

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180219

## 中国高速车轮产品质量性能研发应用进展

苏世怀<sup>1</sup>, 赵海<sup>2</sup>, 江波<sup>2</sup>, 邹强<sup>2</sup>, 从韬<sup>3</sup>, 张关震<sup>3</sup>

(1. 马钢(集团)控股有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 2. 马鞍山钢铁股份有限公司安徽省高性能轨道交通新材料及安全控制重点实验室, 安徽 马鞍山 243000; 3. 中国铁道科学研究院金属及化学研究所, 北京 100083)

**摘要:** 介绍了自 20 世纪 90 年代中国铁路大提速至今天“复兴号”中国标准动车组投入运营, 马钢为满足中国高速铁路的发展, 针对高速车轮产品服役过程出现的问题及质量要求, 在高速车轮成分自主设计、非金属夹杂物控制、制造工艺等开展的一系列研究工作, 试制的车轮实物质量优于进口产品, 并通过装车运用对其服役性能进行综合评价, 最终形成了从产品研究到推广应用的系统研发闭环, 支撑了中国客运时速由最初不到 80 km/h 发展至 350 km/h 以上, 实现了高速车轮技术自主化、产品国产化, 同时对马钢下一步高速车轮产品品种开发及市场开拓等工作进行了展望。

**关键词:** 高速车轮; 产品质量; 研发应用

**文献标志码:** A      **文章编号:** 0449-749X(2018)11-0001-07

## Development and application of high-speed wheel product quality performance in China

SU Shi-huai<sup>1</sup>, ZHAO Hai<sup>2</sup>, JIANG Bo<sup>2</sup>, ZOU Qiang<sup>2</sup>, CONG Tao<sup>3</sup>, ZHANG Guan-zhen<sup>3</sup>

(1. Magang (Group) Holding Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China; 2. Anhui Key Laboratory of High-performance Rail Transportation New Materials and Safety Control, Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China; 3. Metals and Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** The speedup of China's railways since the 1990's and the launch of today's “Fuxing” Chinese standard EMUs was introduced. In order to meet the development of China's high-speed railways, Masteel has conducted a series of research work on the high-speed wheel, including the independent component design, the non-metallic inclusion control, and the manufacturing processes optimization, etc. The quality of the wheel made by Masteel was better than that of imported products. The service performance of the manufactured wheel was comprehensively evaluated by loading applications, and a system-wide R&D closed loop from product research to application was finally formed, supporting the development of China's passenger speed from less than 80 km/h to 350 km/h or more. In the above, Masteel has realized the independence of the high-speed wheel technology and the localization of products. At the same time, we have also looked ahead to Masteel's next step in the development of high-speed wheel product categories and market developments.

**Key words:** high-speed wheel; product quality; research and application

高速列车是中国首先走向世界的战略性高端装备。高速车轮承受巨大动载荷和热负荷, 易发生各类疲劳损伤, 是世界上公认的技术要求最高、生产难度最大的尖端车轮产品。中国从国外进口的车轮在服役过程中暴露出的疲劳损伤、多边形、寿命短等问题已影响到车辆的运行安全和使用成本, 更是制约“高铁走出去”战略。马钢自 20 世纪 90

年代末起, 紧随中国铁路从 120 km/h 提速、160 km/h 准高速、250 km/h 高速、350 km/h 中国标准动车组的发展历程, 通过系统调研、试验研究、试生产和装车运用, 建立了完整的高速车轮生产制造技术体系, 形成高速车轮技术创新, 实现了高速车轮技术自主化、产品国产化。马钢高速车轮产品质量、实物性能及运用表现均好于进口车轮, 对支撑中国战略性

**基金项目:** 国家重点基础研究发展(973)计划资助项目(2015CB654804)

**作者简介:** 苏世怀(1959—), 男, 博士, 教授级高级工程师;      **E-mail:** sshjszx@magang.com.cn;      **收稿日期:** 2018-05-28

**通讯作者:** 赵海(1982—), 男, 大学本科, 工程师;      **E-mail:** haojie120@sina.com

产业安全具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。2011年,马钢按欧洲标准生产的高速车轮批量出口韩国,服役表现好于韩国进口的同类产品。

## 1 高速铁路对车轮质量的要求

### 1.1 对性能、质量的要求

随着列车运行速度的提高,车轮与钢轨之间的磨损、冲击载荷加剧,并且在高速列车的制动过程中产生大量的摩擦热,加剧了车轮和钢轨因疲劳、剥离等引发的失效问题<sup>[4]</sup>,影响到列车的运营安全。从欧洲标准及中国标准来看,其对高速车轮的性能(高强度匹配)、质量(高洁净度)均提出了较高

的要求。而中国高速车轮技术要求总体严于欧标(表1),主要表现在:

(1) 中国高速车轮较欧标增加了钢中有害气体控制要求且控制严格,其中  $w([H]) \leq 0.000\ 15\%$ ,  $w(T[O]) \leq 0.001\ 5\%$ 。

(2) 中国高速车轮对断裂韧性指标提出明确要求。由于该指标直接影响到车轮的服役安全性,因此中国高速车轮断裂韧性指标是参照欧洲进口车轮实物水平( $60 \sim 70\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )设计,总体要求高于欧洲进口车轮。

(3) 中国高速车轮对脆性非金属夹杂物要求严于欧标。

表1 国内外高速车轮技术要求

Table 1 Technical requirements for high-speed wheels at home and abroad

| 标准 | 材质  | 轮辋力学性能                   |              |             |                                 |                                                  | 非金属夹杂物/级   |            |            |            |            |            |            |            |
|----|-----|--------------------------|--------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|    |     | 抗拉强度<br>$R_m/\text{MPa}$ | 断面硬度<br>(HB) | $KU//$<br>J | $-20\ ^\circ\text{C}$<br>$KV/J$ | $K_Q//$<br>( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) | A          |            | B          |            | C          |            | D          |            |
|    |     |                          |              |             |                                 |                                                  | 粗系         | 细系         | 粗系         | 细系         | 粗系         | 细系         | 粗系         | 细系         |
| 欧洲 | ER8 | 860~980                  | $\geq 245$   | $\geq 17$   | $\geq 10$                       |                                                  | $\leq 1.5$ | $\leq 1.5$ | $\leq 1.0$ | $\leq 1.5$ | $\leq 1.0$ | $\leq 1.5$ | $\leq 1.0$ | $\leq 1.5$ |
|    | ER9 | 900~1 050                | $\geq 255$   | $\geq 13$   | $\geq 8$                        |                                                  |            |            |            |            |            |            |            |            |
| 中国 | D1  | 860~980                  | $\geq 245$   | $\geq 17$   | $\geq 10$                       | $\geq 80$                                        | $\leq 1.5$ | $\leq 1.5$ | $\leq 1.0$ | $\leq 1.0$ | $\leq 1.0$ | $\leq 1.0$ | $\leq 1.0$ | $\leq 1.0$ |
|    | D2  | 900~1 050                | $\geq 255$   | $\geq 17$   | $\geq 10$                       | $\geq 70$                                        |            |            |            |            |            |            |            |            |

### 1.2 使用问题

尽管国外标准对高速车轮提出了很高的技术要求,但进口车轮在中国高速铁路服役过程中仍暴

露出诸多问题(图1),主要表现为:(1)轮辋剥离频发,轮辋掉块、开裂时有发生,对行车安全产生隐患;(2)车轮多边形化严重,尤其是在时速300 km以



(a) CRH1 动车组用 ER9 车轮辋裂; (b) CRH2A 动车组用 SSW-Q3R 车轮剥离裂纹。

图1 进口车轮使用问题

Fig. 1 Problems of imported wheels in service

上的动车组上大面积爆发。

### 1.3 失效原因

通过解剖分析和系统调研,得知进口车轮服役问题存在的原因主要有:

(1) 进口车轮踏面表层组织控制方面存在不足,车轮热处理后表层存在大量的上贝氏体硬脆相,在后续加工中无法完全去除,导致车轮服役过程中易产生接触疲劳伤损,形成踏面剥离缺陷。

(2) 进口车轮在解决因内部缺陷造成的轮辋内部疲劳裂纹萌生、扩展问题方面存在不足,车轮钢存在冶金缺陷,其中氧化物夹杂尺寸超过  $20\ \mu\text{m}$ ,对钢基体和性能带来危害。

(3) 进口车轮因材料性能的局限性,尤其是欧洲进口 ER8 材质车轮,因其硬度明显低于钢轨,出现适用性问题,最突出的是车轮多边形化问题,轻则产生振动影响列车乘坐舒适性,重则导致部分零部件振动开裂,直接威胁运输安全。

## 2 中国高速铁路的发展和高速车轮产品开发

中国自 20 世纪 70 年代诞生了高速铁路建设的构想,在国家的大力支持下,经历了 4 个时代<sup>[5]</sup>,发展至今取得了举世瞩目的成就。

马钢作为中国建成最早、规模最大的轨道交通用车轮生产厂<sup>[4]</sup>,为满足高速车轮生产及质量要求,先后完成了 160 km/h 快速客车、200~300 km/h 动车组以及 350 km/h 中国标准动车用车轮产品开发,并投入运用,实现中国高速铁路关键零部件产品的国产化和自主化,为中国高速铁路的发展提供了坚实保障。

### 2.1 时速 160 km 快速客车及城际动车用车轮

列车运行速度超过 120 km/h 后,其动力学条件发生显著变化<sup>[6]</sup>,而运行速度从 120 提升至 200 km/h 就必须迈过 160 km/h 这一关键技术门槛,因此,160 km/h 又被称为准高速。

20 世纪 90 年代铁道部启动了铁路客车大提速工作,针对传统 CL60 材质车轮在铁路客运大提速初期出现的钢裂、严重剥离、异常磨耗问题,铁道部制定了 TB/T 2708—1996 用于取代 GB 8601—88,其技术要求高于 GB 8601—88,为此,马钢进行了一系列技术攻关和技术改造,主要如下:

(1) 在原成分设计基础上,适当添加铬元素,提高车轮硬度,降低异常磨耗。

(2) 采用复合脱氧工艺,使车轮钢中 T[O] 质量分数降至 0.002% 以下,氧化物夹杂控制在 1.0 级以下,以防止车轮在服役过程中因大尺寸氧化物夹杂产生钢裂。

(3) 热处理采用间隙淬火方式,使轮辋全断面获得均匀的珠光体+少量铁素体组织,解决了原热处理工艺下车轮踏面表层存在贝氏体组织引起的服役过程中车轮产生的严重踏面剥离问题。另外,间隙淬火方式还能适当降低辐板的冷却速度,使辐板在正火态下提高韧性水平,使车轮整体获得较高的强韧匹配。

通过上述措施的实施,马钢客车车轮满足了中国铁路客运大提速要求,经受住从时速不到 80 km/h 提升至 160 km/h 的考验。值得关注的是,在 1995—1997 年铁道部组织的 4 次提速试验中,装配 CL60 材质车轮的试验列车首次突破时速 200 km (最高达 240 km/h),创造了中国高速铁路发展史上首个记录。由于改进后的 CL60 材质客车车轮性能优异,2012 年被用于时速 160 km CRH6 型城际动车组,顺利通过 60 万 km 运用考核。2016 年,CL60 材质车轮在原 TB/T 2817—1997 标准基础上,被纳入中国高速车轮标准 TJ/CL 275A—2016。CL60 材质车轮产品的开发及优化,为时速 200 km 以上高速车轮的开发积累了一定经验。马钢试制时速 160 km CRH6 城际动车组用 CL60 车轮性能见表 2。

表 2 马钢试制时速 160 km CRH6 城际动车组用 CL60 车轮性能

Table 2 Performance of CL60 wheel made by Masteel for CRH6 intercity EMU at speed of 160 km/h

| 牌号         | 轮辋                 |              |                |              | 辐板              |                      |        |
|------------|--------------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|----------------------|--------|
|            | 抗拉强度<br>$R_m$ /MPa | 伸长率<br>$A$ % | 断面收缩率<br>$Z$ % | 断面硬度<br>(HB) | A 点硬度减小<br>(HB) | 抗拉强度 $R_m$<br>减小/MPa | $KU/J$ |
| CL60       | 原水平                | 1 010        | 16             | 34           | 278             | 20                   | 231    |
|            | 优化后                | 1 061        | 15             | 31           | 293             | 24                   | 243    |
| GB 8601    | 910~1 155          | ≥8           | ≥14            | ≥255         | —               | —                    | ≥16    |
| TB/T 2708  | ≥910               | ≥10          | ≥14            | 265~320      | —               | —                    | ≥16    |
| TJ/CL 275A | ≥910               | ≥10          | ≥14            | 265~320      | ≥10             | ≥120                 | ≥16    |

### 2.2 时速 200~300 km 动车组用车轮

2000 年铁道部时速 270 km 高速列车产业化项目获国家批准,研制高速列车命名为“中华之星”,国家投资 1.3 亿。同时,科技部配套设立了国家 863 项目“高速铁路用车轮材料及关键技术研究”,由马钢承担高速车轮的研制。马钢一方面通过车轮钢生产系统升级改造,建成国内第一条车轮钢连铸圆

坯生产线,提升了车轮钢整体质量;另一方面,借鉴当时世界上最先进的高速车轮标准(2000 年最新颁布的欧洲标准 EN 13262《铁路规范-轮对和转向架-车轮-产品要求》),综合考虑冶金质量、强韧性匹配、耐磨性以及接触疲劳性能<sup>[7]</sup>,在 EN 13262 中 ER7 材质高速车轮的基础上,结合 CL60 材质快速客车车轮技术积累,重点研究碳质量分数对车轮综合性能

的影响<sup>[8]</sup>,设计开发出CL50A材质高速车轮,其技术指标特点为:(1)较国内车轮标准增加轮辋常温冲击功要求,其指标按EN 13262中ER7车轮设计,确保服役安全性;(2)综合考虑中国线路特点,硬度指标设计高于EN 13262中ER7车轮,提高耐磨性和接触疲劳性能。

马钢研发的CL50A车轮装配在“中华之星”上,在秦沈客专以平均速度270 km/h、最高速度321.5 km/h(2002年11月27日创造)完成60万km运用考核。

值得关注的是,“中华之星”创造的最高时速直到2008年4月24日才由CRH2-061C“和谐号”动车组在京津城际铁路上打破。2006年8月“中华之星”结束在秦沈客专上的正式运营,随之而来的是新型CRH系列“和谐号”高速动车组。马钢CL50A材质高速车轮安全、可靠地完成了自己的历史使命,同“中华之星”一道被纳入中国高速铁路发展史册。马钢试制“中华之星”动车组用CL50A车轮性能见表3。

表3 马钢试制“中华之星”动车组用CL50A车轮性能

Table 3 Performance of CL50A wheel made by Masteel for "China Star" EMU

| 牌号            | 轮辋性能            |            |            |            | 辐板性能             |            |
|---------------|-----------------|------------|------------|------------|------------------|------------|
|               | 抗拉强度 $R_m$ /MPa | 伸长率 $A$ /% | 常温 $KU$ /J | 硬度(HB)     | 抗拉强度 $R_m$ /MPa  | 伸长率 $A$ /% |
| CL50A         | 916             | 16         | 24         | 252        | 720              | 19         |
| 技术条件          | 820~1 000       | $\geq 14$  | $\geq 17$  | 245~300    | $\leq 760$       | $\geq 16$  |
| EN 13262(ER7) | 820~940         | $\geq 14$  | $\geq 17$  | $\geq 235$ | 较轮辋减小 $\geq 110$ | $\geq 16$  |

2007年和谐号动车组正式上线运营,为实现对高速列车技术的引进、消化、吸收,进而实现再创新,2008年4月科技部启动了“十一五”国家支撑计划“中国高速列车关键技术研究及装备研制”重大项目,项目总投资30亿元,而高速车轮的开发再次由马钢承担(国家863项目“高速动车组车轮的研究与开发”)。马钢通过对进口车轮标准、实物质量开展系统分析、研究,查明晶粒度对断裂韧性的影响关系(图2),利用晶粒细化机制,显著提高了断裂

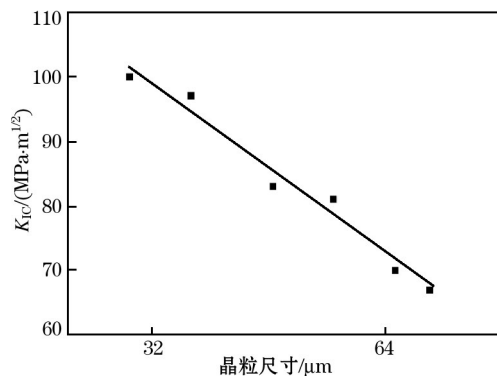


图2 断裂韧性随最大晶粒直径对数的变化规律

Fig. 2 Variation of  $K_{IC}$  with logarithm of maximum grain diameter

韧性水平(由进口水平的60 MPa·m<sup>1/2</sup>左右提高至80 MPa·m<sup>1/2</sup>以上)<sup>[9]</sup>,试制出欧标ER8、ER9材质车轮以及由欧标衍生的ER8C材质车轮,关键指标优于进口同类产品(图3),并通过综合对比,在3种材质车轮基础上,以获得较高的韧性水平为手段确保

高速条件下的服役安全性,设计出适合中国高速列车用D1材质车轮,其技术要求和实物性能见表4。并通过开展夹杂物控制技术研究,使车轮钢夹杂物尺寸控制在10 μm以下,其特点是脆性Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物被塑性MnS夹杂物有效包裹(图4),这种包裹的夹杂物含量(数量比例)在95%以上,从而降低了氧化物夹杂物对实物性能和服役性能的危害,提高运用安全<sup>[10-11]</sup>。该材质车轮于2013年装配在中国时速200~250 km CJ1-0302城际动车组上,顺利通过64万km运用考核,其使用综合服役表现优于进口车轮(图5)。

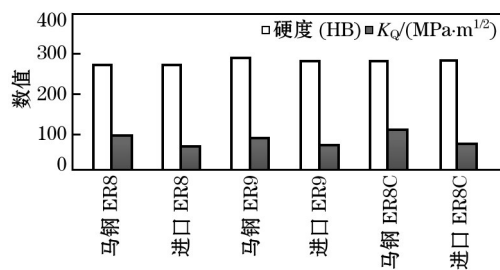


图3 马钢车轮与进口产品关键指标比较

Fig. 3 Key indicators comparison between Masteel wheels and imported products

### 2.3 时速350 km 中国标准动车组用车轮

2013年6月,中国标准动车组项目正式启动,为全面系统掌握高速铁路动车组关键装备的核心技术,2014年,中国铁路总公司设立重大课题“动车组

表 4 马钢试制时速 250 km CJ1-0302 城际动车组用 D1 车轮性能

Table 4 Performance of wheels made by Masteel for intercity CJ1-0302 D1 EMUs at speed of 250 km/h

| 牌号            | 轮辋                  |                  |           |               |               |            |                                     | 辐板            |           |
|---------------|---------------------|------------------|-----------|---------------|---------------|------------|-------------------------------------|---------------|-----------|
|               | 屈服强度                | 抗拉强度             | 伸长率       | 常温            | −20℃          | 硬度         | $K_Q/$                              | 抗拉强度 $R_m$ 缩小 | 伸长率       |
|               | $R_{ch}/\text{MPa}$ | $R_m/\text{MPa}$ | $A/\%$    | $KU/\text{J}$ | $KV/\text{J}$ | (HB)       | ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) | 值/MPa         | $A/\%$    |
| D1            | 602                 | 926              | 19        | 29            | 15            | 262        | 95                                  | 206           | 21        |
| 技术条件          | $\geq 540$          | 860~980          | $\geq 13$ | $\geq 17$     | $\geq 10$     | $\geq 245$ | $\geq 80$                           | $\geq 120$    | $\geq 16$ |
| EN 13262(ER8) | $\geq 540$          | 860~980          | $\geq 13$ | $\geq 17$     | $\geq 10$     | $\geq 245$ | —                                   | $\geq 120$    | $\geq 16$ |

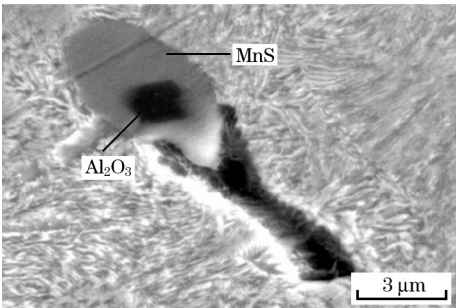


图 4 塑性夹杂物控制技术

Fig. 4 Plastic inclusion control technology

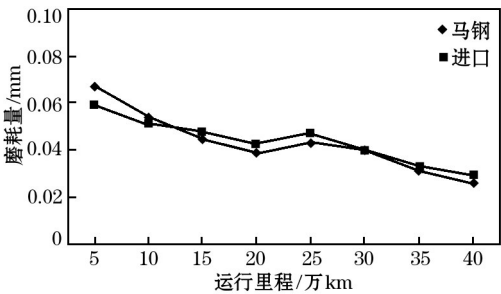


图 5 马钢 D1 车轮与进口 ER8 车轮磨耗对比

Fig. 5 Wear comparison between D1 wheel made by Masteel and imported ER8 wheel

关键技术自主创新深化研究——时速 350 km 中国标准动车组轮轴设计研究”，马钢作为课题组主要成员参与项目全过程，重点负责车轮开发。在材料设计上重点针对进口时速 300 km 车轮服役过程中突出的多边形问题，在确保韧性指标的前提下提高材料硬度和相变点，开发出一种中碳 Si-V 微合金化 D2 材质车轮，该材质车轮利用硅元素提高相变温度，通过控制淬火加热温度和冷却速度，发挥矾的固溶强化和晶粒细化作用<sup>[12]</sup>，提高强韧匹配。与进口产品相比，自主化 D2 材质车轮具有以下优势：(1)实物质量水平明显优于进口车轮，见表 5；(2)材料抗疲劳损伤性能、抗磨损性能较进口材料总体水平提高 30% 以上，如图 6 和图 7 所示；(3)实物服役效果好于进口车轮，马钢 D2 车轮 2015 年装配于“蓝海豚”和“金凤凰”中国标准动车组，顺利通过 60 万 km 装车运用，服役性能优于进口产品，磨耗量低于进口车轮，如图 8 所示。截止目前，马钢 D2 车轮已累计安全运行接近 150 万 km。

表 5 马钢试制时速 350 km D2 车轮和进口产品性能比较

Table 5 Performance comparison between 350 km/h D2 wheels made by Masteel and imported products

| 牌 号 |           | 轮 辋                 |                  |        |               |               |               |         |                                     | 辐 板        |        |
|-----|-----------|---------------------|------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------|-------------------------------------|------------|--------|
|     |           | 屈服强度                | 抗拉强度             | 伸长率    | 常温            | —20℃          | —40℃          | 硬度      | $K_Q/$                              | 抗拉强度 $R_m$ | 伸长率    |
|     |           | $R_{ch}/\text{MPa}$ | $R_m/\text{MPa}$ | $A/\%$ | $KU/\text{J}$ | $KV/\text{J}$ | $KV/\text{J}$ | (HB)    | ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) | 缩小值/MPa    | $A/\%$ |
| 进口  | ER8       | 580                 | 940              | 17     | 23            | 10            | 6             | 265     | 62.7                                | 195        | 19     |
|     | EN 13262  | ≥540                | 860~980          | ≥13    | ≥17           | ≥10           | —             | ≥245    | —                                   | ≥120       | ≥16    |
| 国产  | D2        | 677                 | 952              | 18     | 23            | 18            | 13            | 270     | 86                                  | 152        | 21     |
|     | TJ/CL 519 | ≥580                | 900~1 050        | ≥13    | ≥17           | ≥10           | ≥7            | 255~300 | ≥70                                 | ≥120       | ≥16    |

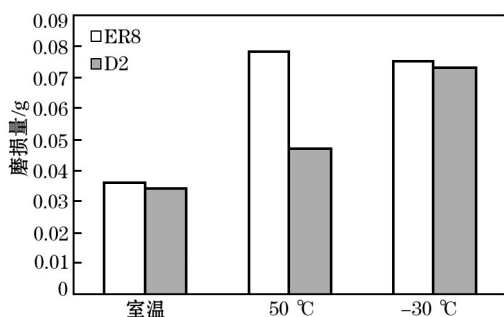


图 6 D2 材料和进口 ER8 材料磨损性能比较

Fig. 6 Wear comparison between D2 wheel and imported ER8 wheel

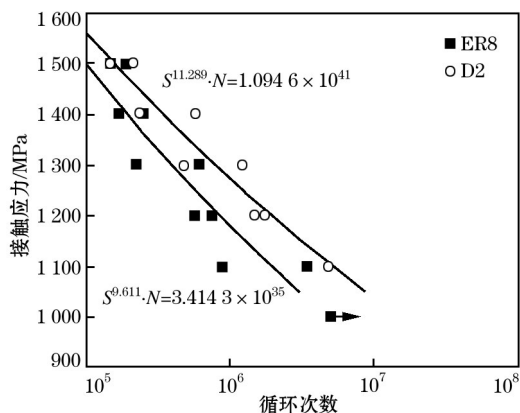


图 7 D2 材料和进口 ER8 材料接触疲劳性能比较

Fig. 7 Contact fatigue performance comparison between D2 wheel and imported ER8 wheel

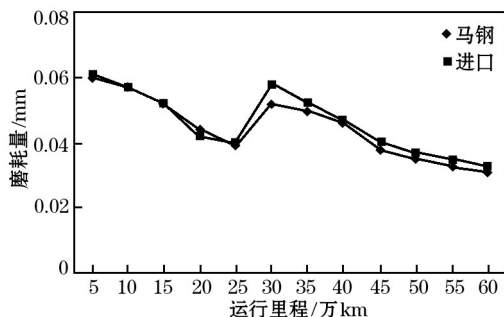


图 8 马钢 D2 车轮与进口 ER8 车轮服役磨耗对比

Fig. 8 Service wear comparison between D2 wheel made by Masteeel and imported ER8 wheel

### 3 应用结果

马钢高速车轮最早在 2002 年投入运用,其中 CL50A 材质车轮在“中华之星”高速列车上装配 126 件,经 60 万 km 装车试验后正式投入运营,服役情况正常。D1 材质高速车轮在 200~250 km CJ1-0302 城际动车组上装配 16 件,完成装车考核并投入运用,累计里程达到 64 万 km。D2 材质高速车轮在复兴号标准动车组上装配 48 件,完成装车考核并投入运用,累计里程已超过 120 万 km,另外, D2 材质车

轮还批量装配在长株潭城际动车上,已投入运用。

马钢高速车轮已通过德铁、韩国、印度市场资质认证,产品实现出口 2 600 余件。1 200 件装配在韩国高速城际列车上车轮累计运行达到 6 年,运行里程超过 100 万 km,服役表现好于韩国进口其他同类产品。

### 4 结语及展望

马钢作为一个为中国铁路事业服务了五十余年的生产基地,在国家的大力支持下,积极配合中国高速铁路的快速发展,从生产装备、工艺技术、管理体制等方面不断创新,构建车轮制造全流程产品研发和质量保证体系<sup>[13]</sup>。目前马钢高速车轮整体技术已达国际先进水平,产品正逐步实现自主化替代,同时出口至国外市场。

在未来产品研发方面,马钢将进行时速 400 km、耐低温、耐腐蚀车轮的前瞻性研发,以满足未来更高时速、特殊服役条件下使用需求,如俄罗斯莫斯科-喀山高铁、东南亚高铁等。

在市场推广方面,国内重点扩大在“复兴号”中国标准动车组上的装用量,同时在既有“和谐号”动车组用维修轮上推广替代进口产品。国外方面开始启动欧洲、北美等国家及地区的高速车轮市场资质认证,继续扩大产品出口量。

#### 参考文献:

- [1] 汪国才,史怀言. 车轮用钢生产的洁净度控制技术[J]. 中国冶金, 2009, 19(9): 36. (WANG Guo-cai, SHI Huai-yan. The cleanliness controlling technology of produced the wheel steel[J]. China Metallurgy, 2009, 19(9): 36.)
- [2] 唐德池,张宏艳,吉立鹏,等. 钙处理车轮钢洁净度[J]. 钢铁, 2018, 53(4): 37. (TANG De-chi, ZHANG Hong-yan, JI Li-peng, et al. Cleanliness of calcium-treated wheel steel[J]. Iron and Steel, 2018, 53(4): 37.)
- [3] 赵东伟,李海波,高攀,等. 非钙处理铝脱氧车轮钢夹杂物形成及变形行为[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 25. (ZHAO Dong-wei, LI Hai-bo, GAO Pan, et al. Inclusion formation and deformation in Al-killed wheel steel without calcium treatment[J]. Iron and Steel, 2016, 51(1): 25.)
- [4] 苏世怀,安涛,龚志翔,等. 马钢系列高品质轮轴产品的开发[C]//第九届中国国际钢铁大会论文集. 北京:中国钢铁工业协会, 2016. (SU Shi-huai, AN Tao, GONG Zhi-xiang, et al. Masteeel's development of high-quality axle products[C]//The 9th China International Steel Congress. Beijing: China Iron and Steel Association, 2016.)
- [5] 高铁见闻. 大国速度:中国高铁崛起之路[M]. 湖南:湖南科学技术出版社, 2017. (High-Speed Rails. Big Country Speed:

- China's High-speed Rail Rise[M]. Hunan: Hunan Science and Technology Press, 2017.)
- [ 6 ] 沈志云, 张卫华, 金学松, 等. 轮轨接触力学研究的最新进展[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 1. (SHEN Zhi-yun, ZHANG Wei-hua, JIN Xue-song, et al. Advances in wheel/rail contact mechanics[J]. China Railway Science, 2001, 22(2): 1.)
- [ 7 ] 季怀忠. 高速列车车轮生产技术[C]//中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2001. (JI Huai-zhong. Production technology of high speed train wheel[C]//China Steel Annual Conference Proceedings. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2001.)
- [ 8 ] 季怀忠, 崔银会, 苏航, 等. 碳含量对高速车轮用钢综合性能的影响[J]. 钢铁, 2005, 40(2): 62. (JI Huai-zhong, CUI Yin-hui, SU Hang, et al. Effect of carbon content on comprehensive properties of wheel steel for high speed train[J]. Iron and Steel, 2005, 40(2): 62.)
- [ 9 ] Sakamoto H, Toyama K. Fracture toughness of medium-high carbon steel for railroad wheel[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 285: 288.
- [ 10 ] 马跃, 潘涛, 江波, 等. S 含量对高速车轮钢断裂韧性影响的
- 研究[J]. 金属学报, 2011(8): 978. (MA Yue, PAN Tao, JIANG Bo, et al. Study of the effect of sulfur contents on fracture toughness of railway wheel steels for high speed train[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011(8): 978.)
- [ 11 ] 沈昶, 乌力平, 苏世怀, 等. 车轮钢的清洁度和夹杂物的控制[C]//第 18 届国际轮轴大会论文集. 成都: 欧洲铁路工业联盟, 欧洲轮对协会, 2016. (SHEN Chang, WU Li-ping, SU Shi-huai, et al. Control of the wheel steel cleanliness and inclusions [C]// 18<sup>th</sup> IWC. Chengdu: UNIFE and ERWA, 2016.)
- [ 12 ] 龚帅, 任学冲, 马英霞, 等. 热处理工艺对高速车轮钢显微组织和断裂韧性的影响[J]. 材料热处理学报, 2015(4): 150. (GONG Shuai, REN Xue-chong, MA Ying-xia, et al. Effect of heat-treatment on microstructure and fracture toughness of high-speed railway wheel steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015(4): 150.)
- [ 13 ] 苏世怀, 安涛, 宫彦华, 等. 铁路车轮材料与技术发展[C]//第 18 届国际轮轴大会论文集. 成都: 欧洲铁路工业联盟, 欧洲轮对协会, 2016. (SU Shi-huai, AN Tao, GONG Yan-hua, et al. Materials and technology development of railway wheels[C]// 18<sup>th</sup> IWC. Chengdu: UNIFE and ERWA, 2016.)

## 《中国冶金》杂志征稿启事

《中国冶金》是由中国科学技术协会主管, 中国金属学会、北京钢研柏苑出版有限责任公司主办的中国金属学会会刊和金属行业综合类科技期刊, 由北京钢研柏苑出版有限责任公司负责编辑出版和发行, 创刊于 1991 年, 现为月刊, 大 16 开。《中国冶金》是“中文核心期刊”, “中国科技核心期刊”, 美国《化学文摘(CA)》收录期刊, ASPT《中国科学文献计量评价数据库》来源期刊, 《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊。

### 1 征稿对象

欢迎从事金属冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理干部等人员投稿, 尤其欢迎广大企业一线工作人员投稿。

### 2 征稿范围

《中国冶金》的报道范围涵盖了钢铁及有色金属矿山地质、采矿、焦化、废钢铁、铁合金、烧结和球团、炼铁、炉外处理、炼钢、连铸、压力加工、材料研究、能源环保等金属冶金工业的主要技术领域, 也征集部分化学化工、新型复合材料等方面的稿件。

栏目设置包括专家论坛、技术综述、专题研究、生产技术、装备技术、节能环保、铁合金、矿业工程与化工、新型复合材料、企业专访、人物专访、冶金科学技术奖、冶金科技英才、学会动态、厂商动态等。其特点是: 既有较高学术水平的创新性研究文章, 又有较高实用价值的技术交流文章, 包括技术发展前沿文章、行业发展方向文章、冶金行业热点问题以

及学会各种会议与活动信息和冶金行业科技信息等。

### 3 投稿和联系方式

(1) 请登录“钢铁期刊网”网站 (<http://www.chinamet.cn>), 点击《中国冶金》的图标或刊名导航条, 进入期刊的首页进行投稿。

(2) 直接登录《中国冶金》网站 (<http://www.zgyj.ac.cn>), 从“作者投稿中心”进行投稿。

编辑部联系人: 曹微言, 魏来

电话: 010-62181032

广告部联系人: 高京慧 010-62183298

发行部联系人: 魏来

电话: 010-62181032

邮箱: CM@chinamet.cn

传真: 010-62185134

通讯地址: 北京市海淀区学院南路 76 号



衷心欢迎广大科技工作者踊跃来稿!