

铁道科学研究院金属
及化学研究所

张斌 等编著

铁路车轮、轮箍

失效分析

及

伤损图谱

TIELU CHELUN LUNGU SHIXIAO
FENXI JI SHANGSUN TUPU

中国铁道出版社

铁路科技图书出版基金资助出版

铁路车轮、轮箍 失效分析及伤损图谱

**Failure Analysis and Metallography of Damage in
Railway Wheels and Tyres**

中国铁道科学研究院金属及化学研究所

张斌 卢观健 付秀琴 张颖智 邢丽贤 刘彤蕾

中国铁道出版社

2002年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书介绍了铁路车轮、轮箍在运用中出现的典型伤损(四大类),选取了有代表性的 10 种损伤案例进行了较详细的失效分析,并且列举了典型的 13 种车轮和 7 种轮箍损伤类型配以照片加以说明。另外,本书还配有“铁路车轮、轮箍伤损及失效分析图库”光盘,直观地反映了各种伤损情况。

图书在版编目(CIP)数据

铁路车轮、轮箍失效分析及伤损图谱/张斌、卢观健等编著
—北京:中国铁道出版社,2002.6
ISBN 7-113-04661-4

I. 铁… II. ①张…②卢… III. ①机车—车轮—失效分析
②机车—轮箍—失效分析 ③机车—车轮—机械性损伤—图谱
④机车—轮箍—机械性损伤—图谱
IV. U260.331.64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 026358 号

书 名: 铁路车轮、轮箍失效分析及伤损图谱
作 者: 张斌 卢观健 付秀琴 张颖智 邢丽贤 刘彤蕾
出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)
责任编辑: 薛淳 编辑部电话:路电(021)73137,市电(010)63549454
印 刷: 北京市兴顺印刷厂
开 本: 787×1092 1/16 印张: 10.25 字数: 253 千
版 本: 2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷
印 数: 1~1 000 册
书 号: ISBN 7-113-04661-4/U·1321
定 价: 80.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

联系电话:路电(021)73169,市电(010)63545969

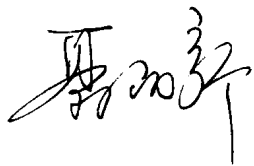
序

车轮、轮箍是铁路机车、车辆重要的走行部件,其产品在到货检验、厂段加工组装和使用过程中通常会发现或发生各种不同类型的失效。这些不同类型的失效严重影响铁路机车车辆的运行安全,成为危及铁路运输安全的隐患,甚至会造成重大行车事故。

《铁路车轮、轮箍失效分析及伤损图谱》系统地分析、总结了车轮、轮箍失效形式,并对其进行了有效的分类归纳;运用失效分析的思路和方法,全面、系统地总结了车轮、轮箍各种伤损特点,对各类失效进行了机理上的分析和研究。该书作者以科学的态度,总结行业的大量案例,积累几十年工作中的大量案例分析,使该书图片、资料翔实丰富,分析合理,是目前国内第一部系统的车轮、轮箍失效分析及伤损图谱;该书配套光盘的制作符合了当今图像技术发展的潮流,为铁路有关专业工程技术人员分析各类车轮、轮箍失效提供了方便的工具,并使读者使用起来更加快捷。

该书及配套的光盘对现场正确判明失效特性和原因,开展车轮、轮箍失效分析工作,对生产制造厂提高产品质量等具有重要的指导意义,对质量异议处理具有借鉴作用,并可作为大、中专院校和相关科研单位的教学和科研参考工具。

中国铁道科学研究院院长



前 言

车轮、轮箍是铁路车辆、机车中的重要走行部件。目前,我国铁路机车、客车、货车上约有 500 万个车轮、轮箍在运营之中。车轮、轮箍在到货检验、厂段加工组装和使用过程中通常会发现或发生各种不同类型的失效。这些不同类型的失效经常影响铁路机车车辆的正常生产和运营,成为危及铁路安全运输的隐患,某些失效甚至会造成重大行车事故。因此有组织、有计划、有目的地进行车轮轮箍失效分析工作,全面掌握车轮轮箍的产品质量特性、失效类型、失效原因,并提出对策和防范措施等,对提高车轮轮箍的使用寿命和安全可靠性,确保行车安全,将具有显著的经济效益和社会效益。

由于目前国内还没有较系统的铁路车轮、轮箍失效分析图谱,只是对一些常见缺陷或损伤进行过检验分析,但不全面,中国铁道科学研究院金属及化学研究所通过较全面收集车轮、轮箍各种缺陷和损伤的实物和有关资料,用失效分析方法查找其产生原因、研究损伤形成和扩展机理,将各种损伤形式归类总结形成了这本车轮、轮箍失效分析及图谱。

本书共分五章:第一章“铁路车轮、轮箍失效分析”,主要介绍失效分析的基本概念、进行车轮、轮箍失效分析的方法和产品质量的管理特性等;第二章“车轮、轮箍的材质性能及制造缺陷”,主要介绍车轮、轮箍生产的工艺流程、产品的基本技术参数和质量要求,同时描述了车轮、轮箍在生产中常出现的缺陷特性等;第三章“车轮、轮箍主要损伤的形成原因及预防措施”,主要运用失效分析方法对车轮、轮箍在运用中出现的典型损伤(四大类)从形成机理和预防措施上进行了研究;第四章“车轮、轮箍典型损伤失效分析案例”,选取多年来国内车轮、轮箍具有代表性的 10 种损伤案例进行了较详细的失效分析,说明其产生的原因及相关预防措施;第五章“车轮、轮箍损伤分类及图谱”,提出了车轮、轮箍损伤代码,主要列举了国内典型的车轮 13 种、轮箍 7 种损伤类型,并配以照片进行分类,同时借鉴国内外车轮、轮箍失效方面的研究成果进行了示意图说明。本书配套出版“铁路车轮、轮箍损伤及失效分析图库”光盘,该光盘较全面的收录了车轮、轮箍出现的损伤现象,从宏观和微观上进行了解释说明,并同时附有车轮全截面径向典型低倍组织缺陷图。

在研究过程中,涉及了数十个铁路局、工厂和科研单位;书中收集照片上百张,力求全面、系统、真实地反映铁路车轮、轮箍的失效类型,科学地找出原因并提

出对策;在课题研究过程中得到铁道部科技司、运输局装备部、安监司、中国铁路机车车辆工业总公司、中国铁路物资总公司、马鞍山钢铁股份有限公司、钢铁研究总院、铁道部标准计量研究所等单位的大力支持和帮助,由于研究水平有限及车轮、轮箍未来不可预见的失效类型出现,使得归类工作并不见得全面,因此课题组将使这项工作继续下去以进一步充实图谱。

在此特别向铁道部运输局装备部杨南翔、李岳恒,铁道部科技司傅小日、徐小平,铁道部标准计量研究所韩瑛,马鞍山钢铁公司季怀忠、谢锡庆、姜波,原冶金部科技司谢仕柜,铁道部安全监察司毛庆祥等专家和领导表示诚挚的感谢。

目 录

第一章 铁路车轮、轮箍失效分析	1
第一节 铁路车轮和轮箍的失效分析方法概述	1
第二节 铁路车轮和轮箍失效分析的实验检测技术	6
第三节 车轮和轮箍的工作条件和力学分析原理	15
第四节 失效分析与产品的质量特性和质量管理	15
第二章 车轮、轮箍的材质性能及制造缺陷	17
第一节 车轮和轮箍的制造流程及工艺	17
第二节 车轮和轮箍的基本技术条件和有关数据	17
第三节 车轮和轮箍的制造缺陷	19
第四节 轮轨接触应力简述	23
第三章 车轮、轮箍主要损伤的形成原因及预防措施	25
第一节 车轮和轮箍的磨耗	25
第二节 轮辋疲劳裂纹	30
第三节 车轮和轮箍的热损伤——制动热裂纹和擦伤	34
第四节 车轮和轮箍踏面剥离	40
第四章 车轮、轮箍典型伤损失效分析案例	46
第一节 热裂纹导致车轮径向裂损失效分析	46
第二节 C _{62A(N)} 货车车轮崩裂掉块事故的失效分析	51
第三节 由于非金属夹杂物引起的机车轮箍崩箍的失效分析	60
第四节 石门坎—岔滩间发生的由车轮崩裂造成的重大事故	66
第五节 焊补引起的崩箍	71
第六节 轮箍扣环槽点焊缺陷造成的崩箍	75
第七节 机车轮箍踏面异物的分析	81
第八节 DF _{4D} 型机车整体辗钢车轮踏面制动剥离	82
第九节 25G 型盘型制动客车车轮对 915KKD 车轮踏面擦伤剥离	87
第十节 DF ₁₁ 机车整体辗钢车轮辐板螺纹工艺孔裂纹	93
第五章 车轮、轮箍损伤分类及图谱	102
第一节 车轮和轮箍损伤分类编码(暂定)	102
第二节 车轮和轮箍部分损伤示意图分类表	102
第三节 车轮损伤图谱	106
第四节 轮箍损伤图谱	138
主要参考文献	154
附光盘 “铁路车轮、轮箍损伤及失效分析图库”	

第一章 铁路车轮、轮箍失效分析

第一节 铁路车轮和轮箍的失效分析方法概述

一、失效分析的基本概念

铁路车轮和轮箍是铁道用钢的重要产品品种,是铁路机车车辆的重要技术装备。重视铁路车轮和轮箍的失效分析工作,加强产品的质量管理活动是提高产品质量、使用寿命和安全可靠性,确保行车安全,适应铁路运输重载和高速使用条件发展要求的重要手段。

产品丧失其规定功能的现象称为失效。分析引起产品失效的原因,并提出对策,以防止其再发生的技术活动和管理活动称为失效分析。

1. 铁路车轮和轮箍的失效及其基本失效类型

车轮和轮箍是铁路客车、货车和机车不可缺少的重要走行部件,它们在机车车辆中必须完成其特有的功能,这主要是要安全可靠地承担载荷和在钢轨上快速行驶等。当它丧失其应有的功能时,即称为失效。它们究竟在何时,以何种方式发生失效,这是随机事件,人们无法完全预料。

由车轮和轮箍生产厂按产品供货技术条件交货的铁路车轮和轮箍,在检验、加工、组装、检修和使用过程中,通常会发现或发生各种不同类型的失效。从产品标准实施方面看,车轮和轮箍的失效主要反映在尺寸超差、表面质量和内部质量三方面。从使用方面看,车轮和轮箍的失效主要反映在磨耗、疲劳裂纹、剥离、掉块、崩轮、崩箍等。从丧失功能的程度方面看,车轮和轮箍的失效可以归纳为危及行车安全、失去安全工作能力、超过规定的失效判据等三种情况。从统计分析角度方面看,产品的失效可分为早期失效、随机(或偶然)失效、疲劳(或耗损)失效。铁路车轮和轮箍失效的基本类型见表 1—1。铁路车轮和轮箍上述主要失效类型的形态特征和判据详见本书第三章“车轮轮箍主要损伤的形成原因及预防措施”部分。

表 1—1 铁路车轮和轮箍失效的基本类型

失效的基本类型	失效的表现形式		失效机理或原因
	车轮	轮箍	
磨耗	踏面磨耗和轮缘磨耗		疲劳磨耗
辗边和压溃	踏面辗宽和轮辋(轮箍)外侧面辗边,轮缘圆周凹陷,踏面圆周不均匀磨耗和辗宽		累积塑性流动变形
轮辋疲劳裂纹	轮辋内部疲劳裂纹和掉块	轮箍内部疲劳裂纹和崩箍	夹杂物应力集中和轮轨接触应力
	轮辋内部裂纹和崩轮	轮箍内部裂纹和崩箍	内部缺陷应力集中
接触疲劳剥离	踏面轮轨接触的圆周部位有不规则的网状裂纹,沿裂纹处层状剥离掉块		轮轨接触应力累积应变疲劳
制动剥离	踏面制动的圆周部位分布有刻度状裂纹,沿裂纹处层状剥离掉块		制动热应力疲劳和轮轨接触应力

续上表

失效的基本类型	失效的表现形式		失效机理或原因
	车轮	轮箍	
局部擦伤剥离	踏面局部有龟裂状裂纹,沿裂纹处层状碎裂剥离掉块		车轮滑行、擦伤层马氏体相变
局部接触疲劳剥离	踏面局部有不规则网状裂纹,沿裂纹处层状剥离掉块		夹杂物应力集中和轮轨接触应力
制动热裂纹	踏面制动的圆周部位分布有刻度状裂纹和径向崩轮或崩箍		制动热应力疲劳
脆性崩轮	早期脆性崩裂成多块		严重冶金缺陷
脆性崩箍		早期脆性崩箍,断口为脆性断口	严重冶金缺陷或紧箍应力过大
表面疲劳裂纹源崩轮和崩箍	断口裂纹源部位有明显的疲劳断口		表面缺陷应力集中等,紧箍应力过大
轮箍弛缓		轮箍和轮芯位置相对移动	紧箍量不够或长时减速制动
轮缘裂纹	表面裂纹		轮辋裂纹或其他
辐板裂纹	表面裂纹	无	冶金缺陷、表面折叠或其他
轮毂裂纹	表面裂纹	无	冶金缺陷、表面折叠或其他
其他	不符合产品技术条件规定的表面缺陷和内部缺陷;不符合检修规程规定的表面缺陷,内部缺陷和型式尺寸公差,磨损到限,外伤等等		

2. 失效分析的核心

失效分析的核心是分析引起车轮和轮箍失效的原因。车轮和轮箍在使用过程中发生的各种失效都是由于其性能和质量(包括强度、硬度、残余应力、表面质量和内部质量、型式尺寸公差等)因素与使用条件(包括轴重、车速、线路条件和环境、轮轨接触应力、制动力等)因素不相适应所致。失效总是首先从产品中最不适应的环节开始,而且失效的残骸上必然会保留有失效过程的信息和形态特征。这些信息和形态特征是进行失效分析的客观依据,只要人们掌握科学的方法,使用必要的仪器设备等检测手段,并运用自己的知识和经验,就可以迅速而准确地找到失效的原因。

3. 失效分析的目的

进行失效分析是为了提出对策,防止车轮和轮箍同类非正常失效的再发生。车轮或轮箍的非正常失效主要是指在预定的使用寿命期限内发生的失效。这种失效可能由各方面的多种原因引起,其中常见的原因可能有如下几种:

(1)车轮和轮箍存在不符合产品质量控制标准的缺陷,而未能被预先发现。

(2)车轮和轮箍产品供货技术条件中所规定的某些性能和质量指标可能不满足提速或重载使用条件(如轮轨接触应力或制动力)的要求。

(3)车轮和轮箍产品在制造过程中可能偶然出现意外的情况,出现产品供货技术条件中所没有规定的质量问题(如过大的残余应力等)。

(4)使用操作不当,或使用过程中偶然发生的意外损伤等。

4. 失效分析不仅是技术活动,也是管理活动

失效分析是技术活动这是人所共知的,也是本书所要阐述的基本内容,但必须强调失效分析也是管理活动。由于引起失效的原因可能来自研究、设计、生产、使用、维修等各技术环节,因此失效分析,特别是涉及一些复杂而重大的失效分析,往往需要组织各有关部门和各方面专家协同工作才能完成,以便尽快寻求导致失效的原因,并采取技术和管理方面可行的有效措施。只有管理活动与技术活动紧密结合,才能及时和顺利地完成失效分析任务。这时的组织

管理工作往往起着关键的作用。

二、失效分析的程序

各种机械产品失效的性质与条件不同,分析的方法和程序也各有差异,但若干基本程序却是共同的,车轮和轮箍也不例外。对于简单的失效事例,或是对于重大的失效事故,都应有适当的失效分析程序和实施方法,才能使失效分析周密和保证结论正确。

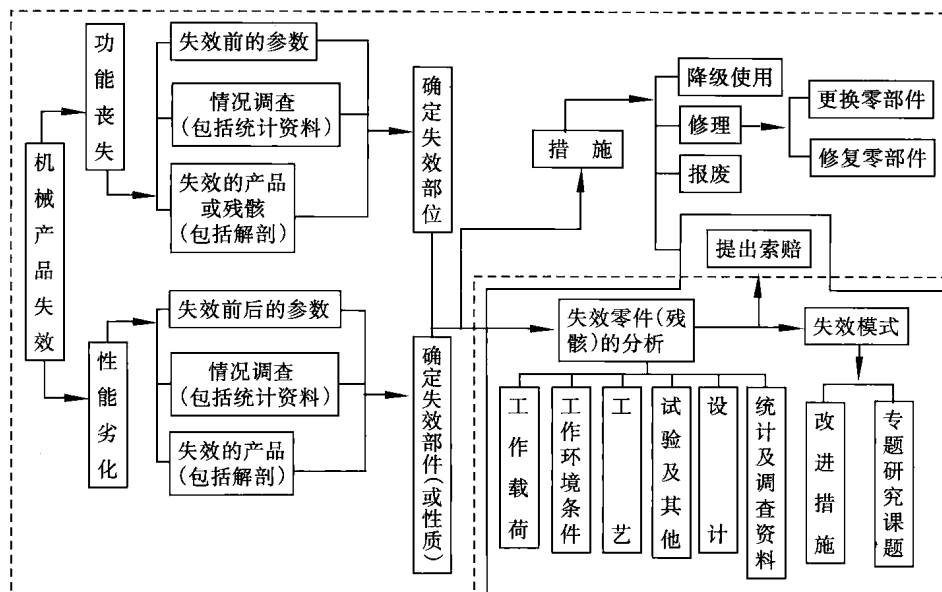


图 1—1 失效分析一般程序

图 1—1 所示为机械产品失效分析的一般程序。对于车轮和轮箍而言,其失效分析程序大致包括以下几方面:

1. 接受任务,明确目的和要求

失效分析的第一步是接受任务。无论任务是由主管部门下达,还是由有关单位委托或申请,在接受任务时都应与任务提出人就分析的目的、要求等进行讨论和磋商,同时也是可行性论证和着手调查研究的过程。

失效分析任务的目的和要求大致包括以下方面:

(1) 事故原因和责任的失效分析

车轮和轮箍在使用过程中发生的突发性失效,经常会导致行车事故。事故原因可能与车轮和轮箍的制造质量有关,同时也可能与使用或缺陷的漏检有关。因此,事故原因和责任的失效分析不仅要分析失效原因,而且还需要分析失效过程的发展特点,即缺陷萌生和发展的时间和尺寸等。

(2) 非正常失效的原因和处理对策

已大量使用的车轮和轮箍,有时由于生产质量控制系统的失控而出现批量的次品。这些次品被当成合格品使用而出现失效;或已大量使用的车轮和轮箍,由于使用条件变动而出现的失效;或由于偶然性原因引起的失效。只有通过失效分析找到产品失效的真正原因,才能依此采取有效的对策。如货车车轮使用初期发生脆性崩轮事故,经失效分析认为是生产工艺控制不当,使同一炉号车轮出现严重内部冶金质量问题,判定该炉号车轮全部报废。因此主管部门针对这种情况采取果断措施,为确保行车安全,将已装在货车上的该炉号车轮一律更换。又如

某新型客车在使用初期发现车轮踏面剥离掉块严重,经失效分析认为踏面剥离掉块失效是属于制动剥离失效类型,而不是属于接触疲劳剥离类型。如果车轮材质的性能和化学成分等符合供货技术条件要求,则制动剥离失效的产生原因应主要与车轮的制动使用条件有关,只有从制动方面采取对策,才能防止同类失效的继续发生。

(3)提高车轮和轮箍使用寿命和安全可靠性的失效分析

这是失效分析的常规工作,是以质量反馈为目的的失效分析。从车轮和轮箍的生产制造、检验、加工、组装、检修和使用过程等各方面,加强质量反馈、质量管理和失效的统计析工作,加强失效原因的检验析工作,提出有针对性的改进措施。从而促进车轮和轮箍产品质量的提高,提高车轮和轮箍的使用寿命和安全可靠性。

(4)缺陷安全度预测的失效分析

缺陷安全度预测又称缺陷危险性分析。在车轮和轮箍的产品质量检验或使用过程中,有时会发现某些不符合质量要求或有质量异议的缺陷或使用缺陷,但并非所有的缺陷一定会导致失效。如果一律报废会造成很大的经济损失。产品缺陷可分为三类:

- ①危险性缺陷。会导致产品失效,而且是不可修复的缺陷。
- ②可修复缺陷。这种缺陷如不修复会导致产品的失效,经修复后可以继续使用。
- ③安全缺陷。不会导致产品在规定的条件下失效,因而是需要修理的缺陷。

产品缺陷的安全度预测是根据缺陷的位置、大小、形状、运用受力分析、断裂力学分析、缺陷的形成原因,及车轮和轮箍失效分析的经验和事例等方法,确定缺陷是属于上述三类中的哪一类缺陷。如在质量检验或失效分析时发现产品存在白点、异型偏析等严重冶金缺陷,不仅判定缺陷性质是属于不可修复的危险性缺陷,而且应判定同一炉号产品全部报废;如车轮和轮箍在使用中发生制动剥离、擦伤等表面缺陷,或轮缘磨耗到限等属于可修复缺陷,则可采用机加工旋轮的方法恢复原踏面形状,重新使用。

(5)仲裁性的失效分析

仲裁性的失效分析的目的是分清产品失效责任的承担者,包括法律和经济责任。当生产和使用部门对事故(或质量异议)车轮和轮箍的失效原因和责任不能统一认识时,需要请双方同意的第三者进行仲裁性的失效分析。

2. 现场调查与背景资料的搜集

掌握和了解与车轮和轮箍失效部件有关的现场调查情况和背景资料,对于明确失效分析任务的目的和要求,以及确定失效分析的重点和按期完成任务等都大有裨益。

(1)现场调查

- ①失效部件或失效事故发生(发现)的时间、地点、经过等。
- ②失效部件的名称、型号、生产时间和炉号。
- ③失效部件装车或装机的使用时间,使用概况(车型或机型,运行公里,运行区间)。
- ④失效部件的损伤程度和损伤情况,失效部件是否得到妥善保护,绘草图或照相。
- ⑤了解相同部件的使用情况和失效情况,是一次性的孤立失效,还是曾在同类部件中多次发生过。
- ⑥考虑失效部件的取样部位和取样方法,为实验室检验做准备。
- ⑦听取各方面人员对失效部件或失效事故的看法,包括对失效的过程、原因、以及措施的看法和建议等。

(2)背景资料的搜集

①失效部件的服役史。完整的服役史记录可大大简化失效分析工作。通过搜集和分析服役史,可以查明失效部件被安装、开始使用、检修和检查的情况和时间,及服役和检修中的操作是否和使用及检修所规定的一致。

②车轮和轮箍的生产制造工艺、供货技术条件、产品质量证书等。

③铁路客货车车辆和机车的检修规程对车轮和轮箍的质量和检修要求。

④车轮和轮箍的工作条件和应力状态(轮轨接触应力、制动力、残余应力、运行速度等)。

⑤车轮和轮箍的主要失效类型、失效分析案例及有关资料。

3. 分析失效类型

分析失效类型的目的是用以推断失效的原因。表 1—1 列举了国内外各国铁路车轮和轮箍失效的基本类型及其失效机理或原因,它是各国铁路车轮和轮箍失效分析的科学总结和分析失效类型的依据。根据失效表现形式的检验结果(失效的部位及其宏观形貌特征、微观形貌特征,裂纹源部位,裂纹形状,断口的宏观和微观形貌,金相组织形貌等)和其他理化检验结果,就可以判定失效类型和分析失效原因。

失效分析学科通常将失效的表现形式(失效类型)称为“失效模式”,并定义失效模式是导致部件失效的一种或几种物理和(或)化学过程。不同的物理和(或)化学过程对应着不同的失效模式。因此,根据失效部件的特征和残留的有关失效过程的信息,首先判断失效类型,进而推断引起失效的主要原因。因而可以认为失效类型的分析是失效分析的核心。失效类型的详细分析方法和理论分析已有许多文献有全面的报导和论述,本文只作简明扼要的介绍。

4. 确定失效原因并采取对策

失效分析的根本目的是防止失效的再发生,因而确定导致失效的原因,并采取相应的措施是失效分析工作的最终归属。

正确地分析失效类型是确定失效原因的基础,但失效类型还不等于失效原因。例如接触疲劳剥离失效的原因可能与材质的力学性能偏低有关,也可能与轮轨接触应力过大有关;脆性崩箍失效的原因可能与材质的冶金质量或与紧箍应力过大有关;表面疲劳裂纹源崩轮(或崩箍)失效的原因可能与表面缺陷应力集中有关,也可能与制动热应力或制动剥离有关。由此可见,确定了失效类型以后,还需要进一步通过检验分析查找导致失效的具体原因。一般说来,后者比前者要困难一些。在实际的失效事例中,引起失效的原因往往不止一个,但有时无法确定哪一个是最主要的原因,甚至人们只能判断几个可能的原因。在这种情况下不可能采用单一的改进措施。在条件许可或有必要的情况下,应进行失效再现的验证性试验。验证性试验的设计应根据失效的几种可能的原因进行设计。通过这样的试验,如果得到预期的结果,则证明查找到的原因是正确的,否则还需要重新进一步查找。

5. 写出结论和建议

失效分析结束时,必须写出一个结论明确、建议中肯的报告。编写报告应遵循以下五项原则:科学性、客观性、公正性、确证性和可读性。

报告可包括以下几个部分:

(1)标题。

(2)任务来源。委托分析单位的名称,接受任务的目的、要求和时间,社会影响和经济损失情况。

(3)调查与检验结果(即失效分析依据的事实)。应包括:失效部件的描述;失效部件的使用条件或使用历史;失效部件的生产制造和质量检验情况;失效部件的检验结果(失效类型和

理化检验情况等)。

(4)检验结果的综合分析意见。应包括:失效类型和失效特点的评价;失效部件冶金质量和理化性能的评价;引起部件失效原因的机理概括或可能的失效机理的讨论;对任何反常情况的讨论。

(5)结论。失效类型、导致失效的原因和各种因素。

(6)建议。提出避免将来发生同类失效,以及关于部件在使用、设计、选材或改进产品质量的建议。

(7)其他。包括负责分析人员的姓名和单位。必要时,附上参考资料或文献、附录等。

第二节 铁路车轮和轮箍失效分析的实验检测技术

铁路车轮和轮箍失效分析中常用的实验检测技术主要有:失效形态的观测和分析;金属基体组织、非正常组织及非金属夹杂物的观测与分析;表面和内部缺陷的无损检测和分析;化学成分(包括常规、局部、微区、微量和表面化学成分)的检测和分析;力学性能和断裂力学性能的检测和分析等。

在进行某项具体的失效分析时,应根据失效分析的目的和要求;根据失效现象的复杂程度及失效分析的经验;根据失效分析的深度、时间性和经济性等,有效而经济地选用上述实验检测技术中的某几项。

一、失效形态的观测和分析

不同类型的失效现象,总是如实地记录着从失效现象的萌生、发展到最后失效的整个发展过程的各种有用的信息,都具有各自不同的宏观、微观及金相组织等失效形态特征。所以对失效形态的检查分析,有助于找到导致失效的原因。

观测失效部件的宏观形态是整个失效分析的第一步,也是观测微观形态和金相组织形态的前提和基础。宏观形态的观测,是通过肉眼直观检查或借助于放大镜、体视显微镜、磁粉探伤等工具,在低倍(其放大倍数通常规定在 50 倍以下)下进行检查和研究失效部件的失效形态特征。宏观检验首先是用肉眼检查,因为肉眼有最好的综合性能:特别大的景深和视野,对颜色、腐蚀、断裂纹理走向有十分敏锐的分析能力,能够判断距离远近和尺寸大小。肉眼对判断裂纹或断裂的萌生位置、裂纹发展方向等等,都能准确地识别出来。

通过宏观失效形态特征的观察和分析,可以推断出可能的失效类型和原因,及确定进一步进行微观形态或金相组织形态的观测部位和取样方法。微观形态的观测,是采用体视显微镜、扫描电镜等,在高倍下检查和研究失效部件主要失效形态部位(如裂纹源、断裂源等)的失效形态特征。

金相组织失效形态特征的观测,是采用金相显微镜、扫描电镜等,对主要失效形态部位的金相试样进行金相组织及裂纹形貌特征的观察和分析。失效形态的微观及金相组织形态特征主要是用来观测和分析磨损、裂纹和断裂源等的性质和成因。在上述失效形态观测的基础上,再结合理化性能检验分析结果,就可以判定失效原因、机理和提出对策。这里需要指出的是,在进行失效形态的观测和分析时,一定要找准导致失效的最初的失效源(如裂纹源、断裂源等)。只有这样才能揭示失效过程的本质,否则就会得出错误的结论。

车轮和轮箍失效形态的表现形式详见表 1—1(即表 1—1 所指各种失效的基本类型及其

失效的表现形式,主要有磨耗、裂纹、剥离和断裂等)和失效图谱有关部分。下面仅就磨耗、裂纹、剥离、断裂等的失效形态和失效源的观测方法进行简单叙述。

1. 磨耗

轮轨接触表面或轮瓦接触表面之间的相对运动和相互作用,使表面层的金属由于机械力(轮轨接触应力和摩擦力)的作用不断地脱离金属基体,使踏面形状、尺寸和表面状态改变,并最终导致规定的功能丧失(踏面或轮缘磨耗到限;轮辋磨耗厚度到限等),这种现象称为磨耗。虽然磨耗不像断裂那样突然和危及行车安全,但磨耗是控制和影响车轮和轮箍使用寿命的最主要因素和原因。

根据磨耗表面的宏观和微观形态特征,或结合磨耗层的金相组织形貌特征,可以鉴别磨耗机理(表面疲劳磨耗、粘着磨耗、磨料磨耗、腐蚀磨耗、表面塑性变形磨耗、不均匀磨耗以及上述某几种磨耗的组合等)。

2. 裂纹形态和裂纹源的识别

金属的局部破断称为裂纹。裂纹不仅破坏了金属的连续性,而且多数裂纹尾部很尖锐,必将引起应力集中,促使部件在低应力作用下疲劳断裂或脆性断裂。

根据裂纹在车轮和轮箍表面的宏观形态特征,结合裂纹的金相组织形貌特征,可以确定裂纹的类别、裂纹源和裂纹扩展方向,以及判定裂纹的形成原因等。裂纹的形态特征主要包括裂纹的起源及扩展方向、裂纹内腔、两侧与末端的显微组织及夹杂物情况等。各种裂纹的宏观形态特征和金相组织形态特征详见失效图谱有关部分。在分析裂纹时,要分别观察裂纹的首端和尾端。例如,根据裂纹首端的形态及脱碳情况,可以推断裂纹的起因;根据裂纹尾端有无氧化物充塞可以推断裂纹形成后所经历的大体温度范围。在车轮和轮箍失效部位通常可以观察到多条裂纹,分析裂纹形成和发展顺序时可利用 T 形法则和分叉法则。

如果有如图 1—2 所示的二条相连的裂纹,由于同一部件上后形成的次生裂纹不可能穿越原有的(或先出现的)主裂纹而扩展,所以可按 T 形法则判定先出现的主裂纹。

如果有如图 1—3 所示的多条呈分叉形状的裂纹,则汇合裂纹发生于前,而分叉裂纹发生在后,即分叉法则。通常主裂纹较支裂纹宽而长,裂纹源区一定在主裂纹部位。

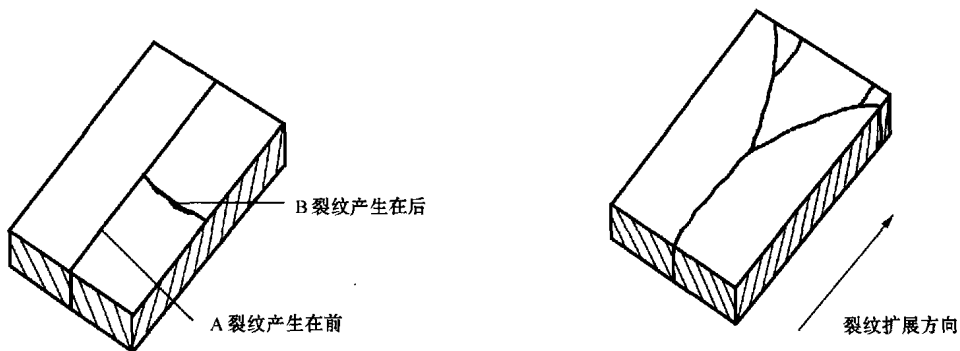


图 1—2 寻找裂纹源区的
T 形法则示意图

图 1—3 寻找裂纹源区的
分叉法则示意图

3. 断裂形态和断裂源的识别

车轮和轮箍在使用过程中的表面裂纹或内部裂纹,在使用应力作用下疲劳发展到临界尺寸后,剩余截面不能再承受使用应力而发生的完全破断现象称为断裂。断裂后的自然表面称为断口。根据断裂形态和断口的宏观形态特征,结合断裂源的微观和金相组织形态特征,可以

确定断裂的类别、断裂源和裂纹扩展方向。断裂全过程按裂纹发展特征,一般可分为裂纹的起源(裂纹源萌生),裂纹的疲劳发展,瞬时断裂三个阶段。如果断裂过程中有明显的裂纹疲劳发展阶段,则称为疲劳断裂;如果断裂过程中没有裂纹疲劳发展阶段或裂纹疲劳发展阶段不明显,则称为脆性断裂。发生瞬时断裂时的裂纹源区和疲劳发展区的尺寸称为临界断裂尺寸。临界断裂尺寸主要与受力状态、裂纹所在部位及材质的断裂力学性能有关。车轮和轮箍断裂失效的主要类型和失效表现形式详见表 1—1 及失效图谱的有关部分。

(1)确定断口上的裂纹源区和断裂扩展方向时,可以利用以下经验:

如果断开的两匹配断口有如图 1—4 所示的缝隙则源区在箭头所指的最宽处,即按匹配情况确定裂纹源区。

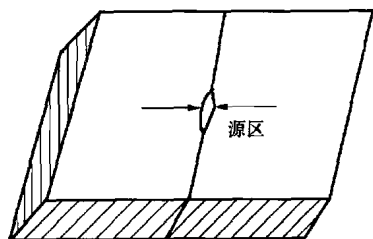


图 1—4 按匹配情况确定
裂纹源区的示意图

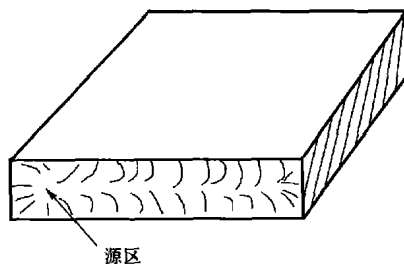


图 1—5 按断口上“人”字形
走向确定裂纹源区的示意图

如果在断口上有如图 1—5 所示“人”字形纹路,当表面无应力集中情况时,源区在两组“人”字形的汇合处;在有应力集中情况时,则情况相反。如果在断口上有如图 1—6 所示放射棱线,则源区在放射棱线的发源处。如果断口上有如图 1—7 所示的疲劳弧线,则根据弧线来确定源区。但当部件在周边有缺口时,疲劳弧线很快外转,分析时应予以注意。

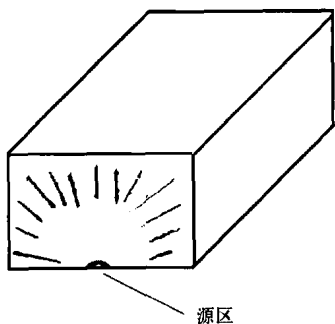


图 1—6 按断口上的放射棱线确
定裂纹源区的示意图

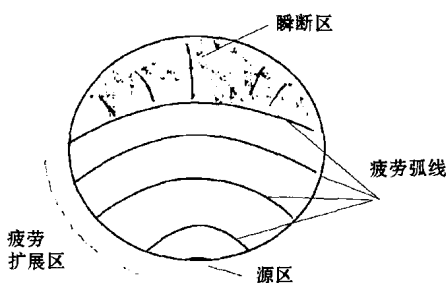


图 1—7 按断口上的疲劳弧线来确定
裂纹源区的示意图

如果断口呈图 1—8 所示形貌,则箭头指处为源区。

如图 1—9 所示,断口边缘无剪切唇处为源区,有剪切唇处的边缘为最后断裂部位。

裂纹源区一般为单裂纹源,如图 1—5~图 1—7 所示,此时裂纹源区呈点状特征。如果裂纹源为多裂纹源时,则裂纹源呈条状和具有疲劳台阶特征(见图 1—8)。疲劳发展区的断口一般具有贝壳纹状疲劳条纹特征,断口较平。瞬时断裂区通常为结晶状断口和具有放射状撕裂棱线或人字形撕裂棱线特征。撕裂棱线是脆性断裂的宏观标记,是判断裂纹扩展方向和裂纹

源的依据。

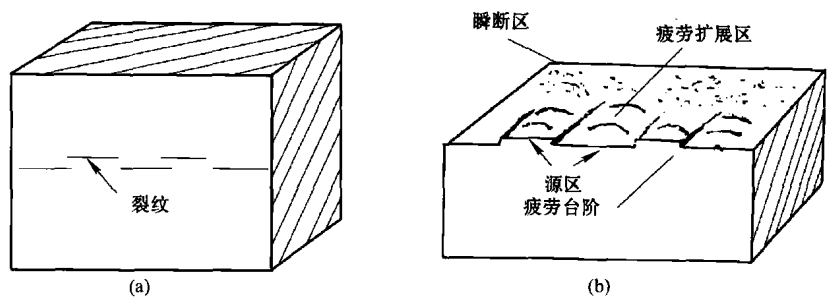


图 1—8 按断口上的疲劳台阶来确定裂纹源区的示意图

当车轮和轮箍断裂成多块时,在不碰伤断口的前提下,应一块一块地将它们拼凑起来。由于断口的各部位都有一定的变形量,通常是后断的各块之间配合程度好些,而先断裂的部位,因应变位移大而配合程度差些。这就形成断裂“宽先窄后”的断口配合规律。结合图 1—2~图 1—9 所示的图例,就可以从多块断口中识别出断裂源。

(2)断口表面的形态特征分析

断口的宏观分析,除分析断裂源区和断裂发展方向外,还应分析断口表面的光泽与颜色(主要是观察有无氧化色、有无腐蚀的痕迹、有无夹杂物的特殊色彩及其他颜色等);断口的粗糙度(表现有瓷状、细粒状、粗粒状及断口表面是否较平整光滑或较粗糙凹凸不平);断口上的花样或花纹(观察断口有无疲劳弧带或疲劳台阶、撕裂棱线等)、边缘情况(断口边缘有无毛刺、台阶、剪切唇或塑性变形、以及断口在部件上的位置等)及冶金缺陷(观察断口有无夹杂、分层、白点、疏松、晶粒粗大等)等。上述形态特征和分析实例详见失效图谱相关部分。

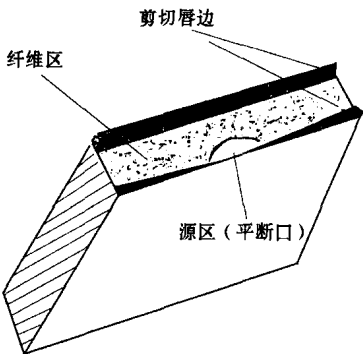


图 1—9 根据有无剪切唇边来确定裂纹源区的示意图

4. 剥离

表 1—2 剥离失效的类型、表面宏观形貌和金相组织形态特征

失效类型	表面宏观形态特征	金相组织形态特征
接触疲劳剥离	位于踏面轮轨接触的圆周部位,呈不规则的网状或鱼鳞状裂纹,沿裂纹处层状剥离掉块	表层金属塑性变形,裂纹是从踏面萌生和沿塑性变形流线方向倾斜向下发展。剥离层深度和塑性变形层深度相对应
制动剥离	位于踏面制动的圆周部位,呈刻度状或龟纹状裂纹,沿裂纹处层状剥离掉块	表层的金相组织主要为热影响层和马氏体白层,裂纹垂直于热影响层。剥离层深度和热影响层深度相对应
擦伤剥离	龟纹状裂纹,沿裂纹处踏面局部层状剥离掉块	表层的金相组织主要为马氏体白层和热影响层。裂纹垂直于马氏体白层。剥离层深度和马氏体层深度相对应

从表 1—1 可知,剥离是车轮和轮箍的主要失效类型,表现为踏面的整个圆周或部分圆周在轮轨接触应力或制动热应力作用下,踏面表层金属形成鱼鳞状或龟纹状微细裂纹,然后逐渐疲劳发展呈薄片状掉块或碎裂掉块。表 1—2 列出了剥离类型及其宏观和金相组织形态特征。剥离的失效形态详见失效图谱有关部分。应当指出的是,有时在同一失效的车轮(或轮箍)部

件上,可以同时观察到制动剥离失效和接触疲劳剥离失效的形态特征。这时就需要根据经验和各种失效形态特征的表现程度进行进一步的分析和判定。

二、金属基体组织、非正常组织及非金属夹杂物的观测和分析

在失效分析中,对金属基体组织、非正常组织及非金属夹杂物的观测和分析是完全必要的。车轮和轮箍的基体组织应是细珠光体和少量的铁素体。车轮和轮箍产品的供货技术条件中,通常对钢中非金属夹杂物的形状、大小、数量和分布等都规定应小于一定的级别。对于失效分析而言,金属基体组织发生变化,存在非正常组织或超标的非金属夹杂物时,其强度、塑性、断裂韧性等力学性能指标也将发生变化,从而导致其耐磨、耐疲劳等失效抗力指标下降。

1. 金相试样的制备和显微组织的显示

金相试样的制备包括取样、镶嵌、磨光和抛光。在失效分析中,对于金相试样的最佳取样部位及检验面的取向问题,无法作出统一的规定。这是由于几乎每一个具体的失效事例都有自己的特点。因此,必须根据具体情况和经验,决定取样部位及检验面的取向。在决定取样部位及检验面的取向时,通常应遵循下述原则:

(1)金相试样必须从靠近裂纹源部位或典型失效区域中切取。

(2)从失效部件上远离失效区域的正常部位切取试样,或从同批部件(尚未使用或未出现失效)的某一个部件上切取。

(3)为了研究断裂起源的形态、性质和原因,则必须从断裂源取样,并且检验面必须含有断裂源。

(4)为了研究裂纹形态和扩展路径,金相试样的检验面必须含有裂纹的起源和端部。

关于金相试样的镶嵌、磨光和抛光的一般原则及具体操作,以及显微组织的显示,许多专著中均有详细阐述,这里不作赘述。但应指出,失效分析用金相试样,除了遵循一般金相试样的原则外,还必须注意以下几点:

①检验面的定位要求较高。

②对靠近断口或缺陷表面处的金相检验面的边角保护,要防止倒角。

③失效部件只有一个,一旦损坏或将裂纹源磨掉,就无法弥补。

2. 金相组织及非金属夹杂物的观测仪器

金相组织及非金属夹杂物的观测和分析通常是采用光学金相显微镜、显微硬度计、扫描电子显微镜和能谱仪、透射电子显微镜、电子探针等。其主要用途见表 1—3。

表 1—3 微观分析设备及用途

设备分类	常用放大倍数	应用范围
光学金相显微镜	20~1 000	金相组织和夹杂物的鉴别和形貌观察
显微硬度计	20~600	各种组织的硬度测量
扫描电子显微镜和能谱仪	10~10 000	表面形貌观察,微区成分定性和半定量分析
透射电子显微镜	500~800 000	相结构和形貌分析
电子探针	500~2 000	形貌观察和相结构的微区成分定量分析

3. 金相组织及非金属夹杂物的形貌特征及评定

用光学金相显微镜观察金相组织及非金属夹杂物的形貌特征及进行分析和评定,是大多数失效分析中的一个标准步骤。它可以有效地揭示材料在制造工艺过程中产生的缺陷和确定