

裂扩门槛值试验数据与钢轨性能关系的探讨

李培德, 梁正伟, 贾鹏霞, 李静, 杨静, 苏丽丽

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古包头 014010)

摘要: 文章在 U71Mn、U75V 和 U20Mn 淬火轨、以及加稀土镧和铈的 U75V 试验钢裂扩门槛值 ΔK_{th} 试验的基础上, 通过试验获取的数据和图表, 分析了钢轨组织、夹杂物、氢超标和残余应力等因素与 Crack Length - Cycle 曲线的关系, 以及钢轨加入稀土镧合金、铈合金之后对钢轨裂纹扩展的影响, 为分析钢轨性能、延长钢轨寿命提供新的手段。

关键词: 钢轨; 门槛值 ΔK_{th} ; 裂纹扩展速率; 金相组织; 夹杂物; 残余应力

中图分类号: TB302.3

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)04-0089-06

Discussions on Relation between Test Data of Threshold Values of Crack Expansion and Performances of Rails

Li Pei-de, Liang Zheng-wei, Jia Peng-xia, Li Jing, Yang Jing, Su Li-li

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

Abstract: In the paper, the relations between such factors as the microstructure of rails, inclusions, excessive hydrogen and residual stress and Crack Length - Cycle curve are analyzed through the data and diagrams obtained by the tests based on the test of threshold value of crack expansion ΔK_{th} for U71Mn, U75V and U20Mn quenched rails as well as U75V test steel with the rare earth, lanthanum and cerium. Moreover, the effects of adding the rare earth, lanthanum alloy and cerium alloy into rails on crack growth of rails are analyzed, which could provide new means for analyzing the performances of rails and prolonging service life of rails.

Key words: rail; threshold value ΔK_{th} ; crack growth rate; metallographic structure; inclusions; residual stress

随着我国铁路重载、提速的迅猛发展, 对钢轨性能要求也越来越高, 钢轨长期在复杂交变应力的作用下, 疲劳性能成了影响寿命和安全性的关键因素, 特别是由疲劳引起的核伤、剥离掉块、开裂断轨, 有可能导致严重事故, 使人身、财产安全遭到重大损失。疲劳裂纹扩展速率门槛值 ΔK_{th} 是钢轨损伤容

限设计的一个重要参数, 是衡量钢轨疲劳性能的重要指标, 囊括钢轨从接近 K_{IC} 到门槛值 ΔK_{th} 所有裂纹扩展速率数据, 这些数据 and 图表能够综合反映钢轨的性能。

本文归纳了钢轨疲劳裂纹扩展速率门槛值 ΔK_{th} 检测中获取的数据和图表, 对影响钢轨疲劳裂

纹扩展速率的因素进行了分析,探讨了裂扩数据和图表与钢轨性能的关系,对提高钢轨质量、延长钢轨寿命的研究和钢轨事故分析具有参考意义。

1 试验方法与装置

理论上,疲劳裂纹扩展速率 $da/dN = 0$ 所对应的应力强度因子 ΔK 为门槛值,目前工程中规定用 $da/dN = 10^{-7}$ mm/cycle 所对应的 ΔK 值作为门槛值,美国试验与材料学会 (ASTM) 和中国国家标准 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率》^[1] 也采用此规定,本文试验参照国标 GB/T 6398—2000 的方法,采用降 ΔK 法,试验波形为正弦波,频率为 30 Hz,试验温度为室温,所有的试验都在

MTS810 电液伺服疲劳试验机上进行。

2 试样与试验材料

试样严格按照 TB/T 2344—2020《43 kg/m ~ 75 kg/m 热轧钢轨订货技术条件》^[2] 规定选取制样位置,以钢轨轨头断面中心线为中心取 20 mm,踏面以下 2 mm 处向下取 45 mm,试样规格为 45 mm × 20 mm × 180 mm。

试验材料选取轨梁厂生产的 U75V 60 kg/m 淬火轨、U71Mn 60 kg/m 淬火轨、U20Mn 60 kg/m 淬火轨,以及技术中心加稀土铈和加稀土镧 U75V 钢轨试验钢,表 1 为其力学性能和金相组织。

表 1 常温下钢轨的力学性能和金相组织

试样编号	品名或规格	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	金相组织
16801151	U75V 淬火轨	837	1 256	14.0	P + F(少)
16901669	U71Mn 淬火轨	729	1 148	14.5	P + F(少)
283	U20Mn 淬火轨	1 182	1 358	15.5	B + M + A(少)
4	U75V 试验钢(加稀土铈)	845	1 220	13.0	P + F(少)
5	U75V 试验钢(加稀土镧)	850	1 228	13.5	P + F(少)

3 结果与讨论

疲劳裂纹扩展速率门槛值 ΔK_{th} 检测可以获得从疲劳裂纹起裂点到门槛值 ΔK_{th} 的全程数据和图表。由于疲劳裂纹总是沿着耗能低、阻力小的路径扩展,所以全程疲劳裂纹扩展速率门槛值 ΔK_{th} 数据和图表能够综合反映钢轨性能。

理想的 Crack Length - Cycle 曲线如图 1 所示,理想的 da/dN - ΔK 曲线如图 2 所示,全程平滑光滑,严格按照材料在应力强度因子 ΔK 作用下的固有曲线变化,代表材料化学成分稳定,金相组织大小和分布均匀,夹杂物等缺陷小而少,残余应力小。图 3 为 U75V 淬火轨的 Crack Length - Cycle 曲线,图 4 为 U75V 淬火轨的 da/dN - ΔK 曲线, da/dN 的数值明显有波动,不平滑,这一特征反映了钢轨化学成分、显微组织、氢含量、夹杂物和残余应力等的特性,而化学成分、显微组织、氢含量、夹杂物和残余应力等特性的分析,可解释钢轨性能变化的原因。

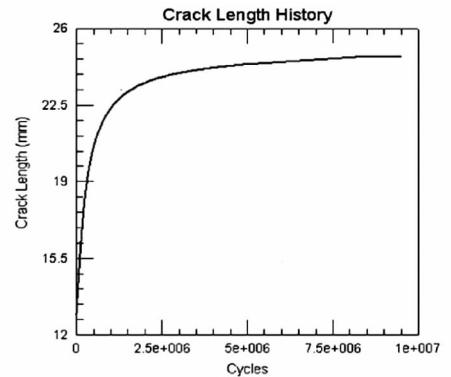


图 1 理想的 Crack Length - Cycle 曲线图

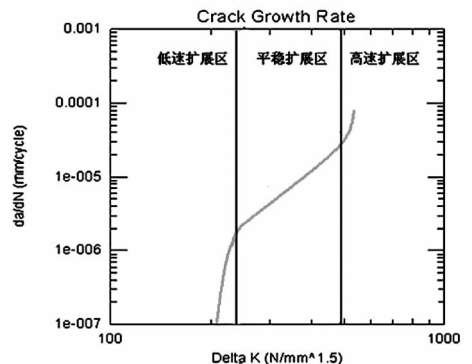


图 2 理想的 da/dN - ΔK 曲线图

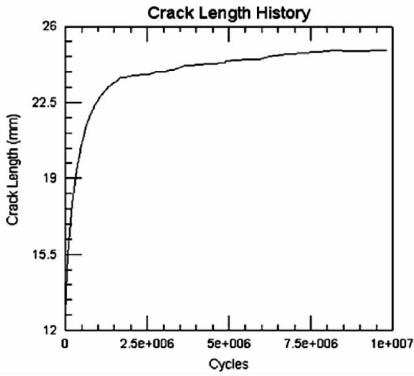


图3 实测 U75V 淬火轨 Crack Length - Cycle 曲线

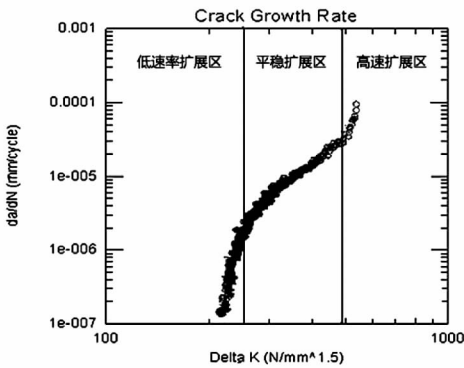


图4 实测 U75V 淬火轨的 da/dN - Deltak 曲线

3.1 不同组织、夹杂物与 Crack Length - Cycle 曲线的关系

裂纹尖端一般为沿晶或穿晶扩展,或者两者兼

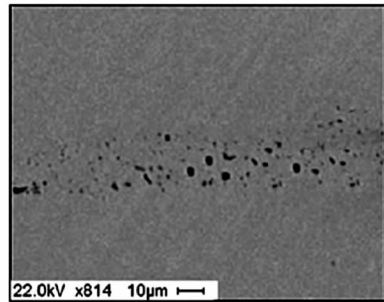
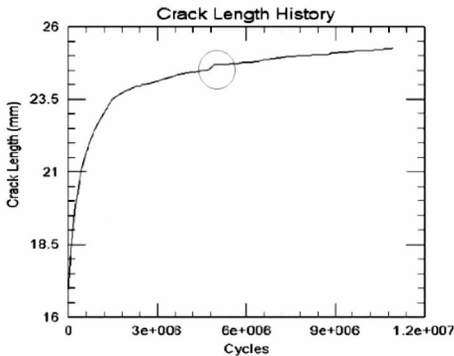


图5 U71Mn 淬火轨裂纹扩展速率突变位置与夹杂物形貌

具。组织不同,晶粒大小、取向和分布不同都会影响裂纹扩展速率,造成 Crack Length - Cycle 曲线的波动、不平滑。如果组织中有夹杂物,由于夹杂物的塑性和韧性低,造成裂纹扩展速率加速,会使 Crack Length - Cycle 曲线产生较大跳动。

在轨梁厂生产的编号为 16901669 的 U71Mn 60 kg/m 淬火钢轨门槛值检测过程中,裂纹扩展速率符合标准,见表 2,裂纹扩展速率突变位置与夹杂物形貌见图 5。

表 2 U71Mn 60 kg/m 淬火轨裂纹

名称	扩展速率 (da/dN)	
	$\Delta K = 13.5 \text{ MPam}^{1/2}$	$\Delta K = 10 \text{ MPam}^{1/2}$
标准要求	55×10^{-6}	17×10^{-6}
16901669 - 5 试样	21.6×10^{-6}	10.8×10^{-6}

从图 5 清晰可见, Crack Length - Cycle 曲线出现突然加速后变为正常,这是由于钢轨扩展阻力突然变小而产生的跳变,从 Crack Length - Cycle 曲线中可以确定裂纹扩展速率突变位置在距裂纹起点 24.6 mm 处。磨制金相试样,观察裂纹区域,发现长条状连续颗粒状夹杂物,夹杂物成分主要为 Si、Al、Ca、O 等。由于夹杂物破坏钢轨组织的连续性,降低了钢轨强度和塑性,同时会产生应力集中,在外载荷作用下裂纹尖端快速扩展,造成裂纹扩展速率的跳升,裂纹通过夹杂物后,裂纹扩展速率变为正常。

通常 Crack Length - Cycle 曲线轻微的波动,大多是由于显微组织大小和分布不均匀以及显微组织

中的弱相造成的。对于 U71Mn 这样的珠光体钢轨,细化钢轨珠光体团块尺寸并均匀分布,减小珠光体

片间距,降低钢中硫和夹杂物含量以及改善夹杂物形态,可以提高钢轨韧性和疲劳裂纹扩展抗力^[3],不仅使得裂纹萌生和裂纹扩展速率变慢,而且提高裂纹扩展速率门槛值,增大钢轨损伤容限,有效地提高钢轨的寿命和使用安全性。

3.2 氢超标与 Crack Length - Cycle 曲线的关系

通常,氢造成较大危害需要满足三个条件:一定的浓度、一定的应力和敏感的显微组织。其中马氏体组织伴有较大的相变应力,对氢脆最敏感,其次为贝氏体。

对轨梁厂委托编号为 283 的 U20Mn 60 kg/m 淬火贝氏体钢轨进行裂纹扩展速率检测,数据严重超过 TB/T 2344—2020《43 kg/m ~ 75 kg/m 热轧钢轨订货技术条件》要求的数值,见表 3, Crack Length - Cycle 曲线见图 6,裂扩断口 SEM 形貌见图 7。

表 3 U20Mn 60 kg/m 淬火贝氏体钢轨裂纹

名称	扩展速率 (da/dN) mm/cycle	
	$\Delta K = 13.5 \text{ MPam}^{1/2}$	$\Delta K = 10 \text{ MPam}^{1/2}$
标准要求	55×10^{-6}	17×10^{-6}
283-3 试样	55.4×10^{-6}	64.8×10^{-6}

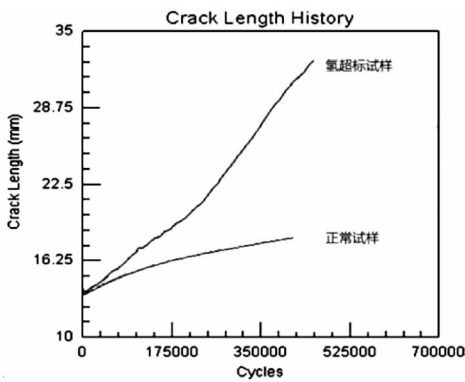


图 6 淬火贝氏体钢轨 Crack Length - Cycle 曲线

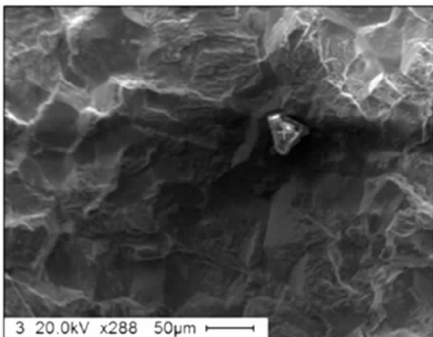


图 7 淬火贝氏体钢轨裂扩断口 SEM 形貌

从图 6 的 Crack Length - Cycle 曲线上可以看到,氢超标试样裂纹扩展速率远超正常值,并且随着 ΔK 的降低,正常试样疲劳裂纹扩展速率会降低,氢超标试样疲劳裂纹扩展速率不降反升。通过对试样进行气体含量和金相检验,发现贝氏体钢轨试样氢含量高达 0.000 90% (标准要求不大于 0.000 25%);金相断口扫描观察,发现局部沿晶断裂^[4]。

为了更加全面的了解氢含量对裂纹扩展速率的影响,查阅过去多年钢轨疲劳裂纹扩展速率试验数据和氢含量数据,结果发现,当氢含量较低时,钢轨中的氢对疲劳裂纹扩展速率影响有限,而当氢含量较高,特别是超过铁标 TB/T 2344—2020 规定的 0.000 25% 时,由于大量的氢在裂纹尖端聚集,产生应力集中,叠加试验加载的应力强度因子 ΔK 的作用,加快了钢轨的裂纹扩展速率,同时,形成的氢化物在晶界的聚集,与钢中的第二相作用,使钢基体晶界结合力减弱而导致钢晶界局部脆化,发生脆性沿晶开裂,进一步加快裂纹扩展速率;另一方面,该试样主要组织为对氢敏感的马氏体、贝氏体,间接加快了裂纹扩展速率,且检测不到门槛值 ΔK_{th} 。

王鹏飞等人通过生产试验数据分析指出^[5],轨梁厂冶炼贝氏体钢液中的氢主要来源于转炉出钢过程中加入合金、渣料中的水分,通过新增合金烘烤装置及优化 VD 真空设备的脱氢能力,可大幅降低贝氏体钢液中氢含量,可有效避免“氢脆”的产生,从而大幅降低钢轨的疲劳裂纹扩展速率,提高钢轨性能。

3.3 残余应力与 Crack Length - Cycle 曲线的关系

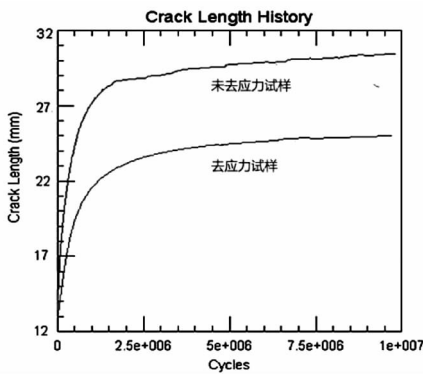
在钢轨的生产过程中,轧制、热处理、冷却、矫直等工艺都会产生残余应力,热应力与相变应力是钢轨产生残余应力的主要原因;此外,为了满足钢轨平直度的要求,对钢轨矫直,也会使钢轨内部产生残余应力。由于钢轨残余应力大小、方向、分布复杂,很难用力学解析公式精确表征残余应力对疲劳裂纹扩展速率的影响,只能通过试验的方法检测。

轨梁厂委托一组 U75V 淬火轨进行裂纹扩展速率试验。经检测,化学成分和金相组织正常,拉伸强度、硬度和冲击功等指标都合格,但轨头残余应力大于 365 MPa,远超标准要求的不大于 250 MPa。对该钢轨分两组进行疲劳裂纹扩展速率试验,一组未去应力,直接加工成试样检测,另一组对钢轨进行 24 h 低温退火去应力,加工试样后时效 20 天后检测,检测数据见表 4, Crack Length - Cycle 曲线见图 8。

表4 U75V 60 kg/m 淬火轨疲劳裂纹扩展速率 (da/dN)

mm/cycle

项目	编号	$\Delta K = 13.5 \text{ MPam}^{1/2}$	$\Delta K = 10 \text{ MPam}^{1/2}$
未去应力试样	16801151 - 1	46.5×10^{-6}	28.7×10^{-6}
	16801151 - 2	54.3×10^{-6}	31.6×10^{-6}
	16801151 - 3	53.2×10^{-6}	30.1×10^{-6}
	16801151 - 4	24.6×10^{-6}	10.7×10^{-6}
去应力试样	16801151 - 5	23.4×10^{-6}	11.5×10^{-6}
	16801151 - 6	22.8×10^{-6}	10.1×10^{-6}

图8 U75V 60 kg/m 淬火轨
Crack Length - Cycle 曲线

如图8所示,比较16801151-3(U75V钢轨未去应力)试样和16801151-4(U75V钢轨去应力)试样 Crack Length - Cycle 曲线,残余应力超标的试样 Crack Length - Cycle 曲线明显波动较大,相同疲劳

周次下,裂纹扩展长度远超去应力试样的数值,且未去应力试样的扩展速率对高应力强度因子敏感,对低应力强度因子敏感程度降低。

残余应力是钢轨疲劳裂纹萌生与扩展的重要影响因素之一,出厂钢轨的残余应力来源于生产过程,所以要严格控制轧制、热处理和矫直工艺,减小出厂钢轨的残余应力,特别是钢轨轨头的拉应力,可有效降低 da/dN 数值。

3.4 加稀土合金与 Crack Length - Cycle 曲线的关系

钢轨的疲劳裂纹扩展行为除了受夹杂物、氢含量和残余应力的影响,加入不同合金(如稀土)对裂纹扩展行为的也有显著影响。

技术中心钢轨所委托的加稀土铈合金、镧合金的U75V钢轨试验钢两组试样,对其进行疲劳裂纹扩展速率性能比较,结果见表5,疲劳裂纹扩展 Crack Length - Cycle 曲线见图9和图10。

表5 U75V 钢轨试验钢疲劳裂纹扩展速率 (da/dN)

mm/cycle

项目	$\Delta K = 13.5 \text{ MPam}^{1/2}$	$\Delta K = 10 \text{ MPam}^{1/2}$
标准要求	55×10^{-6}	17×10^{-6}
16801151 - 8(U75V 未加稀土试样)	21.7×10^{-6}	11.9×10^{-6}
16801151 - 9(U75V 未加稀土试样)	22.5×10^{-6}	12.1×10^{-6}
4 - 4(U75V 加稀土铈合金试样)	29.5×10^{-6}	14.6×10^{-6}
5 - 3(U75V 加稀土镧合金试样)	25.5×10^{-6}	13.3×10^{-6}

由图9、图10可见,加稀土铈合金试样和加稀土镧合金试样的U75V钢轨试验钢疲劳裂纹扩展速率性能比未加稀土的U75V钢轨试样差,特别是加稀土铈的试样在应力强度因子 ΔK 逐渐降低过程中,疲劳裂纹扩展速率有明显加速,说明在低应力载荷情况下,抵抗疲劳裂纹扩展能力差。比较加稀土镧合金试样和加稀土铈合金试样疲劳裂纹扩展速率

性能,加稀土镧合金的U75V钢轨试验钢试样比加稀土铈合金的U75V钢轨试验钢试样略好。

钢中加入稀土的作用是脱氧、脱硫、固溶强化、夹杂物变性和微合金化。稀土与氧和硫的亲合力比其他元素强,钢液在氧和硫存在的条件下,优先生成稀土硫化物,所以脱氧、脱硫会消耗稀土;固溶强化、夹杂物变性和微合金化对炼钢、精炼及连铸生产

技术要求很高,需要严格控制钢中的硫含量和氧含量,提高钢的纯净度,确保稀土存量对显微组织和性能的作用,使稀土在钢中的固容量增加,充分发挥稀土元素的微合金化的作用。

大量文献指出加入稀土对珠光体钢轨性能有正向影响,这与钢的成分波动小、硫含量、氧含量和夹杂物大幅降低、钢质稳定和纯净度提高相关;对于 U75V 钢轨,与轧制工艺和热处理工艺减小珠光体片间距和减小珠光体团块尺寸以及均匀分布等相关,而本文加稀土铈和镧合金的两组 U75V 钢轨试验钢的结果却不理想,有待深入研究。

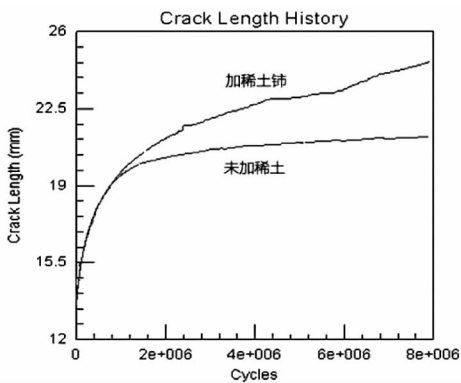


图 9 加稀土铈合金与未加稀土对比图

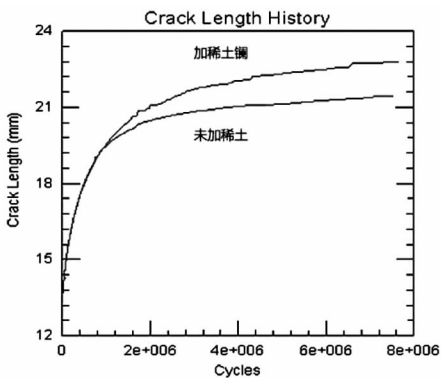


图 10 加稀土镧合金与未加稀土对比图

4 结论

(1)通过裂扩门槛值 ΔK_{th} 试验能够获得钢轨疲劳裂纹扩展速率的全程数据和图表,其中 da/dN 数值和 Crack Length - Cycle 曲线的波动和变化,反映

了钢轨化学成分、显微组织、夹杂物、氢含量和残余应力等因素的综合影响,可作为钢轨性能研究的一种新的手段。

(2)钢轨显微组织是钢轨性能的基础,晶粒大小、取向和分布不均匀会造成 Crack Length - Cycle 曲线的小幅波动,而远小于标准要求 (≤ 250 MPa) 的残余应力和远小于标准要求 ($\leq 0.00025\%$) 的氢含量,不仅造成 Crack Length - Cycle 曲线的小幅波动,还会造成 da/dN 数值小幅变大,而少量的夹杂物则会造成 da/dN 短暂快速跳升。

(3)残余应力远大于标准要求 (≤ 250 MPa) 会使裂纹扩展加速,本文检测的钢轨轨头残余应力大于 365 MPa,而且还是拉应力,会造成 da/dN 数据不能达到铁标要求。而钢中氢含量远大于铁标要求的不大于 0.00025%,氢在裂纹尖端的聚集,会产生应力集中,直接增加裂纹扩展速率,形成的氢化物在晶界的聚集,会导致脆化晶界,造成局部脆化,断口上的沿晶断裂是其特征。本文检测的 U20Mn 淬火贝氏体钢轨试样氢含量高达 0.00090%,裂纹扩展速率数据严重超过铁标要求,且没有检测到门槛值 ΔK_{th} 。

(4)钢中加入稀土合金对钢轨性能产生重要影响,本文加入稀土合金的 U75V 钢轨试验钢的裂扩性能不理想。

参 考 文 献

- [1] GB/T 6398—2000,金属材料疲劳裂纹扩展试验方法[S].
- [2] TB/T 2344—2012,43 kg/m ~ 75 kg/m 热轧钢轨订货技术条件[S].
- [3] 周清跃,周晨光. 钢轨显微组织与疲劳性能[J]. 金属学报,1990,26(4):307-308.
- [4] 刘蔚,王中光,夏月波. 疲劳过程沿晶裂纹萌生与扩展的机理[J]. 兵器材料与过程,1990,104(5):2-4.
- [5] 王鹏飞,白国君,韩春鹏. 包钢贝氏体钢冶炼中氢的控制研究[J]. 包钢科技,2017,43(2):23-25.