多效耦合智能皮带清洁机设计与试验研究

谭潇玲，刘克俭，温荣耀，张 震
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205）

摘要： 为了彻底解决皮带运输机使用过程中的粘料和落料问题，文章通过深入分析皮带粘料的成因和特点，研究出由“辊刷－剥离鞭－高压气刀”组成的多级耦合皮带清除技术，并开发了包含清洁系统、散料回收系统、智能控制系统的多效耦合智能皮带清洁机。基于仿真和试验研究的方法，验证了高压气刀装置对浆状层的清除效果，明确了当入口压强大于0.7 MPa、喷射距离为5～10 mm、喷射角度为70°，喷孔间距为4.5 mm、高压气刀采用双排错列布置时，在工程运行过程中粘料皮带表面能够获得较好的清除效果。目前，多效耦合智能皮带清洁机已在工程现场运行1年以上，可实现皮带粘料的脱除率90%以上，同时可实现长期有效防粘除粘、清扫回收一体化以及清理过程的无人化。

关键词： 皮带粘料；多效耦合；皮带清洁机；高压气刀；防粘除粘
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)05－0059－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.071

Design and experimental research on multi-effects coupled intelligent cleaning machine for belts

TAN Xiaoling, LIU Kejian, WEN Rongyao, ZHANG Zhen
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In order to completely solve the problem of material clinging and blanking during the use of belt conveyor, through in-depth analysis on the causes and characteristics of materials clinging to belt, a multi-effects coupled removal technology for belts is researched, which is composed of "roller brush-peeling whip-high-pressure air knife", and a multi-effects coupled intelligent cleaning machine for belts is developed, including cleaning system, bulk cargo recovery system and intelligent control system. Based on the simulation and experimental research method, the removal effect of the high-pressure air knife device on the slurry layer is verified, and it is made clear that when the inlet pressure is greater than 0.7 MPa, the spray distance is 5～10 mm, the spray angle is 70°, the nozzle spacing is 4.5 mm, and the high-pressure air knife adopts double-row staggered arrangement, the surface of the belt twhich has clinging materials on it can obtain a better removal effect during the engineering operation. At present, the multi-effects coupled intelligent cleaning machine for belts has been running on the engineering site for more than 1 year, which can realize the removal rate of clinging materials of more than 90%, and can realize long-term effective anti-sticking and debonding, cleaning and recycling integration and unmanned cleaning process at the same time.

Key words: material clinging to belt; multi-effect coupling; cleaning machine; high pressure air knife; anti-sticking and debonding

近年来，在国家“十四五”战略发展规划和“双碳”目标的大背景下，冶金、煤炭等传统行业

收稿日期： 2022－9－15；**修回日期：** 2022－11－22
基金项目： 湖南省科技成果转化及产业化计划资助项目(2020GK4055)
作者简介： 谭潇玲(1996—)，女，工程师，从事钢铁冶金装备研发方面的工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

正处于产能变革的关键时期，同时面临着向绿色化和智能化转型的挑战，这也对相关生产制造装备提出了新的要求。其中带式运输机作为一种最常见的生产运输装备，为了顺应行业发展的趋势，也正处于自动化和绿色化的改造进程当中[1-3]。

皮带表面粘料是影响皮带运行效果及使用寿命的重点问题之一。一方面，粘料的存在会引起皮带与滚筒、托辊之间的过度磨损，从而造成皮带跳动、跑偏等一系列的设备运行故障；另一方面，在皮带回程过程中表面粘料会沿途掉落并造成扬尘，不仅增加了工人的清扫工作量，而且带来了严重的环境污染。因此，皮带表面粘料的有效清除是提高运行效率、减少设备故障、降低维护成本的重要手段。

目前，国内外主流的清扫器主要有刮板式清扫器、辊刷式清扫器、水力和风力清扫器等[4]，但是，不同的清扫器对不同类型粘料的清扫效果、皮带表面的磨损程度以及使用过程中的自动化程度均不相同。因此，在实际运行过程中，为了提高清扫器的运行效果，国内外相关设备厂家除了对传统的清扫器进行改造之外，还针对皮带粘料的特性提出了联合清扫装置。比如在水泥行业，就有相关设备厂家基于大量的行业调查和试验分析提出了“三道刮板 + 电动辊刷 + 高压气幕”的清扫方案[5]；在码头，又有对应提出的“一清、二冲、三挤、四刮、五引导”的清扫方案[6]；在大运量、长距离的输送机上，德国某设备厂家针对水分大、黏性强的物料提出了“高压水冲洗—转刷、刮板清扫—热风烘干”的清扫方案等。然而，在冶金行业，采用的主要还是可调式刮板清扫器，在使用过程中仅对黏附在皮带表面的粒状或块状物料的清扫效果较好，且存在皮带磨损程度难控制的问题[7]，目前并没有出现既可解决现有方案存在的问题，又能在行业内通用的皮带清扫方案。

因此，文章基于理论分析、仿真分析和试验分析的方法，针对冶金行业皮带粘料特性，提出了一种“松散料刷除—固结层剥离—残留浆状层高压气刀清除—散料自动收集”的皮带粘料通用解决方案，并由此开发了集表面清料和散料收集功能为一体的多效耦合智能皮带清洁机，可以解决冶金行业现有的皮带清扫器适用范围小、有效寿命短、自动化程度低等一系列的问题，可实现长期有效防粘除粘、清扫回收的一体化、皮带粘料清理过程的无人化，减少环境污染，促进冶金生产过程的绿色化。

1 皮带粘料的成因及特点

通过对现场皮带粘料的过程进行总结分析发现，皮带输送机运行初期，粘料现象并不严重，即使有少量粘料，也容易清除。但随着运行时间的延长，皮带表面粗糙度增大，加上散状物料中水分的存在会增强颗粒之间的黏结力，使得在紧贴皮带表面会形成一层由超细原料粉末与皮带表面积水混合后而形成的浆状层，厚度大约在 1 ~ 3 mm。随着时间的推移，浆状层内部水分蒸发后，会直接在皮带表面变硬、变厚，同时与皮带之间的接合强度也会进一步增强，形成固结层。且由于固结层是由原料中的细粉组成的，与原料之间的亲和力较强，皮带运输过程中的松散物料极易黏附在表面，形成松散黏结物层。

在松散黏结物、固结层和浆状层这 3 种不同的皮带粘料类型中，松散黏结物的占比较大，其比较容易清除；固结层的占比不高，受到物料与皮带之间较强的黏结作用的影响，其清除难度较大；浆状层是皮带粘料情况恶化的根本原因，也是最难清除的一类粘料。由于常用的皮带粘料清扫设备只能去除具有一定体积和一定机械强度且黏结不牢固的表面粘料，而浆状层厚度很薄，又是泥浆状态，可以轻松绕过刮刀等清除设备，导致市面上现有皮带清扫设备几乎无法对此类粘料实施有效清扫。

为了彻底解决皮带表面的粘料问题，除了要清除表面的松散黏结物之外，还要去除皮带表面已经形成的固结层，并在新的浆状层固结之前有效清除，防止固结层的再次形成。

2 多效耦合智能皮带清洁机结构及工作原理

多效耦合智能皮带清洁机主要由清洁系统、散料回收系统两个部分组成（图 1）。除此之外，还配备有智能控制系统（图 2）。其中：清洁系统包括辊刷、剥离鞭和高压气刀，用于在皮带运行过程中对表面粘料进行清洁；散料回收系统是由链

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

条和刮板组成的链式收集运输机，用于将清洁过程中产生的散料统一回收并送至皮带落料点，智能控制系统包括运行控制与管理套件，用于皮带清洁机运行过程的整体监测和控制。另外，为了防止清料及运输过程中产生扬尘，机身与皮带之间的间隙处均设置有密封板。设备整体运行过程如下：当智能控制系统监测到皮带启动信号时，会依次自动开启高压气刀、剥离鞭和辊刷，并在 5 ~ 10 s 后，开启链式收集运输机。经过清洁机上方的粘料皮带会先在辊刷的作用下去除表面的松散黏结物，然后在剥离鞭的抽击剥离下去除固结层，最后在高压气刀所产生的密集点阵高压气体射流的作用下去除浆状层。链式收集运输机会对清扫过程中产生的落料进行实时回收并输送至皮带落料点。在这个过程中，皮带的运行状态及速度、气刀回路气压、辊刷、剥离鞭及链式运输机的转速等相关参数均会受到智能控制系统的实时监测，一旦出现异常，则自动报警。而当智能控制系统监测到皮带停机信号时，系统会自动在 5 min 后依次关闭辊刷、剥离鞭、高压气刀和链式收集运输机。

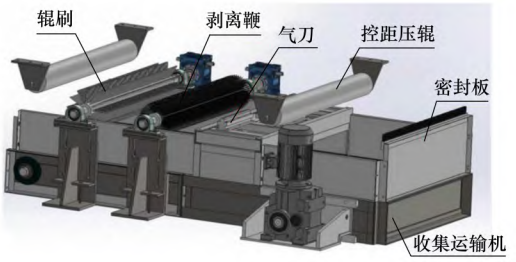


图 1　多效耦合智能皮带清洁机三维结构

Fig. 1　Three dimensional structure diagram of multi-effect coupling intelligent belt cleaning machine

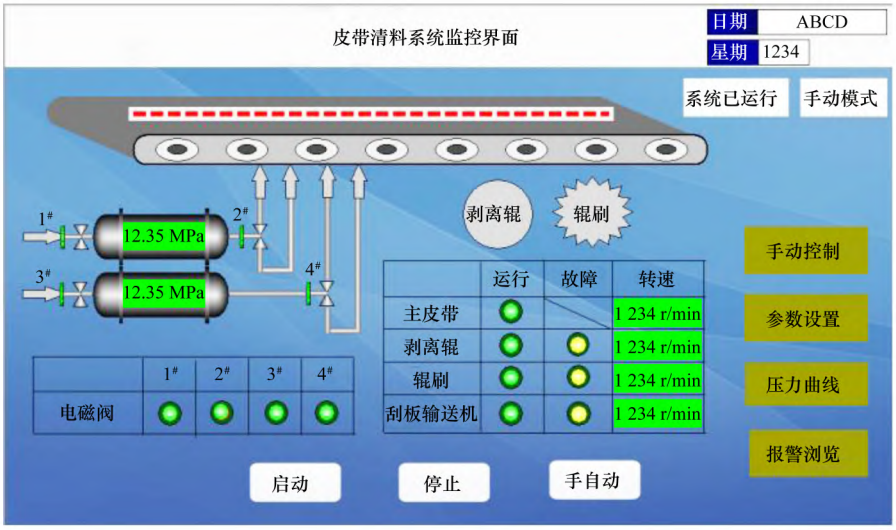


图 2　多效耦合智能皮带清洁机智能控制系统

Fig. 2　Intelligent control system of multi-effect coupling intelligent belt cleaner

3　气刀清除装置参数设计

在清洁系统中，辊刷和剥离鞭的设计相对较为简单，可通过将转速与皮带运行速度相匹配、控制作用点位置等保证清除效果。对于高压气刀，其对皮带表面的清除效果取决于其内部喷出的射流在皮带表面产生的冲击力的大小，而冲击效果则受到射流冲击条件的影响，如喷嘴结构和尺寸、喷射距离、喷射角度、喷孔间距等。因此，为了获得皮带表面浆状层的最佳清除效果，同时尽量减小高压气体消耗量，文章基于仿真和试验的方法研究了不同的条件参数对射流冲击效果的影响，以期研究结果能为高压气刀装置设计过程中的结构和工艺参数的选择提供参考依据。

3.1　仿真分析

3.1.1　计算模型及条件设置

高压气刀装置主要包括高压气源、气腔、气刀和支架等 4 个组成部分，单把气刀线性排列有 31 个高压射流喷嘴，在皮带下部横向布置。将计算模型作如下简化：将气刀对皮带表面的冲击过程简化为高压气体射流冲击平板的过程；由于不同喷嘴的喷射效果以及相互之间的干扰基本一致，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

只取其中的3个喷嘴进行模拟。计算模型如图3所示。计算过程中，将高压气体入口设置为压力入口，压强为0.7 MPa；出口设置为压力出口，压强为0；操作压力为一个标准大气压(101 325 Pa)；壁面设置为无滑移边界。为了分析各条件因素对射流冲击效果的影响，采用单因素仿真试验的方法综合考虑了不同的喷射角度、喷射距离、喷孔间距工况下高压射流对皮带表面的冲击情况，为了减小工程现场的高压气体消耗量，将喷嘴直径设置为0.4 mm，入口压强设置为0.7 MPa，具体的参数设置情况如表1所示。

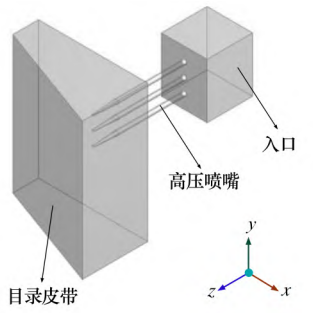


图3 计算模型示意

Fig. 3 Diagram of the alculation model

表1 仿真参数设置情况

Table 1 Conditions of simulation parameter setting

工况条件	固定参数	影响参数
工况1	入口压强(0.7 MPa)；喷孔直径(0.4 mm)；喷射距离(10 mm)；喷孔间距(3 mm)	喷射角度：70°、80°、90°
工况2	入口压强(0.7 MPa)；喷射角度(70°)；喷孔直径(0.4 mm)；喷孔间距(3 mm)	喷射距离：5、10、15 mm
工况3	入口压强(0.7 MPa)；喷射角度(70°)；喷孔直径(0.4 mm)；喷射距离(10 mm)	喷孔间距：1.5、3.0、4.5 mm

3.1.2 数学模型

高压气刀装置所对应的气体流为可压缩高压气体冲击射流，其对应的控制方程如式(1)～(6)所示[8]。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}=0 \tag{1}$$

式中：u_x、u_y、u_z 分别为 x、y、z 3个方向上的速度分量，m/s；t 为时间，s；ρ 为流体密度，kg/m^3。

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t}+\nabla(\rho u_x\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+\rho f_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t}+\nabla(\rho u_y\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}+\rho f_y \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t}+\nabla(\rho u_z\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+\rho f_z \tag{4}$$

式中：p 为作用于流体微元的压强，Pa；τ_{xx}、τ_{yx}、τ_{zx} 分别为 xx、yx、zx 3个方向上的黏性应力分量，Pa；f_x、f_y、f_z 分别为微元体上 x、y、z 3个方向上的单位质量力分量，m/s^2。

采用 realizable k-ε 湍流模型[9]，对应的湍动能 k 和耗散率 ε 的输运方程如下：

$$\rho\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{5}$$

$$\rho\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+\rho C_1 S_\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon_2}{k+\sqrt{v\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b \tag{6}$$

式中：k 为湍动能，m^2/s^2；x_i 为位移坐标，m；G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生，m^2/s^2；G_b 表示由于浮力影响引起的湍动能产生，m^2/s^2；ε 为耗散率，%；Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响，m^2/s^2；μ 为湍流黏性系数，kg/(m·s)；$C_{1\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$、C_1、C_2 为湍流常数；σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能及其耗散率的湍流朗普特系数。

3.1.3 计算结果分析

由文献[10]可知，射流垂直冲击平板的流场可划分为自由射流区、冲击区和壁面射流区3个区域。在自由射流区，主体段轴线上的速度满足无量纲关系式：

$$\frac{u_m}{u_o}=k\frac{D}{x} \tag{7}$$

式中：u_m 为射流轴线上的速度，m/s；u_o 为射流轴线上的初始速度，m/s；D 为射流直径，m；x 为射流轴向位置，m；k 为自由紊动射流时均速度

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分布理论解的自由常数(当采用 Tollmien 解时，k 为 7. 32；当采用 Gortler 解时，k 为 5. 75) 。

仿真分析所得的射流流场的速度分布如图 4 所示，其中自由射流区主体段轴线上的速度无量纲关系式:

$$\frac{u_m}{u_o}=5.37\frac{D}{x} \tag{8}$$

由此可见，式(8) 和式(7) 之间存在相似的比例关系，验证了文章计算方法的可行性。

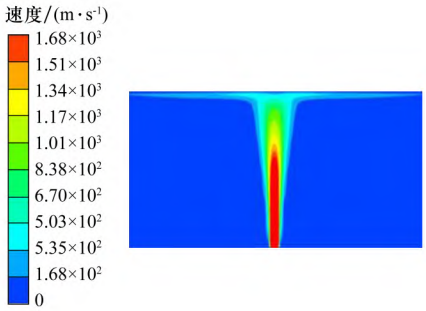
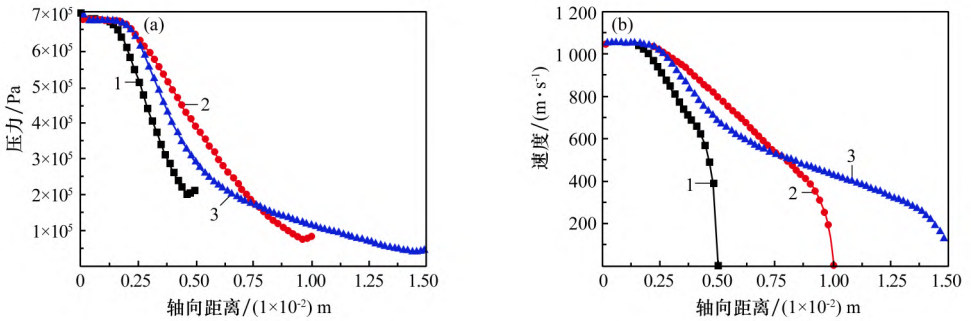


图 4　仿真结果验证

Fig. 4　Simulation result verification

图 5 给出了不同喷射距离(指喷嘴出口至皮带表面的距离) 工况下中部喷嘴射流从喷孔到皮带表面的压力和速度衰减曲线。由图 5 可知，在自由射流区域内，射流的发展基本不受上部皮带的影响，不同喷射距离工况下压力和速度的变化情况基本一致[11]。在射流冲击区域内，速度和压力迅速衰减，且在喷射距离为 15 mm 工况下出现了射流弯曲的现象，这主要是因为喷嘴直径较小导致射流的冲击能力不够。另外，随着喷射距离的增大，射流在皮带表面中心冲击区域的滞点压力逐渐减小，且随着喷射距离从 5 mm 增加至 10 mm，滞点压力的下降量约为 60%。因此，为了确保皮带表面浆状层较好的清除效果[12]，射流喷射距离应尽量减小，但由于皮带运输过程中受到物料重量分布的影响表面高度存在轻微的差异，在满足使用效果的前提下可将喷射距离控制在 5 ~ 10 mm。



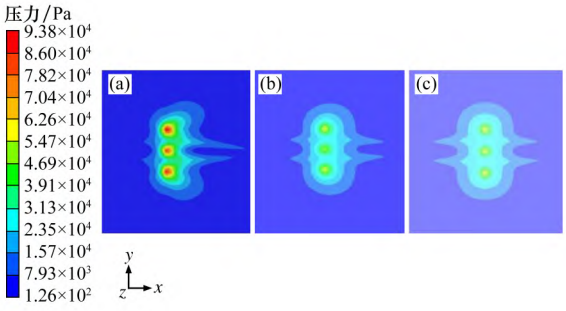
(a) 压力衰减曲线；(b) 速度衰减曲线

喷射距离/m: 1—5；2—10；3—15。

图 5　不同喷射距离工况下高压射流压力和速度衰减曲线

Fig. 5　Pressure and velocity attenuation curves of high-pressure jet under different spray distance conditions

图 6 给出了不同喷射角度工况下皮带表面压力云图的分布情况。由图 6 可知，随着喷射角度的减小，各喷嘴在皮带表面的滞点压力明显增大，这意味着皮带表面的清除效果也会增强，因此，在满足工程运行要求的前提下，可将喷射角度设置为 70°。皮带表面浆状层清除的重点在于破坏物料与皮带之间的黏结作用，因此若能使高压气刀的作用点直接落在物料与皮带黏结的位置则能获得最佳的清除效果。在高压气刀运行的过程中，使其倾斜方向与皮带运行方向相反，当初始作用的高速射流击穿黏结物料层后，显示出来的料层断面会使得射流可持续作用于皮带与物料之间的黏结点，实现浆状层的快速清除，如图 7 所示。



喷射角度/(°) : (a) 70; (b) 80; (c) 90

图 6　不同喷射角度工况下皮带表面压力分布云图

Fig. 6　Pressure distribution cloud map of belt surface under different injection angles

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

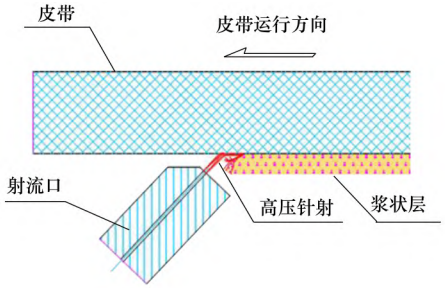
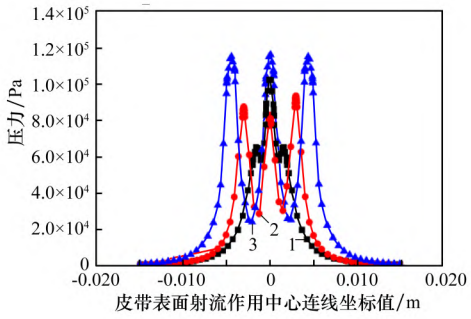


图 7 高压气刀清除浆状层原理解析

Fig. 7 Principle analysis of high pressure air knife to remove slurry layer

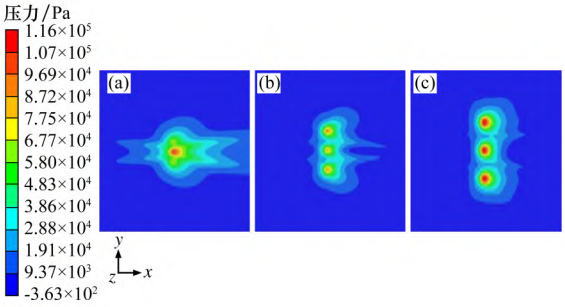
图 8、9 分别给出了不同喷孔间距(指高压气刀上相邻两喷嘴的中心距)工况下各喷嘴在皮带表面作用中心连线上的压力变化曲线以及皮带表面的压力分布云图。由图 8、9 可知，当喷孔间距为 1.5 mm 时，3 股射流之间没有出现明显的会聚和联合，但由于间距较小，中间射流对旁边两股射流存在一定的卷吸作用，导致其对应的滞点压力明显较大[12]。而当喷孔间距为 3.0 mm 时，3 股射流之间的干扰作用减弱，但是由于发展区域仍然受限，其对应的滞点压力减小。当喷孔间距为 4.5 mm 时，3 股射流得到充分发展，滞点压力明显增大，但是各股射流中间区域所受的冲击力较小，会存在明显的清扫盲区。因此，对于多喷嘴气刀而言，喷孔间距越小，皮带表面整体所受冲击力的分布会更加均匀，相应的清除效果也会更好。但是为了综合考虑冲击效果和气体消耗量，可将喷孔间距设置为 4.5 mm，使用过程中通过采用双排气刀错列布置的方式避免清扫盲区。



喷孔间距/m：1—1.5；2—3.0；3—4.5。

图 8 不同喷孔间距工况下皮带表面射流作用中心连线上压力变化曲线

Fig. 8 Pressure variation curve of jet action center line on belt surface under different orifice spacing conditions



喷孔间距/m：(a) 1.5；(b) 3.0；(c) 4.5

图 9 不同喷孔间距工况下皮带表面压力分布云图

Fig. 9 Pressure distribution cloud diagram of belt surface under different orifice spacing conditions

3.2 试验分析

3.2.1 试验设计

为了进一步验证高压气刀对皮带表面浆状层的清除效果，并确定最终的条件参数，基于仿真结果，设计加工了高压气刀皮带清扫试验装置，如图 10 所示。由图 10 可知，该装置主要由高压气源(包括空压机、增压泵、储气罐、输送管道、截止阀等)、气刀和粘料皮带 3 部分组成。试验过程中，以皮带表面浆状层的清除效果为评价指标，分别以入口压强和喷射距离为影响因素做单一变量试验，具体参数设置情况如表 2 所示。

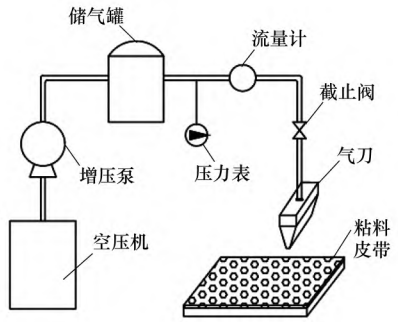


图 10 高压气刀皮带清扫试验装置示意

Fig. 10 Diagram of the high pressure air knife belt cleaning test device

3.2.2 试验方法

试验过程主要分为 3 个阶段：① 试验前期准备。为了准确模拟工程现场皮带表面浆状层的黏结情况，每一次试验开始前，需将皮带表面固结层清洗干净后晾干，并铺上圆筒造粒机后的混合料(混合料水分控制为 8%)，铺好后用保鲜膜覆盖，在静置 12 h 后，去除皮带上方的堆积料，皮

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　现场试验参数设置情况

Table 2　Field test parameter setting table

工况条件	固定参数	影响参数
工况 1	喷孔直径(0.4 mm)；喷射距离(10 mm)；喷孔间距(4.5 mm)；喷射角度(70°)	入口压强: 0.5、0.6、0.7、0.8 MPa
工况 2	入口压强(1 MPa)；喷孔直径(0.4 mm)；喷孔间距(4.5 mm)；喷射角度(70°)	喷射距离: 5、10、15、20 mm

带表面会形成一层较薄的浆状层，如图 11 所示。② 试验阶段。通过调节装置相关参数，开展不同的入口压强和喷射距离工况下高压气刀对皮带表面浆状层的定点清除试验，并记录试验效果。③ 结果分析阶段。观察在高压气刀作用区域内粘料皮带表面底色的恢复程度，用来判断不同工况下浆状层的去除效果。粘料皮带表面底色恢复得越明显，则浆状层的清除效果越好。



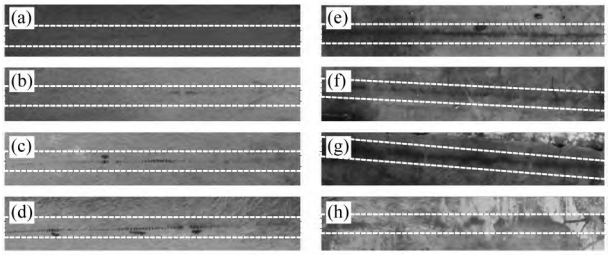
图 11　皮带表面浆状层黏结示意

Fig. 11　Diagram of belt surface paste layer

3.2.3　试验结果分析

图 12(a) ~12(h) 给出了不同入口压强和喷射距离工况下高压气刀对皮带表面浆状层定点清除的试验结果。由图 12(a) ~12(d) 可知，当入口压强为 0.5 和 0.6 MPa 时，在高压气刀的作用区域内，皮带表面基本上没有呈现出底色，表明射流压力较小，对浆状层并没有清除效果。当入口压强为 0.7 MPa 时，皮带表面仅在中间作用区域呈现出明显的底色，浆状层得到了有效清除，但在其他区域内，高压气刀对浆状层的清除效果减弱。另外，在相邻两股射流作用点的中间区域内，出现了明显的清扫盲区。而当入口压强增加到 0.8 MPa 时，皮带表面的浆状层能够在高压气刀的作用区域内得到有效清除，但是清扫盲区仍然存在。

由图 12(e) ~12(h) 可知，当喷射距离为 5 mm时，在高压气刀的作用下，皮带表面呈现出明显的底色，浆状层的清除效果较好。随着喷射距离的增大，单股射流在皮带表面的作用区域扩大，但是清除效果逐渐减弱。当喷射距离为 20 mm 时，高压气刀对浆状层已无明显的清除效果。另外，与不同压强工况下相同，射流作用点的中间区域内同样存在清扫盲区。



入口压强/MPa: (a) 0.5; (b) 0.6; (c) 0.7; (d) 0.8

喷射距离/mm: (e) 5; (f) 10; (g) 15; (h) 20

图 12　不同参数工况下皮带表面浆状层清除效果示意(白色框: 高压气刀作用范围)

Fig. 12　Slurry layer removal effect diagram of belt surface under different parameter conditions (White box: the action range of high pressure air knife)

综上所述，为了获得较好的浆状层清除效果，高压气刀的入口压强应大于 0.7 MPa，喷射距离应控制在 5 ~ 10 mm，喷射角度为 70°，各喷孔之间的距离为 4.5 mm，但由于相邻两股射流作用点的中间区域内存在清扫盲区，工程运行时需要采用双排气刀错列布置的结构形式。

4　运行效果

多效耦合智能皮带清洁机自研发成功以来，已经在湛江钢铁、承德建龙钢铁正式投入运行 1 年以上，并即将应用至新余钢铁、湛江钢铁等。在设备运行过程中，根据多次采样分析以及业主的情况反馈，系统的运行效果良好。系统不仅可实现皮带粘料的脱除率达到 90% 以上，同时可实现长期有效防粘除粘、清扫回收一体化以及清理过程的无人化，大大节省了人工清扫的劳动时间，为冶金生产过程实现清洁智能运输提供了有效的解决方案。

5　结　论

(1) 明确了皮带表面粘料主要包括松散黏结

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

物、固结层和浆状层3种不同的类型，要彻底解决皮带表面的粘料问题，不仅要除粘更要防粘。在此基础上，形成了由辊刷清除松散黏结物、剥离鞭剥离固结层、高压气刀清除浆状层3个部分组成的多级耦合皮带清除方案，并设计开发了多级耦合智能皮带清洁机。

(2) 为了获取高压气刀清除浆状层的最佳效果，对喷射距离、喷射角度、入口压强、喷孔间距等关键参数对粘料皮带表面清除效果的影响规律进行了仿真和试验分析，明确了参数取值范围：入口压强大于0.7 MPa、喷射距离为5～10 mm、喷射角度为70°，喷孔间距为4.5 mm、高压气刀采用双排错列布置。

(3) 多级耦合智能皮带清洁机已在湛江钢铁、承德建龙钢铁等工程现场运行时间长达1年，经过多次采样分析以及业主的情况反馈，效果良好，可实现皮带粘料的脱除率达到90%以上。

参考文献：

[1] 王新章，刘丰生，张子元，等. 莱钢型钢烧结厂延长皮带使用寿命的措施[J]. 烧结球团，2009，34(1)：52－54.
WANG Xinzhang，LIU Fengsheng，ZHANG Ziyuan，et al. About the measurements for increasing belt service life in Laigang sintering plant [J]. Sintering and Pelletizing，2009，34(1)：52－54.

[2] 张立福，程明森，刘爽. 宝钢烧结皮带机胶带防撕裂技术的应用实践[J]. 烧结球团，2019，44(3)：18－21.
ZHANG Lifu，CHENG Mingsen，LIU Shuang. Application practice of anti-tear technology for rubber belt of the belt conveyor in sintering plant of Baosteel [J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(3)：18－21.

[3] ZHANG Mengchao，JIANG Kai，CAO Yueshuai，et al. A deep learning-based method for deviation status detection in intelligent conveyor belt system [J]. Journal of Cleaner Production，2022，363：132575.

[4] 沈少南. 皮带输送机清扫器的种类及特点[J]. 现代食品，2017(16)：53－56.
SHEN Shaonan. Types and characteristics of belt conveyor cleaner [J]. Modern Food，2017(16)：53－56.

[5] 李明旭. 皮带输送机带面清扫问题的解决[J]. 水泥，2021(5)：53－55.
LI Mingxu. Solution of belt conveyor surface cleaning problem [J]. Cement，2021(5)：53－55.

[6] 庄辛喆. 新型散货皮带机综合除尘清扫装置的设计[J]. 机械管理开发，2016，31(2)：58－60.
ZHANG Xinzhe. Design of comprehensive dust removal cleaning device for new bulk belt conveyor [J]. Mechanical Management and Development，2016，31(2)：58－60.

[7] 张伟. 皮带机系统运行问题及优化技改[J]. 中氮肥，2021(6)：55－57；80.
ZHANG Wei. Operation problems and optimization of belt conveyor system [J]. Nitrogenous Fertilizer Progress，2021(6)：55－57；80.

[8] 曹家皓. 气体燃料高压射流及燃烧特性的数值模拟研究[D]. 北京：北京交通大学，2018.
CAO Jiahao. Numerical simulation for high pressure injection and combustion characteristics of gas fuel [D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2018.

[9] 王明波，王瑞和. 采用不同湍流模型对半封闭狭缝湍流冲击射流的数值模拟[J]. 中国石油大学学报，2010，34(4)：75－78.
WANG Mingbo，WANG Ruihe. Numerical simulation of semi-confined slot turbulent impinging jet using different turbulence models [J]. Journal of China University of Petroleum，2010，34(4)：75－78.

[10] 刘沛清. 自由紊动射流理论[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2007.
LIU Peiqing. Jet theory of free turbulent [M]. Beijing：Beijing university of aeronautics and astronautics press，2008.

[11] ANDREI K，MORTEZA E，HONGHI N T. On the failure of a brittle material by high velocity gas jet impact [J]. International Journal of Impact Engineering，2010，37(2)：131－140.

[12] 何峰. 气体紊动射流理论及其在冲击颗粒矿料中的应用[D]. 湘潭：湘潭大学，2014.
HE Feng. Theoretocal study on gas turbulent jet in the application to impact the granular mineral aggregate [D]. Xiangtan：Xiangtan University，2014.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net