

# 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管研制

余泽金, 裴福莉, 张行刚, 王增海, 王 栋, 赵广林, 米永峰

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管分公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 采用微合金化设计, 以低碳含锰钢为基础, 设计掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管的化学成分。实验室研究及工业试制结果表明, 采用“910 °C 淬火 + 640 °C 回火”调质热处理工艺, 钢管具有优良的低温韧性及强度, 显微组织以贝氏体 + 铁素体为主, 组织晶粒度为 9.0 级, 材料 -90 °C 低温冲击功为 200 J。CTOD(裂纹尖端张开位移) 试验(-10 °C) 结果表明, 裂纹尖端开口位移 > 0.9 mm(要求  $\geq 0.254$  mm)。氢环境下与非氢环境下慢应变拉伸试验材料断面收缩率及延伸率比值均大于 90%, 材料均有良好的抗裂纹扩展、抗氢脆性能。

**关键词:** 微合金化; X52QH 钢级; 无缝钢管; 热处理

中图分类号: TG142.1; TK91

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)04-0030-07

## Development of X52QH Grade Seamless Steel Pipe for Hydrogen Compressed Natural Gas Transportation

Yu Zejin, Pei Fuli, Zhang Xinggang, Wang Zenghai, Wang Dong,  
Zhao Guanglin, Mi Yongfeng

(Steel Pipe Branch Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The chemical compositions of X52QH seamless steel pipe for hydrogen compressed natural gas transportation are designed with microalloying design based on low carbon manganese steel. The results of laboratory studies and industrial trial productions showed that the pipe was with excellent low temperature toughness and strength, its microstructure was mainly bainite + ferrite, grain size of microstructure was grade 9.0 as well as low temperature impact energy at -90 °C of material was 200 J when the quenched - tempered heat treatment process of “910 °C quenching + 640 °C tempering” was adopted. The CTOD (crack tip opening displacement) test (-10 °C) results showed that crack tip opening displacement > 0.9 mm (required to be  $\geq 0.254$  mm). In the environments with and without hydrogen, the reduction of area and elongation of slow strain rate test materials are all over 90% so that they are with good crack extension resistance and hydrogen embrittlement resistance.

**Key words:** microalloying; X52QH grade; seamless steel pipe; heat treatment

全球范围内氢能产业发展强劲, 多国相继发布氢能发展战略, 我国于 2022 年 3 月首次发布《氢能

产业发展中长期规划(2021—2035 年)》, 在“十四五”重点科技研发计划中更加明确提出将氢能利用

发展作为我国目前科技产业发展的重点研究方向,这一强劲势头正在加速包括氢气生产、运输、储存、分销、零售和终端产业链上应用成本的降低,且快速推动规模化应用<sup>[1]</sup>。钢管分公司密切关注内蒙古周边输氢管道工程项目,通过介入下游用户,充分了解用户对产品性能的要求,将掺氢、纯氢输送管研发作为重要课题,以满足客户个性化需求。

钢管分公司开发了掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管全流程生产工艺,制备出了规格为  $\Phi 457 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$  掺氢混输用无缝钢管,应用于国内首条掺氢混输天然气管道示范项目。材料成分设

计以低碳当量为基础,采用纯净钢冶炼工艺,使用优质原料,实现窄成分、低有害元素、低碳当量的优质钢坯生产。通过高均匀度热处理工艺,实现产品低温高韧性指标要求,确保产品在寒冷环境的安全服役。产品通过氢环境下的慢应变速率拉伸试验、CTOD 试验、氢致开裂试验(HIC),产品性能满足输送压力 6.3 MPa 及 10% 掺氢比例工况设计要求。

## 1 主要技术指标

掺氢天然气输送用 X52QH 钢级管线用无缝钢管的化学成分和机械性能要求分别见表 1、表 2。

表 1 X52QH 钢级无缝钢管化学成分要求(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Nb + V + Ti	CEIW
≤0.12	≤0.40	≤1.35	≤0.010	≤0.003	≤0.12	≤0.19

注:  $\omega(\text{Cu}) \leq 0.1\%$ ,  $\omega(\text{Cr}) \leq 0.3\%$ ,  $\omega(\text{Mo}) \leq 0.15\%$ ,  $\omega(\text{Ni}) \leq 0.30\%$ ,  $\omega(\text{B}) \leq 0.00050\%$ 。

表 2 X52QH 钢级无缝钢管力学性能要求

$R_{0.5}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$R_{0.5}/R_m$	$A/\%$	硬度 HV10	$KV_8(-10^\circ\text{C}, \text{横向})/\text{J}$	剪切面积比/ $\%$
360 ~ 525	460 ~ 625	≤0.93	≥ $A_{\min}$	≤230	≥94	≥85

表 2 中伸长率最小值  $A_{\min}$  应按以下公式计算:

$$A_{\min} = 1940 \times A_{\text{XC}}^{0.2} / U^{0.9} \quad (1)$$

式中:  $A_{\min}$  为标距为 50 mm 试样最小伸长率,圆整到最邻近的百分数;  $A_{\text{XC}}$  为拉伸试样的横截面积,按以下方法确定:

(1) 直径 12.7 mm 和 8.9 mm 的圆棒试样为 130 mm<sup>2</sup>; 直径 6.4 mm 的圆棒试样为 65 mm<sup>2</sup>;

(2) 板状试样规定宽度与钢管规定壁厚计算的横截面积和 485 mm<sup>2</sup> 两者中较小值,圆整到最邻近的 10 mm<sup>2</sup>。

$U$  为规定钢级的抗拉强度最小值<sup>[2]</sup>。

## 2 化学成分设计

由于掺氢天然气输送用无缝钢管服役条件较为苛刻,钢管应具有一定强度同时要求具有较低脆性转变温度,保证产品具有良好的抗氢脆性能和焊接性能。随钢中碳元素含量的增加,钢管的强度与硬度随之增加,而母材的塑性、低温韧性随之降低,无缝钢管的冷裂纹敏感性也会增加<sup>[3]</sup>。为了保证钢管母材具备优良的焊接性能,本文研究的掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管碳含量控制在

0.12% 以内。为了提高钢管母材的强度,在满足钢管碳当量及韧性的前提下,适量加入微合金化元素。锰元素是扩大奥氏体相区的合金元素,可以促进奥氏体组织晶粒长大,同时锰元素在钢中与铁元素形成一定的固溶体,对奥氏体和铁素体起到一定强化作用,而生成的 MnS 可以防止钢中硫元素导致的热脆效应;锰元素能明显降低钢奥氏体相变的速率及临界相变温度  $A_{r1}$ , 能够提高钢管的淬透性,但过高锰含量会增加钢管的回火脆性以及钢管的过热敏感性,因此锰元素设计含量不超过 1.35%。钢中钛元素可以通过形成细小弥散的化合物,在相变过程中细化组织晶粒,在焊接过程中抑制环焊缝及热影响区组织晶粒急剧增大,降低焊缝过热敏感性。

掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管以低碳含锰钢为基础,加入适量的微合金化钛元素<sup>[4]</sup>,通过“淬火+回火”调质热处理工艺,充分发挥钢中合金元素的作用,以细化晶粒和第二相粒子析出强化方式来保证材料的强度和韧性。设计钢种的化学成分尽可能降低硫、磷等有害元素的含量,从而保证材料的低温韧性,降低因硫化物导致的氢致裂纹和应力腐蚀开裂<sup>[5]</sup>。

### 3 CCT 曲线测定

在实验室测定掺氢天然气输送用 X52QH 钢级

无缝钢管用钢 CCT 曲线,得到不同冷却速率下显微组织,显微组织如图 1 所示,CCT 曲线图如图 2 所示。

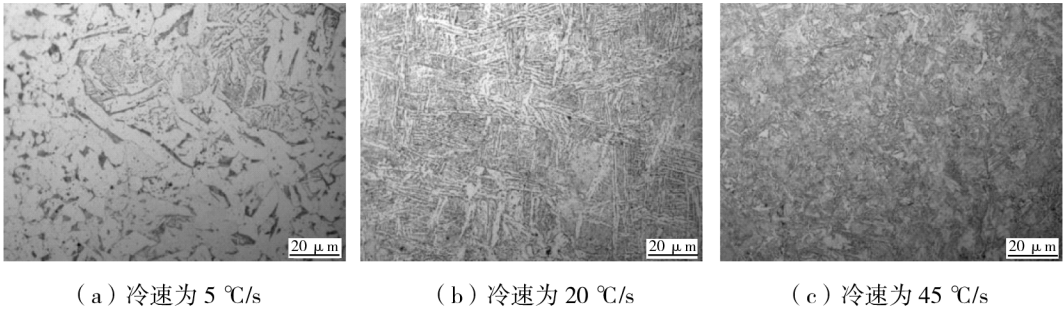
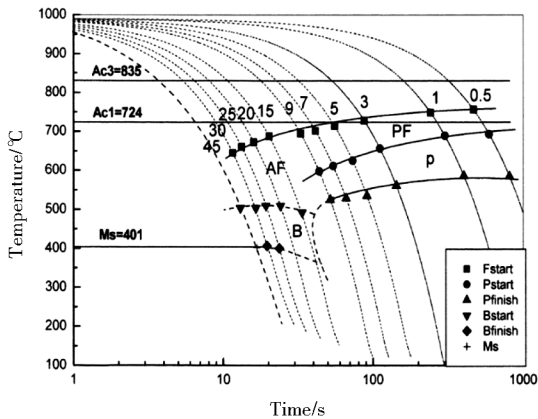


图 1 不同冷速下 X52QH 钢级无缝钢管用钢显微组织照片



冷速从左到右依次是 45 °C/s、30 °C/s、25 °C/s、20 °C/s、15 °C/s、9 °C/s、7 °C/s、5 °C/s、3 °C/s、1 °C/s、0.5 °C/s

图 2 X52QH 钢级无缝钢管用钢 CCT 曲线

由于掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管用钢为低碳亚共析钢,材料的 CCT 曲线图上分别存在铁素体组织转变区、珠光体组织转变区、贝氏体组织转变区和马氏体组织转变区。随着冷却速率的逐渐降低,可以获得不同转变量的显微组织。在实验室条件下测得试验钢相变临界点  $Ac_1 = 724\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $Ac_3 = 835\text{ }^\circ\text{C}$ ,材料的平均线膨胀系数为  $1.463\ 2 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

当冷速在 0.5 ~ 5.0 °C/s 之间时,显微组织主要为少量珠光体和晶粒较为粗大的多边形铁素体,随着冷速的逐渐增大,铁素体开始细化,珠光体也开始退化;当冷速在 5.0 ~ 15 °C/s 之间时,铁素体进一步得到细化,有极少量的针状铁素体,珠光体组织转变基本消失,开始转变贝氏体组织,随着冷速的继

续增大,贝氏体组织所占的比例增大;当冷速在 15 ~ 45 °C/s 之间时,铁素体和珠光体组织转变基本完成,显微组织以贝氏体为主,在钢管的内表面开始出现马氏体组织,随着冷速的进一步增大,马氏体组织所占的比例越来越大。

## 4 试制过程

### 4.1 生产工艺流程

铁水→铁水脱硫预处理(KR)→顶底复吹转炉冶炼(120 t)→LF 精炼→VD 真空脱气→圆坯连铸→圆坯加热→初轧穿孔→PQF 热连轧→钢管定径→钢管冷却→锯切(定尺)→钢管漏磁探伤检测→调质热处理→超声探伤→钢管水压测试→人工钢管表面、尺寸检查→钢管倒棱→测长、称重、喷标→入库。

### 4.2 炼钢

预脱硫的铁水经过 120 t 顶底复吹转炉冶炼,化学成分及温度达到工艺要求后配合 LF 炉外精炼 + VD 真空脱气处理,实现了钢液低碳、低磷硫、低夹杂物含量、高纯净度及窄成分控制,钢液由弧形连铸机制成外径为 390 mm 圆管连铸坯。转炉工艺采用单渣冶炼生产工艺,冶炼初期利用钢液处于相对低温条件下实现快速脱磷,在精炼的中后期采用 LF + VD 组合冶炼(炉外精炼全程吹氩气),实现快速脱硫、脱气以及去除非金属夹杂物。在 LF 精炼过程中使用铝粒和碳化硅颗粒进行脱氧处理。

### 4.3 热轧

掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管生产采用外径 390 mm 连铸圆坯在  $\Phi 460\text{ mm}$  PQF 热连

轧管机组轧制成型。将连铸圆坯料锯切定尺后装入环形炉中加热,通过锥形穿孔机穿孔轧制成毛管,再经 PQF 连轧管机组轧制成荒管,荒管再经过微张力减径机减径为  $\Phi 457 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$  的成品无缝钢管,随后成型的钢管通过冷床冷却,进入精整线进行相应后续工序处理。

#### 4.4 调质热处理

未经热处理的热轧态无缝钢管的各项力学性能不能完全满足用户及相关标准的要求,为了达到相应性能指标,需要对热轧态无缝钢管进行调质热处理。尤其是得到较低的脆性转变温度、低温韧性、组织晶粒细化均需对热轧后的无缝钢管进行热处理,调质热处理工艺采用“淬火+回火”工艺。通过升温、冷却过程中钢显微组织的相变来细化组织晶粒,使钢管的组织晶粒度达到 8.0 级以上,组织晶粒细化在提高钢管韧性的同时,也能提高钢管的抗拉强度,使钢管具有良好的强韧性匹配<sup>[6]</sup>。

组织均匀、晶粒细化的显微组织可以提高钢管力学性能的稳定性,热处理过程中,若淬火温度低,钢中存在碳化物溶解不充分,则钢的奥氏体组织及成分不均匀;当奥氏体中固溶的碳元素及其他合金元素含量相对较低,热处理回火过程中第二相析出量较低,最终影响材料的力学性能;若淬火加热温度过高,则易导致奥氏体组织晶粒粗大,降低钢管的冲击韧性及性能的稳定性。

掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管用钢为低碳亚共析钢,依据热处理手册,热处理淬火温度范围在  $A_{c3}$  ( $A_{c3} = 835 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 以上  $30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,由于加热的钢管从淬火炉出来到水淬位置过程中存在一定温降,同时考虑到炉温与管体的实际温差,导致钢管在水淬时的温度降低,给予一定的温度补偿,故淬火

温度设为  $910 \text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间为  $t$  (min),使钢的显微组织完全奥氏体化。保温时间为  $t$  计算依据经验公式:

$$t = a \cdot K \cdot D \quad (1)$$

式中: $t$  为加热保温时间,min; $a$  为材料系数,取 1.0; $K$  为装炉系数,取 1.4; $D$  为钢管的实际壁厚,取 11 mm。

计算得到淬火保温时间为 15 min 左右。

回火热处理的作用是降低钢管因淬火产生的残余应力,提高钢管的塑性及韧性,细化组织,提高钢管各项力学性能的稳定性。依据实验室研究结果,同时综合考虑钢管的强度、低温冲击韧性、伸长率等力学性能要求,热处理生产工艺为淬火温度为  $910 \text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间为 15 min,水冷;回火温度为  $640 \text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间为 90 min,空冷。具体热处理的工艺制度如图 3 所示。

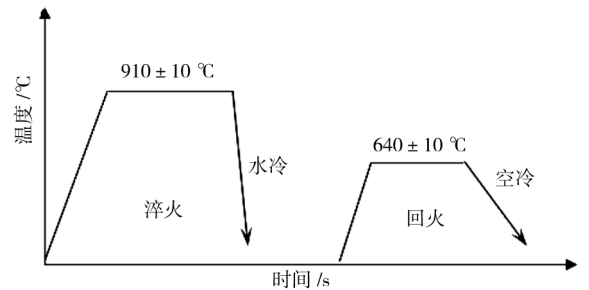


图3 热处理工艺制度

## 5 试制结果及性能评价

### 5.1 化学成分和相关性能检测结果

掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管的主要化学成分见表 3,钢管热处理后力学性能见表 4。

表3 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	%
≤0.12	≤0.30	≤1.35	≤0.010	≤0.003	≤0.020	≤0.045	

表4 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管的力学性能

$R_{0.5}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$R_{0.5}/R_m$	$A/\%$
374	508	0.74	38
383	511	0.75	38

取热处理后钢管进行系列温度冲击性能检测,具体试验温度及对应的冲击功见表 5。

对热处理后钢管管壁进行内、中、外维氏硬度检测,具体检测值见表 6。



表9 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管晶粒度级

编号	晶粒度
1	9.5
2	10.0
用户要求	$\geq 9.0$

表10 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管带状组织级

编号	带状组织
1	0.5
2	0.5
用户要求	$\leq 2$

表11 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管 CTOD 试验数据

编号	预制疲劳裂纹参数		CTOD 试验				
	载荷比 $R$	$Kf_{\max}$ /MPa $\cdot$ m <sup>1/2</sup>	$a_0$ /mm	位移控制加载速率 /(mm $\cdot$ min <sup>-1</sup> )	$V_p$ /mm	$F_m$ /N	$\delta_m$ /mm
1	0.1	24	12.18	1	5.268	9 533	1.052
2	0.1	24	12.56	1	4.753	8 335	0.906
3	0.1	24	12.46	1	5.406	9 208	1.044

注： $a_0$  为初始裂纹长度，mm； $V_p$  为  $V$  的塑性分量，mm； $F_m$  为预制疲劳裂纹时最大力，N； $\delta_m$  为裂纹尖端张开位移（CTOD），mm。

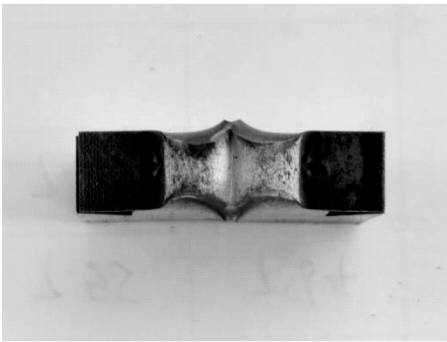


图5 CTOD 断口照片

按照 GB/T 34542.2—2018 要求，在室温下采用带有环境箱的万能试验机对试样进行环境拉伸试验。拉伸试样分别在 6.3 MPa ( $N_2$ )、6.3 MPa (10%  $H_2$ ) 中进行，应变速率为  $1 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，采用相对延伸率和相对断面缩率比较拉伸试验样品的氢脆敏感性，慢应变拉伸曲线见图 6。

慢应变拉伸试验结果表明，掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管氢环境下平均断面延伸率为 30.82%，氮气环境下平均断面延伸率为 31.65%，测得相对断面延伸率为 97.38%；氢环境下平均断面收缩率为 77.33%，氮气环境下平均断面收缩率为 84.19%，测得相对断面收缩率为 91.85%。

通过调质热处理，掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管的组织细致、晶粒均匀，保证了材料具有良好的强韧性匹配，

## 5.2 CTOD 及慢应变拉伸试验

按照 GB/T 21143—2014 进行试样制备，每组试验选取 3 个试样，取样方向为纵向，缺口垂直于钢管表面，每根钢管的母材在  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  下进行 CTOD 试验，试验结果不低于 0.254 mm 为合格。具体试验结果分别见表 11 和图 5。

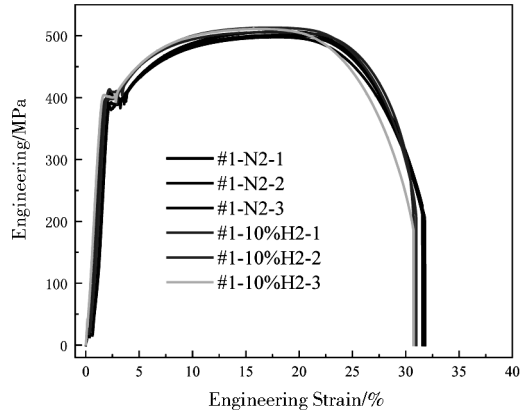


图6 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管慢应变拉伸曲线

由 CTOD 试验数据可看出，掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管在  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  条件下，裂纹尖端开口位移  $> 0.9\text{ mm}$ （要求  $\geq 0.254\text{ mm}$ ）；氢环境下与非氢环境下慢应变拉伸试验后，掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管断面收缩率及延伸率比值均大于 90%。试验结果表明，掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管具有良好的裂纹止裂性能及抗氢脆性能。

## 6 结论

(1) 采用微合金化技术,以低碳含锰钢为基础设计掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管的化学成分,采用“910 ℃ 淬火 + 640 ℃ 回火”热处理工艺,材料强韧性匹配良好。

(2) 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管显微组织为贝氏体 + 铁素体,组织晶粒度达 9.0 级以上;材料在 -90 ℃ 冲击功为 200 J, HIC 试验中各项裂纹敏感率均为 0,材料具有优异的低温韧性及抗氢致开裂性能。

(3) 母材 CTOD 试验(-10 ℃)测试结果及氢环境下慢应变拉伸试验结果表明,材料具良好的裂纹止裂性能及抗氢脆性能,掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管相关力学性能满足输送压力为 6.3 MPa 及掺氢比例为 10% 的工况设计要求。

### 参 考 文 献

[1] 任若轩,游双娇,朱新宇,等. 天然气掺氢输送

技术发展现状及前景[J]. 油气与新能源, 2021, 33(3): 26-31.

[2] API SPEC 5L, 管线钢管: 第 46 版[S].

[3] 彭自胜, 谢凯意, 孙群峰. X60 级海底管线管的研制开发[J]. 中国冶金, 2008, 18(11): 27-29.

[4] 孔祥磊, 黄国建, 黄明浩, 等. X80 管线管成分工艺与组织性能研究[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(24): 20-23.

[5] 张宝昌. 有色金属及其热处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1993.

[6] 胡克迈, 傅继成, 张传友. X56 钢级海底无缝钢管的研制[J]. 钢管, 2006, 35(1): 43-46.

(上接第 24 页)

(3) 断口处观察到异常大型夹杂物。钢轨母材中存在外来夹杂物是导致断口轨底角上表面出现异常大型夹杂物的一个重要原因。

### 参 考 文 献

[1] 张琪, 李力, 宋宏图, 等. 无缝线路钢轨焊接技术发展现状及趋势[J]. 热加工工艺, 2017, 46(3): 10-12.

[2] 刘宝海. 钢轨焊接方法与焊接接头的质量控制研究[J]. 中阿科技论坛(中英阿文), 2019(1): 57-59, 74.

[3] 范华, 王瑞军, 郝玉朋, 等. 钢轨闪光焊接头近表面裂纹缺陷研究[J]. 高速铁路新材料, 2024, 3(3): 80-85.

[4] 张天庆. 重载铁路钢轨的伤损及预防维护对策[J]. 工程技术研究, 2016(5): 148, 150.

[5] 许鑫. 某高速铁路固定式闪光焊接头伤损原因检验分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 218-224.

[6] 刘南. 重轨钢中非金属夹杂物控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.