

弯管固体颗粒冲蚀理论与防冲蚀研究进展

谢振强, 曹学文, 吴超, 孙晓阳, 赵湘阳, 熊妮

(中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘 要: 在石油化工领域, 管道输送系统的弯管非常容易遭受管内固体颗粒的冲蚀, 使管道承压能力降低, 增加管道输送的安全风险。首先对油气行业广泛采用的 API RP 14E 和 DNV 冲蚀准则进行了描述和分析, 进而概述了国内外被较多专家学者提及的弯管固体颗粒冲蚀理论和模型, 包括经典的微切削理论模型、变形磨损理论模型以及适用性较强的 E/CRC 冲蚀模型和 Oka 冲蚀模型。并在此基础上, 对不同冲蚀理论和模型进行了对比和分析, 指出各个冲蚀理论模型之间的内在联系, 以及各自的优势和缺陷。在工程应用方面, 对近年来工业中常见的防冲蚀涂层和防冲蚀几何结构进行了系统的归纳和总结。其中, 防冲蚀涂层包括金属防冲蚀涂层、非金属防冲蚀涂层以及复合材料防冲蚀涂层, 防冲蚀几何结构包括涡旋结构和各种形式的仿生肋条结构。最后, 对弯管固体颗粒冲蚀理论模型的研究方向、纳米防冲蚀涂层以及仿生学防冲蚀肋条结构的发展前景进行了展望。为油气管道系统完整性管理、油气储运安全和流动保障等方面的研究提供借鉴。

关键词: 弯管; 冲蚀理论; 固体颗粒; 防冲蚀; 涂层

中图分类号: TE832; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0170-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.015

Research Progress of Solid Particle Erosion Theories and Anti-erosion Methods in Elbow

XIE Zhen-qiang, CAO Xue-wen, WU Chao, SUN Xiao-yang, ZHAO Xiang-yang, XIONG Ni

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: In petroleum and chemical industry as well as other industrial processes, the elbows of pipeline transportation system are very easy to be eroded by solid particles entrained in the pipe, which reduces the pressure capacity of pipeline and increases the safety risk of pipeline transportation as a result. Firstly, this paper describes and analyzes the rules of API RP 14 E and DNV erosion prediction models used widely in oil and gas industry. Then, it summarizes the theories and models of solid particles erosion in elbow mentioned by many experts and scholars at home and abroad, including the classic micro-cutting theory model, the deformation wear theory model, E/CRC erosion model with high applicability, and Oka erosion model. On

收稿日期: 2020-10-11; 修订日期: 2021-01-13

Received: 2020-10-11; Revised: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51874340); 山东省自然科学基金项目(ZR2018MEE004)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51874340), Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2018MEE004)

作者简介: 谢振强(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多相流理论及冲蚀磨损。

Biography: XIE Zhen-qiang (1989—), Male, Doctoral candidate, Research focus: multiphase flow theory and erosion.

通讯作者: 曹学文(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为天然气处理与加工、油气水多相流理论及应用、海底管道完整性管理。

Corresponding author: CAO Xue-wen (1966—), Male, Doctor, Professor, Research focus: natural gas treatment and processing, theory and application of multiphase flow, submarine pipeline integrity management.

引文格式: 谢振强, 曹学文, 吴超, 等. 弯管固体颗粒冲蚀理论与防冲蚀研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 170-179.

XIE Zhen-qiang, CAO Xue-wen, WU Chao, et al. Research progress of solid particle erosion theories and anti-erosion methods in elbow[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 170-179.

this basis, different erosion theories and models are compared and analyzed, and the internal relations among them as well as their advantages and disadvantages are summarized and pointed out. In terms of engineering application, the common anti-erosion coatings and anti-erosion geometric structures in industry in recent years are systematically summarized. The anti-erosion coatings include metal anti-erosion coatings, non-metal anti-erosion coatings and composite anti-erosion coatings. And the anti-erosion geometric structures include vortex structures and various forms of bionic rib structures. At the end of this paper, the research direction of theories and models of solid particle erosion in elbow, the development prospect of nanometer anti-erosion coatings and bionics anti-erosion rib structures are prospected. This paper can provide reference for the study of integrity management of oil and gas pipeline system, storage and transportation safety and flow guarantee of oil and gas.

KEY WORDS: elbow; erosion theories; solid particles; anti-erosion; coating

管道输送系统的安全运行是石油化工行业健康发展的基础, 对保障国计民生具有重大战略意义。近年来, 在页岩气、水合物等新能源勘探开发过程中, 采出流体携带固体颗粒的含量较高。弯管作为油气管道输送系统中应用较为普遍的管件, 极易受到管道流体中携带的机械杂质(如沙粒、铁屑等)的冲蚀磨损。冲蚀磨损的直接作用是减小管道壁厚, 从而降低管道的承压能力, 缩短相关设备的使用寿命, 增加管道输送风险。严重时会造成管道穿孔失效、油气资源泄漏和环境污染, 不仅造成巨大的经济损失, 还会给人民生活安全带来威胁^[1-2]。图 1 为颗粒对弯管造成冲蚀的实物图, 从图中可以看出, 颗粒冲蚀会使得弯管外拱 45° 附近的壁厚减薄甚至磨穿。



图 1 颗粒对弯管冲蚀的实物图^[1]

Fig.1 Picture of elbow erosion caused by particles^[1]

冲蚀指的是流体中所含的固体颗粒冲击或刮擦金属表面, 从而引起金属表面材料损失的现象^[3-4]。冲蚀现象广泛存在于多种工业领域(如采矿、冶金、水利、石油等)中, 暴露在运动流体中的设备和过流部件(如泵、阀门、弯管、三通等)的内表面均会受到冲蚀破坏。统计研究表明, 弯管的冲蚀磨损量是直管段冲蚀磨损量的 50 倍^[5-8]。

根据 Meng 等^[9]的研究, 发现影响冲蚀的因素多达 33 个, 这导致冲蚀研究十分复杂。这些影响因素可分为以下几类: (1) 流体介质特性, 如流速、黏度、流动状态等; (2) 固体颗粒特性, 如密度、硬度、体积浓度、形状等; (3) 受冲蚀表面特性, 如硬度、韧性、材料屈服强度等; (4) 过流部件的几何形状, 如

管径、弯径比、弯曲角度等。

目前, 国内外对固体颗粒弯管的冲蚀研究主要有试验研究和数值模拟两种方法, 得到的结论多为冲蚀率随某一参数的变化关系, 难以准确描述冲蚀率和多个参数之间的综合函数关系, 冲蚀率测量和预测精度较低。对于冲蚀模型的研究, 多是基于特定工况下测量参数拟合的经验或半经验模型, 适用范围窄, 且不能从机理上对冲蚀进行准确解释。不同专家学者的冲蚀理论各自成派, 模型差异较大, 目前尚未形成统一的被普遍认可的冲蚀理论。对于工程中常见的防冲蚀方法, 文献记载较为分散, 未见统一归纳总结。

本文针对以上冲蚀理论和防冲蚀方法研究中存在的缺陷, 归纳总结了国内外现有的典型弯管冲蚀理论以及防冲蚀方法, 并对冲蚀理论研究中存在的问题和防冲蚀方法未来的发展方向进行了总结和展望。以期为油气管道系统完整性管理、油气储运安全和流动保障等方面的研究提供借鉴, 同时, 也为工程应用上的管道防冲蚀设计, 提高管输效率提供帮助和指导。

1 冲蚀理论模型研究

自 20 世纪 60 年代以来, 许多专家学者对固体颗粒冲蚀进行了大量实验和数值模拟研究, 提出了各自的冲蚀模型。

1.1 常见冲蚀准则

1.1.1 API 冲蚀准则

目前在油气行业中, 国内外广泛使用的预测管道最大冲蚀速率的规范是美国石油协会(API)提出的 API RP 14E 标准^[10]。此标准所采用的模型是一个简单的经验参数模型, 公式如下:

$$V_e = \frac{c}{\sqrt{\rho_m}} \quad (1)$$

式中: V_e 为管道系统临界流速; c 为经验常数, 根据具体适用性研究确定, 对于连续作业, 取值范围为 100~200; ρ_m 为操作压力和温度条件下的气液混合物密度。

1.1.2 DNV 冲蚀准则

另一个常见的冲蚀预测模型是挪威船级社 (DNV) [11] 提出的, 此模型相对 API RP 14E 标准有了很大进步, 将碰撞角函数和颗粒速度纳入模型, 其公式如下:

$$ER = CF(\alpha)u_p^{2.6} \quad (2)$$

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^S (-1)^{i+1} A_i \alpha^i \quad (3)$$

式中: ER 为目标管件的冲蚀速率, 定义为材料在单位面积上单位时间内损失的质量; $F(\alpha)$ 为碰撞角函数; C 为常数, 对于钢管, $C=2.0 \times 10^{-9}$; 参数 A_i 取值见表 1。

表 1 DNV 模型 A_i 取值
Tab.1 Values of A_i in DNV model

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
9.370	42.295	110.864	175.804	170.137	98.398	31.211	4.170

1.1.3 冲蚀准则对比分析

从以上公式可以看出, API RP 14E 是通过规定冲蚀发生的最小流体速度来控制管件的冲蚀, 冲蚀仅与

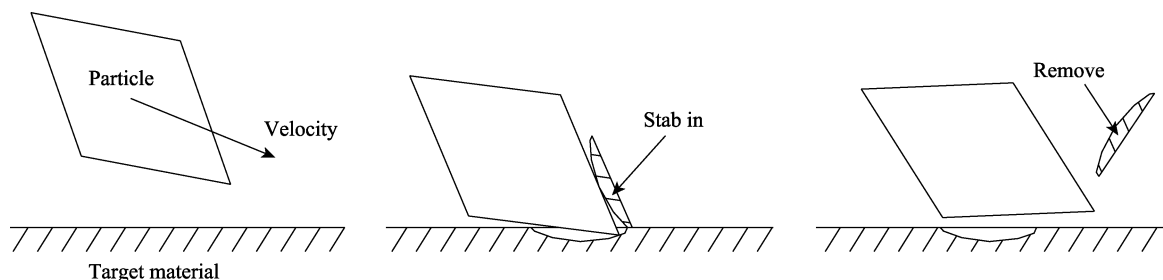


图 2 微切削原理图
Fig.2 Schematic diagram of micro-cutting

Finnie [13] 在 1960 年根据实验数据对公式进行了修正, 得到冲蚀率随入射角变化的关系式如下:

$$V = K \frac{mv_s^n}{\sigma_y} f(\alpha) \quad (4)$$

$$f(\alpha) = \begin{cases} \sin(2\alpha) - 3\sin^2 \alpha & 0 < \alpha < \alpha_0 \\ \frac{\cos^2 \alpha}{3} & \alpha_0 < \alpha < 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中: V 为材料的冲蚀率; K 为粒子分数; m 为冲蚀粒子的质量, kg; v_s 为粒子冲击速度, m/s; σ_y 为靶材的屈服强度, Pa; n 为磨损体积对粒子冲击速度的依赖度; α 为颗粒入射角, ($^\circ$); α_0 为临界入射角, ($^\circ$).

1.2.2 变形磨损理论模型

1963 年, Bitter [14-15] 提出了变形磨损理论, 该理论从能量平衡角度入手, 将冲蚀磨损分为切削磨损和变形磨损两部分, 总的冲蚀量是两部分的代数和。当颗粒撞击靶材产生的冲击应力小于靶材表面的屈服

流体混合物的密度相关。但实际上, 流体密度不变时, 流速较高的管道显然比流速低的管道冲蚀更严重。另外, 公式(1)过于简单, 对在流体密度相同的所有工况下计算出的许用临界速度均相同, 这显然与工程实际不符。实际应用中, 公式(1)估算的值误差较大。另外, 公式(1)未体现各种参数对冲蚀的影响, 特别是对产生冲蚀的关键因素——沙粒, 没有任何考虑, 这显然是不合理的。

DNV 冲蚀预测模型相关参数的确定是基于大量的实验结果和数值计算结果, 相比 API RP 14E, 公式(2)中考虑了影响冲蚀的两个重要因素——颗粒速度和角度。公式(2)可以计算直管、弯管、三通、变径管、焊接接头等管件的冲蚀速率。但未考虑流体特性、颗粒形状、大小、颗粒质量流量等其他影响冲蚀的因素。

1.2 典型冲蚀模型

1.2.1 微切削理论模型

塑性材料的微切削理论是世界上首个冲蚀机理理论, 由 Finnie [12] 在 1958 年提出。该理论认为, 固体颗粒高速撞击靶材表面时, 颗粒的尖角就像一个微型刀具, 刺入材料表面, 并将靶材表面的材料以切削方式带走, 其原理如图 2 所示。

强度时, 靶材仅发生弹性形变。变形磨损理论的模型公式如下:

$$E = \frac{mV^2}{2\phi} \cos^2 \alpha + \frac{m(V \sin \alpha)^2}{2\varepsilon} \quad (6)$$

式中: m 是颗粒质量, V 是颗粒速度, α 是颗粒入射角, ϕ 和 ε 分别是剪切和切削变形所消耗的能量。

1.2.3 E/CRC 冲蚀模型

美国 Tulsa 大学的冲蚀/腐蚀研究中心 (E/CRC) [16-17] 在管道冲蚀方面也进行了大量的实验研究和数值模拟, 并在此基础上, 提出了 E/CRC 冲蚀预测模型。此模型在考虑颗粒冲击速度和入射角度的基础上, 又加入了靶材硬度和颗粒形状两个因素, 冲蚀模型如下:

$$ER = K(BH)^{-0.59} F_s u_p^{2.6} F(\alpha) \quad (7)$$

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^5 R_i \alpha^i \quad (8)$$

式中: 对于钢管, 经实验拟合的经验常数 $K=$

2.17×10^{-7} ; BH 为靶材的布氏硬度; F_s 为颗粒形状系数 (表示与颗粒同体积的球表面积与颗粒面积的比值), 对于尖角颗粒, $F_s=1$, 对于半球形颗粒, $F_s=0.53$, 对于球形颗粒, $F_s=0.2$; 参数 R_i 见表 2。

表 2 E/CRC 模型 R_i 取值
Tab.2 Values of R_i in E/CRC model

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
5.4	-10.11	10.93	-6.33	1.42

1.2.4 Oka 冲蚀模型

Oka 等^[18-19]在考虑颗粒入射角度和冲击速度的基础上, 还加入了颗粒直径、颗粒形状、颗粒材料特性、靶材硬度等参数, 公式如下:

$$ER = 10^{-9} \rho_w k_0 F(\alpha) (HV)^{k_1} \left(\frac{u_p}{u_c}\right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d_c}\right)^{k_3} \quad (9)$$

$$F(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} [1 + HV(1 - \sin \alpha)]^{n_2} \quad (10)$$

式中: HV 为管道材料的维氏硬度; d_c 为颗粒参考直径, m; u_c 为颗粒的参考撞击速度, m/s; k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 n_1 、 n_2 、 d_c 和 u_c 的具体数值见表 3。

表 3 Oka 模型参数取值
Tab.3 Parameters in Oka model

Parameters	Value
k_0	65
k_1	-0.12
k_2	$2.3HV^{0.038}$
k_3	0.19
n_1	$0.71HV^{0.14}$
n_2	$2.4HV^{-0.94}$
$u_c/(m \cdot s^{-1})$	104
$d_c/\mu m$	326

1.2.5 多相流冲蚀模型

多相流由于其广泛存在性和高度复杂性(不同流型、非定常、相界面复杂多变等), 一直是研究的热点, 多相流状态下的冲蚀也是近年来全球冲蚀研究的最新方向和难点。因此, 本文对多相流冲蚀进行深入的分析 and 总结。

国外对多相流冲蚀的研究起步较早, 目前对于多相流冲蚀研究较为先进的是 Tulsa 大学的 E/CRC。Salama^[20]通过考虑多相流中沙粒直径和混合物密度的影响, 提出以下冲蚀临界速度代替 API RP 14E 标准的公式:

$$V_c = \frac{D\sqrt{\rho_m}}{20\sqrt{W}} \quad (11)$$

$$\rho_m = \frac{(\rho_l V_l + \rho_g V_g)}{V_m} \quad (12)$$

$$V_m = V_l + V_g \quad (13)$$

式中: ρ_m 是混合密度, kg/m^3 ; V_m 是混合速度, m/s; W 为砂流率, kg/s ; D 为管径, mm。

之后, McLaury^[21-22]考虑了多物理变量, 如流体特性、管道几何尺寸、管材、沙粒特性等因素, 提出一个综合的多相流冲蚀预测模型, 并用实验数据和多相流理论对模型进行丰富和改进, 其冲蚀预测方程如下:

$$h = F_M F_S F_p F_{r/D} \frac{W V_L^{1.73}}{(D/D_0)^2} \quad (14)$$

$$F_{r/D} = \exp\left[-\left(-0.1 \frac{\rho_f^{0.4} \mu_f^{0.65}}{d_p^{0.3}} + 0.015 \rho_f^{0.25} + 0.12\right)\left(\frac{r}{D}\right) - C_{std}\right] \quad (15)$$

式中: h 为冲蚀率; F_M 是考虑材料硬度的经验常数; F_p 是冲蚀因子; V_L 是颗粒冲击速度; $F_{r/D}$ 是弯头曲率因子; C_{std} 是标准弯头曲率因子, $C_{std}=1.5$ 。

Mazumder^[23-24]对 McLaury^[21-22]的模型进行了改进, 对多相流中的颗粒分布、夹带作用以及特征颗粒冲击速度的计算进行了优化, 提出的液滴夹带率可用式(16)计算。

$$E = \tanh(7.25 \times 10^{-7} We^{1.25} Re_F^{0.25}) \quad (16)$$

式中: We 是韦伯数; Re_F 是液体雷诺数。

之后, Vieira^[25]对不同表观气、液速度条件下的多相流冲蚀进行了实验研究, 发现气控多相流中, 液量的增加可减缓冲蚀。Zhou 等^[26]研究了颗粒形状以及旋流强度对多相流冲蚀的影响。Zahedi 以及其他学者^[27-29]将机器学习、随机森林回归算法、环状流建模等新技术引入多相流冲蚀的研究中, 丰富了多相流的冲蚀模型。

国内对于多相流冲蚀的研究尚处于起步阶段, 研究主要集中于管道几何、气液流速、颗粒尺寸等宏观参数对冲蚀的影响, 采用的研究方法为数值模拟和实验测试。于飞等^[30]将欧拉多相流与离散相模型结合, 研究了不同弯头几何参数条件下, 气固两相流造成的冲蚀。钱东良^[31]以番禺 35-2 海底输气管道为例, 用数值模拟和灰色关联分析了沙粒流速、质量流量等因素对冲蚀的影响。王凯^[32]提出相对冲蚀的概念, 并研究了斯托克斯数对冲蚀机理的影响。李增亮等^[33-34]研究了单个角形颗粒撞击金属靶材并对靶材表面产生损伤的过程, 为冲蚀机理的研究提供了新思路。

中国石油大学(华东)多相流研究课题组对多相流冲蚀也进行了大量的实验和数值模拟研究。曹学文等^[35-37]对水平管段塞流条件下的冲蚀进行了研究, 分析了段塞体的流动特征对颗粒分布和冲蚀的影响。彭文山等^[38-40]对水平弯管中含沙分散泡状流和竖立管中段塞/乳沫流的冲蚀机理进行了分析, 并对冲蚀速率进行了预测。

1.3 冲蚀模型分析总结

Finnie^[12]的微切削理论仅适用于入射角较小的

情况,当入射角较大(如 90° 垂直入射)时,颗粒会在靶材表面产生撞击坑,而非切削,因此Finnie^[13]后期对其进行了修正。修正后的公式虽然可与其实验数据吻合,但受其本身代表的切削原理限制,对大入射角颗粒产生的冲蚀预测不准确,且未考虑冲蚀的颗粒形状、硬度、颗粒质量流量等其他因素的影响。

Bitter^[14-15]的变形磨损理论可以很好地适用于入射角较大的情况,当颗粒以较大的入射角频繁撞击靶材表面时,靶材表面会产生加工硬化。但冲蚀影响因素仅考虑颗粒速度和入射角两个变量,未考虑影响冲蚀的颗粒形状、硬度、颗粒质量流量等因素,不能全面解释冲蚀发生的机理。

E/CRC 冲蚀模型^[16-17]在变形磨损理论的基础上,又考虑了靶材硬度和颗粒形状因素的影响,这进一步提高了冲蚀预测的精度,可以预测干燥材料表面和潮湿材料表面的冲蚀速率。但E/CRC 冲蚀模型实验数据的来源主要为气固两相流和以气相为主的多相流,对含液量高的冲蚀预测较差。影响因素的考虑仍不够全面。

Oka^[18-19]模型相对比较综合,除了颗粒入射角度和速度,还考虑了靶材密度、硬度、颗粒直径等影响冲蚀的几个主要因素,模型预测值的准确度也更高。其缺点是,未考虑颗粒形状影响,对冲蚀速率存在较大的过度预测。

目前,关于冲蚀的研究最新和最难的部分是多相流冲蚀,以下对多相流冲蚀进行深入总结。国外对于多相流冲蚀的数学模型主要基于单相气体冲蚀的实验数据,模型中的相关参数取值都是基于实验数据拟合而非物理机理,得到的经验参数也仅适用于实验所涉及的工况范围,冲蚀模型普适性较差。另外,冲蚀预测模型考虑的影响因素数量有限,建立的模型并不能反映冲蚀发生的机理,因此与实际相比,模型计算的冲蚀率有较大的误差。在模型中,未考虑多相流中的气液相分布、相间作用、颗粒运移特性、流型、沉积率等重要因素。因此,多相流冲蚀模型尚处于初步发展阶段,还有许多重要因素未加入模型,许多难点尚未克服,在此领域,未来还有很大的机遇和挑战。

对于实际工程应用,目前大多数冲蚀模型的预测都较为保守,预测的冲蚀值往往高于实际发生的冲蚀。API RP 14E 模型^[10]的计算最为简单,预测也最为保守,预测的冲蚀值可能比实际的高10倍,适用性不强。DNV 模型^[11]所采用的数据库基于实际生产数据,较为广泛和全面,对于冲蚀预测的平均值估算较好,但对局部冲蚀的预测不准确。Finnie^[12-13]、Bitter^[14-15]和Oka 模型^[18-19]基于部分物理规律和实验室数据,仅适用于实验室研究,不适用于大规模管径的工业管道的预测和应用。E/CRC^[16-17]模型的优点是,适用于湿润表面,模型数据库来源为小管径管道,对于工业大管道的应用尚有较大误差。多相流模型尚

处于起步阶段,研究不成熟,不适宜大规模的工业应用。综合来看,采用DNV 标准对工业大管径管道的冲蚀进行预测,可以获得相对较好的效果。

综上所述,目前国内外对于弯管固体颗粒冲蚀理论模型的研究尚处于发展阶段,相关研究结果尚不成熟,虽然有学者根据实验拟合了冲蚀速率和多个参数之间的综合函数关系,但公式适用范围窄、不精确。对于冲蚀机理的研究多是基于特定工况下实验数据拟合的经验和半经验公式,难以从机理上对冲蚀过程进行合理解释,并形成被普遍认可的冲蚀理论。

作者认为,从微观上,可以将多相流弯管颗粒的冲蚀看作颗粒撞击靶材引起表面材料变形和损失的过程;从宏观看,是大量颗粒多次撞击壁面造成变形和损失的统计结果,颗粒的统计分布规律对冲蚀的影响尚不清楚,有待进一步研究。冲蚀是个动态发展变化的过程,前期颗粒对壁面的频繁撞击可能会使壁表面产生加工硬化,致使后期颗粒撞击产生的冲蚀效果与前期有所不同,是另一个值得研究的方向。另外,多相流流型、颗粒在气液两相中的分布规律、颗粒在相间的迁移过程等对多相流冲蚀也产生一定的影响,在冲蚀研究中,这些未考虑的因素值得进一步拓展研究。

2 防冲蚀方法研究

早期石油工业中,为了降低管道的冲蚀速率,往往采用降低生产流速的方式。但这种做法会减小产量,降低工作效率,很不经济。目前,工程上常见的防冲蚀方法主要有两大类:一类是在管道内壁涂敷防冲蚀涂层,另一类是改变弯管的几何形状。鉴于国内尚未有学者对此进行总结,本文特将其总结概括,以期工程管道的防冲蚀应用提供借鉴。

2.1 防冲蚀涂层

防冲蚀涂层的种类很多,大致可分为金属涂层、非金属涂层和复合涂层三类。涂层的耐冲蚀性能定义为清除基体表面单位体积材料所需的能量。

2.1.1 金属涂层

金属防冲蚀涂层是在原有易被冲蚀金属表面镀一层比基体材质强度更高的金属,或对基材进行表面处理,使其表面强度提高,从而保护内层金属不被颗粒冲蚀的目的。从1882年英国人Hadfield发明了耐磨性能优良的高锰钢开始,各种耐磨材料开始被开发生产出来,在20世纪80年代,英国开始在锅炉管道内表面喷涂 $75\text{Cr}_3\text{C}_2/25\text{NiCr}$ 和 Mn_2O_3 ,作为防冲蚀涂层。随着冶炼、铸造、热处理和机加工工艺日益发达,等离子喷涂、高速电弧喷涂等新工艺的应用,提高了耐磨材料的各种力学性能^[41-50]。

姜峰等^[51]采用溶剂法对304 不锈钢进行热浸镀

铝,显著提高了 304 不锈钢的耐冲蚀性能,实验研究表明,当 304 不锈钢热浸镀 Al-3.0%Si-0.5%RE,在 740 °C 左右浸镀 15 min,然后在 820 °C 下扩渗 4 h,基体和镀层金属之间会形成冶金结合的硬质铁铝金属化合物合金镀层,可达到最好的抗冲蚀性能。陈小明等^[52]采用高速火焰喷涂系统,在基体金属上喷涂了微米和纳米结构的 WC-10Co-4Cr,研究表明,纳米结构涂层组织致密、孔隙率低,提高了涂层的硬度、韧性和结合强度,增强了涂层的抗冲蚀性能。黄达等^[53]采用离子注入的方法,对 TC4 钛合金基体与 TiN/Ti 涂层的结合力与抗冲蚀能力进行了研究。结果表明,Mo、Ti、Nb 3 种离子注入 TC4 基体后,都会增强 TiN/Ti 涂层的结合力,从而增强了涂层的抗冲蚀能力。

2.1.2 非金属涂层

非金属涂层主要由环氧粉末、陶瓷等非金属材料制成。相比金属涂层,陶瓷涂层具有非常好的抗高温冲蚀特性,但陶瓷材料喷涂成本比较高,喷涂工艺比较复杂,且涂层表面容易出现裂纹,导致涂层易脱落。单一的金属或者陶瓷涂层的防冲蚀效果都不理想,因此专家学者考虑将二者结合起来,制作复合涂层。

2.1.3 复合涂层

吕振林等^[54]采用射流冲击实验研究了复合材料中 SiC 颗粒尺寸对其抗冲蚀特性的影响,发现随着 SiC 颗粒尺寸增大, SiC 颗粒/铸铁复合材料的抗冲蚀磨损能力增强。但增强颗粒和金属液体之间的润湿性较差,颗粒和金属基体之间的结合强度不够。

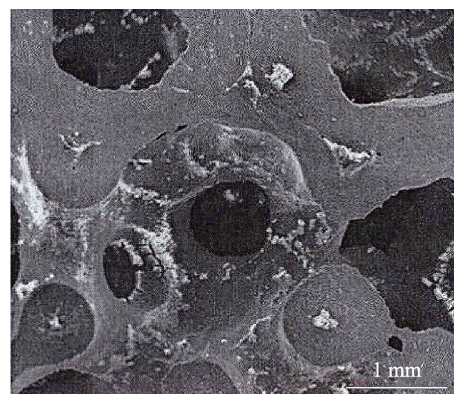
为了解决颗粒增强复合材料中颗粒和金属基体之间结合强度低的问题,采用纤维增强的形式提升复合材料的耐冲蚀性能。目前应用较多的是碳纤维、硼纤维、碳化硅纤维等^[55]。

碳纤维增强金属基复合材料是纤维增强金属基复合材料中使用最广泛的。碳纤维质量轻、密度小,有良好的热疲劳性能。硼纤维增强金属基复合材料中,硼纤维的强度远高于其他陶瓷纤维,具有高模量和低密度的特性。其优点是,与大多数金属基体之间的润湿性较好,界面反应低,但硼纤维直径大,易发生纵向断裂。碳化硅纤维增强金属基复合材料具有许多优点,如比强度和比模量高、高温性能和尺寸稳定性良好、抗老化和抗疲劳性能优良等。

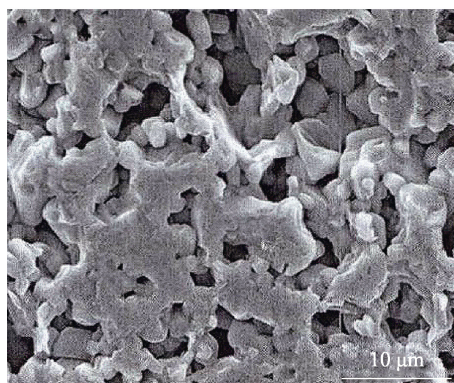
纤维增强金属基复合材料的缺点是制造成本高,且纤维增强金属基复合材料本身存在各向异性,从而限制了其应用。随着制造工艺不断进步,出现了双连续相复合材料,如泡沫陶瓷/金属双连续相复合材料。在此材料中,陶瓷相和金属相连续分布、互相贯穿支撑,可以通过调节陶瓷相的体积分数来调节复合材料的整体密度,满足特定的使用环境要求。两相之间的界面结合力较好,避免了各向异性和不均匀性。

万伟等^[56]对 SiC 泡沫陶瓷/球墨铸铁双连续相复

合材料的耐冲蚀性能进行了研究,发现在该材料中,陶瓷相和金属相之间形成了两个互相贯穿和支撑的三维网络。由图 3 可知,该材料的宏观和微观形貌中都含有三维连通孔的骨架结构,这种网络结构有助于最大限度地保留两相的优势,使此复合材料的抗冲蚀性能得到大幅提升。



a 宏观毫米级孔径



b 微观微米级孔径

图 3 双尺度碳化硅泡沫陶瓷^[48]

Fig.3 Double-scale silicon carbide foam ceramics^[48]: a) millimeter scale pore-size; b) micrometer scale pore-size

2.2 防冲蚀结构

除了在管道内表面增加涂层来增强管道抗冲蚀能力的方法外,也有一些专家学者通过改变弯管几何形状和尺寸的方法来减缓冲蚀。HammerTek 公司生产的 Vortice EII 弯管涡旋结构(如图 4)^[57],可以使

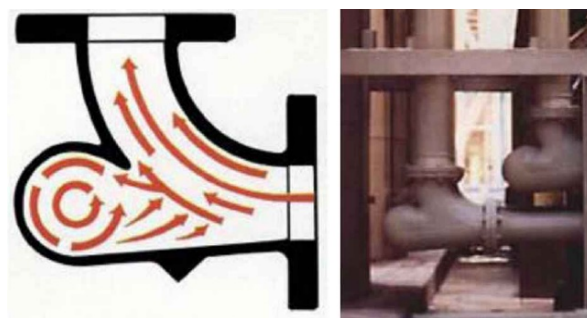


图 4 Vortice EII 弯管涡旋结构^[57]

Fig.4 Vortice EII elbow vortex structure^[57]

颗粒在漩涡的作用下旋转,从而改变其运动方向,避免直接撞击弯头,导致严重冲蚀磨损,而且由于颗粒的分离特性,颗粒在漩涡流场中可以被再次加速,而不至于沉积。

曾子华等^[58]研究发现,通过将一定横截面的几何形状(矩形、三角形)按照一定的间距分布在直角弯管 20°~80°的外拱内壁上,可以明显增加弯管的抗冲

蚀性能,且矩形肋条的抗冲蚀性能较好。季楚凌等^[59]运用仿生学理论,仿照沙漠蝎子蜥蜴等生物体表形态,对弯管外拱内壁设置横纵凹槽和圆形凹坑,并进行数值模拟(如图 5),发现横槽型弯管的抗冲蚀性最好。孙鸿志等^[60]运用仿生学理论,仿照抗泥沙冲蚀的扇贝外壳设计了弯管的抗冲蚀肋条,肋条垂直管流方向,分布于弯管 10°~90°,可达到良好的抗冲蚀性。

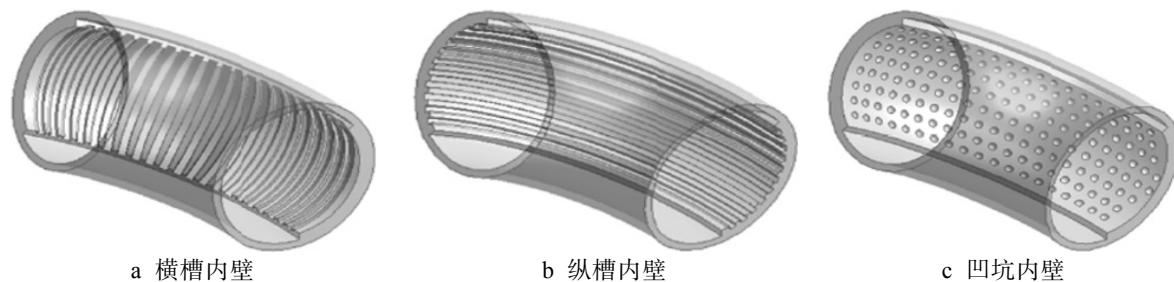


图 5 三种仿生内壁加厚弯头三维示意图^[59]

Fig.5 3D diagrams of three kinds of bionic inner wall thickening elbows^[59]: a) transverse rib groove; b) longitudinal rib groove; c) pits

2.3 防冲蚀方法分析总结

2.3.1 防冲蚀涂层

金属抗冲蚀涂层主要是 Ni-Cr 合金和 Fe-Cr 合金,涂层和基体结合强度高。多数金属抗冲蚀涂层和耐磨合金的制备需要加入 Mo、Ni、Cr 等稀有元素,使其制备和使用受到了限制。陶瓷材料的喷涂成本比较高,喷涂工艺比较复杂,且涂层表面容易出现裂纹,导致涂层易脱落。复合涂层由金属相和非金属相组成,两相之间的优势可以互补。金属相的韧性良好,可以弥补非金属相韧性不足的缺点,非金属相由于硬度高、耐磨性好,可以弥补金属相耐磨性差的缺点,但是两相之间的均匀融合较为困难。

防冲蚀涂层的优点是,可以较好地贴合物件原有的内部结构,对管道内流体的流动影响微小。但其缺点是,喷涂工艺复杂,成本高,且涂层易出现裂纹、脱落等情况,引起失效。

2.3.2 防冲蚀结构

防冲蚀结构主要是通过改变原有的管道几何形状,使流体的流动状态发生变化,进而改变颗粒运动,到达减缓冲蚀的目的。防冲蚀结构多借鉴仿生学的理论和几何结构,有很好的发展前景。但目前防冲蚀结构尚处于设计研究阶段,距批量加工制造和大规模工程应用还有很长距离。

3 结论与展望

目前,对于弯管固体颗粒冲蚀的理论模型研究尚处于发展阶段,研究结论多是基于特定工况拟合的经验公式,适用范围窄,不能从机理上对冲蚀进行合理解释,并形成能准确描述冲蚀速率和多参数之间的综

合函数关系。对于防冲蚀涂层,复合材料涂层兼具金属和非金属涂层高强度和高韧性的优点。防冲蚀管道结构是通过改变管内流体流动,避免固体颗粒直接撞击管道脆弱部位,提高了其抗冲蚀性能。今后,弯管固体颗粒的冲蚀理论和防冲蚀方法的发展方向体现在以下几个方面:

1) 弯管固体颗粒冲蚀理论模型的丰富完善。在颗粒入射角度、冲蚀速度、靶材硬度等基本参数的基础上,不断加入更多新的影响冲蚀的变量,如流动的流型、统计理论、颗粒在两相中的分布、颗粒相间迁移等,以期进一步完善冲蚀理论模型。

2) 对于管道内壁防冲蚀涂层的发展和应用,将更加偏向于开发新材料。复合材料的防冲蚀涂层兼具金属相和非金属相的优点,是未来发展的方向。纳米材料和先进的加工工艺可为其发展完善,提供助力。

3) 对于管道防冲蚀结构的发展和应用,今后会越来越多地借鉴仿生学的方法和技术,其设计会结合学科交叉和迁移。

参考文献:

- [1] 董刚. 材料冲蚀行为及机理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
DONG Gang. Study on the erosion wear behaviors and mechanisms of several materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2004.
- [2] 赵新学. 气固两相流对旋风分离器壁面磨损机理的研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
ZHAO Xin-xue. Research on the erosion mechanism of cyclone separator's wall caused by gas-solid two-phase flow[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East

- China), 2010.
- [3] 李强, 唐晓, 李焰. 冲刷腐蚀研究方法进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(5): 399-409.
LI Qiang, TANG Xiao, LI Yan. Progress in research methods for erosion-corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(5): 399-409.
 - [4] 曹学文, 彭文山, 胥锟, 等. 双金属复合管内衬层液固两相流冲蚀机理[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 739-746.
CAO Xue-wen, PENG Wen-shan, XU Kun, et al. Erosion mechanism of liquid-solid two-phase flow at inner liner of bimetallic composite tube[J]. Oil & gas storage and transportation, 2017, 36(6): 739-746.
 - [5] 丁矿, 朱宏武, 张建华, 等. 直角弯管内液固两相流固体颗粒冲蚀磨损分析[J]. 油气储运, 2013, 32(3): 241-246.
DING Kuang, ZHU Hong-wu, ZHANG Jian-hua, et al. Erosion wear analysis of solid particles in liquid-solid two-phase flow of right-angle bend pipe[J]. Oil & gas storage and transportation, 2013, 32(3): 241-246.
 - [6] 涂亚东, 徐小兵, 殷华锋, 等. 高压管汇冲蚀磨损规律研究[J]. 石油机械, 2018, 46(2): 84-88.
TU Ya-dong, XU Xiao-bing, YIN Hua-feng, et al. Analysis on erosion wear laws of high pressure manifold[J]. China petroleum machinery, 2018, 46(2): 84-88.
 - [7] 郑思佳, 张鹏, 敬加强, 等. 输气管路弯头内壁面冲蚀进化的试验和数值模拟研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 754-760.
ZHENG Si-jia, ZHANG Peng, JING Jia-qiang, et al. Experimental and numerical study of surface erosion evolution at inner wall of elbow in gas flow line[J]. Tribology, 2015, 35(6): 754-760.
 - [8] 陶中东, 顾正东, 吴东方. 颗粒流化磨损研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(10): 2535-2539.
TAO Zhong-dong, GU Zheng-dong, WU Dong-fang. Research progress on fluidized particle attrition[J]. Chemical industry and engineering progress, 2014, 33(10): 2535-2539.
 - [9] MENG H C, LUDEMA K C. Wear models and predictive equations: Their form and content[J]. Wear, 1995, 181(6): 443-457.
 - [10] API R P 14E 811—1991. Recommended practice for design and installation of offshore production platform piping systems[S].
 - [11] DNV RP O501 REVISION 4.2—2007. Recommended practice: Erosive wear in piping systems[S].
 - [12] FINNIE I. The mechanism of erosion of ductile metals [C]// Proceeding of the 3rd US National Congress of Applied Mechanics. New York: [s. n.], 1958.
 - [13] FINNIE I. Erosion of surfaces by solid particles[J]. Wear, 1960, 3(2): 87-103.
 - [14] BITTER J G A. A study of erosion phenomena part I[J]. Wear, 1963, 6(1): 5-21.
 - [15] BITTER J G A. A study of erosion phenomena: Part II[J]. Wear, 1963, 6(3): 169-190.
 - [16] ZHANG Y, REUTERFORS E P, MCLAURY B S, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows[J]. Wear, 2007, 263(1-6): 330-338.
 - [17] ZHANG Jun, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. CFD simulation and 2-D modeling of solid particle erosion in annular flow[C]// 10th north American conference on multiphase technology. Banff: [s. n.], 2016: 8-10.
 - [18] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation[J]. Wear, 2005, 259(1-6): 95-101.
 - [19] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. Wear, 2005, 259(1-6): 102-109.
 - [20] SALAMA M M. An alternative to API 14E erosional velocity limits for sand-laden fluids[J]. Journal of energy resources technology, 2000, 122(2): 71-77.
 - [21] MCLAURY B S, SHIRAZI S A, VISWANATHAN V, et al. Distribution of sand particles in horizontal and vertical annular multiphase flow in pipes and the effects on sand erosion[J]. Journal of energy resources technology, 2011, 133(2): 023001.
 - [22] MCLAURY B S, SHIRAZI S A, RYBICKI E F. Sand erosion in multiphase flow for slug and annular flow regimes[C]//Corrosion 2010. Houston: NACE international, 2010.
 - [23] MAZUMDER Q H, SHIRAZI S A, MCLAURY B S. Prediction of solid particle erosive wear of elbows in multiphase annular flow-model development and experimental validations[J]. Journal of energy resources technology, 2008, 130(2): 023001.
 - [24] MAZUMDER Q H, SHIRAZI S A, MCLAURY B S, et al. Development and validation of a mechanistic model to predict solid particle erosion in multiphase flow[J]. Wear, 2005, 259(1-6): 203-207.
 - [25] VIEIRA R E, PARSI M, ZAHEDI P, et al. Sand erosion measurements under multiphase annular flow conditions in a horizontal-horizontal elbow[J]. Powder technology, 2017, 320: 625-636.
 - [26] ZHOU Jia-wei, LIU Yu, LIU Song-yong, et al. Effects of particle shape and swirling intensity on elbow erosion in dilute-phase pneumatic conveying[J]. Wear, 2017, 380-381: 66-77.
 - [27] ZAHEDI P, PARVANDEH S, ASGHARPOUR A, et al. Random forest regression prediction of solid particle Erosion in elbows[J]. Powder technology, 2018, 338: 983-992.
 - [28] FAROKHIPOUR A, MANSOORI Z, SAFFAR-AVVAL M, et al. 3D computational modeling of sand erosion in gas-liquid-particle multiphase annular flows in bends[J]. Wear, 2020, 450-451: 203241.
 - [29] XIE Zhen-qiang, CAO Xue-wen, ZHANG Ju-ni, et al.

- Study of erosion behavior in elbows mounted in series using computational fluid dynamics method[J]. Journal of energy resources technology, 2020, 142(11): 113001.
- [30] 于飞, 刘明, 王汀, 等. 弯头内气-固两相流动与管壁磨损特性研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(4): 796-800.
YU Fei, LIU Ming, WANG Ting, et al. Numerical research on gas-solid two phase flow and erosion in elbows[J]. Journal of engineering thermophysics, 2015, 36(4): 796-800.
- [31] 钱东良. 番禺 35-2 海底输气管道冲蚀规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
QIAN Dong-liang. Study on erosion law of panyu 35-2 submarine gas pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [32] 王凯, 李秀峰, 王跃社, 等. 液固两相流中固体颗粒对弯管冲蚀破坏的位置预测[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 691-694.
WANG Kai, LI Xiu-feng, WANG Yue-she, et al. Numerical prediction of the maximum erosion location in liquid-solid two-phase flow of the elbow[J]. Journal of engineering thermophysics, 2014, 35(4): 691-694.
- [33] 李增亮, 杜明超, 董祥伟, 等. 单个角型颗粒冲蚀机理实验系统设计及实验[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 195-203.
LI Zeng-liang, DU Ming-chao, DONG Xiang-wei, et al. Design and tests for single angular particle erosion mechanism test system[J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(21): 195-203.
- [34] 杜明超, 李增亮, 董祥伟, 等. 菱形颗粒冲击延性材料的运动行为及凹坑形态研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 97-105.
DU Ming-chao, LI Zeng-liang, DONG Xiang-wei, et al. A study on the kinematic behavior and crater shape of rhomboid particle impacting ductile material[J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38(20): 97-105.
- [35] 曹学文, 彭文山, 胥锟, 等. 含固体颗粒竖直弯管段塞流/乳沫状流冲蚀速率预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(2): 119-128.
CAO Xue-wen, PENG Wen-shan, XU Kun, et al. Prediction of erosion rate of solid particles in vertical pipe bends with slug flow/churn flow[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2018, 42(2): 119-128.
- [36] 曹学文, 樊茵, 李星标, 等. 段塞流下携砂水平弯管的冲蚀试验[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(4): 245-253.
CAO Xue-wen, FAN Yin, LI Xing-biao, et al. Erosion experiment for horizontal elbow in slug flow carrying sands[J]. Corrosion & protection, 2019, 40(4): 245-253.
- [37] 曹学文, 胥锟, 彭文山. 弯管液固两相流冲蚀失效模拟分析[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 124-131.
CAO Xue-wen, XU Kun, PENG Wen-shan. Simulation and analysis of liquid-solid two-phase flow erosion failure in pipe bends[J]. Surface technology, 2016, 45(8): 124-131.
- [38] 彭文山, 邢少华, 曹学文, 等. 水平弯管含砂分散泡状流冲蚀机理分析[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 237-244.
PENG Wen-shan, XING Shao-hua, CAO Xue-wen, et al. Analysis of sand erosion mechanism of horizontal pipe bend under dispersed bubble flow[J]. Surface technology, 2019, 48(4): 237-244.
- [39] 彭文山, 曹学文. 基于气-固双向耦合的输气管道最大冲蚀角度预测[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 110-118.
PENG Wen-shan, CAO Xue-wen. Prediction on the maximum erosion angle of gas pipelines based on the gas-solid bidirectional coupling[J]. Natural gas industry, 2016, 36(2): 110-118.
- [40] 彭文山, 曹学文. 管道参数对液/固两相流弯管流场及冲蚀影响分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(1): 87-96.
PENG Wen-shan, CAO Xue-wen. Influence of pipe parameters on flow field of liquid-solid two-phase flow and erosion of pipe bend[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(1): 87-96.
- [41] 冯承明, 许斌. 耐磨高锰钢的发展与应用[J]. 金属世界, 1995(1): 11.
FENG Cheng-ming, XU Bin. Development and application of wear-resistant high manganese steel[J]. Metal world, 1995(1): 11.
- [42] 赵建华, 赵占西, 陈晓亮, 等. CrMoV 合金堆焊层组织结构及抗冲蚀磨损性能研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(10): 111-114.
ZHAO Jian-hua, ZHAO Zhan-xi, CHEN Xiao-liang, et al. Microstructure and anti-erosion wear properties of CrMoV alloying coating[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(10): 111-114.
- [43] 杨晓辉, 曹佩, 王毅, 等. C/SiC 复合材料喷嘴冲蚀磨损性能及其机理研究[J]. 火箭推进, 2019, 45(1): 53-58.
YANG Xiao-hui, CAO Pei, WANG Yi, et al. Study on erosion wear properties and its mechanism of C/SiC composite nozzle[J]. Journal of rocket propulsion, 2019, 45(1): 53-58.
- [44] 王三军. 耐磨铸铁的研制及其耐磨性的试验研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2018, 36(1): 83-85.
WANG San-jun. The preparation of wear resistant cast iron and its experimental study on the wear resistance[J]. Journal of Jiamusi University (natural science edition), 2018, 36(1): 83-85.
- [45] 文军, 李毅, 张东亚, 等. 低合金耐磨钢摩擦磨损性能研究[J]. 工程机械, 2018, 49(12): 30-34.
WEN Jun, LI Yi, ZHANG Dong-ya, et al. Research on friction and wear properties of low-alloy wear resistant steel[J]. Construction machinery and equipment, 2018, 49(12): 30-34.
- [46] 李巾杰, 吴凤芳, 吴冰. 钛合金基体上 AlCrN 涂层的冲蚀磨损行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 152-158.
LI Jin-jie, WU Feng-fang, WU Bing. Erosion wear performance of AlCrN coating on titanium alloy substrate[J]. Surface technology, 2019, 48(2): 152-158.
- [47] 姜良锋, 杨顺贞, 纪秀林, 等. 电沉积镍合金的冲蚀-腐蚀磨损研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 137-142.

- JIANG Liang-feng, YANG Shun-zhen, JI Xiu-lin, et al. Erosion-corrosion of electroplated Ni-based alloy coatings [J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(21): 137-142.
- [48] 李守彪, 许立坤, 沈承金, 等. 等离子喷涂耐冲蚀陶瓷涂层的性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(3): 196-201.
- LI Shou-biao, XU Li-kun, SHEN Cheng-jin, et al. Performance of erosion-resistant ceramic coatings deposited by plasma spraying[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2011, 31(3): 196-201.
- [49] 刘慧芳, 高瑾, 李晓刚, 等. 高速电弧喷涂 FeCrAl 涂层和 3Cr13 涂层的冲刷腐蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(4): 225-230.
- LIU Hui-fang, GAO Jin, LI Xiao-gang, et al. Erosion-corrosion characteristic of high velocity arc sprayed FeCrAl and 3Cr13 coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(4): 225-230.
- [50] 范敏, 余新泉, 孙扬善. Fe₃Al 基合金在含 SO₂ 和 SiO₂ 颗粒高温气流中的冲刷腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000(3): 155-160.
- FAN Min, YU Xin-quan, SUN Yang-shan. Erosion-corrosion of Fe₃Al based alloys in air flow containing SO₂ and SiO₂ particles[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2000(3): 155-160.
- [51] 姜峰, 张志浩, 王毅坚, 等. 304 不锈钢热浸镀铝工艺及镀层的耐冲蚀性能[J]. 材料保护, 2019, 52(5): 83-85.
- JIANG Feng, ZHANG Zhi-hao, WANG Yi-jian, et al. Hot dip aluminizing process and erosion corrosion resistance of 304 stainless steel[J]. Materials protection, 2019, 52(5): 83-85.
- [52] 陈小明, 周夏凉, 吴燕明, 等. 超音速火焰喷涂微、纳米结构 WC-10Co4Cr 涂层及其性能[J]. 金属热处理, 2016, 41(5): 52-56.
- CHEN Xiao-ming, ZHOU Xia-liang, WU Yan-ming, et al. Properties of micro and nano structured WC-10Co4Cr coatings by HVOF spray[J]. Heat treatment of metals, 2016, 41(5): 52-56.
- [53] 黄达, 何卫锋, 吕长乐, 等. 离子注入对 TC4 钛合金 TiN/Ti 涂层结合力和抗砂尘冲蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 184-191.
- HUANG Da, HE Wei-feng, LYU Chang-le, et al. Effects of ions implantation on adhesion strength and sand erosion resistance of TiN/Ti coatings on TC4 titanium alloy[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 184-191.
- [54] 吕振林, 金汉, 周永欣. SiC 粒子尺寸对 SiC_p/铸铁表面复合材料组织及冲蚀磨损性能的影响[J]. 铸造技术, 2012, 33(9): 1019-1021.
- LYU Zhen-lin, JIN Han, ZHOU Yong-xin. Effect of SiC size on microstructures and erosion wear behaviors of SiC_p/cast iron surface composite[J]. Foundry technology, 2012, 33(9): 1019-1021.
- [55] 赵稼祥. 碳化硅纤维及其复合材料[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(4): 1-6.
- ZHAO Jia-xiang. Silicon carbide fibers and their composites[J]. Hi-tech fiber & application, 2002, 27(4): 1-6.
- [56] 王伟. SiC 泡沫陶瓷/球墨铸铁双连续相复合材料的耐冲蚀性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- WAN Wei. Study on erosion resistance of SiC foam ceramic/ductile iron co-continuous phase composites[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [57] 张开泉, 刘焕芳. 涡管分水排沙规律的研究及其工程应用[J]. 泥沙研究, 1991(4): 1-12.
- ZHANG Kai-quan, LIU Huan-fang. A study on water-diverting and sand trapping by vortex tube and its application[J]. Journal of sediment research, 1991(4): 1-12.
- [58] 曾子华, 姚军, 周芳, 等. 液固两相射流中 304 不锈钢冲蚀行为研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(12): 2853-2858.
- ZENG Zi-hua, YAO Jun, ZHOU Fang, et al. Investigation of particle impact on 304SS under the liquid-solid two phase flow[J]. Journal of engineering thermophysics, 2019, 40(12): 2853-2858.
- [59] 季楚凌, 李长俊, 马树锋, 等. 弯管仿生耐磨方法数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3582-3589.
- JI Chu-ling, LI Chang-jun, MA Shu-feng, et al. Numerical simulation of bionic method for improving property of elbow erosion resistance[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2016, 47(10): 3582-3589.
- [60] 孙鸿志. 管道弯头仿生表面耐冲蚀磨损性能及机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- SUN Hong-zhi. Research on anti-erosion performance and mechanism of a pipe bend with the bio-inspired internal surface[D]. Changchun: Jilin University, 2017.