DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.07.017

嵌入式组合高锰钢辙叉心轨水平裂纹产生原因分析

严则会,李文博

(中铁宝桥集团有限公司 技术中心轨道线路研究院,陕西 宝鸡 721006)

摘　要:通过对三次爆炸硬化高锰钢叉心心轨小断面水平裂纹宏观形貌、微观组织、力学性能试验分析,确定了心轨裂纹起源于顶面表层、硬化层心部及硬化层与硬化过渡区。结果表明,表层裂纹为疲劳裂纹,在服役过程中经交变载荷作用而产生,并向内部及水平方向扩展。硬化层内裂纹由服役过程中产生的形变孪晶与爆炸硬化时产生的孪晶发生交互作用萌生微裂纹,或者由于晶粒之间变形不协调导致晶界处萌生微裂纹,并在交变载荷作用下沿孪晶方向或晶界扩展。

关键词:高锰钢;辙叉;心轨;裂纹

中图分类号:TG142; TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)07-0621-04

Cause Analysis of Horizontal Cracks on the Center Rail of Embedded Composite High Manganese Steel Frog

YAN Zehui, LI Wenbo

(Turnouts Research Institute, Technology Center, China Railway Baoji Bridge Group Co., Ltd., Baoji 721006, China)

Abstract: Based on analysis of macro-morphology, microstructure and mechanical properties of the horizontal cracks located at the small section of the high manganese steel frog that is hardened by three times of explosion, it is determined that the point rail cracks originate from the top surface, the center of the hardened layer and the hardened transition zone. The surface cracks are fatigue cracks, which are generated by alternating loads during service, and propagate inward and horizontally. The cracks in the hardened layer initiate at twin boundaries due to interaction between deformation twin produced in service and twin produced during explosive hardening process, or initiate at grain boundaries due to deformation incompatibility between adjacent grains, and propagate along twin boundaries or grain boundaries under alternating loads.

Key words: high manganese steel; frog; point rail; crack

高锰钢辙叉(以下简称辙叉)是铁路道岔的核心零部件,对线路的运营安全和整组道岔使用寿命发挥着至关重要的作用[1]。60-12 号嵌入式组合高锰钢辙叉由高锰钢叉心(心轨与翼轨镶嵌块连体铸造)、翼轨、叉跟轨、间隔铁、高强度螺栓连接副等零部件组成,整体结构见图 1。锰叉心采用 ZGMn13 铸造成型,生产中采用电弧炉冶炼高锰钢和底注开放式浇注系统,浇注温度控制在 1 450 ~ 1 465 ℃,铸件开箱清砂后进行水韧处理(加热至 1 070 ℃并保温 3 h后水冷至室温),机加工后进行 3 次爆炸硬化处理[2-4]。该嵌入式组合高锰钢辙叉在上道使用过程中检查发现,锰叉心心轨宽 25~40 mm 断面之间存在水平贯穿裂纹,裂纹从顶面至底部方向约 7 mm 均存在裂纹。本文针对锰叉心水平裂纹(见图 1 所示)的产生原因进行分析。

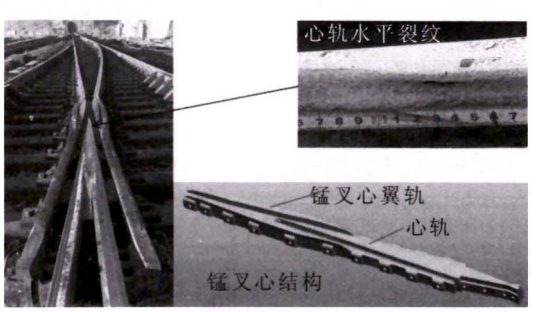


图 1 嵌入式高锰钢组合辙叉心轨水平裂纹

Fig.1 Horizontal Cracks on the Center Rail of Embedded Composite High Manganese Steel Frog

1　取样位置

在失效下道的 60-12 铸造高锰钢叉心的裂纹心

收稿日期:2020-11-28

作者简介:严则会(1973—),甘肃武威人,学士,高级工程师.主要从事高锰钢辙叉技术研发方面的工作.

电话:0917-2867357,Email:yzhwm888@163.com

轨及其相对位置未行车的翼轨上分别截取 A1 和 A2 试块做比较分析，其中 A1 为存在长度约 70 mm 水平裂纹的心轨，A2 为未通过车辆的翼轨。锰叉心材质为 ZGMn13，在实际服役前均经过 3 次表面爆炸硬化工艺处理。

1.1 A1 试块取样

A1 试块取样位置如图 2 所示。

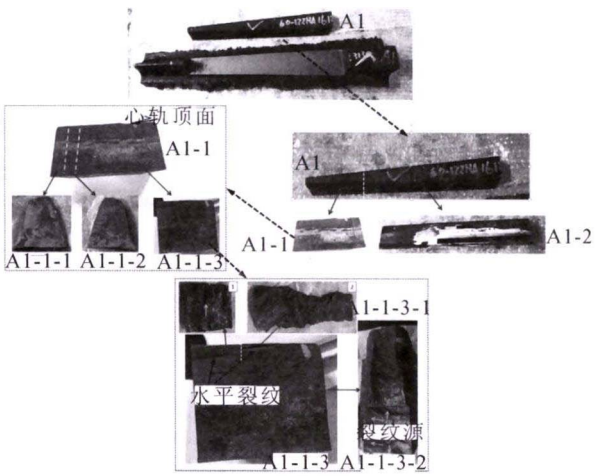


图 2 A1 试块取样位置及取样编号

Fig.2 Sampling locations and numbers of A1 specimen

先将心轨 A1 试块在距端部 110 mm 处采用线切割切出长 350 mm、距底部厚度为 40 mm 的待测试样品，再沿图 2 中 A1 上白色虚线位置将试样解剖为两部分，分别为 A1-1 和 A1-2。A1-1 试样上存在两条水平裂纹但并未贯穿，此段试样用于观察裂纹的扩展方式；A1-2 试样用于测试裂纹扩展位置处（即爆炸硬化层与下部硬化过渡区）及材料服役后较深位置的力学性能。

再沿图 2 中 A1-1 试样上白色虚线位置截取试样 A1-1-1 和 A1-1-2，用于观察裂纹端部及水平贯穿裂纹扩展方式；余下部分为 A1-1-3，用于确定裂纹源位置及扩展路径。在 A1-2 试样距顶面 25~32mm 处取 7 mm 厚标准拉伸试样，编号为 A1-2-1；在距顶面 6~8 mm 及 8~10 mm 处取 2 mm 厚标准拉伸样，编号分别为 A1-2-2 和 A1-2-3，以上试样用于测试心轨不同位置的力学性能。A1-1-3 裂纹分为上下两条裂纹，且两条裂纹并未贯穿，因此沿白色虚线处切割使两裂纹贯穿并将试样分成 A1-1-3-1、A1-1-3-2 上下两个部分，并且将 A1-1-3-1 沿虚线分成两部分（标号为 1 和 2）。由于工件实际服役过程中环境比较复杂，裂纹面已经锈蚀非常严重，无法进行直接观察和分析。分析过程中首先将试样在碱液中进行除油清洗，再用稀盐酸进行轻微的除锈处理，然后用纯水和乙醇清洗后吹干。

1.2 A2 试块取样

A2 试块取样位置如图 3 所示。在翼轨 A2 试块上分别截取 A2-1 及 A2-2 试样，其中 A2-1 试样用于测试由表层向心部的硬度分布；A2-2 试样距端部 210 mm，长 240 mm，厚 40 mm，用于测试铸造水韧处理后相关力学性能及组织观察。再将 A2-2 试样进行解剖，采用线切割（距顶面 25 mm 处）切取标准冲击试样及组织试样，编号分别为 A2-2-1 及 A2-2-2；同时在距顶面 25~32 mm 处切取厚度为 7 mm 标准拉伸试样，编号为 A2-2-3；在距顶面 6~8 mm 及 8~10 mm（即爆炸硬化层与下部硬化过渡区）处切取标准拉伸试样，编号分别为 A2-2-4 及 A2-2-5。

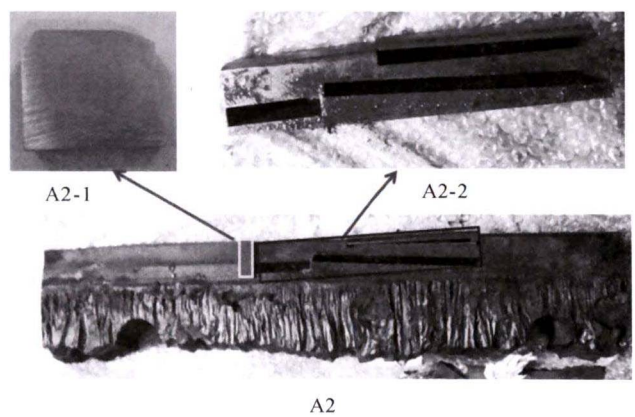


图 3 A2 试块取样位置及取样编号

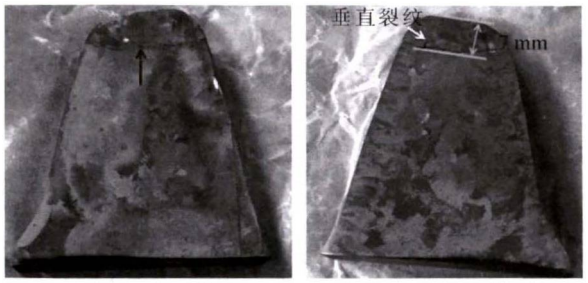
Fig.3 Sampling locations and numbers of A2 specimen

2 裂纹源及裂纹扩展方式

2.1 A1 心轨

由图 2 中 A1-1-3 试样的宏观裂纹面可观察到裂纹扩展留下的纹理，可判定上表面裂纹是由表层产生，向内部逐渐扩展，然后在交变载荷的作用下向大断面一侧水平扩展，见图 2 中 A1-1-3-1 标号 2 样；而心轨上靠下部裂纹根据裂纹扩展的纹理可判定裂纹是从中心向两侧扩展，当裂纹扩展至两侧时，裂纹贯穿试样，同时裂纹向水平方向扩展，据此可判定裂纹源位于心轨小断面一侧的心部位置，裂纹源及裂纹扩展示意如图 2 中 A1-1-3-2 样上白色椭圆及箭头所示。

将 A1-1-1 和 A1-1-2 用砂纸磨平后进行抛光，再用 4%硝酸酒精腐蚀后制成金相试样，进行组织观察，图 4(a)和(b)分别为 A1-1-1 和 A1-1-2 金相样的宏观照片。由图 4(a)可见 A1-1-1 试样上裂纹由心部向两端扩展，向左端裂纹分叉为两个次裂纹，右端扩展至端部形成水平贯穿裂纹；由图 4(b)可知水平裂纹距顶面约 7 mm，同时发现垂直裂纹，见图 4(b)中白色箭头所示位置。



(a)A1-1-1样　　(b)A1-1-2样

图 4 心轨断面宏观照片

Fig.4 Macro morphology of center rail section

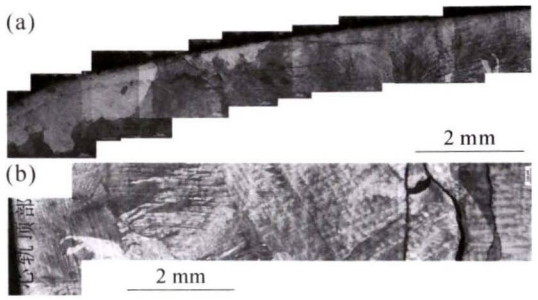


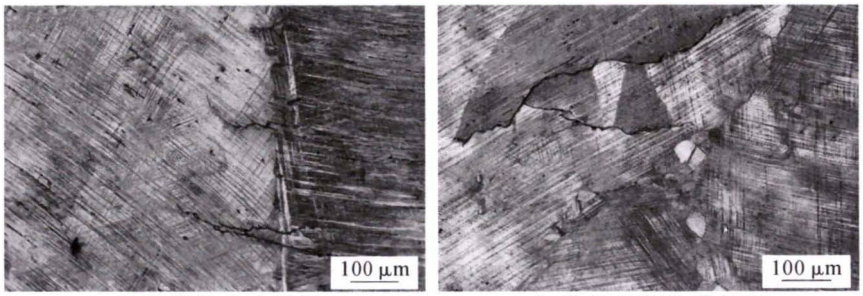
图 5 心轨裂纹及组织拼图

Fig.5 Microstructure and cracks in point rail

图 5(a)为心轨顶部至心轨工作边金相组织拼图，孪晶数目由心轨顶部至工作边逐渐减少，同时在心轨顶部表面发现表层裂纹沿孪晶界向心部扩展。图 5(b)为心轨顶部至心部金相组织拼图，由表层至底部孪晶数目逐渐减少，且主裂纹主要位于爆炸硬化层与硬化过渡区，裂纹沿晶界扩展。

此外，在硬化层内部分布有很多细小裂纹，如图 6 所示。图 6(a)显示多条微裂纹沿孪晶界或孪晶交互位置萌生并易于沿孪晶界扩展；图 6(b)显示裂纹沿晶界萌生和扩展，且裂纹两侧晶粒内的孪晶取向差非常大。

由以上组织分析可知，裂纹形核原因主要是由于形变过程中变形不协调，在形变孪晶交互区或者晶界处萌生；随后主要沿着孪晶方向及晶界扩展。



(a)沿孪晶方向扩展　　(b)沿晶界萌生和扩展

图 6 硬化层内部裂纹

Fig.6 Internal cracks in hardened layer

3 力学性能

3.1 硬度

图 7 为 A2 翼轨经爆炸硬化后由表层至心部的硬度变化，距顶面 0~6 mm 处硬度梯度较大；随着距离增大，硬度梯度逐渐减小，距顶面 23 mm 处硬度趋于平稳。在实际生产过程中辙叉心轨和翼轨的组织相同，爆炸硬化工艺也相同，力学性能也基本相同，因此，未行车的 A2 翼轨的硬度梯度基本可以代表辙叉服役前心轨的硬度梯度。在距顶面 6~10 mm 处基本处于硬度梯度过渡区，而此深度处恰好对应心轨主裂纹扩展区。同时在硬化层内硬度梯度较大，心轨硬化层内也存在许多微裂纹，表明裂纹主要出现在硬化层及硬度梯度过度区。

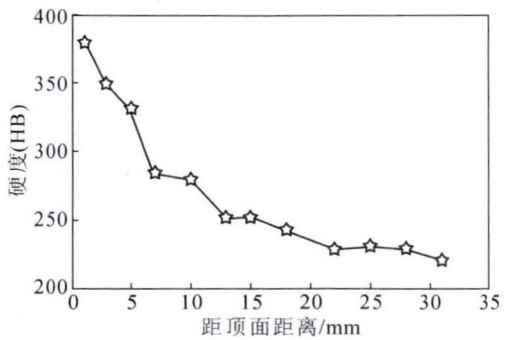


图 7 A2 翼轨硬度梯度

Fig.7 Hardness gradient of A2 wing rail

3.2 拉伸性能

图 8 为锰叉心距顶面不同深度处试样的静态拉伸应力-应变曲线。图 8(a)中 A1-2-2 和 A1-2-3 分别代表爆炸硬化后距顶面 6~8 mm 和 8~10 mm 处高锰钢经过服役后的力学性能；图 8(b)中 A2-2-4 和 A2-2-5 分别代表爆炸硬化后距顶面 6~8 mm 和 8~10 mm 处高锰钢未服役的力学性能；这些拉伸样的取样位置与心轨水平裂纹位置在同一高度。由实验结果可知，服役前后在与水平裂纹同一高度处拉伸力学性能没有本质变化。图 8(c)中 A1 与 A2 为距表层约 25 mm 处试样的静态拉伸应力-应变曲线，A1 代表服役后距顶面较深处高锰钢的力学性能，A2 代表经爆炸硬化后未服役较深处高锰钢力学性能。由实验结果可知，经过服役后，材料的屈服强

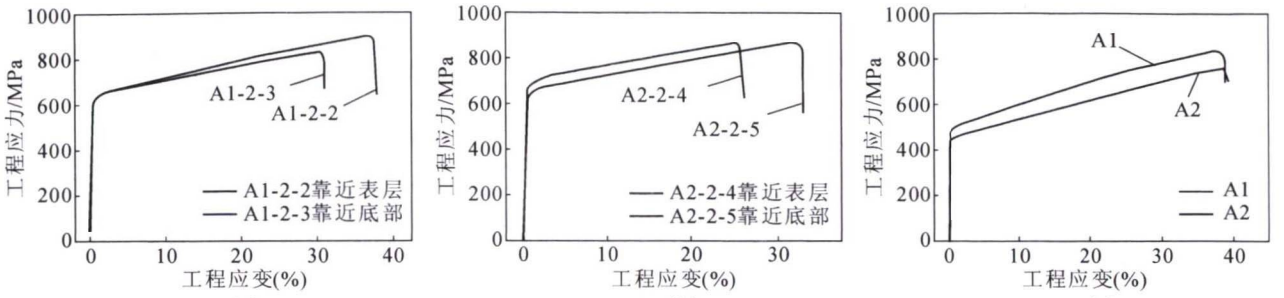


图 8 A1 及 A2 硬化层及过渡区力学性能测试

Fig.8 Mechanical properties of hardened layer and transition zone for A1 and A2 specimens

度有一定的提高(提高约 40 MPa),伸长率两者并没有明显差别。其对应的宏观拉伸试样宏观形貌相似,拉伸试样表面均出现大量凹凸,凹凸尺寸与晶粒尺寸大小相似,这是由于晶粒尺寸较大,导致晶粒之间变形不协调,最终在晶界处产生裂纹,最终导致断裂;同时在拉伸试样侧边发现有许多小裂纹。

3.3 冲击性能测试

在距顶面 25~35 mm 处取 U 型缺口标准冲击试样,冲击功大于 300 J。检测发现冲击测试试样断裂变形区同样存在大量的凹凸区,其尺寸约一个晶粒尺寸。

4 分析与讨论

试验观察到在距顶面硬化层与硬化过渡区存在贯穿主裂纹,且在主裂纹与表层之间(即硬化层中)均存在许多小裂纹。材料的疲劳强度与其强度成正比,而心轨从顶面向下强度逐渐降低,其对应的疲劳强度也逐渐降低;在列车经过时,心轨承受较大的压应力,距顶面较近的硬化层强度较高,受力时发生弹性变形,列车经过后弹性变形恢复;而距顶面一定深度处材料的强度低于承受的载荷时将会发生塑性变形(即硬化层过渡区),列车经过后塑性不能恢复,因此在心轨内部会产生一个拉应力,该拉应力可作为裂纹萌生和沿水平扩展的驱动力促使裂纹沿水平方向扩展。另一方面,由于材料为铸造后经水韧处理状态,晶粒尺寸较大(达到毫米级别),因此在交变载荷下,晶粒之间变形不协调,极易在晶界处或孪晶交互区萌生裂纹,进而沿晶界或孪晶界扩展。实际试验观测到水平贯穿裂纹位置正好对应于硬化层硬度梯度较大与硬度梯度较小的过渡区,这与以上分析结果非常吻合。

5 结论

(1)嵌入式组合高锰钢辙叉心轨水平裂纹起源于顶面表层、硬化层心部及硬化层与硬化过渡区,即表层裂纹、硬化层内微裂纹及水平主裂纹。裂纹在服役过程中经交变载荷作用产生,并向内部及水平方向扩展。硬化层内裂纹由服役过程中产生的形变孪晶与爆炸硬化时产生的孪晶发生交互作用萌生微裂纹,或者由于晶粒之间变形不协调导致晶界处萌生微裂纹,并在交变载荷作用下沿孪晶方向或晶界扩展。

(2)在列车经过时,心轨承受较大压应力,距顶面较近的硬化层强度较高,受力时发生弹性变形,列车经过后弹性变形恢复;而当距顶面一定深度处材料的强度低于承受的载荷时将会发生塑性变形(即硬化层过渡区),列车经过后塑性不能恢复,因此在心轨内部会产生一个拉应力,该拉应力作为裂纹水平扩展的驱动力促使裂纹沿水平方向扩展。

参考文献:

[1] 陈国桢,肖柯则,姜不居. 铸件缺陷和对策手册[M]. 北京:机械工业出版社,1996.

[2] 张福成,吕博,刘辉,等. 高锰钢辙叉表面爆炸硬化工艺:中国:200710061422.X[P].2007-07-08.

[3] 陈勇富, 洪友秋. 高锰钢的爆炸硬化工艺: 中国:85103847[P]. 1986-11-05.

[4] 张福成. 辙叉钢及其热加工技术[M].北京:机械工业出版社,2009.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2021 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64　国外发行号:M855　国内定价:25 元/本　海外定价:25 美元/本