than 400 km/h speed is being developed based on Materials Genome Initiative(MGI) technology in China.

Key words: high speed train; axle technology; axle steel; Materials Genome Initiative(MGI)

1 前言

运营速度为 200 km/h 以上的轮轨系统即为高速铁路。自 1964 年日本首次开行高速列车以来, 经过了 50 余年的发展, 形成了以日本新干线、欧洲 TGV(法国)和 ICE(德国)、中国和谐号和复兴号为代表的高速列车技术, 日本、欧洲、中国高速列车的最高运营速度分别为

300, 320 和 350 km/h^[1, 2]。

相对于高速列车技术, 高速列车车轴技术目前也分为日本、欧洲和中国三大流派。同时, 日本、欧洲和中国都正在积极开发 400 km/h 以上高速列车技术^[3, 4]。因此很有必要对目前国内外高速列车车轴技术进行对比分析, 在此基础上展望了新一代高速列车车轴技术。

2 高速列车车轴主要失效形式

车轴属于超大型阶梯状轴对称类零件, 其最大直径将超过 200 mm, 长度可达 2200 mm, 它与车轮通过过盈联接组成轮对, 承受机车车辆的全部重量, 是铁道车辆三大关键零部件之一^[5, 6]。

车轴在运动中的受载状态比较复杂, 不仅承受弹簧上垂向力、制动力和车轮的反作用力, 而且承受来自线

收稿日期: 2019-01-23 修回日期: 2019-04-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB07030004)

第一作者: 杜松林, 男, 1963 年生, 教授级高级工程师

通讯作者: 汪开忠, 男, 1971 年生, 教授级高工,

Email: wkzkwkz@sina.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201901021

路的冲击载荷和通过曲线时横向作用于轮缘的导向力;此外,由于同一轮对两个车轮的滚动圆半径不同,或曲线上轨道长度不同,均会引起附加的扭转力矩。因此,在车轴的各配合部位,有着大小不一的轴向力、径向力、剪切力、弯矩和扭矩等载荷的单独作用或共同作用^[7,8]。

在实际应用中,车轴常以热切、冷切、裂纹、尺寸超限、锈蚀、碰伤、端部螺纹损坏和焊接烧伤等形式失

效。高速列车空心车轴失效可能发生的部位主要在轮座嵌镶部、卸合槽和轴身中部。据统计,在这些失效形式中,疲劳裂纹占在役车轴失效总数的 90% 以上。导致疲劳裂纹的原因有:材质(钢的纯净度、组织均匀性和性能等)不良、表面加工不良、腐蚀、微动摩擦损伤和轴身表面外来损伤等^[9,10]。常见的车轴损伤形式和裂纹出现位置及发生率如图 1 所示。

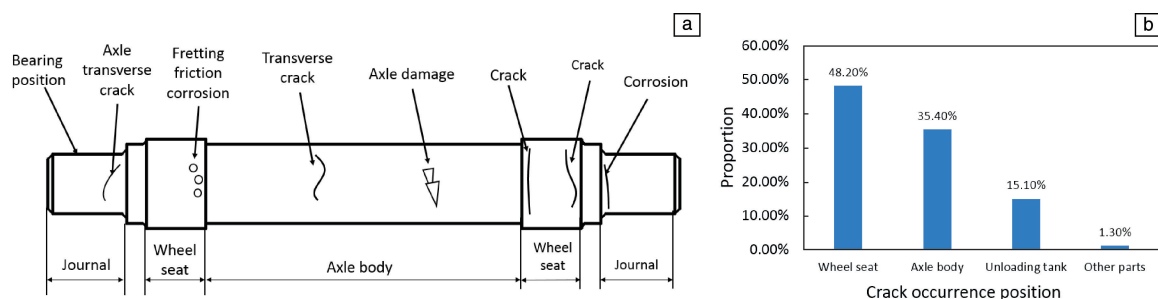


图 1 车轴主要损伤形式(a), 裂纹出现位置及发生率(b)

Fig. 1 The main damage forms (a) and crack occurrence positions and proportion (b) of axle

高速列车车轴要保证在服役环境下, 具有足够的安全性、可靠性和长的使用寿命, 这就对车轴材料提出了更高的技术要求。车轴既要轻量化, 又要保证有足够的疲劳强度, 以确保在整个服役期间不因疲劳裂纹扩展而损坏, 甚至切轴, 所以提高车轴疲劳强度一直是各国高速车辆的研究热点。

因此, 对车轴用钢而言, 主要是保证其良好的强度、韧性及疲劳性能(特别是旋转弯曲疲劳强度)。为了防止其轴颈部位的迅速磨损, 还应具备一定的表面硬度。车轴的强度、韧性及疲劳等性能要求可以通过车轴钢材成分优化和热处理工艺控制两方面来保证; 与此同时, 对钢材的冶金质量、淬透性等还需提出附加要求。

3 国内外高速列车车轴技术对比分析

世界各铁路发达国家都非常重视高速列车车轴(以下简称“高速车轴”)的研究工作, 分别从材料、设计、生产和运行维护等方面不断改善。由于各国的国情和技术观点不同, 选用的车轴材料也不相同, 主要选材范围为优质碳素结构钢和合金结构钢, 目前主要牌号有欧洲的 EA1N、EA4T、34CrNiMo6 和 30NiCrMoV12 等, 日本的 S38C 等, 中国的 DZ1 和 DZ2 等。本文重点从生产工艺流程、成分-组织-性能和车轴结构设计等方面进行对比分析。

3.1 国内外高速车轴生产工艺流程

目前, 国内外高速车轴多采用“轧制+锻造+热处理”的工艺进行生产, 但欧洲、日本和中国的车轴生产工艺流程又不尽相同, 具体如下。

中国和欧洲的合金钢高速车轴加工工艺流程是^[11]:

电炉或转炉冶炼→炉外精炼→连铸或模铸→连铸坯或模铸锭→车轴坯轧制→车轴坯加热→车轴锻造→车轴→(正火+)调质热处理→车轴端面加工→车轴超声波探伤→车轴外圆加工→车轴径向超声波探伤→内孔加工→内孔超声波探伤→车轴端面精加工→车轴外圆精车加工→滚压→磨削→车轴磁粉探伤→尺寸及外观检查→包装。

日本碳素钢高速车轴生产工艺流程为^[12,13]: 电炉或转炉冶炼→炉外精炼→连铸或模铸→连铸坯或模铸锭→车轴坯轧制→车轴坯加热→车轴锻造→调质热处理→车轴端面加工→内孔加工→超声波探伤→车轴外圆半精车加工→车轴表面高频感应淬火+低温回火→车轴外圆磨削→磁粉探伤→尺寸及外观检查→包装。本文重点对浇铸工艺和热处理工艺进行对比。

3.1.1 浇铸工艺对比分析

从浇铸方式来说, 欧洲主要采用模铸工艺, 日本主要采用连铸工艺, 中国既有模铸工艺, 也有连铸工艺^[14]。通过生产和检测数据积累, 将采用不同工艺生产的车轴检测结果列于表 1。通过统计数据可看出, 采用模铸工艺生产的车轴探伤报警率比连铸工艺高。

3.1.2 车轴热处理工艺对比分析

典型高速车轴钢热处理工艺见表 2^[15-17]。日本、中国和欧洲高速列车车轴采用钢种不同, 其热处理工艺差别较大。日本高速车轴采用普通碳素结构钢(S38C), 并进行表面中频淬火热处理, 相比欧洲采用合金结构钢并进行调质处理, 日本高速车轴原材料成本低, 热处理工艺复杂, 参数控制精度要求高。日本高速车轴的危险部位为轮座, 为了增加轮座部位的疲劳强度, 日本采用了

表 1 采用模铸与连铸工艺生产的车轴质量比较

Table 1 Quality comparison of axles by mold casting and continuous casting, respectively

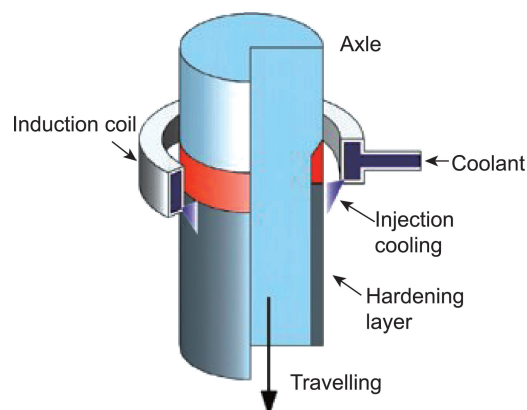
EA4T axles	Number of detected axles	Number of defective axles	Defective axles proportion /%	Number of scrapped axles	Scrapped axles proportion /%
Mold casting processed	1236	41	3.32	19	1.54
Continuous casting processed	1237	1	0.08	1	0.08

表 2 典型车轴钢热处理工艺^[15-17]Table 2 Heat treatment processes for typical axle steels^[15-17]

Classification	Grade of steel	Heat treatment process
Carbon axle steel	S38C	Quenching + high temperature tempering + surface induction hardening + low temperature tempering
	EA4T	Normalizing + quenching + tempering
Alloy axle steel	30NiCrMoV12	Ditto
	DZ1	Ditto
	DZ2	Ditto

表面感应淬火硬化措施(如图 2 所示),以进一步提高该部位的疲劳强度^[15]。

中国和欧洲的高速车轴材料一般采用合金钢(如 EA4T、30NiCrMoV12 等),通过采用热处理(正火+淬火+回火)及抛丸强化处理方法,使车轴表面形成残余压应力(磨削加工也能提高车轴表面压应力)^[16-18]。同时,也可通过对轮座表面喷涂涂层来提高轮座的抗磨损能力,延长车轴使用寿命。因此,中国与欧洲高速车轴原材料成本较高,热处理工艺相对比较简单。

图 2 日本新干线列车车轴的表面感应淬火硬化工艺示意图^[15]Fig. 2 Schematic diagram of induction hardening on the surface of axles of Shinkansen^[15]

3.2 材料的化学成分-组织-性能对比分析

目前,国内外高速车轴用钢大致可分为 3 类:优质碳素结构钢、合金结构钢和高 Ni 合金结构钢。国内外典型高速车轴用钢化学成分、组织和性能如表 3 和表 4 所示^[19-27]。

3.2.1 优质碳素结构钢

碳素结构钢以日本的 S38C 为代表,成分如表 3 所示^[19, 20]。

日本新干线上使用的两种典型车轴为:0 系实心轴和 500 系空心轴。其中 0 系实心轴的最大运行速度为 210 km/h,500 系空心轴的为 300 km/h。为了提高轮座与轴压配合部位的疲劳强度,这两种轴均采用感应淬火处理来提高表面硬度。

日本新干线的高速列车,由于速度更高(200 km/h 以上),运行条件更为苛刻,对车轴可靠性的要求更高,因此采用了 JIS(日本国有铁道标准)中的 S38C 钢制造。

表 3 不同国家车轴用钢化学成分^[19, 20]Table 3 Chemical composition of axle steel in different countries(ω / %)^[19, 20]

Standard	Grade of steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Al
JIS E4502	S38C	0.35~0.41	0.15~0.35	0.60~0.90	≤0.030	≤0.035	≤0.20		≤0.20		≤0.30	0.015~0.040
EN 13261	EA4T	0.22~0.29	0.15~0.40	0.50~0.80	≤0.020	≤0.015	0.90~1.20	≤0.30	≤0.30	≤0.06	≤0.30	0.015~0.040
UNI 6787	30NiCrMoV12	0.26~0.32	≤0.40	0.40~0.70	≤0.020	≤0.020	0.60~1.00	0.40~0.60	2.70~3.30	0.08~0.13	≤0.20	0.015~0.040
Q/CR 639	DZ1	0.22~0.29	0.17~0.37	0.60~0.80	≤0.020	≤0.010	0.95~1.20	0.20~0.30	0.20~0.30	0.02~0.06	≤0.20	0.010~0.040
Q/CR 639	DZ2	0.24~0.32	0.20~0.40	0.60~0.90	≤0.010	≤0.010	0.90~1.20	0.20~0.30	0.50~1.50	≤0.06	≤0.20	0.010~0.040

表 4 不同国家高速车轴用钢热处理工艺-组织-性能对比^[21-27]

Table 4 Comparison of heat treatment process, microstructure and performance of high-speed axle steel in different countries^[21-27]

Grade of steel	Heat treatment process	Mechanical property								Fatigue property(10 ⁷)/MPa			Grain size number, microstructure
		R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	$KU_2/J(20\text{ }^{\circ}C)$		$KU_2/J(-40\text{ }^{\circ}C)$		R_{fL} (Smooth)	R_{fE} (Notch)	R_{fL}/R_{fE}	
						Length-wise	Broad-wise	Length-wise	Broad-wise				
S38C	Quenching and tempering + Surface induction quenching/ Low temperature tempering	≥540	≥295	≥25	≥45	—	—	—	—	—	—	—	≥5, P+F
	Test data	619	315	29	63.5	92	59			495	490	1.01	8, P+F
EA4T	Normalizing+ Quenching and tempering	650~800	≥420	≥18	—	≥40	≥25	—	—	≥350	≥215	≤1.63	≥5, M+B tempered microstructure
	Test data	729	575	20	69	81	79			360	278	1.29	8, M+B tempered microstructure
30NiCrMoV12	Normalizing+ Quenching and tempering	950~1079	≥850	≥15	≥60	≥50	≥30	≥40	≥25	≥495	≥330	≤1.50	≥5, M+B tempered microstructure
	Test data	1020	910	18.5	63	63	57			510	395	1.29	8, M+B tempered microstructure
DZ1	Normalizing+ Quenching and tempering	650~800	≥420	≥18	—	≥40	≥25	—	—	≥350	≥215	≤1.63	≥6, M+B tempered microstructure
	Test data	741	582	22	70	91	88	134	121	372	316	1.18	8, M+B tempered microstructure
DZ2	Normalizing+ Quenching and tempering	680~850	≥450	≥18	—	≥50	≥25	≥30	≥25	≥350	≥215	≤1.63	≥7, M+B tempered microstructure
	Test data	812	678	23	71	106	101	208	201	428	394	1.09	8, M+B tempered microstructure

Note: Microstructure of typical steel is shown in figure 3. EA4T axle is normalized at high temperature first, then tempered.

日本高速车轴在锻造成形后先进行调质处理(调质工艺为 860 ℃/油淬+550~680 ℃回火), 然后进行半精加工, 在直径方向保留 1 mm 的精加工余量, 接着对需硬化的部位采用 3 kHz 感应淬火和 200 ℃的回火处理。热处理结束后, 对车轴进行 0.7 mm 的车削和 0.22 mm 的半精磨以及 0.08 mm 的精磨, 即完成整个车轴的加工成形过程。

成品车轴高频淬火部位的硬度要求为 HS 55~80, 每根车轴各部位的硬度允差为最高硬度的 20%以内, 圆周方向的硬度允差为 HS 5 以内。车轴表层的残余压应力为 588~980 MPa, 深度最好为 10 mm。车轴表面的组织为马氏体, 越到内部贝氏体越多, 至表面下 4 mm 处几乎全部是细珠光体, 再向内铁素体析出量逐渐增加, 从距表面

15 mm 处到车轴中心均为基体原始组织^[21]。

采用“调质+感应淬火+回火”的热处理工艺后, 车轴的疲劳强度可大幅度提高。例如, 直径为 180 mm 的车轴压装部位的疲劳强度由正火时的 113 提高到157 MPa, 表面硬度、抗拉强度和冲击韧性等其他性能也有明显提高。

3.2.2 合金结构钢

欧洲高速车轴材料大多采用 EA4T 中碳合金结构钢, 通过采用热处理(正火+淬火+回火)强化处理方法来提高车轴的强韧性指标^[22], 热处理工艺简单, 但材料成本要高于碳素钢。

EA4T 钢是欧洲标准(EN 13261)规定的高速铁路车轴用钢, 我国与德国西门子公司和加拿大庞巴迪公司合作生产高速铁路动车(CRH3 和 CRH1), 车轴用钢均为此

钢种^[23, 24]。EA4T 钢的显微组织由贝氏体或退火马氏体构成, 根据 ISO643 标准, 其晶粒度应为 5 级或者更细。

国外文献绝大部分集中在对钢的热处理工艺和疲劳性能的研究^[25, 26]。除了标准试样, 研究还对含有半椭圆裂纹和几何形状表面缺陷的试样进行了弯曲试验。结果表明, 裂纹增长率与试样的几何形状和载荷状态有关; 在较低的应力范围内, 还与裂纹尖端塑性有关。部分试验结果被用于评估正在服役的车轴的剩余寿命。一般认为, 传统疲劳极限测试并不能满足高速铁路车轴用钢的评估要求, 同时对服役状态下车轴的探伤检查间隔也必须重新设计。通过对微缺口试样的疲劳极限测试, 确定微裂纹的疲劳阈值, 从而利用“比例效应”分析在整个轴中由非金属夹杂物引起的微裂纹的临界应力, 确定轴的疲劳强度。对小规模试样的裂纹扩展试验表明: EPFM 裂纹扩展模型同样适用于全尺寸车轴部件, 这些实验结果可以用来确定轴的探伤检查间隔。

欧洲高速车轴材料采用 EA4T 合金结构钢, 整体强韧性和疲劳性能优于日系, 但存在淬透性不足而导致的组织不均匀、生产工艺窗口窄、回火稳定性较差及强度指标与疲劳性能指标不匹配(如按强度指标中下限控制,

会出现疲劳指标不合格问题)等诸多问题。

我国高速车轴早期主要从欧洲 LUCCHINI、BVV 等引进, 所以国产化的高速车轴主要采用的是中合金结构钢的成分设计思路。针对进口 EA4T 动车组车轴存在的诸多问题, 采用优化 Mn, Ni, Mo 等合金元素及 V, Ti, Nb 等微合金化元素含量的技术思路, 在保证组织细化及析出强化的前提下进一步提高了淬透性, 从而获得了均匀的组织 and 良好的回火稳定性, 并保证了强度与疲劳性能的合理匹配, 设计出具有优异综合性能的系列动车组车轴钢 DZ1 和 DZ2, 显著地提高了连铸工艺高速车轴钢的强度、韧塑性和抗疲劳性能指标, 达到了国际先进水平。目前 DZ1、DZ2 材质车轴已完成中国铁路总公司装车运行考核, 处于小批量应用阶段。

3.2.3 高 Ni 合金结构钢

欧洲耐低温高速车轴材料选用 30NiCrMoV12 高 Ni 合金结构钢。30NiCrMoV12 钢中含 Cr 0.60%~1.00%、Ni 2.70%~3.30%、Mo 0.40%~0.60%、V 0.08%~0.13% (质量分数), 该类钢种有很多优点, 如淬透性好、可油淬、变形小、硬度高、屈强比高和耐腐蚀性能好等, 但是成本比较高^[27]。

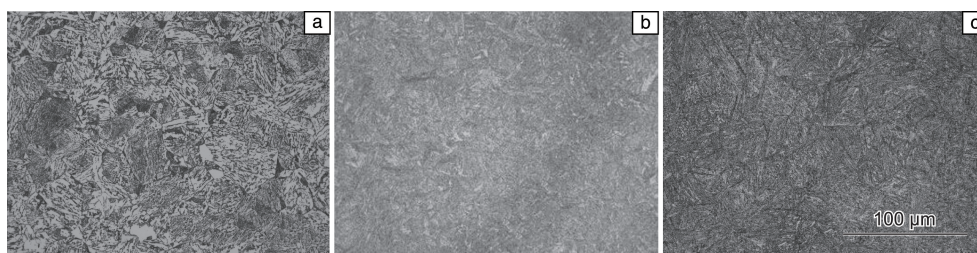


图3 典型钢种的微观组织: (a) EA4T, (b) DZ2, (c) 30NiCrMoV12

Fig. 3 Microstructures of typical steels: (a) EA4T, (b) DZ2, (c) 30NiCrMoV12

3.3 车轴结构设计

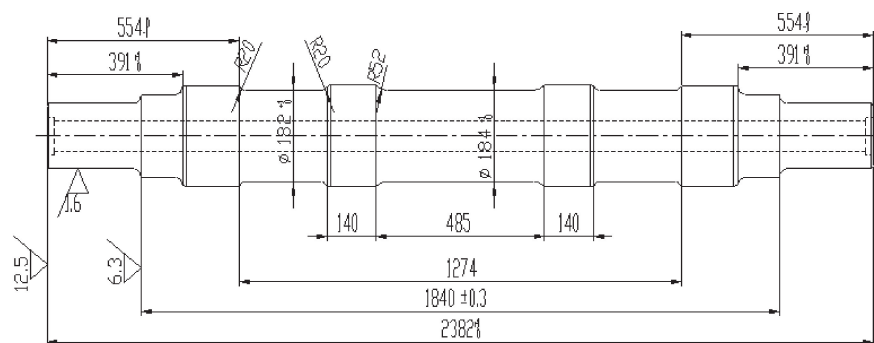
3.3.1 车轴结构设计

高速运转下的列车安全服役是人们关心的首要问题, 在高速列车安全问题上, 任何一个环节出现问题, 都可能造成无法估量的严重后果^[28]。为了确保车轴安全使用, 高速车轴通常采用空心的结构形式, 如图 4 所示。由于车轴主要承受横向弯曲力矩作用, 截面中心部分应力很小, 制成空心后, 对车轴强度影响很小。同时, 采用空心结构形式, 一方面可以实现轻量化, 更主要的是使用空心车轴可以更方便地进行高精度超声波探伤, 漏探和误判几率可明显减少。所以空心车轴的使用安全性比实心车轴要高。目前我国空心车轴结构参数如表 5 所示, 常见的空心车轴的空心直径有: $\Phi 30$ mm、 $\Phi 60$ mm 和 $\Phi 65$ mm^[29-31]。

表5 我国高速列车车轴结构参数对比^[29-31]

Table 5 Comparison of axle structure parameters of high-speed trains in China^[29-31]

Item	CRH2	CRH380	CRH5
Material	S38C	EA4T	30NiCrMoV12
Speed/(km/h)	200	200	200
Axial load/t	15	17	16.4(17)
Shaft diameter/mm	130	130	130
Hollow diameter/mm	60	30	65
Wheel seat diameter/mm	196	196	192
Axle body diameter/mm	182	165	166
Distance between journal centers/mm	2000	2000	2070
Design life/a	20	30	30

图 4 CRH2 空心车轴结构图^[34]Fig. 4 Hollow axle structure of CRH2^[34]

3.3.2 直径比及过渡圆弧半径设计

铁路车轴的疲劳危险部位为疲劳磨损多发生的压装部位,如轮座、从动齿轮座和制动盘座。据统计,机车车辆 86% 左右的车轴在轮座靠内侧处发生裂损,这是由于车轴轮座中间部分承受着最大的变曲应力,并存在擦伤、腐蚀以及由于装配引起的应力集中,致使轮座部分疲劳载荷明显加大^[32, 33]。为了提高压装部位的疲劳强度,各国高速车轴在轮座、从动齿轮座及制动盘座处的直径处,均设计得比平滑部位的要大,并增设了圆弧过渡^[34](如图 4),圆弧的半径在各个国家均是通过疲劳试验进行优化的(如表 6)。

表 6 经疲劳试验优化的车轴尺寸^[31]Table 6 Structure parameters of axle optimized by fatigue experiment^[31]

Size	Shinkansen in Japan	TGV in France	ICE in German
Wheel seat diameter(D)/mm	209	212	190
Axle body diameter(d)/mm	190	184	160
D/d	1.10	1.15	1.19
Radius of transition fillet/mm	100	15.75	15.75

从表 6 可以看出,ICE 和 TGV 采用大直径比和小半径圆弧。这样,高的应力集中使其小半径圆弧成为疲劳裂纹的危险部位。相反,由于采用小直径比和大半径圆弧,日本高速铁路车轴的危险部位为轮座。因此,欧洲和日本对车轴轮座表面的热处理方式也就不一样。

3.4 综合比较

对日本、欧洲和中国的高速列车车轴结构、钢材、加工工艺和组织性能的综合比较分析列于表 7,结果表明^[35-37]:①日本、欧洲和中国车轴用的是不同类型的钢,日本是碳素结构钢,欧洲和中国是合金结构钢;

②轴加工的热处理工艺路线不同,日本是采用“调质+表面感应淬火”处理,欧洲和中国则是对整支轴进行调质热处理;两者相比,日本车轴的热处理工艺更难控制一些;③由于表面热处理装备的局限,日本车轴在外形设计时对整支轴的直径变化有一定限制;④日本车轴的 1/2 处和内孔表面的显微组织和性能较差;⑤欧洲和中国车轴所用原材料价格比日本车轴昂贵。

4 新一代高速车轴材料发展方向的思考

从过去 30 年的高速车轴材料的发展历程来看,车轴材料有两种发展方向,一是提高材料的合金元素(Ni, Mo 和 Cr 等)含量,以欧洲尤其是德国为代表,先后由 EA1N、EA4T 直到 EA7T,强度呈逐步提高的趋势^[38];二是日本为代表的在 S38C 碳素结构钢基础上,采用整体调质+表面热处理硬化,通过提高表面强度而不是提高整个车轴强度,因为高速车轴的疲劳失效大多数由表面开始^[39]。目前,在欧洲以法国国家铁路公司为代表,不主张继续通过提高合金元素含量来提高材料强度,认为高合金结构钢存在裂纹敏感性高等缺点。

中国的高速铁路技术正在从跟跑、并跑逐步向领跑的方向发展。对于时速超过 350 km 的有轨高速铁路领域,目前中国的相关研究更为超前,时速 400 km 及以上的高速列车车轴的研发,作为国家重点研发计划项目已经于 2017 年立项,由上海交通大学、马鞍山钢铁股份有限公司、北京交通大学和中科院金属研究所等单位共同参与。基于材料基因组(MGI)技术,研发生产我国具有自主知识产权的时速 400 km 的高速车轴,这在世界上尚无先例,没有成功的经验可供借鉴。我国地域辽阔,从 -60℃ 的极寒地区到温度高达 45℃ 的高温高湿的南方地区,从广袤的平原到崇山峻岭到茫茫戈壁,气候和地形十分复杂。这要求我国高铁的车轴用钢除了具有通用性能外,还要有广泛的适应性。

表 7 3 种车轴的比较^[34-37]Table 7 Comparison of three kinds of axles^[34-37]

Grade of steel	Chemical element characteristics	Heat treatment process	Mechanical property	Mechanical processing	Comprehensive characteristics
S38C	Carbon steel	Very low hardenability due to low alloying element content, not suitable for the whole heat treatment. Induction heat treatment is available	The overall strength and toughness level of the material is low, but the axle surface is greatly strengthened by induction heat treatment, and the hardness is very high	The overall hardness of the material is lower, and the rough processing before heat treatment is easier. The surface has high hardness after induction heat treatment	The material cost is low, but the process manufacturing cost is high, the industrial manufacturing is more difficult
EA4T/DZ1/DZ2	Alloy steel with moderate alloying element content	With strong hardenability, whole heat treatment can be carried out. However, operation requirement of heat treatment process is higher for axle materials with large diameter, a narrow window of heat treatment for adjustment	The overall strength and toughness level of the material is high, the strength of interior part is relatively lower than that of the outside part	The hardness of the material surface is moderate, and the machining is not too difficult	The material cost is moderate and the machining difficulty degree is relatively small. Although the heat treatment process is difficult to some extent, better strength and toughness matching can be obtained through appropriate alloy composition design and heat treatment process research
30NiCrMoV12	Alloy steel with high alloying element content	With very high hardenability, whole heat treatment can be carried out	The whole material has high strength, toughness level and good low temperature performance	The hardness of material surface is higher, which challenges for machining, especially finishing machining	The cost of materials is high, machining is also difficult, the overall strength and toughness of materials is high, the difficulty of industrial manufacturing is controllable

时速 400 km 等级的新一代高速车轴，从载荷上看轴重在目前最大为 17 t，由于弯曲疲劳以及车体结构的要求，轴的尺寸也不可能有大范围的减小，这意味着材料需要强度指标的大幅提升。在复杂的服役条件下，新一代高速车轴材料应该具有：① 优异的性能：包括优异的超高周疲劳性能（ 10^8 循环周次，疲劳强度 $R_{\text{H}} \geq 350$ MPa）、良好的低温冲击韧性（韧脆转变温度 ≤ -80 °C，应用于高寒地带）和高耐蚀性能（应用于沿海地区）。② 高度的可靠性：包括材料无缺陷、高可靠性和低裂纹敏感性。③ 生产和运行的经济性：包括材料的生产成本低、减轻车辆重量和使用过程中免或少检修。

通过 DZ1 和 DZ2 的研究及生产实践，设想新一代高速车轴的材料设计方向为：① 应用 MGI 技术平台，优化化学成分和热处理工艺，节约材料研发成本和周期。通过 Nb 和 V 的复合微合金化，研究与材料相适应的热处理工艺，进行多尺度复杂相的调控，达到晶粒细化，提高车轴材料的强韧性。② 开发新型表面强化处理技术。如超声滚压强化、激光强化、表面渗层强化、深冷强化、表面热

处理及其组合技术等。③ 应用智能制造技术，建立可靠的质量控制技术和体系，以保证产品的质量稳定性。

5 结 语

随着我国标准化动车组的研制及高速铁路“走出去”战略的实施，我国的高速列车研究需要具备国际视野。与高速列车配套的相关产业也需要从更开阔的视野、用更前沿的技术去追赶、引领整个行业。随着我国科技自主创新能力的增强，我国在高速列车车轴技术方面取得了长足进步。但与国外相比还存在不足，应加强对产品研发基础数据的积累、提高知识产权保护意识、紧追前沿科技，为高速新型列车的研制提供材料保障，确保我国高速列车技术在未来几十年具备足够的国际竞争力。

参考文献 References

- [1] 李瑞淳. 国外铁道车辆[J], 2014, 51(06): 1-10.
LI R C. Foreign Rolling Stock[J], 2014, 51(06): 1-10.
- [2] 李卫强. 既有线上 200 km/h 机车动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

- LI W Q. Dynamics Analysis of 200 km/h Locomotive on Existing Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [3] HIROMICHI I. Vehicle Technology[J], 2011, 12: 14-18.
- [4] 朱静, 顾家琳, 周惠华, 等. 中国铁道科学[J], 2015, 36(02): 60-67.
ZHU J, GU J L, ZHOU H H, *et al.* China Railway Science[J], 2015, 36(02): 60-67.
- [5] ZERBST U, KLINGER C, KLINGBEIL D. Engineering Failure Analysis[J], 2013, 35: 54-65.
- [6] 史俊玲. 中国铁路[J], 2016(01): 95-98.
SHI J L. China Railway[J], 2016(01): 95-98.
- [7] ZORAN O, MILETA R, VESNA M M. Engineering Failure Analysis[J], 2015, 55: 169-181.
- [8] TAIZO M, TAKANORI K, KENJI H. Engineering Fracture Mechanics[J], 2011, 78(5): 810-825.
- [9] 吴毅, 项彬, 张斌, 等. 铁道车辆[J], 2015, 53(06): 1-5+7.
WU Y, XIANG B, ZHANG B, *et al.* Railway Vehicle[J], 2015, 53(06): 1-5+7.
- [10] 牛俊光. 轮轴表面损伤下的疲劳可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
NIU J G. Study on Fatigue Reliability of Wheel Axle under Surface Damage[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [11] KLINGER C, BETTGE D. Engineering Failure Analysis[J], 2013, 35: 66-81.
- [12] 李祥志. DZ1、25CrNiMo 和 30CrNi3MoV 车轴钢的组织与力学性能[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
LI X Z. Microstructure and Mechanical Properties of DZ1, 25CrNiMo and 30CrNi3MoV Axle Steels[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018.
- [13] MAKINO T, HIROKI S. Nippon Steel Sumitomo Jin Technical Newspaper[J], 2013, 395: 56-64.
- [14] 麻晓光, 王天瑶, 张秀平. 世界钢铁[J], 2009, 9(5): 41-45.
MA X G, WANG T Y, ZHANG X P. World Iron & Steel[J], 2009, 9(5): 41-45.
- [15] 潘向南. S38C 车轴冲击损伤疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
PAN X N. Study on Fatigue Performance of Impact Damage on S38C Axle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [16] 王之香, 王玉玲. 山西冶金[J], 2017, 40(01): 1-2+10.
WANG Z X, WANG Y L. Shanxi Metallurgy[J], 2017, 40(01): 1-2+10.
- [17] 王筑生, 梁益龙, 吴少斌, 等. 材料热处理学报[J], 2012, 33(05): 48-52.
WANG Z S, LIANG Y L, WU S B, *et al.* Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2012, 33(05): 48-52.
- [18] 薛振峰, 赵兴龙, 王艳芳. 金属热处理[J], 2016, 41(07): 139-141.
XUE Z F, ZHAO X L, WANG Y F. Heat Treatment of Metals[J], 2016, 41(07): 139-141.
- [19] 付宪强. 特钢技术[J], 2018, 24(01): 30-33.
FU X Q. Special Steel Technology[J], 2018, 24(01): 30-33.
- [20] 易忠宏, 李泉, 陈玲, 等. 金属加工: 热加工[J], 2013(s1): 181-183.
YI Z H, LI Q, CHEN L, *et al.* Metal Working[J], 2013(s1): 181-183.
- [21] SOTA S, YUJI I, ISAMU N. 炭素鋼 S38C の高サイクル疲労強度における周波数効果[C]//日本機械学会東北支部総会・講演会講演論文集(2011). 日本機械学会東北支部, 2011: 182-183.
- [22] 刘军辉. 机械管理开发[J], 2012, 27(4): 57-59.
LIU J H. Mechanical Management and Development[J], 2012, 27(4): 57-59.
- [23] 郑业方, 杨军, 苏立武, 等. 金属热处理[J], 2011, 36(12): 38-40.
ZHENG Y F, YANG J, SU L W, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2011, 36(12): 38-40.
- [24] 程建宏. 机车车辆工艺[J], 2017(5): 18-20.
CHENG J H. Locomotive & Rolling Stock Technology[J], 2017(5): 18-20.
- [25] POKORNY P, VOJTEK T, NAHLIK L, *et al.* Engineering Fracture Mechanics[J], 2017, 185: 2-19.
- [26] VARFOLOMEEV I, LUKE M, BURDACK M. Engineering Fracture Mechanics[J], 2011, 78(5): 742-753.
- [27] 陈楚, 何毅, 黄军波, 等. 特殊钢[J], 2014, 35(5): 57-60.
CHEN C, HE Y, HUANG J B, *et al.* Special Steel[J], 2014, 35(5): 57-60.
- [28] 李冰. 金属材料与冶金工程[J], 2017, 45(04): 3-6.
LI B. Metal Materials and Metallurgy Engineering[J], 2017, 45(04): 3-6.
- [29] HAO P, JAMES L, GRACIOUS N. Procedia Engineering[J], 2017, 207: 454-459.
- [30] BRANCO R, COSTA J D, ANTUNES F V. Theoretical and Applied Fracture Mechanics[J], 2012, 58(1): 28-34.
- [31] 李炳华, 杜欣. 内燃机车[J], 2000, 1: 14-20.
LI B, DU X. Diesel Locomotive[J], 2000, 1: 14-20.
- [32] 林浩博. 高速动车组 S38C 车轴疲劳、裂纹扩展特性及可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LIN H B. Studies on the Fatigue, Crack Propagation Characteristics and Reliability of EMU High Speed S38C Axle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [33] 吴毅. 铁道机车车辆[J], 2016, 36(05): 7-11.
WU Y. Railway Locomotive & Car[J], 2016, 36(05): 7-11.
- [34] 李润华. CRH2 转向架轮对轮径差检修限度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
LI R H. Research on Wheelset Rolling Radius Difference Maintenance Limits of CRH2 High Speed Train Bogie[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [35] 张艳, 汪永阳, 姜江. 机械研究与应用[J], 2017, 30(06): 106-109.

- ZHANG Y, WANG Y Y, JIANG J. Mechanical Research & Application[J], 2017, 30(06): 106-109.
- [36] 陈新, 王连庆, 王建国, 等. 物理测试[J], 2018, 36(01): 46-50.
- CHEN X, WANG L Q, WANG J G, *et al.* Physics Examination and Testing[J], 2018, 36(01): 46-50.
- [37] 徐锋, 孙奇, 刘鹏涛, 等. 机械工程材料[J], 2018, 42(04): 62-67.
- XU F, SUN Q, LIU P T, *et al.* Mechanical Engineering Materials [J], 2018, 42(04): 62-67.
- [38] 全琪, 窦作勇, 章武林, 等. 昆明理工大学学报[J], 2018(5): 22-27.
- QUAN Q, DOU Z Y, ZHANG W L, *et al.* Journal of Kunming University of Science and Technology [J], 2018(5): 22-27.
- [39] 马天宇. 高速动车组车轴表面强化层的疲劳性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- MA T Y. The Study on Fatigue of High-speed EMU Axle Surface Reinforcement Layer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- (编辑 惠 琼)