

矿用输送带 无损检测技术

KUANGYONG SHUSONG DAI
WUSUN JIANCE JISHU

■ 乔铁柱 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书的研究工作得到山西省普通高校特色重点学科项目（项目名称：煤矿运输系统物联网安全监控关键技术开发与应用）的资助。

矿用输送带 无损检测技术

乔铁柱 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是作者在长期从事煤矿安全工作的基础上,借鉴了国内外矿用输送安全检测的先进技术,并结合作者长期的科研成果编写而成,系统地介绍了矿用输送带故障检测的常用方法。

全书共分6章。第1章主要介绍了矿用输送带的结构、常见故障以及各种检测方法;第2章至第6章重点介绍了5种不同的检测方法,即漏磁检测、金属磁记忆检测、射线检测、机器视觉检测及红外视觉检测。

本书可供从事矿用输送带故障检测的技术人员以及相关专业科研人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿用输送带无损检测技术/乔铁柱著. —北京:国防工业出版社, 2015.6

ISBN 978-7-118-10252-9

I. ①矿… II. ①乔… III. ①矿山运输—输送带—无损检测 IV. ①TD5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第148451号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12 字数 232千字

2015年6月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 79.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

无损检测是一门涉及多学科知识的综合性技术，其特点是在不破坏被测对象材质和使用性能的条件下，运用现代测试技术来确定被测对象的特征及缺陷，以评价被测对象的使用性能。

输送带是冶金、矿山生产必要的、价格昂贵的大型系统，运输能力强、运载功率高，是大量材料最经济的运输工具。输送带长期、高负荷运转和一些意外原因，如接头抽动、钢绳芯锈蚀、托辊损坏、滚筒故障摩擦、金属工件卡阻、矸石划伤等，导致输送带纵向撕裂、横向断裂，造成通道堵塞、输送带报废、系统设备损坏、人员伤亡，甚至引起输送带局部温度升高，引起外因火灾，造成运输系统重大的生产事故。

目前针对矿用输送带的检测，一般采用人工检测与无损检测相结合的方法。人工检测方法工作量大，效率低，检测精度受人为因素影响；而无损检测方法可以大致分为磁检测法、电涡流检测法、X 射线检测法、金属磁记忆检测等方法。近年来，作者在矿用输送带的在线检测方面开展了一系列的研究工作，本书归纳整理了部分研究成果。

全书从矿用输送带结构和常见故障的基本知识开始，比较全面地讨论了适合矿用输送带故障的无损检测方法，即漏磁检测、金属磁记忆检测、射线检测、机器视觉检测以及红外检测，并分别设计了不同的检测系统。在编写过程中，各章相对独立，力图做到有较好的系统性和完整性。

本书得到了山西省特色学科项目“煤矿运输系统物联网安全监控关键技术开发与应用”给予的大力支持，太原理工大学测控技术研究所硕士研究生王旭东、王晓超、李兆星、李建勇等为本书的编写做了大量工作，在此表示感谢。

限于作者水平，书中难免有不妥之处，恳请读者提出宝贵的意见和建议。

作 者

2015 年 4 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 钢绳芯输送带简介	1
1.1.1 输送带的分类	2
1.1.2 钢绳芯输送带的结构	2
1.1.3 钢绳芯输送带的接头	3
1.2 矿用输送带的常见故障及其机理研究	4
1.2.1 矿用输送带运行故障分析	4
1.2.2 矿用输送带外因故障分析	5
1.3 矿用输送带的检测方法	6
1.3.1 人工检测法	7
1.3.2 无损检测法	8
参考文献	10
第二章 漏磁检测原理及技术	12
2.1 电磁学基本知识	12
2.1.1 磁现象和磁场	12
2.1.2 磁学的基本物理量	12
2.1.3 物质的磁特性	13
2.1.4 磁路及其定理	15
2.2 漏磁检测理论概述	15
2.2.1 被测构件的磁化	16
2.2.2 缺陷漏磁信号的产生	18
2.2.3 漏磁信号的获取	19
2.2.4 信号分析处理	20
2.2.5 漏磁检测的优缺点	20
2.3 矿用输送带漏磁检测原理	21
2.3.1 等效磁偶极子模型	21
2.3.2 电磁场的有限元分析原理	24
2.4 矿用输送带漏磁检测探头的设计	25

2.4.1	漏磁测量的基本要求	25
2.4.2	漏磁检测元件	26
2.4.3	漏磁检测方法	27
2.4.4	漏磁检测探头设计	28
2.5	本章小结	30
	参考文献	30

第三章 金属磁记忆检测原理及技术 31

3.1	金属磁记忆检测概述	31
3.2	金属磁记忆检测技术原理	32
3.2.1	铁磁性材料的特性	33
3.2.2	地磁场	37
3.2.3	金属磁记忆产生的机理	38
3.2.4	影响磁记忆信号的因素	40
3.2.5	磁记忆检测评价依据	42
3.3	金属磁记忆检测	42
3.3.1	金属磁记忆的定性检测判据	42
3.3.2	李萨如图形检测判据	46
3.3.3	磁记忆信号的三维矢量分解与合成	48
3.3.4	矿用输送带金属磁记忆的定量检测	49
3.4	矿用输送带钢绳芯缺陷检测试验	50
3.4.1	试验设备介绍	50
3.4.2	试验材料	51
3.4.3	试验步骤	52
3.4.4	试验结果分析	52
3.4.5	试验总结	57
3.5	矿用输送带磁记忆信号处理	58
3.5.1	钢绳芯磁记忆信号的空间—频率特性	58
3.5.2	小波分析理论	59
3.5.3	磁记忆信号的去噪	63
3.5.4	磁记忆信号的特征提取	69
3.6	磁记忆传感器及检测装置的设计	74
3.6.1	磁敏传感器的选择	74
3.6.2	各向异性传感器	76
3.6.3	磁记忆检测装置设计	79
3.7	矿用输送带的金属磁记忆检测	85
3.7.1	矿用输送带磁记忆检测的信号采集试验	86

3.7.2 矿用输送带磁记忆测量信号的分析处理	87
3.8 本章小结	89
参考文献	90
第四章 射线检测	93
4.1 射线检测概述	93
4.1.1 射线的种类	93
4.1.2 射线检测技术的分类	94
4.2 射线检测基本原理	96
4.2.1 射线与物质的相互作用	96
4.2.2 各种相互作用发生的相对概率	98
4.3 X射线检测原理	98
4.3.1 X射线的产生	99
4.3.2 X射线的衰减特性	100
4.3.3 X射线成像技术	101
4.3.4 X射线检测原理	103
4.4 矿用输送带X射线检测系统	104
4.4.1 X射线发生器	104
4.4.2 X射线探测卡	105
4.4.3 图像采集板	106
4.4.4 图像处理传输板	107
4.4.5 X射线图像的处理算法	107
4.5 本章小结	108
参考文献	108
第五章 机器视觉检测原理及技术	109
5.1 机器视觉检测概述	109
5.2 矿用输送带纵向撕裂的视觉检测	110
5.3 矿用输送带纵向撕裂图像处理	111
5.3.1 撕裂特征分析	112
5.3.2 图像处理整体思路和算法设计	114
5.3.3 图像增强	114
5.3.4 图像分割	129
5.3.5 图像分析与识别判断	134
5.4 矿用输送带视觉检测系统的设计	138
5.4.1 矿用输送带运行图像的高速检测技术	142
5.4.2 矿用输送带运行图像传输技术	148

5.4.3 机器视觉的输送带运行图像的处理算法识别	154
5.4.4 矿用输送带纵向撕裂在线检测系统的设计	154
5.4.5 结论	163
5.5 本章小结	163
参考文献	163
第六章 矿用输送带的红外视觉检测	166
6.1 红外辐射概述	166
6.1.1 黑体的红外辐射定律	167
6.1.2 实际物体的红外辐射规律	169
6.2 红外检测技术	169
6.2.1 红外无损检测技术的理论基础	169
6.2.2 红外传感器	171
6.2.3 红外传感器的性能参数	173
6.2.4 红外传感器的应用	174
6.3 红外热波无损检测	176
6.3.1 红外热波无损检测原理	176
6.3.2 红外热波无损检测技术的检测方式	177
6.4 矿用输送带纵向撕裂的红外视觉检测系统设计	179
6.4.1 CCD 传感器	179
6.4.2 矿用输送带红外视觉检测系统设计	180
6.4.3 系统的抗干扰设计	181
6.5 本章小结	183
参考文献	183

第一章 绪 论

随着工业水平不断发展,运输系统输送带已从简单的运输系统发展成为具有多种类型且运输距离长、运输量大、运输速度快、多功能的现代化运输设备。其中,矿用输送带伸长率小、抗拉强度高、动态性能好,能够长距离、大量、高速度地输送物料,以及适应各种不同的环境和物料,十分经济实用。因此,输送带运输系统被广泛地应用于矿山、冶金、码头、电力等部门的散状物料运输。

然而,随着输送带运输系统运载量和运载速度的不断增加,在长期的运行过程中,输送带横向断裂、纵向撕裂事故时有发生,对安全生产造成了严重的负面影响,直接影响生产效率的提升,甚至威胁到工作人员的人身安全。据不完全统计:自1989到1995年间,大同煤业集团共有7次输送带断带事故发生,共计影响生产将近400h影响产量达30万t,导致部分生产设备损毁,造成了严重的经济损失,严重的甚至影响到了工作人员安全;自1992年以来,平煤集团共发生断带事故24起,累计影响生产时间达1706.2h,造成采煤产量20余万吨的损失;2002年底,淮北矿业集团公司朱仙庄煤矿连续发生5起输送带断带事故,严重影响到全矿的安全生产;2005年,山西某矿发生了两起断带事故,每次断带后下滑近400m,累计影响生产达一个月之久,造成严重的经济损失;2008年12月,北京某公司主斜井高强运输系统输送带发生断带事故,损坏输送带架120架、抓捕器1组;2012年8月23日,某选煤厂原煤车间M21输送带机发生撕带事故,导致M21输送带全程撕裂,造成严重的经济损失。

众多事故所造成的严重后果引起人们对断带、撕裂事故的高度重视。在煤矿中,带式运输机常运行在较为恶劣的环境中,各种环境因素会使输送带受到腐蚀、磨损而造成输送带的钢绳芯断芯、接头抽动等损伤,给输送带的安全使用带来极大的隐患。因此,如何预防输送带的断裂、撕裂,已经成为保证安全高效生产的重要课题。

1.1 钢绳芯输送带简介

带式运输机作为块状、粉状等散料的运输工具广泛地应用于农业、工矿企业和交通运输业,它能够实现对物料的大运量、高速度、不间断运输,而且它操作简单,运输费用低,能够大大降低运输距离和建造成本。在煤矿运输中,运输系统输送带

也是比较理想的设备，具有其他设备无可比拟的优势，它可以根据煤炭的存储量以及巷道的长度、宽度、坡度等工矿条件量身定制，适应复杂的地形环境。

1.1.1 输送带的分类

输送带用于带式运输机中物料的承载和运送，一般是由橡胶与纤维、金属、塑料或织物等材料复合制成的。输送带按其用途、材料和结构可以分为多种不同类型。

- (1) 按输送带覆盖层材料划分为橡胶输送带和塑料输送带。
- (2) 按输送带带芯材料划分为织物芯输送带和钢绳芯输送带。
- (3) 按输送带表面形状划分为平面输送带、花纹输送带和挡边输送带。
- (4) 按输送带带芯结构划分为整芯输送带和叠层输送带。
- (5) 按输送带安全性能划分为阻燃型输送带和非阻燃型输送带。

矿用输送带（煤矿用的输送带的简称）必须符合我国的《煤矿安全规程》的规定，矿井下有瓦斯、煤炭等易燃物质，所以必须采用阻燃型输送带。目前，我国在煤矿井下使用的输送带有三种：煤矿用阻燃钢绳芯输送带，煤矿用织物整芯阻燃输送带，煤矿用阻燃钢丝绳牵引输送带。

1.1.2 钢绳芯输送带的结构

钢绳芯输送带是带式运输机的主要组成部分，其一般结构是由覆盖层与抗拉层组成。其中，抗拉层由多根等间距的钢丝绳组成，承担了运输系统输送带在运输过程中的绝大部分负荷。钢绳芯外部覆盖层由橡胶制成。钢绳芯输送带的总体结构如图 1-1 所示。

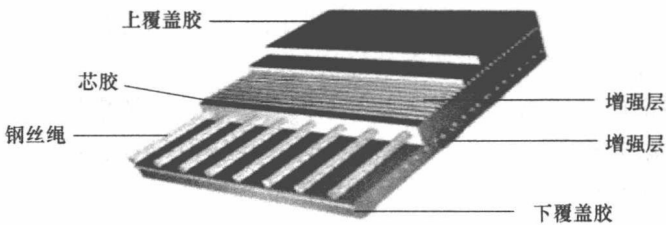


图 1-1 钢绳芯输送带结构图

由图 1-1 可以看出，钢绳芯输送带主要由钢绳芯、覆盖胶构成。覆盖胶能够保护输送带免受各种杂物以及大块物料对传送带的损伤。钢绳芯的周围可以进行抗腐蚀材料等的填充，使得钢绳芯本身不会受到严重损伤。钢绳芯输送带主要承受工作负荷的部分是其内部的钢绳芯。

它们的各自特点及规格如下^[1]。

- (1) 钢丝绳的材质一般是镀锌高碳钢，若干根细钢丝先形成股线，股线再环

绕成绳。钢丝绳一般有七股式、三股式，在整条输送带中含有等量的左右互捻的钢丝绳。钢绳芯是输送带的承拉部件，为其提供了更高的强度和更低的伸长率。

(2) 芯胶选择黏合力比较强的贴胶，使钢丝绳和芯胶紧密结合，不易脱落。芯胶把钢丝绳完整地包裹在里面，使钢丝绳之间具有良好的黏合强度，可以很好地传递应力，防止钢绳芯在使用过程中抽出。

(3) 覆盖胶的规格必须具有较好的拉伸强度和耐磨性，上覆盖胶为物料承载面，下覆盖胶与滚筒接触，主要是抓紧力强、防止打滑。输送带表面盖胶具有保护内部钢绳芯、运送物料和传输动力的优点，同时还可以减小物料下落的动量、减少磨损，并且输送带覆盖胶的磨擦系数很大，可以实现大角度、高速运送物料的功能。

正是由于钢绳芯输送带具有如此特殊的结构，所以具有拉伸强度高、伸长量小、成槽性好、抗冲击及抗弯曲疲劳性好、寿命长等优点，适合高速度、长距离、大负荷的散状物料的运输，广泛应用于码头、煤矿、电厂、冶金等重工行业。

1.1.3 钢绳芯输送带的接头

钢绳芯输送带接头搭接形式共分为一级接头、二级接头、三级接头和四级接头 4 种。接头是由热硫化交接而成，其搭接长度和搭接形式是根据输送带型号、钢丝绳的直径、间距、最小破断拉力和与橡胶之间的黏合强度而定。接头中的钢丝绳必须有一定搭接长度，使接头处钢丝绳与橡胶的黏合力大于钢丝绳的最小破断拉力^[2]。图 1-2 为 4 种接头中钢丝绳之间的搭接形式图。



图 1-2 钢绳芯搭接示意图

钢绳芯输送带的铺设距离较长，单机的输送带长度最长可达几十公里。因此，

整个输送带存在多个接头，而接头部分最容易出现断裂。接头的形式、质量将会直接影响到整个输送带的强度。所以，接头部分是钢绳芯输送带的最薄弱环节，也是最重要的环节。在通常情况下，人们用来评价一条输送带质量好坏的指标是输送带安全系数，即输送带抗拉强度与正常运行状态满载或设计最大负载的比例。然而，影响输送带抗拉强度的主要因素就是接头强度。目前，许多厂家称接头效率可达到 90% 以上，这只是输送带静态时的接头强度。而输送带在运行过程中所受的张力具有时变性，物料的变化和大块物料的冲击都会使其张力突然变大，这些动态最大突变张力是影响接头强度的重要因素。此外，影响输送带接头强度的因素还有接头结构、输送带动态负载、运输机稳定状态下负载。

本书所述的矿用输送带，即为煤矿用阻燃钢绳芯输送带。在以后的篇幅中，钢绳芯输送带统称为矿用输送带。

1.2 矿用输送带的常见故障及其机理研究

矿用输送带在运输过程中，钢绳芯通过与橡胶之间的黏合力实现输送带传递拉力。随着矿用输送带的长时间使用，运行时受到的不平衡的拉力、摩擦和冲击等多种作用以及钢绳芯与橡胶之间的黏合力不断降低，会导致矿用输送带产生多种损伤，例如：钢绳芯磨损和腐蚀导致的钢绳芯截面积减小；钢绳芯金属疲劳导致的钢绳芯失效等。当钢绳芯损伤达到一定程度的时候，将有可能发生传送带撕裂的事故，造成人身财产及重大的经济损失。

在煤矿运输系统中，造成矿用输送带发生断带事故的原因，除了输送带正常的磨损还有人为因素和其他因素造成的输送带非正常磨损和破裂，甚至断带、撕裂。停机检修或者更换新的输送带所浪费的人力、物力以及经济损失非常巨大，甚至会造成机毁人亡的重大事故。对于煤矿安全运行的维护工人以及科研人员，要做到提前预防事故并尽量减少不必要的停机，延长运输系统输送带的使用寿命，首先就要先调查清楚其产生故障的原因，并且要分析输送带故障类型。

矿用输送带故障主要有横向断裂、纵向撕裂、火灾等，其中：横向断裂主要由钢绳芯锈蚀、接头抽动和断裂导致；纵向撕裂主要由托辊、滚筒故障摩擦、金属构件卡阻、矸石划伤等危险源引起。

1.2.1 矿用输送带运行故障分析

1. 疲劳损伤影响弯曲应力

由于现场空间的限制，矿用输送带内的钢绳芯在运输机运行时要不断地绕过滚筒，随着其弯曲次数的增多，最终造成疲劳损伤。如果滚筒直径比较小，那么输送带的弯曲应力会很大。为了延长输送带的使用寿命，必须综合考虑滚筒质量、驱动装置、安装尺寸等其他因素。

2. 运输机的张紧装置影响输送带张力

输送带在运输系统正常运行时会有一定的张力，在运输机开启和制动这两种情况下，矿用输送带的张力也不同。在运输机正常运行期间，输送带的张力小于运输机在启动和制动时输送带的张力。考虑到这两种情况，带式运输机的张紧装置必须同时满足不同状态下输送带的张紧要求。如果运输机的张紧装置采用的是重锤式，此时输送带张力是一定的，那么输送带的张力是按带式运输机在正常运行、开启和制动这三种情况来设计的最大张力。不过，这样做会使输送带在一定程度上始终保持高张力的状态，从而使输送带内的钢绳芯的使用寿命减少，长期使用很容易在钢绳芯接头处发生抽动和断丝的现象^[4]。

3. 输送带张力分布影响钢丝绳寿命

为了增大煤炭的装载面积，运行时的输送带通常呈槽形。输送带由水平段过渡到槽形时，带的边缘会比中间拉伸的更大一些，致使钢绳芯输送带的张力分布在横截面上不均匀，具体如图 1-3 所示。

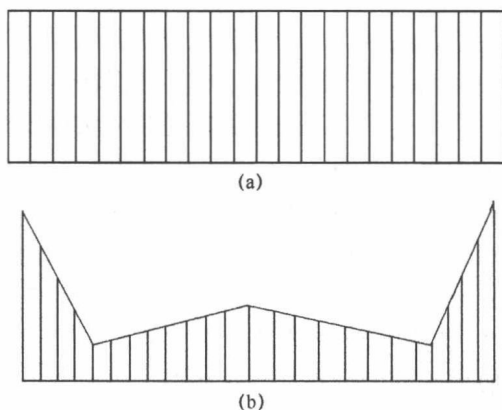


图 1-3 张力分布

(a) 正常区段上张力的均匀分布；(b) 槽形过渡区段上张力的不均匀分布。

水平区间上的张力分布如图 1-3(a)所示，在槽形过渡区间上的张力分布如图 1-3 (b) 所示。与输送带中心相比，带边张力较大，而输送带内部的钢绳芯伸长率小。因此，输送带边缘的钢绳芯更容易出现断丝。

1.2.2 矿用输送带外因故障分析

1. 外力过大

输送带因外力突然增大而剧烈拉伸时，会出现钢绳芯的断裂，造成输送带破损甚至断裂。如果输送带在运行过程中突然受到煤块、撬棍、矸石等大块的、尖锐的物料跌落在输送带上，并卡到输送带运行线上的导料槽、分料板等设施上，此刻输送带的拉伸力会突然增大，可能会导致输送带划伤并造成纵向撕裂断带事

故。正常工作的清扫机和其他设备由于突然出现故障而卡住输送带，输送带遭受的阻力增加，导致撕裂断带事故；运输系统输送带由于其运行周期不长而且经常起停，张力会随设备的运转而突然增大，也会导致输送带撕裂断带。

2. 腐蚀

矿用输送带由于长期使用，其表面覆盖胶会逐步磨损、老化、龟裂，接头开缝最初表现为覆盖胶开裂，如果破损处不能及时修补，钢绳芯将暴露在外面，水通过覆盖胶的缝隙浸入钢绳芯，导致钢绳芯锈蚀，钢绳芯的强度降低，进而导致钢绳芯断裂。硫化接头是输送带强度最薄弱的环节，其损坏与硫化工艺、材料、使用环境等因素有关^[6]。不正确的敷层、涂液、两次以上的硫化会导致硫化接头质量差，特别是硫化接头有起泡或者搭接边缘开裂，此时接头的强度会明显下降。

3. 突发性的损伤

输送带在运行过程中，导向槽衬板与输送带之间的缝隙不断变化，造成非正常损耗，或者有异物卡进缝隙造成异常磨损和划伤；导向槽衬板处物料流速与输送带的速度不一致，落差度大，也会使输送带的表面损伤加速；托辊损坏造成输送带异常磨损和划伤；输送带打滑也会造成异常损耗。

从宏观角度看，不管是什么原因导致输送带接头损坏甚至断丝，必然会造成输送带接头区域的应变以及钢绳芯的抽动。一旦输送带接头区域的部分钢绳芯发生抽动，输送带还在正常运行中，所有的运转负荷就加载到没有发生抽动的钢绳芯上。如果此时没有及时发现局部应力集中区接头的抽动，随着发生抽动的钢绳芯不断增多，接头变形区域不断扩大，输送带接头处的强度和韧性会变得越来越差。当接头区域发生抽动的钢绳芯数量越来越多，等变形区域扩展到一定程度时，会导致钢绳芯与芯胶层之间的黏合度越来越低。当黏合度难以承受负载时，所有的钢绳芯都会被抽出。这就是发生断带的机理。

1.3 矿用输送带的检测方法

准确地对矿用输送带的运行状态及接头检测、分析、诊断，是排除安全隐患的重大课题，尽可能早发现接头处钢绳芯发生抽动或断裂等故障征兆，可以很好地避免断带事故发生。近些年，各国专家针对钢绳芯输送带故障检测方法进行了广泛而深入的研究，取得了较大的进展。

1970 年以来，国外不断加大矿用输送带无损检测的研究力度，先后尝试了电磁检测、微波检测和 X 光检测等多种检测方法。澳大利亚 A.Harrison 依据磁感应原理研制出一种矿用输送带监测装置 CBM 检测器，并获得专利^[7,8]。该 CBM 探测器在设计好的支架上、下处安装两个传感器，通过这两个传感器对夹在中间的输送带内的钢绳芯进行探测，对信号进行预处理，钢绳芯的损伤程度可以显示出来。该探测器完全不同于以往的 X 光机检测，取得了电磁检测故障的新进步。1982

年到1987年,加拿大、美国、德国、南非等国家将这种电磁检测技术广泛地应用在矿产行业中,目前这种方法是国际上矿用输送带接头检测的主要方法;还有加拿大的BELT C.A.T.^[9]、俄罗斯的INTROCON等^[10]。1990年,澳大利亚的新萨斯特大学开发出一套阵列传感器系统,随后美国一家运输机公司在这套系统上开发了一系列的矿用输送带无损检测系统^[11]。近几年,美国、德国对该项研究投入较大,发展也比较快。俄罗斯“动力诊断”公司开发了一种全新的无损检测方法——金属磁记忆检测法,并研制了检测仪器来检测应力集中和各种缺陷^[12]。

我国对矿用输送带的无损检测起步较晚,经过几十年的努力,在一些方面逐步与国际接轨。我国在输送带故障检测中最初采用人工检查的方法,凭借经验判断内部钢绳芯接头是否发生抽动或者断裂;随着X光机在设备故障检测中的应用,开始采用辅助X光机对静态矿用输送带进行检测。随着无损检测技术的不断发展,一些单位将无损检测技术应用到钢绳芯输送带故障检测中。例如:北京的中国矿业大学开发的“钢绳芯输送机输送带横向X射线透视探伤监测装置”,实现了钢绳芯输送带在线实时定性检测的核心技术,极大地推动了对矿用输送带故障检测的研究^[13];1998年太原理工大学的科研人员采用电磁转换技术,成功开发了电磁式矿用输送带在线实时检测设备,这一成果在我国很多煤矿得到了广泛应用,又一次推动了输送带故障检测技术的发展^[14]。近几年,随着计算机技术、传感器技术、信号和图像处理技术的发展,我国多家科研院所又相继研制出了集电磁检测与X光机检测于一体的钢绳芯输送带实时在线无损检测装置。洛阳悉悉钢丝绳检测技术有限公司研制的TCK钢绳芯输送带在线实时自动监测系统^[15],厦门爱德森公司研究出的EMS-2003智能磁记忆/涡流检测仪、EEC/SMART-2004智能型多功能电磁检测仪、EEC/SMART-2005智能型电磁/超声多功能检测仪等^[16],这些优秀的科研成果极大地促进了矿用输送带的无损检测技术发展。目前,矿用输送带在线实时监测系统还需在以下几个方面不断完善:稳定性、数字化、智能化、自动化、信息化、网络化等^[17]。

现阶段,矿用输送带的故障检测方法分为两类:人工检测法和无损检测法。

1.3.1 人工检测法

人工检查方法就是现场维修人员采用目测、手摸或做记号的方法,观察输送带外形,判断输送带接头是否伸长或者变形,主要有以下三种方法^[18]。

1. 观察输送带“起泡”现象法

由于输送带表面覆盖着一层薄胶,当钢绳芯接头发生异常损坏而抽动时,输送带表面就会有“起泡”现象发生。当起泡面积达到一定程度时,停机更换或者维护加固,这是输送带使用现场常用的一种故障检测简便方法。这种方法的缺点是需要停机,并且清除输送带表面的杂物。

2. 输送带标线长度测量法

该方法就是将几组标刻线均匀的标刻在硫化接头的边界处,并且标线长度一

定，检测前要事先设定好标线阈值。当输送带投入实际运行后定期对每条标志标线检测，如果检测到有标线拉伸长度超过设定阈值时，启动 X 射线探测设备对接头拍照进行图像分析，来确定硫化接头损坏的程度大小，最终确定是否要更换输送带或者硫化接头。这种方法的缺点是可执行性差，需要事先对传输带进行清理。

3. 输送带表面应变测量法

这种检测方法的原理是将输送带划分为高低应力区，在低应力区传输带表面等间距标刻上同样大小的网格。当网格随着传输带运转到高应力区时测量网格形变大小，根据形变大小来确定钢绳芯损坏程度。这种方法的缺点是需要不定时停机检测，而且表面刻画的网格容易受到污损。

上面所述的人工检测方法需要维修工人有专门的检修时间，在输送带静止情况下，凭借经验对输送带表面变化情况进行判断，容易造成漏检和误判，并且只能在故障发生后进行检测。优点是方法简单；缺点是环境条件恶劣，劳动强度大。

1.3.2 无损检测法

无损检测 (Nondestructive Testing, NDT) 技术，就是利用声、光、磁和电等特性，在不损害或不影响被测对象使用性能的前提下，检测被测对象中是否存在缺陷或不均匀性，给出缺陷的大小、位置、性质和数量等信息，进而判定被测对象所处工作状态（如故障、缺陷、剩余寿命等）的所有技术手段的总称。随着科技的发展，无损检测技术得到广泛的应用，新的无损检测方法及设备如雨后春笋般地出现。通常矿用输送带故障采用无损检测的方法有 X 射线检测、超声波检测、漏磁检测、磁粉检测、机器视觉检测^[19-22]等。

1. X 射线探测检测法

X 射线探测检测法^[23]基本原理是 X 射线穿透慢速运行的矿用输送带，打在 X 射线光伏探测器上，经过一系列处理，通过观察输送带二维投影图像，查看钢绳芯及接头状况，还可以将图像信号转化为数字信号，储存在计算机上，进一步分析和判断。这种方法的优点直观、可靠；缺点是 X 射线会对人体造成伤害，对输送带内部接头小幅度抽动情况无法检测，从而埋下极大隐患^[24]。

2. 超声波检测法

超声波检测法^[25,26]是一种比较成熟的无损检测技术，基本原理是利用超声波在钢绳芯输送带内传播时，输送带的声学特性以及结构变形会影响超声波的传播，通过检测超声波受影响的状况和程度，推测输送带结构的变化。这种方法的优点是输送带表面裂纹和内部变形都可以探测到；缺点是需要清洁输送带表面，输送带与探头之间要加耦合剂，对轴向裂纹分辨力差，容易漏检微裂纹，且需要有经验的检修人员^[27]。

3. 漏磁检测法

漏磁检测法^[28,29]的原理是输送带表面或近表面有缺陷的地方，由于磁导率的

变化，磁力线会逸出表面，产生漏磁场。检测时，先用磁化传感器将钢绳芯均匀磁化，采用漏磁放大器检测钢绳芯上的漏磁信号。这种方法的优点是可以在线检测、准确定位接头抽动和损伤位置，结果可靠；缺点是操作复杂，需要预先磁化钢绳芯，检测结束后还需要退磁，耗能大。图 1-4 所示为无缺陷和有缺陷时金属构件的磁感应线。

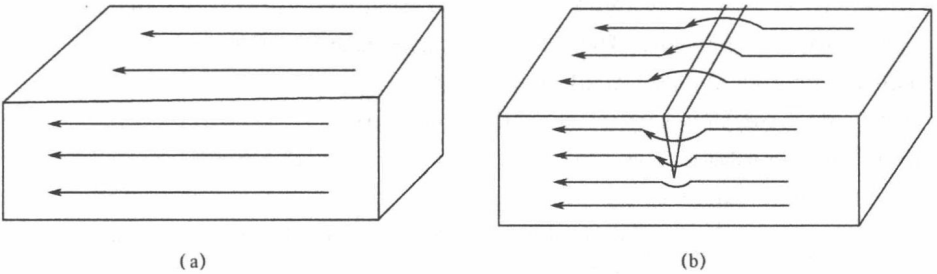


图 1-4 金属构件的磁感应线

(a) 无缺陷的磁感应线；(b) 有缺陷的磁感应线。

4. 金属磁记忆检测法

金属磁记忆检测法^[30,31]是近些年发展起来的一种新型无损检测技术，铁磁性金属部件在加工或运行时，其内部各种微观缺陷和局部应力集中在地磁场作用下有特殊反应机制，根据这个特点可以对金属构件进行早期诊断，是金属材料早期损伤无损检测中的一个有效方法。这种方法的优点是不需专门的磁化装置，探头提离效应小，不需要添加耦合剂，可以快速准确检测应力集中区，灵敏度高，在无损检测领域中具有广阔的应用前景。

表 1-1 列出了目前钢绳芯输送带常用的检测方法之间的对比。

表 1-1 目前矿用输送带常用检测方法的分析

检测方法 比较项目	人工检测	漏磁检测	X 光机检测	金属磁记忆检测
检测时输送带 状态	静止	在线	静止	在线
接头抽动与 断丝	经验判断	定性的判断	定性的判断	定性的判断
设备投入	无需设备	磁敏探头	便携、大型 X 光机设备	阵列传感器
完成检测所需 时间	检修时间长	依输送带长度判定， 较快	检修时间长	依输送带长度判定， 较快
对人体健康 影响	环境恶劣，有一定 伤害	自动在线检测，对身 体无伤害	X 光的辐射，有较大伤 害	自动在线检测，对身 体无伤害
直观性	人工观察，较直观	信号的变化，直观	图像观察，较直观	信号的变化，直观
产生缺陷的 状态	已产生明显缺陷	已产生缺陷	已产生明显缺陷	提前预测应力集中区