



## 钢丝绳芯输送带接头强度与预成型芯胶技术研究

张弘玉 李军霞 宋佳辉 樊文瑞

### 引用本文:

张弘玉, 李军霞, 宋佳辉, 等. 钢丝绳芯输送带接头强度与预成型芯胶技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 336-345.  
ZHANG Hongyu, LI Junxia, SONG Jiahui. Research on joint strength of steel cord conveyor belt and preformed core rubber technology[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 336-345.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1014>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 输送带输煤采样技术研究现状及发展趋势

Research status and development trend of belt coal sampling technology

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 200-206 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/662f110f-ee8b-4c7b-ad39-6b5d1d490945>

#### 矿井带式输送机液压拉紧Fuzzy-PID控制技术研究

Research on hydraulic tension Fuzzy-PID control technology of mine belt conveyor

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 217-224 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0597>

#### 煤矿带式输送机巡检机器人关键技术研究

Research on key technology of inspection robot for coal mine belt conveyor

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9cb74dfd-f1b2-4afc-89b2-2a92684bdaa2>

#### 带式输送机智能化关键技术现状与展望

Status and prospect of intelligent key technologies of belt conveyor

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 225-239 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1243>

#### 基于双流融合网络的输送带跑偏检测方法

Conveyor belt deviation detection method based on dual flow network

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 259-267 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0215>

#### 基于特征增强与Transformer的煤矿输送带异物检测

Coal mine conveyor belt foreign object detection based on feature enhancement and Transformer

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 199-208 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1336>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张弘玉, 李军霞, 宋佳辉, 等. 钢丝绳芯输送带接头强度与预成型芯胶技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 336-345.

ZHANG Hongyu, LI Junxia, SONG Jiahui, *et al.* Research on joint strength of steel cord conveyor belt and preformed core rubber technology[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 336-345.

## 钢丝绳芯输送带接头强度与预成型芯胶技术研究

张弘玉<sup>1,2,3</sup>, 李军霞<sup>1,2,3</sup>, 宋佳辉<sup>1,2,3</sup>, 樊文瑞<sup>1,2,3</sup>

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 矿山流体控制国家地方联合工程实验室, 山西 太原 030024;

3. 山西省矿山流体控制工程技术研究中心, 山西 太原 030024)

**摘要:** 钢丝绳芯输送带是带式输送机的牵引和运载构件, 接头破坏是引起钢丝绳芯输送带故障的主要原因。为了提高输送带的接头强度和接头硫化效率, 基于现有接头硫化工艺, 提出了一种预成型芯胶敷设技术, 以 ST1 600 型钢丝绳芯输送带接头为研究对象, 对该技术的应用进行了理论分析和试验研究。首先, 建立输送带接头力学模型并进行受力分析, 通过 ANSYS Workbench 软件研究钢丝绳水平、垂直间距不均匀性对接头强度的影响, 然后, 提出预成型芯胶敷设方法, 通过芯胶流固耦合分析对比了填充式芯胶与三角形、梯形和半圆形芯胶凹槽对限制钢丝绳偏移的作用效果。最后, 通过接头预成型芯胶硫化试验研究了该技术对输送带胶体粘合强度、接头硫化效率以及接头强度的影响。研究表明: 输送带接头处钢丝绳的受力与其纵向位移有关, 由于传统接头硫化作业中无法实现钢丝绳的均匀分布从而引起钢丝绳受力不均, 影响接头强度, 而钢丝绳水平间距相较于垂直间距的变化对钢丝绳等效应力的影响尤为显著, 更易引起接头钢丝绳的破坏。预成型芯胶敷设技术能够有效减少钢丝绳的偏移量, 其中半圆形芯胶凹槽效果最优, 水平方向减少 70%, 垂直方向减少 86.9%。在相同硫化条件下, 与填充式芯胶相比, 三角形、梯形和半圆形芯胶凹槽硫化后的粘合强度分别提升了 1.91%、-3.51%、2.48%, 半圆形芯胶与钢丝绳结合度最好; 采用半圆形芯胶凹槽的预成型芯胶技术敷设钢丝绳可减少 70% 作业时间, 硫化后的输送带接头强度提高 5.74%。研究结果可为钢丝绳芯接头硫化工艺的改进提供理论和实践指导。

**关键词:** 钢丝绳芯输送带; 预成型芯胶; 硫化工艺; 接头强度

**中图分类号:** TD526 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)04-0336-10

### Research on joint strength of steel cord conveyor belt and preformed core rubber technology

ZHANG Hongyu<sup>1,2,3</sup>, LI Junxia<sup>1,2,3</sup>, SONG Jiahui<sup>1,2,3</sup>, FAN Wenrui<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. National-local Joint Laboratory of Mining Fluid Control Engineering, Taiyuan 030024, China; 3. Shanxi Research Center of Mining Fluid Control Technology Engineering, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Steel cord core conveyor belt is a traction and carrying component of belt conveyor, and joint failure is the main cause of steel cord core conveyor belt failure. In order to improve the joint strength and vulcanization efficiency of the conveyor belt, this paper proposes a preformed core rubber laying technology based on the existing joint vulcanization process. Taking the ST1 600 steel cord core conveyor belt joint as the research object, the application of this technology is theoretically analyzed and experimentally studied. Firstly, the mechanical model of the conveyor belt joint is established and stress analysis is conducted. The influence of uneven horizontal and vertical spacing of steel cords on the joint strength is studied using ANSYS Workbench software. Then, a preformed core rubber laying method is proposed, and the effect of filling core rubber and triangular, trapezoidal, and semicircular core rubber grooves on limiting the offset of steel cords is compared through fluid-solid coupling analysis of core rubber. Finally, the influence of this technology on the adhesive

收稿日期: 2022-06-30 责任编辑: 周子博 DOI: 10.12438/cst.2022-1014

基金项目: 山西重点研发计划资助项目(201903D121065)

作者简介: 张弘玉(1992—), 男, 河北唐山人, 博士研究生。E-mail: 771930680@qq.com

strength of the conveyor belt, joint vulcanization efficiency, and joint strength is studied through joint preformed core rubber vulcanization experiments. The research shows that the stress of steel cords at the conveyor belt joint is related to their longitudinal displacement. Due to the inability to achieve uniform distribution of steel cords in traditional joint vulcanization operations, uneven stress of steel cords is caused, which affects the joint strength. The change of horizontal spacing of steel cords compared to vertical spacing has a more significant effect on the equivalent stress of steel cords, which is more likely to cause the failure of joint steel cords. The preformed core rubber laying technology can effectively reduce the offset of steel cords, among which the semicircular core rubber groove has the best effect, reducing by 70% in the horizontal direction and 86.9% in the vertical direction. Under the same vulcanization conditions, compared with filling core rubber, the adhesive strength after vulcanization of triangular, trapezoidal, and semicircular core rubber grooves increased by 1.91%, -3.51%, and 2.48%, respectively, with the best combination with semicircular core rubber. The preformed core rubber technology with semicircular core rubber groove laying can reduce the working time by 70% while concurrently boosting the joint strength of the vulcanized conveyor belt by 5.74%. The research findings can offer both theoretical and practical insights for streamlining joint enhancements.

**Key words:** steel cord conveyor belt; preformed core rubber; vulcanization technology; joint strength

## 0 引言

钢丝绳芯输送带因其拉伸强度高、摩擦阻力大、抗冲击性强等优点广泛应用于煤炭、矿山、冶金等诸多运输领域<sup>[1]</sup>,随着煤炭综采工作面的不断深入,对重载带式输送机提出了长距离、大运量的要求,钢丝绳芯输送带也成为煤炭运输的主要带型之一<sup>[2]</sup>。输送机上一条完整的输送带需要由多条短带搭接而成,受搭接过程中硫化工艺、人工操作等因素的影响,制作一个接头通常需要多名工人消耗大量时间,以一条长度 2 000 m 的钢丝绳芯输送带为例,通常需要 10 条 200 m 长的短带连接而成,单个接头的硫化时间正常情况下约为 10 h,总耗时达 100 h,工作效率低,极大地影响了输送系统的运行效率<sup>[3]</sup>。同时,传统工艺下的接头强度一般也仅为原输送带强度的 85%~90%,这使得接头连接部位成为整条输送带最薄弱的位置。钢丝绳芯输送带在运行过程中经常会因非正常因素如大块物料磨损、铁器碰撞、振动冲击等而发生撕带、断带等事故,据统计 90% 的事故发生在输送带接头处<sup>[4]</sup>。一旦出现断带事故,不但会给输送系统的修复带来巨大挑战,对企业造成巨大的经济损失,甚至引起的人员伤亡时间也会对社会引起恶劣的影响<sup>[5]</sup>。因此,如何提高输送带接头制作效率和接头强度成为运输行业亟需解决的难题。

近年来,国内外专家学者从理论分析、接头橡胶材料和接头制作工艺等方面进行了深入研究,并对接头硫化提出了新的理论和方法。LONG 等<sup>[6]</sup>通过有限元方法对钢丝绳芯输送带接头的变形以及强度的关系进行了分析,研究了在外力作用下钢丝绳与橡胶之间的粘结强度变化,得到了输送带在实际运输过程中在纵向张力作用下的应力分布情况,确定钢丝绳的长度、直径和水平间距是影响接头强度的

主要因素,并总结了接头变形与接头整体强度之间的定量关系。MIROSLAW 等<sup>[7]</sup>对输送带接头的强度进行试验研究,发现相邻钢丝绳的应力差较大,导致钢丝绳延展差异以及橡胶层中额外的剪切应力出现,确定输送带接头的疲劳寿命取决于接头橡胶的剪切强度和钢丝绳的延展性。HE 等<sup>[8]</sup>采用直径 20  $\mu\text{m}$  的超高分子量聚乙烯(UHMWPE)短纤维作为填料添加到天然橡胶中,用以增加输送带的撕裂强度,结果表明每 100 份天然橡胶中添加 1.2 份 UHMWPE 可使复合橡胶的撕裂强度提高 150.2%,但起到关键因素的是 UHMWPE 的磨碎工艺和硫化工艺。在硫化接头制作工艺方面,Robin Bovaird 等人使用具有特定尺寸、未硫化的橡胶套代替芯胶胶片包裹钢丝绳,减少了接头搭接时间,并将硫化后的接头性能提高了 30%<sup>[9]</sup>。Mohammadreza 等<sup>[10]</sup>通过研究输送带钢丝绳在接头处的应力分布,提出了一种添加金属丝与输送带橡胶相结合的接头增强技术,结果表明增加金属丝数量和直径可使粘接层应力分布均匀,减小最大应力值,接头强度提高 90%。杜占虎等<sup>[11]</sup>发明了一种用于钢丝绳芯输送带接头硫化的接头预制胶片,能够提高接头强度。虽然近年来专家学者们对钢丝绳芯输送带接头搭建技术的优化取得了一定的成果,但根据实际调研,受限于新材料的成本、技术工人操作熟练度等因素的影响,煤矿现场的接头硫化过程仍存在工艺繁琐、接头质量差的问题。

以 ST1 600 型钢丝绳芯输送带接头为研究对象,首先通过对输送带接头处进行受力分析,揭示了钢丝绳水平、垂直间距不均匀对接头强度影响规律。然后在现有硫化工艺基础上提出了一种预成型芯胶敷设技术,通过芯胶流固耦合分析对比了填充式芯胶与三角形、梯形和半圆形芯胶凹槽对限制钢丝绳偏移的影响,并对硫化后的预成型芯胶胶体的性能



受力时,相较于均匀排布的原输送带,接头处钢丝绳由于水平、垂直方向的位移,导致纵向位移量不一致,进而引起各钢丝绳受力不均,降低了接头整体强度。因此需要对钢丝绳在水平、垂直方向间距的不一致对接头强度的影响进行分析。

## 2 钢丝绳偏移对接头强度影响的仿真分析

在 ANSYS Workbench 中对钢丝绳芯输送带接头进行静力学分析<sup>[14]</sup>,以普通型 ST1 600 钢丝绳芯输送带为研究对象,上覆盖胶厚度 8 mm,芯胶厚度 8 mm,下覆盖胶厚度 6 mm,钢丝绳直径 3.9 mm,钢丝绳间距 12 mm,模型长度 50 mm,如图 3 所示。

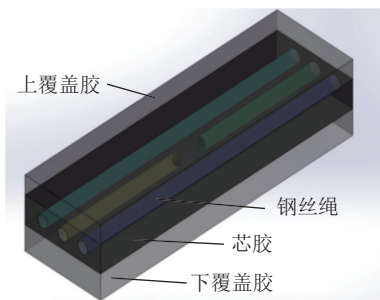


图 3 输送带接头三维模型  
Fig.3 3D model of the conveyor belt connector

为降低建模难度和提高计算速度,钢丝绳采用圆柱体代替,设置模型的端面钢丝绳固定,另一侧施加模型长度的 0.2% 伸长量,用钢丝绳彼此间的剪切力衡量表征钢丝绳和橡胶的粘合性能<sup>[15]</sup>。由于中间两根钢丝绳未刚性连接,与橡胶的粘合处最容易发生破坏,因此围绕中间钢丝绳和对应橡胶的受力情况展开研究。钢丝绳及橡胶材料的属性参数见表 1、表 2。

### 2.1 水平间距不均匀性对接头强度影响分析

在 ST1 600 型钢丝绳芯输送带尺寸范围内选取间距 6、9、12、15、18 mm 情况下对接头处进行受力分析,主要分析中间位置的钢丝绳和橡胶所受到的

表 1 输送带钢丝绳的材料属性  
Table 1 Material properties of conveyor belt wire rope

屈服极限/GPa	泊松比	剪切模量/GPa	弹性模量/GPa
1.95	0.3	85.3	184.9

表 2 输送带橡胶的物性参数

Table 2 Physical parameters of conveyor belt rubber

类型	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-2</sup> )	非牛顿指数	W/(m·K)
芯胶	2 201	1 182	0.75	0.3
覆盖胶	2 398	1 389	0.75	

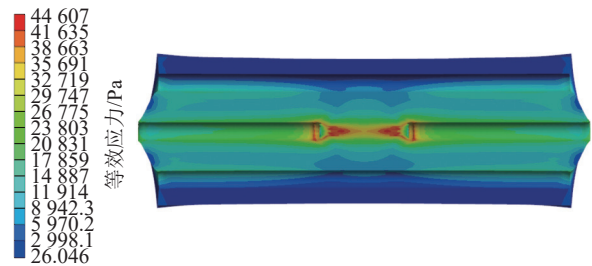


图 4 接头中心截面等效应力云图

Fig.4 Cloud diagram of reduced stress of joint center section

等效应力以及橡胶的最大剪切力。当间距为 12 mm 时,接头中心水平截面等效应力如图 4 所示。可以看出,橡胶最大等效应力发生在中间两根钢丝绳与橡胶结合面上,中间钢丝绳最大等效应力发生在受位移载荷端处,同时沿着钢丝绳在纵向上由中心向两端逐渐减小。不同水平间距下中间钢丝绳等效应力、橡胶等效应力以及橡胶最大剪应力的仿真结果如图 5 所示。

由图 5 看出,在施加相同的位移载荷后,中间钢丝绳和橡胶所对应的等效应力,以及橡胶的最大剪应力均随着钢丝绳水平间距的减小而增大,这是由于随着水平间距减小,钢丝绳间的芯胶厚度减少,增大的应力会降低钢丝绳与橡胶之间的粘合强度,加大接头破坏几率。当水平间距为 12 mm 时中间钢丝

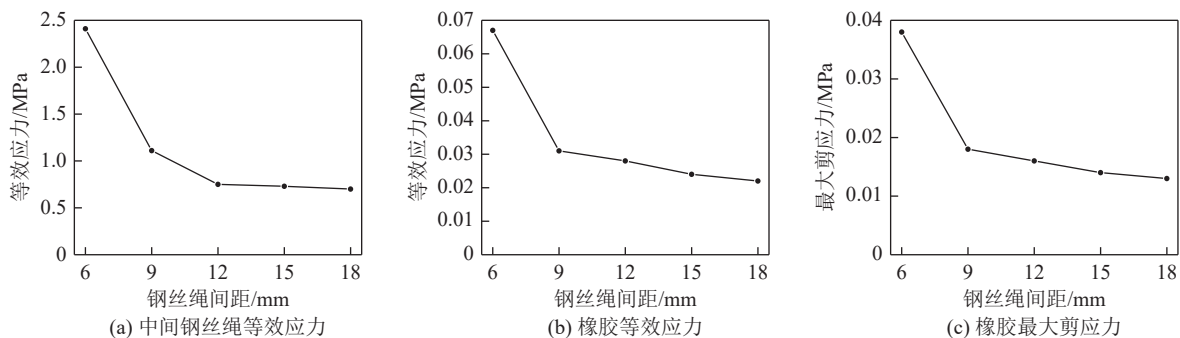


图 5 不同水平间距下的输送带接头应力

Fig.5 Stress of conveyor belt joint under different horizontal spacing

绳等效应力为 0.72 MPa, 水平间距大于 12 mm 后, 3 种力的变化趋于稳定。其中, 中间钢丝绳等效应力差值为 1.71 MPa; 橡胶等效应力差值为 0.05 MPa; 橡胶受到的最大剪应力差值为 0.03 MPa。

根据接头等效应力随钢丝绳间距变化图所描述的规律, 在间距大于 12 mm 后的中间钢丝绳和橡胶的等效应力差别很小, 与国标 GB/T 9770—2013《普通钢丝绳芯输送带》中规定的钢丝绳间距 12 mm

相吻合, 也进一步证明仿真的正确性。

## 2.2 垂直间距不均匀性对接头强度影响分析

分析钢丝绳在垂直距离的受力情况, 在钢丝绳水平间距为 12 mm 的条件下, 选择钢丝绳垂直间距 0、1、2、3、4、5 mm 对钢丝绳和橡胶的受力情况进行<sup>[16]</sup>, 主要对中间位置钢丝绳和橡胶所受到的等效应力, 以及橡胶的最大剪切力进行分析, 仿真结果如图 6 所示。

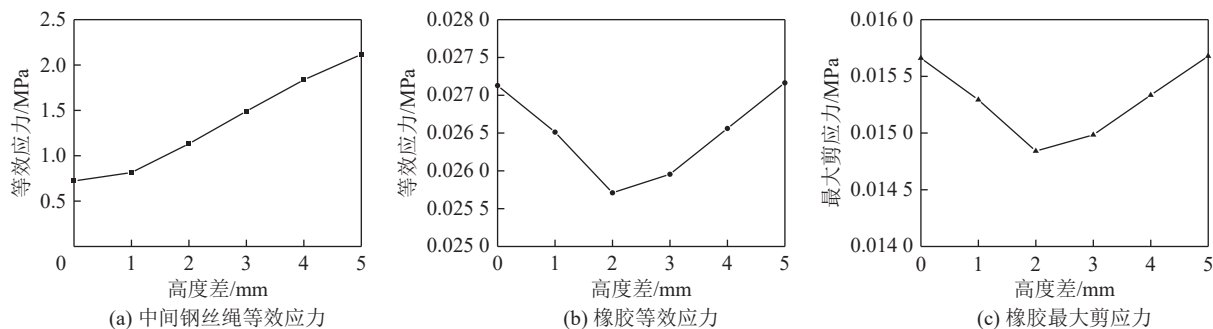


图 6 不同垂直间距下的输送带接头应力

Fig.6 Stress of conveyor belt joint under different vertical spacing

由图 6a 中间钢丝绳等效应力图可以看出, 高度差为 0 时钢丝绳的等效应力为 0.7 MPa, 随着高度差增加, 钢丝绳的等效应力呈线性增长趋势, 最大差值为 1.56 MPa。由图 6b 和图 6c 可以看出, 随着钢丝绳垂直偏移增加, 橡胶的等效应力和最大剪应力虽然有浮动, 但其变化数值微小, 差值均在 0.001 MPa 以内, 因此, 钢丝绳的垂直偏移主要对钢丝绳的应力变化存在影响。结合水平间距不均影响分析结果可知, 无论在数值以及变化的幅度上, 相较垂直间距, 水平间距变化对钢丝绳等效应力的影响尤为显著, 更易引起接头钢丝绳的破坏, 因此为提高接头强度, 在硫化过程中应保证钢丝绳水平方向的均匀排布。

## 3 接头预成型芯胶敷设技术及凹槽流固耦合分析

### 3.1 接头预成型芯胶敷设技术

目前, 煤矿钢丝绳芯输送带硫化作业还无法实现自动化, 需要将处理后的钢丝绳按照搭接要求敷设在芯胶内部, 铺上覆盖胶后在接头硫化机内完成硫化。传统的钢丝绳敷设方法是操作人员首先按照搭接要求在整片芯胶上绘制标记, 再将剥皮修整后的钢丝绳按照标记均匀的敷设在芯胶上, 然后将芯胶胶条填充在钢丝绳间隙(以下简称填充式芯胶), 最后铺上芯胶及覆盖胶, 通过硫化机完成硫化<sup>[17]</sup>。人工摆绳操作繁琐、耗时长, 对操作人员的熟练度依

赖程度高, 同时由于钢丝绳自身的刚度问题, 也很难在敷设后保持水平方向的均匀性排布, 引起钢丝绳间距不一致, 由上文分析可知, 该现象会对硫化后的接头强度产生不利影响。

针对以上问题, 提出一种接头预成型芯胶敷设技术, 结构如图 7 所示。

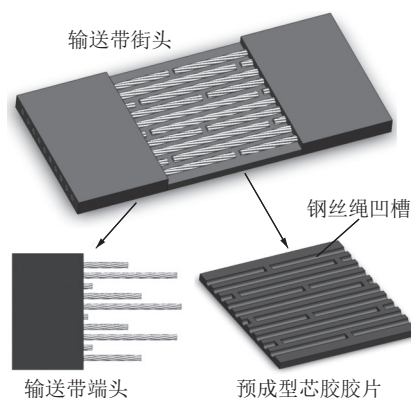


图 7 接头预成型芯胶结构示意图

Fig.7 Structure of preformed core adhesive

通过橡胶挤压模具制成带有符合搭接要求的预成型芯胶胶片, 只需将钢丝绳按照顺序依次摆放在芯胶凹槽内, 即可完成钢丝绳的敷设作业, 同时由于整片芯胶一体成型, 相邻凹槽中间的芯胶具有足够强度以限制钢丝绳的偏移, 保证了钢丝绳的均匀排布, 此外也省略了插入芯胶胶条的作业步骤, 以提高工人敷设效率和输送带接头强度。

### 3.2 接头预成型芯胶凹槽流固耦合分析

输送带接头在硫化过程中橡胶流动及残存气体的排出导致内部流场的变化,进而产生钢丝绳的偏移<sup>[18]</sup>。因此通过流固耦合分析研究硫化过程中预成型芯胶接头橡胶的流动对钢丝绳偏移的影响。传统钢丝绳敷设过程中插入的芯胶胶条可以等效为立方体形状,钢丝绳与芯胶的截面如图 8a 所示,简称填充式芯胶。为探究预成型芯胶凹槽形状对钢丝绳偏移的影响,考虑橡胶挤压机的生产难度,设计了三角形、梯形和半圆形芯胶凹槽结构,如图 8b—图 8d 所示。

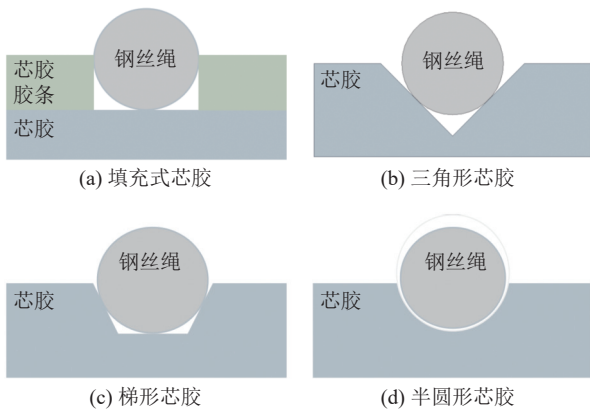


图 8 预成型芯胶凹槽模型截面图  
Fig.8 Preformed core rubber groove model

通过设置接头钢丝绳与橡胶的流固耦合界面,将流体橡胶计算数据导入到结构模块中进行强度分析,计算钢丝绳形变量。将模型导入 Fluent 中,设置能量残差值标准为  $10^{-6}$ ,并对结构分析进行网格无关性验证<sup>[19]</sup>,模型相关尺寸与图 3 一致。通过 Fluent 与 Static Structural 联合计算得到的钢丝绳在流体橡胶作用下的变形如图 9 所示。

由图 9 可以看出,由于左侧施加固定约束,四种芯胶中钢丝绳的偏移量均从左到右增大,其中填充式芯胶中的钢丝绳变形最为明显,而半圆形芯胶最小,为  $1.01 \times 10^{-4}$  mm。进一步提取各芯胶钢丝绳在水平、垂直、纵向 3 个方向的偏移量如图 10 所示。

由图 10 可以看出,填充式芯胶内的钢丝绳与其他 3 种相比在 3 个方向上均存在较大的偏移量,这是由于填充式下的芯胶胶条与上下芯胶在硫化前没有结合,无法对钢丝绳的偏移提供约束力。①水平方向,3 种预成型芯胶中的钢丝绳具有相似的偏移量,相较填充式芯胶,偏移量较少了约 70%,表明所设计的凹槽结构均可有效限制钢丝绳的水平方向的移动;②垂直方向,3 种预成型芯胶的钢丝绳偏移量具有较大差异,由大到小分别为三角形、梯形和半圆形芯胶

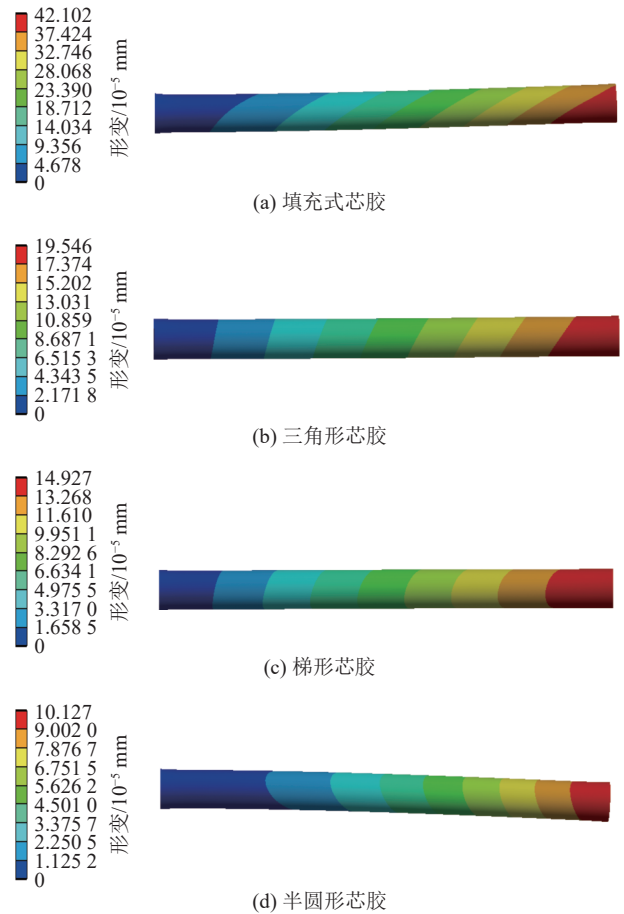


图 9 钢丝绳变形云图

Fig.9 Deformation of wire rope

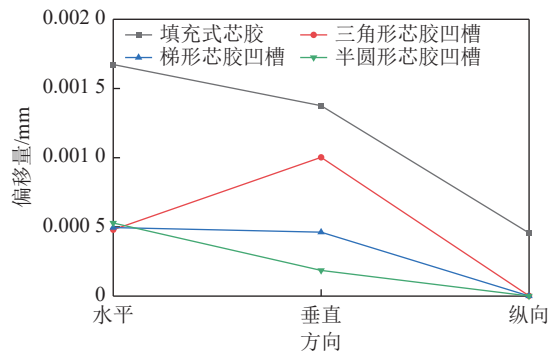


图 10 钢丝绳偏移量  
Fig.10 Cable deformation

凹槽,相较于填充式芯胶,偏移量分别减少了 27.5%、66.7% 和 86.9%,这是由于硫化前接头内存在空气,硫化过程中钢丝绳周围的空气在高温高压作用下流动,致使钢丝绳产生偏移,由于半圆形芯胶凹槽与钢丝绳结合面均匀,因此产生的偏移量最小;③纵向,3 种预成型芯胶在纵向上基本未发生变异,这是由于芯胶凹槽能够对钢丝绳提供较大摩擦阻力,硫化过程中内部压力及空气的扰动很难在纵向上使钢丝绳产生偏移。通过上述仿真可以看出,3 种预成型芯胶

均可有效减少钢丝绳的偏移,从而提高各钢丝绳受力的均匀性,其中半圆形芯胶凹槽效果最优。

## 4 接头预成型芯胶硫化试验

### 4.1 预成型芯胶胶体粘合强度测试

为探究不同形状的预成型芯胶凹槽对硫化后胶体粘合强度的影响,设计了预成型芯胶胶体性能试验<sup>[20]</sup>。试验采用的胶料试样为芯胶,镀锌钢丝绳直径为3.9 mm,试验主要仪器为M-3000A1型硫化仪、GT-7014-H40硫化机、GT-AI-7000M型拉力试验机,如图11所示。所以材料的来源及试验地点为山西奥伦胶带厂。

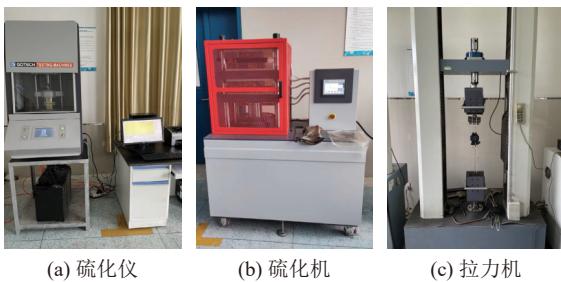


图11 试验仪器

Fig.11 Cable deformation

首先将芯胶原料按照图8所示加工成三角形、梯形及半圆形凹槽芯胶式样,如图12所示。将钢丝绳摆放进3种预成型及填充式芯胶式样进行硫化,硫化温度160℃,压力2 MPa,时间30 min,硫化模具尺寸70 mm×50 mm×24 mm,完成硫化后取出接头

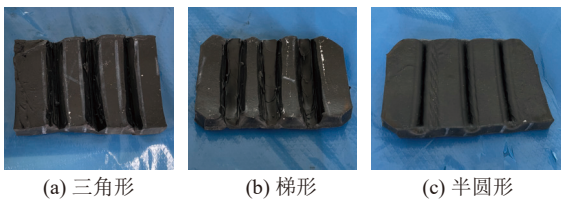


图12 试验试样

Fig.12 The test sample

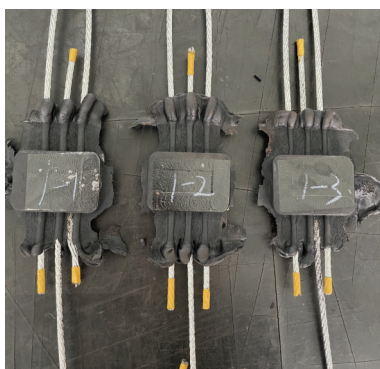


图13 接头试样

Fig.13 Joint specimen

试样如图13所示。

接头试样冷却放置1 d后通过拉力试验机进行拉伸试验,拉伸速度为100 mm/min。每组试样分别进行3次试验,同时记录钢丝绳被完全抽离时的拔脱力,试验结果见表3。

表3 芯胶与钢丝绳粘合强度试验结果  
Table 3 Test results of bonding strength between core rubbish and wire rope

芯胶凹槽形状	试件编号	最大拔脱力/N	粘合强度/(N·mm <sup>-1</sup> )	平均粘合强度/(N·mm <sup>-1</sup> )	提升效果/%
填充式芯胶	A1	6 973	139.5		
	A2	6 684	133.7	132.9	1
	A3	6 281	125.6		
三角形芯胶凹槽	S1	6 803	136.1		
	S2	6 314	126.3	135.5	1.91
	S3	7 201	144.0		
梯形芯胶凹槽	T1	6 579	131.6		
	T2	6 465	129.3	128.3	-3.51
	T3	6 195	123.9		
半圆形芯胶凹槽	B1	7 451	149.0		
	B2	6 345	126.9	136.2	2.48
	B3	6 639	132.8		

由表3可以看出,在相同的硫化工艺下,采用了不同形状的预成型芯胶凹槽会使芯胶与钢丝绳产生不同的粘合强度,以填充式芯胶硫化粘合强度为对照,三角形、梯形芯胶和半圆形凹槽与钢丝绳硫化后的粘合强度相对分别提升了1.91%、-3.51%、2.48%,均大于GB/T 9770—2013中所规定的105 N/mm。其中粘合强度最大的是半圆形芯胶凹槽,为136.2 N/mm。3种预成型芯胶与填充式芯胶随着硫化过程变成熔融状态包裹钢丝绳,并在压力作用下排出存留的空气,半圆形状可与钢丝绳均匀紧密接触,减少空气的残留且加快排出,提高硫化后接头强度。梯形芯胶凹槽下钢丝绳粘合强度降低的原因可能是由于橡胶挤压机精度问题,导致凹槽空隙较大,在硫化过程中胶体内残留了过量的空气。

当钢丝绳从接头中被抽出后,残留在钢丝绳上芯胶的情况也能表征芯胶的粘合强度,四种硫化接头钢丝绳芯胶残留如图14所示。

通过图14可以看出,半圆形芯胶凹槽硫化接头处钢丝绳上的残留芯胶最多,残留芯胶能够均匀地附着在钢丝绳表面上,其余3种的钢丝绳上均有不同程度裸露,填充式与梯形芯胶凹槽残存芯胶较少,

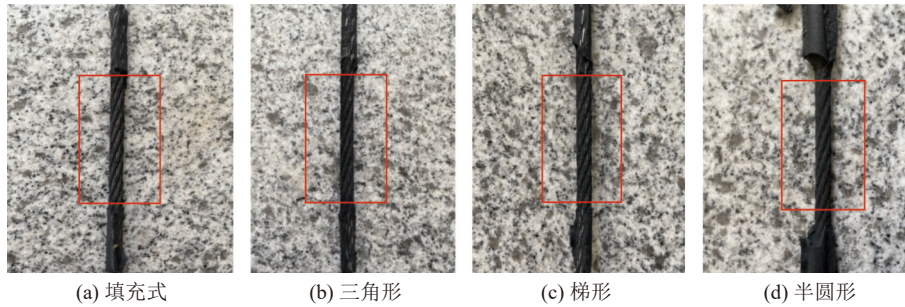


图 14 四种硫化接头钢丝绳芯胶残留

Fig.14 Residue of four kinds of vulcanized joint wire rope core rubber

表明芯胶与钢丝绳间的粘合强度略低,致使胶带粘合强低于上述两种。通过上述分析表明,半圆形芯胶凹槽与钢丝绳结合度最高,其粘合强度也最大,因此选择预成型芯胶凹槽形状为半圆形。

#### 4.2 预成型芯胶接头敷设试验

为检验上文提出的钢丝绳芯输送带预成型芯胶接头敷设技术对硫化作业效率的提升效果,分别进行填充式芯胶和半圆形预成型芯胶接头敷设试验,输送带原带及接头制作材料均来自奥伦橡胶厂,预成型芯胶凹槽胶片由原芯胶挤压成型,参数见表 4,接头由 3 名工人按照三阶搭接方式进行作业。

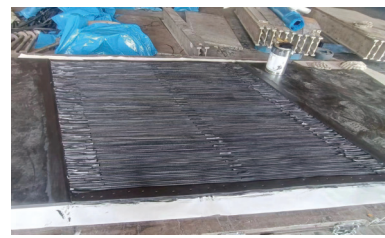
表 4 钢丝绳芯输送带参数

Table 4 Parameters of steel wire core conveyor belt

参数	填充式芯胶接头	预成型芯胶接头
输送带类型	ST1600型钢丝绳芯输送带	
带宽/mm	800	
接头区域长度/mm	1 500	
钢丝绳数量	63	
钢丝绳直径/mm	3.9	
芯胶厚度/mm	上、下芯胶各4	上芯胶2、下芯胶凹槽、 凹槽直径4
覆盖胶厚度/mm	上覆盖胶8、下覆盖胶6	

两种芯胶接头制作过程如图 15 所示,图 15a 为传统的接头硫化过程,准备好前期工作后,3 名人工按照三阶搭接方式在芯胶表面上绘制敷设图形,再依次将裁剪好的钢丝绳摆放在芯胶上,然后在每根钢丝绳间隙插入芯胶胶片用以填充,总共用时 40 min。该过程由于人工操作,面对数十上百根钢丝绳极易出现搭接方式绘制错误的问题,同时也不可避免的出现钢丝绳摆放不均的问题,此外,长时间的将钢丝绳暴露在恶劣的井下环境中也容易造成钢丝绳表面被粉尘污染,致使钢丝绳与芯胶的粘合强度降低。

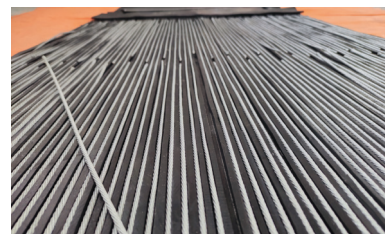
图 15b 为采用预成型芯胶的钢丝绳敷设过程,



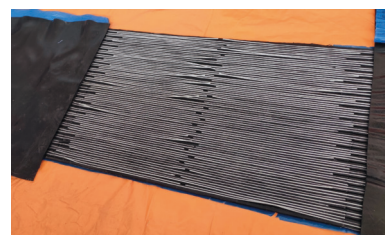
(a) 填充式芯胶敷设



(b) 预成型芯胶钢丝绳敷设过程



(c) 预成型芯胶接头



(d) 预成型芯胶接头

图 15 两种芯胶敷设过程

Fig.15 Two core adhesive laying processes

由于预成型芯胶本身具有匹配搭接要求的凹槽,省去了绘制图形和填充芯胶胶片的流程,极大缩短了钢丝绳敷设时间。经现场试验测得,3 人仅用 12 min 即可完成钢丝绳敷设作业,较传统敷设方法缩短时间 70%。图 15c 和图 15d 为钢丝绳敷设完成的接头,可以看到由于凹槽自身轨道的限制,每根钢

钢丝绳均按照规定的搭接方式整齐摆放,解决了水平、垂直方向间距不均匀的现象,确保接头内钢丝绳的受力一致。

### 4.3 输送带接头纵向拉伸试验

将上文制作的填充式芯胶输送带接头和预成型芯胶输送带接头完成刷胶浆、敷设上芯胶、覆盖胶、裁剪等步骤后,放入硫化机中在相同的条件下(145 °C, 1.8 MPa, 40 min)进行硫化,最后硫化后的对填充式芯胶输送带接头、预成型芯胶输送带接头以及输送带原带按照 GB/T 5754.2—2017 规定的钢丝绳芯输送带纵向拉伸试验方法进行静态拉断强度试验。将3种输送带各自裁剪成长度为300、300和200 mm的3段,依次在WAL(300)卧式拉力机上进行拉伸,如图16所示,并记录其拉断时的数值。



图16 输送带纵向拉伸试验

Fig.16 Longitudinal tensile test of conveyor belt

输送带纵向拉伸试验结果见表5,3条输送带的强度均大于国家标准值,填充式芯胶输送带接头和预成型芯胶输送带接头强度分别为原输送带的91.15%和96.89%,结果表明相较于传统硫化工艺,采用预成型芯胶技术硫化的钢丝绳芯输送带接头强度提高了5.74%。

表5 纵向拉伸试验结果  
Table 5 Longitudinal tensile test results

	拉力试验结果/kN				硫化效果
	300 mm	300 mm	200 mm	总拉力	
标准值	600	600	400	1 600	—
输送带原带	682	701	448	1 831	100%
填充式芯胶接头	621	637	411	1 669	91.15%
预成型芯胶接头	673	662	437	1 774	96.89%

## 5 结 论

1)输送带接头处钢丝绳的受力与其纵向位移有关,由于传统接头硫化作业中无法实现钢丝绳的均匀分布,导致钢丝绳受力不均,进而影响接头强度。通过钢丝绳偏移对接头强度影响分析表明:水平间

距相较垂直间距的变化对钢丝绳等效应力的影响尤为显著,更易引起接头钢丝绳的破坏。

2)为限制输送带接头钢丝绳的偏移,提高接头敷设效率,在现有硫化工艺基础上,提出了一种预成型芯胶敷设技术,通过橡胶挤压模具制成带有符合搭接要求的预成型芯胶胶片,将钢丝绳按照顺序依次摆放在芯胶凹槽内,即可完成钢丝绳的敷设作业。通过对预成型芯胶凹槽进行流固耦合分析表明:三角形、梯形和半圆形芯胶凹槽均可以有效减少钢丝绳的偏移量,其中半圆形芯胶凹槽效果最优,水平方向减少70%,垂直方向减少86.9%。

3)预成型芯胶胶体粘合强度测试结果表明:在相同硫化条件下,与填充式芯胶相比,三角形、梯形和半圆形芯胶凹槽硫化后的粘合强度分别提升了1.91%、-3.51%、2.48%,半圆形芯胶与钢丝绳结合度最好,粘合强度也最大。预成型芯胶接头敷设试验结果表明:与填充式芯胶相比,采用预成型芯胶技术敷设钢丝绳可减少70%作业时间。输送带接头拉伸试验结果表明:与填充式芯胶相比,采用预成型芯胶技术硫化的钢丝绳芯输送带接头强度提高了5.74%。预成型芯胶敷设技术可极大地提高输送带接头敷设效率,同时也能提高硫化后的接头强度。

### 参考文献(References):

- [1] 蒋卫良,王兴茹,刘冰,等.煤矿智能化连续运输系统关键技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(7):134-142.  
JIANG Weiliang, WANG Xingru, LIU Bing, *et al.* Study on key technology of coal mine intelligent continuous transportation[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 134-142.
- [2] 康红普,王国法,王双明,等.煤炭行业高质量发展研究[J].中国工程科学,2021,23(5):130-138.  
KANG Hongpu, WANG Guofa, WANG Shuangming, *et al.* High-quality development of China's coal industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130-138.
- [3] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴-2020,2020[M].北京:中国统计出版社,2021.
- [4] KONECKI K, WOJTKOWIAK D, TALASKA K, *et al.* Conventional selection of mechanical fasteners for flat belts[J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 2916.
- [5] 王国法.煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J].煤炭科学技术,2022,50(1):1-27.  
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [6] LONG Xinyu, LI Xianguo, SHEN Zhenqian, *et al.* Analysis of strength factors of steel cord conveyor belt splices based on the FEM[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019(2): 1-9.

- [7] BAJDA M, BLAZEJ R, HARDYGÓRA M. Impact of selected parameters on the fatigue strength of splices on multiply textile conveyor belts[J]. *Earth and Environmental Science*, 2016, 44(5): 052021.
- [8] HE J, HUANG B Y, WANG L, *et al.* Enhancing natural rubber tearing strength by mixing ultra-high molecular weight polyethylene short fibers[J]. *Polymers*, 2023, 15(7): 1768.
- [9] STEVEN R B, BROWN H C. Preformed strip and method for splicing conveyor belts[P]. USA: US6689247, 2004-02-10.
- [10] KAJI M, FARAHANI M, ANSARI M. A reinforcing technique for the adhesive bonded composite joints using metallic wires[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017, 31(17): 1963–1975.
- [11] 杜占虎, 李永亮. 一种钢丝绳芯输送带接头预制胶片 [P]. 中国: ZL209291286U, 2019-08-23.
- [12] 刘鸣宇. 钢丝绳芯输送带接头硫化加热系统研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021  
LIU Mingyu. Research on vulcanization heating system for steel cord core conveyor belt joints[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [13] 申立芳. 钢丝绳芯输送带钢丝绳抽动的有限元分析 [D]. 天津: 天津工业大学, 2018  
SHEN Lifang. Finite element analysis of wire rope twitching of wire rope core conveyor belt[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018.
- [14] 吴震, 王颖. 基于 ANSYS Workbench 液压支架整架有限元分析[J]. *煤矿机械*, 2009, 30(9): 106–108.  
WU Zhen, WANG Ying. Finite element analysis of hydraulic support frame based on ANSYS Workbench[J]. *Coal Mining Machinery*, 2009, 30(9): 106–108.
- [15] GHOREISHY M H R. A state-of-the-art review on the mathematical modeling and computer simulation of rubber vulcanization process[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2016, 25(1): 89–109.
- [16] 李晓森. 基于有限元法的钢丝绳芯输送带接头的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008  
LI Xiaosen. Belt conveyor steel cord splice research based on finite element method[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [17] 郭飞, 张兆想, 宋炜, 等. 橡胶硫化过程数值模拟研究进展[J]. *化工学报*, 2020, 71(8): 3393–3402.  
GUO Fei, ZHANG Zhaoxiang, SONG Wei, *et al.* Research progress in numerical simulation of rubber vulcanization[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(8): 3393–3402.
- [18] 刘立波, 李军霞, 张弘玉, 等. 带式输送机输送带接头用胶硫化特性研究[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(4): 30–32.  
LIU Libo, LI Junxia, ZHANG Hongyu, *et al.* Study on vulcanization properties of rubber for belt joint of belt conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(4): 30–32.
- [19] 方志坚. 钢丝绳芯胶带热硫化胶接工艺的改进[J]. *矿业研究与开发*, 2015, 35(1): 96–98.  
FANG Zhijian. The improvement on heat vulcanizing process of steel core belt[J]. *Mining Research and Development*, 2015, 35(1): 96–98.
- [20] SH L T, MARCIN B, ADAM K, *et al.* Study of the influence of vulcanization process parameters on the adhesion strength of textile-reinforced conveyor belts[J]. *Textile Research Journal*, 2023, 93(23/24): 5345–5356.