

基于气-固两相流喷嘴实验的 20G 钢冲蚀机理研究

邓宽海¹, 程金亮¹, 林元华^{1*}, 黄耕¹, 刘冰², 梅宗斌³, 秦大伟⁴

(1.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500;
2.贵州航天天马机电科技有限公司, 贵州 遵义 563000; 3.四川华宇钻采装备有限公司,
四川 泸州 646000; 4.广东石油化工学院, 广东 茂名 525000)

摘要: **目的** 由天然气管道内壁减薄及穿孔导致的天然气泄漏事故频繁发生, 输气管道面临着日益严重的冲蚀磨损问题。针对这一问题需要明确输气管道材料的冲蚀行为及机理, 为抗冲蚀材料设计和延长管道使用寿命等工作的开展提供有效支撑。**方法** 基于 ASTM-G76 测试标准, 采取气-固喷嘴冲蚀试验研究方法, 利用空气射流冲蚀实验机, 开展不同冲击角度和冲击速度下天然气管道材料 20G 钢的气-固冲蚀实验; 采用扫描电子显微镜、激光粒度分析仪等设备分析试样表面冲蚀形貌及特征; 采用 Ahlert 冲蚀模型对实验数据进行拟合, 建立 20G 钢的冲蚀率方程。**结果** 当冲击速度 (15~72 m/s) 增大时, 冲蚀率随之增大。当冲击角度 (15°~90°) 增加时, 冲蚀率随之减小。冲蚀面积随着冲击角度的增加而减小。在低冲击角度下 (15°、30°), 固相颗粒的“犁削”为主要冲蚀及材料移除机制。在中等冲击角度下 (45°、60°), 冲蚀机制呈现混合形式, 犁削、压实与开裂共同作用于材料表面。在高冲击角度下 (75°、90°), 以压实和开裂为主要冲蚀及材料移除机制。**结论** 在气固两相流作用下, 20G 钢的冲蚀磨损过程符合典型的塑性材料冲蚀规律。颗粒冲击速度不会直接影响冲蚀机制, 颗粒冲击能量的变化是影响冲蚀率的主要因素。建立了适用于天然气管道材料抗冲蚀性能对比和 CFD 冲蚀模型的冲蚀速率方程。

关键词: 冲蚀磨损; 20G 钢; 冲蚀机理; 气固两相流; 冲蚀速率方程; 冲蚀试验

中图分类号: TE973; TG142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)17-0050-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.17.004

Erosion Mechanism of 20G Steel Based on Gas-solid Two-phase Flow Nozzle Experiment

DENG Kuanhai¹, CHENG Jinliang¹, LIN Yuanhua^{1*}, HUANG Geng¹,
LIU Bing², MEI Zongbin³, QIN Dawei⁴

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Guizhou Aerospace Tianma Electromechanical Technology Co., Ltd., Guizhou Zunyi 563000, China; 3. Sichuan Huayu Drilling Equipment Co., Ltd., Sichuan Luzhou 646000, China; 4. Guangdong Institute of Petrochemical Engineering, Guangdong Maoming 525000, China)

收稿日期: 2023-09-25; 修订日期: 2024-03-14

Received: 2023-09-25; Revised: 2024-03-14

基金项目: 国家自然科学基金 (52074232, 52474011); 四川省自然科学基金重点项目 (2022NSFSC0028); 四川省青年科学基金 (2022NSFSC0994); 广东省自然科学基金 (2022A1515010512); 广东省教育厅青年创新人才项目 (2020KQNCX047)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52074232); Sichuan Science and Technology Program (2022NSFSC0028); Sichuan Youth Science Foundation (2022NSFSC0994); Guangdong University of Petrochemical Technology Natural Science Foundation of Guangdong Province (2022A1515010512); Guangdong Province Colleges and Universities Young Innovative Talents Project (2020KQNCX047)

引文格式: 邓宽海, 程金亮, 林元华, 等. 基于气-固两相流喷嘴实验的 20G 钢冲蚀机理研究[J]. 表面技术, 2024, 53(17): 50-61.

DENG Kuanhai, CHENG Jinliang, LIN Yuanhua, et al. Erosion Mechanism of 20G Steel Based on Gas-solid Two-phase Flow Nozzle Experiment[J]. Surface Technology, 2024, 53(17): 50-61.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: In recent years, natural gas leakage accidents occur frequently due to the thinning and perforation of the inner wall of natural gas pipelines, and the natural gas pipelines are faced with increasingly serious erosion and wear problems. To solve this problem, the work aims to clarify the erosion behavior and mechanism of gas pipeline materials to provide effective support for the design of anti-erosion materials and the extension of pipeline service life.

Based on the ASTM-G76 test standard, the gas-solid two-phase flow nozzle erosion test research method was adopted and the air jet erosion test equipment was used to carry out erosion experiments on 20G steel, a commonly used material for natural gas pipelines, at different impact angles and impact speed. The micromorphologies of the samples were analyzed by means of specialized microinstruments. Ahlert erosion model was used to fit the experimental data, and the erosion rate equation of 20G steel was established.

The sample size of 20G steel was processed into 20 mm×20 mm×5 mm (impact angle 15° and 30°) and 25 mm×25 mm×5 mm (impact angle 45°-90°) with laser cutting instrument, and the surface of the pattern was polished with sandpaper to be eroded, cleaned, dehydrated and blown dry, and then placed in the dryer for use, and finally weighed with a balance. Before the experiment, the abrasive was weighed and dried in a 150° drying oven for 2 hours, and then the abrasive was poured into the sand storage tank in the equipment. With the help of air jet erosion device, the abrasive was sucked into the nozzle, and accelerated in the air flow, to realize impact pattern. During the experiment, the impact angle was adjusted by replacing the sample brackets with different angles (15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°) to achieve the required conditions of the experiment. After the experiment, the debris on the surface of the pattern was cleaned, dehydrated and dried, and the weight of the pattern after erosion was weighed and the weight loss was calculated. The erosion mechanism was studied by scanning electron microscope (SEM).

When the particle impact angle (15°-90°) increased, the erosion rate decreased. However, when the particle impact speed (15-72 m/s) increased, the erosion rate increased. When the impact angle increased, the erosion area decreased. At low impact angles (15° and 30°), the "plowing" of solid particles was the main erosion and material removal mechanism. At moderate impact angles (45° and 60°), the erosion mechanism presented a mixed form, with ploughing, compaction and cracking acting together on the material surface. At high impact angles (75° and 90°), compaction and cracking were the main erosion and material removal mechanisms.

It is concluded that the erosion wear process of 20G under the action of gas-solid two-phase flow conforms to the typical erosion law of plastic materials, and the removal mechanism is not directly affected by particle impact speed, and the change of particle impact energy is the main factor affecting the erosion rate. The erosion rate equation which is suitable for comparison of erosion resistance of natural gas pipeline materials and CFD erosion model is established. The theory of erosion wear is improved, which provides effective theoretical support for solving practical erosion problems in future engineering.

KEY WORDS: erosion wear; 20G steel; erosion mechanism; gas-solid flow; erosion rate equation; erosion experiment

在“双碳”时代背景下,天然气无疑是传统化石能源体系转变为未来可再生能源体系的重要纽带,是一种具有低碳、清洁、经济的过渡型化石能源,其发展前景十分广阔^[1]。过去 10 年,国内天然气管道产业快速发展,取得了一系列成就,今天的中国已经成为世界第四大天然气产气国和第一大天然气进口国^[2]。近些年来,由天然气管道穿孔及泄漏引发的事故频繁发生,例如,2020 年 12 月山西省吕梁市临兴区集气管线发生爆裂破损事故,经调查破损的主要原因是天然气中含有的大量砂粒不断冲蚀管道内壁,最终导致管道燃气泄漏失效^[3]。作为天然气集输管道的常用材料,20G 钢面临的固体颗粒冲蚀磨损问题是造成管道运行失效的主要安全隐患之一。随着气田开采过程中出砂量的增大,以及管道内部腐蚀产物剥落等相关原因,必然导致集输管道面对的冲蚀磨损风险日益

增加^[4]。由此可见,了解 20G 钢在固体颗粒冲击下的冲击特性、磨损机理是准确预测天然气集输管道冲蚀磨损规律,并提出有效减缓冲蚀措施的理论基础和前提。常见的冲蚀磨损现象如图 1 所示^[5]。

气体或液体携带大量固体颗粒,在设定条件下冲击材料,使材料发生消耗的过程被定义为冲蚀磨损^[6]。在研究某种材料的冲蚀特性时,通常采用喷嘴冲蚀实验方法,此方法侧重于研究颗粒撞击材料的过程,通过设置实验装置的初始参数,与颗粒撞击试样的设定条件相关联,以达到实验的预期效果^[7-11]。常见的喷嘴冲蚀实验方法包含液固和气固 2 种。目前,国内多数研究人员采用液固喷嘴实验方法。例如,杨向前等^[12]使用液固喷嘴实验方法,在冲击角度小于 30°,以及 45 m/s 的冲击速度条件下,研究了不同冲击角度对 35CrMo 钢冲蚀机制的影响规律;杨少帅^[13]使用



图 1 常见的冲蚀磨损现象
Fig.1 Common erosion wear phenomenon

自制液固喷嘴冲蚀实验装置,在 9.6 m/s 的冲击速度下研究了不同颗粒粒径对 304 不锈钢冲蚀磨损的影响;唐春艳^[14]基于液固喷嘴冲蚀实验方法,在 2 m/s 的冲击速度下分别探究了 420 不锈钢和 420 不锈钢镀锌涂层 2 种材料的不同冲蚀机理;王志杰等^[15]利用砂水两相流喷嘴冲蚀实验方法,在 10 m/s 的冲击速度下,得到了 Q345 钢材的冲蚀机理;张明鲲等^[16]使用自制的液固喷嘴实验台,在液固两相流冲击速度 (6~12 m/s) 条件下,研究了 304 不锈钢的冲蚀特性。

相较于液固喷嘴冲蚀实验方法,采用气固喷嘴实验方法的结果的准确性更高。这是因为液固喷嘴实验中存在“停滞区”,使得实验条件与初始参数存在一定误差,导致实验结果的准确性下降^[17]。近年来,国内部分研究人员采用了气固喷嘴实验方法。例如,梁兆惠等^[18]使用自制的气固喷嘴实验装置,以铁粉颗粒为冲蚀剂,分别在 8.5、14.87、20.03、23.07 m/s 冲击速度下,研究分析了不锈钢的冲蚀规律,确定了 2 种影响冲蚀率的主要因素,得到了使冲蚀率达到最大值的冲击角度为 45°。吕祥鸿等^[19]采用气固喷嘴实验方法,分别在 10、19 m/s 冲击速度条件下,研究了 316 不锈钢的冲蚀机理,当固体颗粒流速增加时,试样的质量消耗率增大。

国外有研究人员采用了更精确的气固喷嘴冲蚀实验方法。例如,Al-Asadi 等^[20]利用气固喷嘴实验方法,在不同的冲击角度和冲击速度 (30、50、70 m/s) 条件下,分别研究了 410 不锈钢、410 硬化不锈钢、带类金刚石碳涂层的 410 硬化不锈钢的砂粒冲蚀现象,结果表明,冲击速度和角度等因素对冲蚀率无显著影响,其中 DLC 涂层表现出最高的抗冲蚀性能。Verma 等^[21]使用氧化铝为冲蚀剂,在 90 m/s 恒定冲击速度和 4 种不同冲蚀角度 (15°、45°、70°、90°) 条件下,开展了含有不同含量马氏体双相钢的气固喷嘴冲蚀磨损实验。结果表明, N 钢和 DP 钢的冲蚀率随着冲击角度的增大而减小,与 DP 钢相比, N 钢的冲

蚀率明显更高。Abyazi 等^[22]利用气固喷嘴实验方法,在改变冲击角度 (15°、45°、90°) 的条件下,研究了镍铬硼硅复合涂层的冲蚀机理。Sepetcioglu 等^[23]采用气固喷嘴实验方法,在 34 m/s 的冲击速度条件下通过不断改变冲击角度,得到了 BFRP 复合管的冲蚀率变化情况。结果表明,在 60°冲击角度下材料的冲蚀率达到最大值。Sliem 等^[24]使用喷嘴直径 2 mm 的气固喷嘴冲蚀装置,测试了所制备涂层的冲蚀特性,在 19~49 m/s 的冲击速度下,以不同的入射角度面向喷嘴,研究了固体颗粒对材料的冲蚀规律。Vishnoi 等^[25]利用气固喷嘴实验方法,分别在 4 种不同冲击角度 (15°、30°、45°、60°、90°) 下,研究了氮钢的冲蚀特性,结果表明,冲蚀率随着冲击角度的增加而降低。

综上所述,国内针对较高冲击速度条件下 (70m/s) 的冲蚀实验研究较少^[21]。究其原因,一方面多数文献都基于低速工况中颗粒的冲击速度开展研究,即与研究需求相关,冲击速度低于 70 m/s^[12-16]。未来,随着气井产量的不断增加,在生产及运输过程中必将面临高速工况下的冲蚀磨损问题,故本文拟开展较高冲击速度下的冲蚀研究。另一方面,针对喷嘴实验方法的研究多采用自制的试验设备^[12-16, 18-19],其最大冲击速度无法达到 70 m/s^[18-19],即与实验设备的性能参数有关。此外,国内冲蚀研究使用的传统自制试验设备^[12-16, 18-19],在试验过程中对颗粒质量流量的控制和冲击角度的改变都依靠人为操作^[15-16],无法有效降低人为因素对试验结果的影响,导致误差较大。为使试验结果具有更高的准确性和科学性,采用国外定制的先进冲蚀设备,即满足 ASTM-G76 测试标准的空气射流冲蚀试验台,其最大冲击速度可达到 200 m/s。在试验过程中可实现自动测试、无人操作干扰,可以得到更为准确的试验结果。本文依据 ASTM-G76,基于气固喷嘴实验方法,探究了不同冲击角度和冲击速度对 20G 钢冲蚀速率的影响规律,利用 SEM 观察了 20G 钢的微观形貌特征,得到了冲击角度对冲蚀机理的影响,总结出 20G 钢的冲蚀速率模型,为冲蚀模拟研究的开展补充了科学依据。研究成果补充了国内气固喷嘴试验在高冲击速度下的研究理论,改善了传统自制设备的设计缺点^[26],有效降低了人为因素的影响,使结果的准确性得到增强,弥补了气固喷嘴试验研究的不足,为天然气集输管道的冲蚀预测与防护提供了重要支撑。

1 冲蚀试验

1.1 空气射流实验装置

气固喷嘴冲蚀实验主要使用空气射流冲蚀试验装置,满足 ASTM-G76 测试标准。将喷嘴与试样表面之间的直线距离设定为 10 mm,喷嘴直径选择 1.5 mm,

在室温下开展了 20G 钢的固体颗粒冲蚀行为研究工作。完整的空气射流实验装置如图 2 所示, 包括空气射流冲蚀试验台、活塞式空气压缩机及冷冻式干燥机。该实验装置主要针对不同材料进行气固两相流固体颗粒撞击冲蚀实验, 测定试样的质量损失, 并将其用于评定材料的固体颗粒冲蚀率。在使用空气射流冲蚀装置过程中, 伴随着喷嘴中加压空气的产生, 磨料以恒定的速度从供料器中被吸入, 随后磨料在气流中加速, 冲击目标试样, 最终造成材料损失。在冲击试样的过程中, 通过更换不同角度 (15°、30°、45°、60°、75°和 90°) 的试样支架来调整气固射流与试样之间的冲击角度, 以达到实验设计条件, 试样支架如图 2 所示。

使用空气压缩机为实验供给气体和压力, 同时为了保持实验过程中环境干燥, 使用冷冻式干燥机消除气体中的水分。此外, 加砂速率由安装在料斗底部卸料装置上的放电单元控制。磨料在撞击试样后落入最底部的冲蚀收集器中, 不再循环使用, 以减小磨料与实验材料表面发生碰撞后颗粒破碎对实验产生的误差。为了防止热量传递, 整体系统要进行防生和绝缘处理。

1.2 试样准备及预处理

我国天然气集输管道多采用国产 20 号钢无缝钢管^[27], 因此这里选用集输管道常用材料 20G 钢作为冲蚀实验材料, 其化学成分如表 1 所示。首先利用精密激光仪器将试样切割为 20 mm × 20 mm × 5 mm (冲击角度 15°、30°) 和 25 mm × 25 mm × 5 mm (冲击角度 45°~90°) 的尺寸。20G 钢的硬度为 156HB。20G 钢的金相组织如图 3 所示。

为了减小因试样表面粗糙度的差异引起的实验误差, 在每次实验前使用 100[#]、200[#]、400[#]、1000[#]、2000[#]砂纸依次打磨试样。随后经过清洗、除油、脱水、吹干等步骤后, 放置于干燥器中待用, 最后使用分析天平称量, 精确至 0.01 mg。

1.3 磨料

依据 ASTM-G76 测试标准, 在实验中使用 Al₂O₃

颗粒, 其平均粒径为 50 μm, 莫氏硬度为 9, 与铬的莫氏硬度级别相同。由激光粒度分析仪测试所得颗粒粒径分布, 如图 4 所示, 其中颗粒中值粒径为 50 μm, 满足 ASTM-G76 要求。使用 SME 得到 Al₂O₃ 颗粒形貌, 如图 5 所示, 可知颗粒外观均呈现不规则棱角且边缘锋利, 因此可更加真实地模拟实际工况下材料的冲蚀磨损过程。在每次实验前, 称取培养皿中实验所需总质量 1.5 倍的磨料, 并放入 150°干燥箱中至少烘干 2 h。在此过程中, 至少搅拌 1 次, 保证排干水分, 随后将磨料倒入冲蚀设备中的储砂罐内。

此外, 由于颗粒碰撞速度不等于气体速度, 气体与颗粒之间存在滑移, 气体速度高于颗粒的运动速度, 因此需要使用双圆盘法重新标定颗粒速度。标定使用的双圆盘装置如图 6 所示。该装置由安装在 1 个共用轴上的 1 对金属圆盘 (1、2) 构成, 并在携砂射流下旋转, 同时在圆盘 1 上存在一个允许颗粒通过的缝隙, 颗粒穿过缝隙撞击圆盘 2, 形成冲蚀痕迹。测量痕迹之间的角位移, 使用式 (1) 计算颗粒速度^[28]。该方法具有操作简便、重复性强、测试结果科学准确、可靠性高等特点。其中, 实验所得气体压力与颗粒速度的关系如图 7 所示。

$$v = \frac{2\pi ruL}{s} \quad (1)$$

式中: v 为颗粒速度, m/s; L 为 2 个圆盘之间的距离, mm; r 为圆盘的半径, mm; u 为圆盘的转速, r/min; s 为 2 个标记距离圆盘中心半径 r 处的线性距离, mm。

1.4 实验条件

根据实际的实验方案, 确定 20G 钢气-固喷嘴冲蚀的实验条件, 如表 2 所示。

1.5 测定方法

在冲蚀磨损过程中, 颗粒会对材料表面进行连续冲击, 造成材料变形, 甚至被去除, 最终导致材料质量的损失。由于颗粒速度较高, 冲蚀磨损现象比较明显, 因此试样的损失主要通过宏观称量结果来表示。为了衡量物体的冲蚀变化规律, 通常使用冲蚀率 (E)



图 2 空气射流实验装置及试样支架
Fig.2 Air jet test device and sample support

表 1 20G 钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 20G steel

Element	C	Si	Mn	P	S	V	Ti
Mass fraction/%	0.2	0.22	0.57	0.023	0.005	0.002	0.004

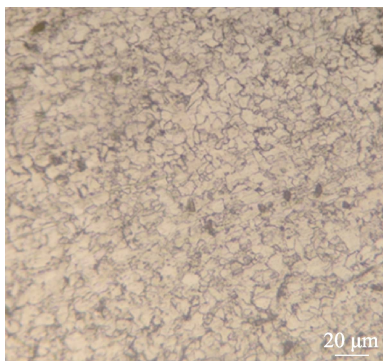


图 3 20G 钢的金相组织
Fig.3 Metallographic structure of 20G steel

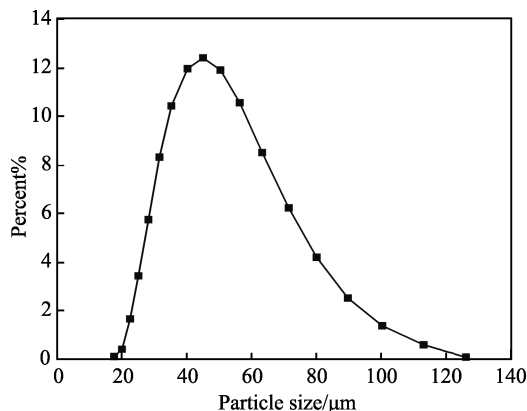


图 4 Al₂O₃ 颗粒粒径分析结果
Fig.4 Al₂O₃ particle size analysis results



图 5 Al₂O₃ 颗粒和 SEM 形貌
Fig.5 Al₂O₃ particles and SEM morphology

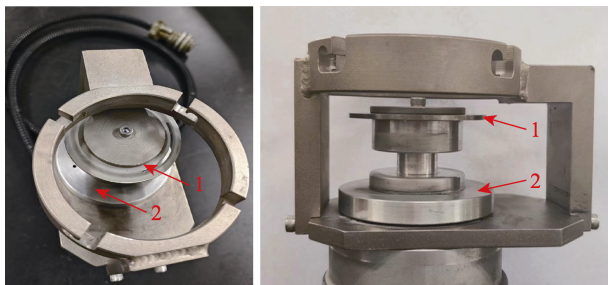


图 6 双圆盘装置
Fig.6 Double disc device

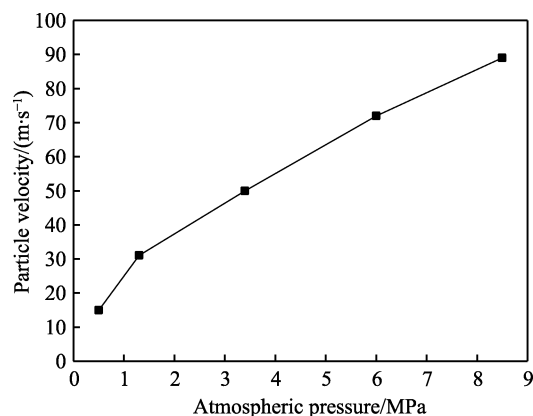


图 7 气压与颗粒速度的关系
Fig.7 Relation between air pressure and particle speed

表 2 实验条件
Tab.2 Experimental condition

Argument	Stats
Experiment time/min	2, 4, 8, 16
Experimental temperature	Room temperature
Impact Angle/(°)	15, 30, 45, 60, 75, 90
Impact velocity/(m·s ⁻¹)	15, 31, 50, 72
Particle mass flow/(g·min ⁻¹)	2

来表示试样的损失程度^[29]，其计算如式(2)所示。

$$E = \frac{m_2 - m_1}{M_p t} \quad (2)$$

式中： E 为试样冲蚀率，mg/g； m_1 为实验后试样质量，mg； m_2 为实验前试样质量，mg； M_p 为颗粒的质量流量，g/min； t 为实验时长，min。

2 结果与分析

2.1 冲蚀速度和角度对冲蚀率的影响

冲蚀后 20G 钢的损伤宏观形貌如图 8 所示。随着冲击角度的增加，喷嘴出口在 20G 钢表面的投影面积减小，即颗粒撞击材料表面的面积减小，导致材料表面冲蚀面积随着冲击角度的增加而减小。从图 8 可以看出，15°、30°冲蚀区域呈现狭长的椭圆形，45°、60°冲蚀区域呈现椭圆形，而 75°、90°冲蚀区域大致呈圆形。当冲击角度增加时，椭圆的长轴长度不断减小，逐渐向圆形接近。在 15°冲击角度下，椭圆的长轴达到最大值。虽然冲蚀区域与喷嘴投影区域的轮廓基本一致，但冲蚀区域面积大于投影面积，冲击角越小越明显。这是由于在较低冲击角度下，固体颗粒具有较高的发散性，导致冲蚀区域扩散到投影区域之外^[30]。

20G 钢在不同冲击角度和冲击速度下分别冲蚀 2、4、8、16 min 后的质量损失如图 9 所示。试样的质量损失随着冲击速度的增大而增加，随着冲击角度

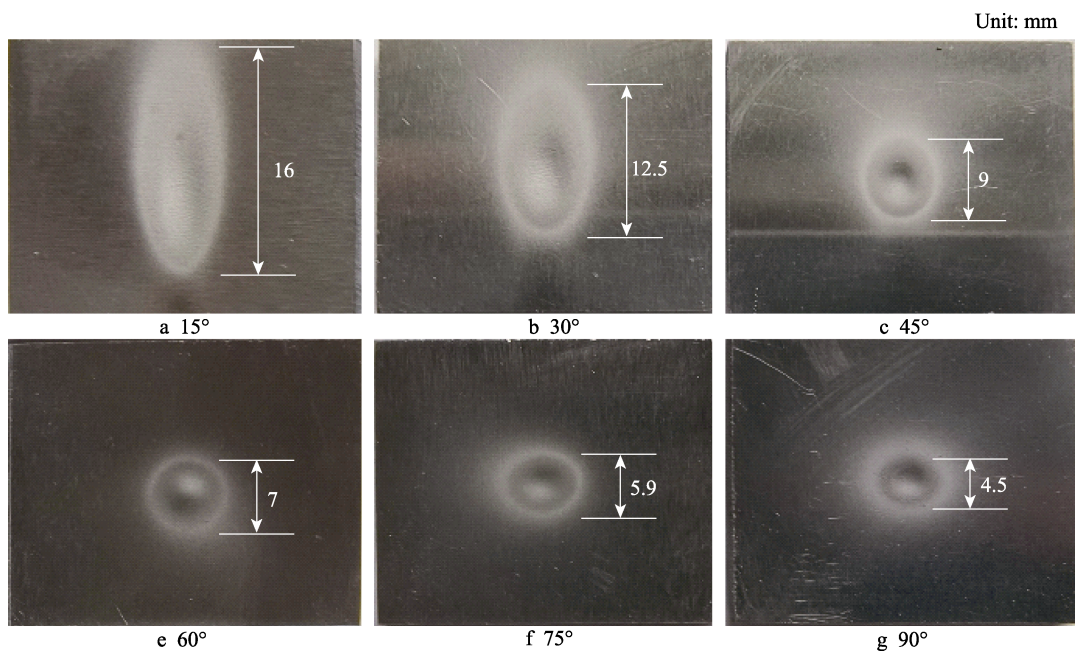


图 8 20G 钢在不同冲击角下的宏观形貌对比
Fig.8 Macroscopic morphology comparison of 20G steel at different impact angles

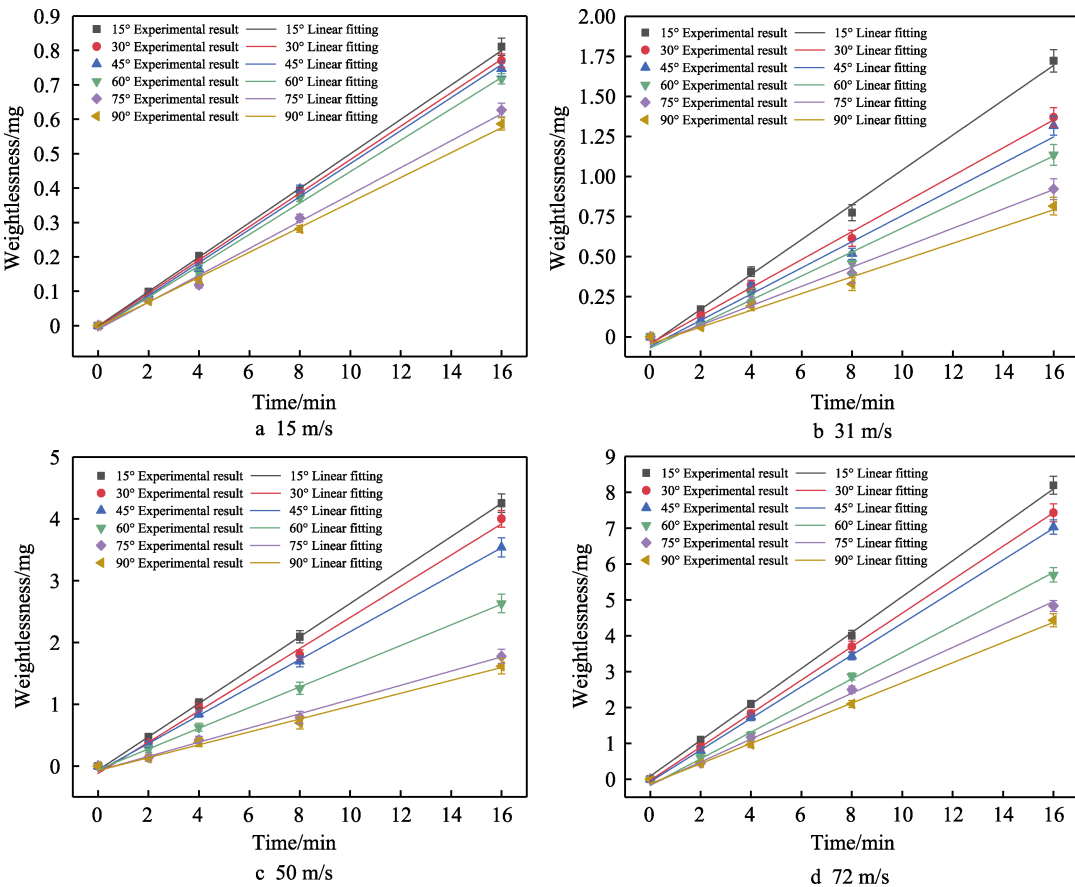


图 9 20G 钢质量损失在不同冲击角度下随时间变化和曲线
Fig.9 Mass loss curve of 20G steel with time at different impact angles

的减小而增大。试样冲蚀率根据质量损失与时间的关系斜率拟合确定,冲蚀率(mg/g)由冲蚀速率(mg/min)除以颗粒质量流量(g/min)计算得出。

颗粒冲击角度和冲击速度对材料冲蚀率的影响

如图 10 所示。首先,由冲击角度对冲蚀率的变化情况可知,在冲蚀磨损实验过程中,颗粒依靠动能撞击材料表面,达到冲蚀效果,即颗粒自身的动能是使材料发生损失所需能量的唯一来源。从整体趋势来看,

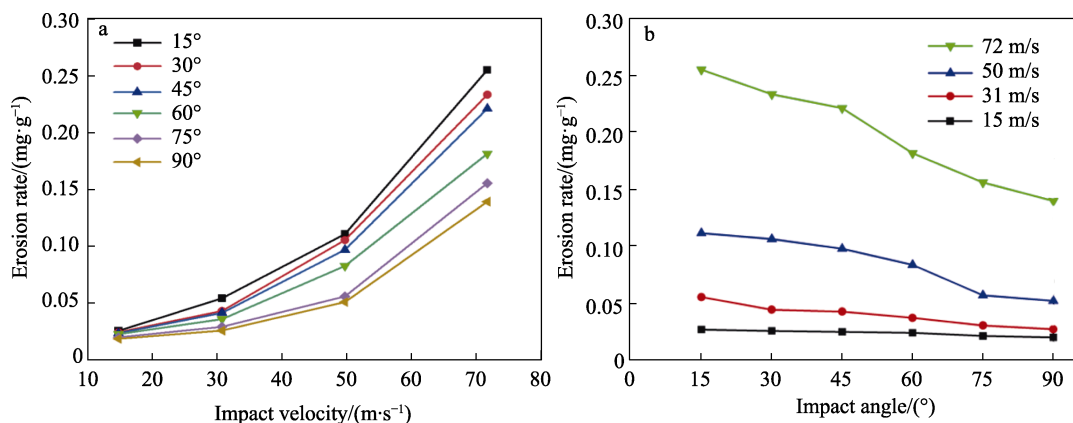


图 10 20G 钢冲蚀率在不同冲击角度 (a) 和冲击速度 (b) 下变化曲线
Fig.10 Erosion rate curve of 20G steel under different impact angles (a) and impact speed (b)

当颗粒速度增大时,其自身的动能随之增大,因此冲蚀率随速度的增大而增大。在 72 m/s 冲击速度和 15° 冲击角度条件下,材料的冲蚀率达到最大值。此外,当颗粒速度增加时,15° 与 90° 冲击角之间的冲蚀速率差值越大。对比 15、72 m/s 这 2 种冲击速度下的曲线可以发现,在较高速度下,冲蚀角度对冲蚀率的影响比在低速条件下更为显著。形成这种现象的原因是当颗粒速度较低时,只有少部分颗粒具有足够的速度和质量使材料表面产生塑性变形,而大多数颗粒的能量较低,低于材料发生弹性变形的阈值,因此只会导致材料表面发生弹性变形。随着颗粒速度的增加,更多的颗粒达到了材料变形和去除的临界能量,从弹性变形转变为塑性变形,最终导致冲蚀率增加。在高颗粒速度下,冲击角度对冲蚀率的影响更明显,而在低颗粒速度下,大部分颗粒只会引起材料表面的弹性变形,对冲蚀率的影响较弱。

根据冲击速度对冲蚀率的影响可知,在 15°~90° 的冲蚀角度范围内,当冲击角度减小时,冲蚀率随之增大,在 15° 时达到最大值,符合塑性材料典型的冲蚀规律。造成此现象的主要原因有以下几点:首先,在低冲击角度下,颗粒与材料表面的接触面积更大,即冲蚀区域面积更大,具体如图 8 所示,使得颗粒消耗的能量更多,同时,颗粒的撞击与反弹方向不同,不会影响到即将到来的未撞击颗粒流,导致冲蚀率更高。然而,在高冲击角度下,特别是 90°,冲蚀区域面积最小,且颗粒的撞击与反弹方向相反,严重阻碍了后方颗粒的流动,造成冲蚀率较低;其次,在高冲击角度下,部分 Al_2O_3 颗粒嵌入材料表面,起到了保护被冲蚀材料表面的作用,导致材料损失的效率变低,因此随着冲击角度的增加, Al_2O_3 颗粒的保护效果越好,冲蚀率逐渐降低;在低冲击角度下,材料的移除机制主要以犁削为主,去除了大量材料,在高冲击角度下,材料发生塑性变形,并挤压到冲蚀疤痕两侧,并不会完全被去除。

综上所述,冲击角度和冲击速率是影响冲蚀率的

重要因素,深入了解和掌握不同冲击角度和冲击速度对材料冲蚀率的影响,可以为材料的选择和应用提供重要的参考和指导。

2.2 冲蚀机理分析

冲蚀磨损是一个极其复杂的物理过程,为了解材料如何被去除,得到 20G 钢的冲蚀机理,对试样表面开展微观形貌特征分析研究。

2.2.1 不同冲击角度下冲蚀机理

20G 钢在不同冲击角度 (冲击速度 72 m/s) 下的冲蚀形貌如图 11 所示。由图 11a 可以观察到,在 15° 低冲击角度下,材料表面的去除机制以犁削为主,符合塑性材料典型的冲蚀特征。颗粒撞击材料表面产生沟槽的方向与颗粒轨迹基本一致,主要原因是固体颗粒的运动轨迹与气体的流动轨迹基本相同。在犁削完成后,由于颗粒反复撞击,沟槽附近的材料被挤压到前方和两侧,形成了大量清晰、完整的唇形凸起,且当大量颗粒持续撞击材料表面时,唇形凸起分裂,形成微小碎片,并逐渐脱离材料表面,使得 20G 钢在 15° 低冲击角度下的冲蚀率达到最大值。由于颗粒速度的法向及切向分量不同 (法向分量用于垂直穿透材料,切向分量用于切削材料),使得沟槽之间的形状差异较大。当颗粒完全离开材料表面时,若切向分量依然存在,则部分沟槽形状呈现完整。反之,若切向速度分量消耗殆尽,则部分沟槽形状不完整。

如图 11b 所示,在 30° 冲击角度下,材料的去除机制依然以犁削为主。与 15° 时相比,由于颗粒入射角度的提高,使得颗粒速度的切向分量减小,法向分量增大,造成颗粒作用时间变短,犁削产生的沟槽长度变短,唇形凸起宽度变大。在低冲击角度下,犁削的直观原理如图 12a 所示。

在 45° 冲击角度下的微观形貌特征如图 11c 所示,与 15°、30° 冲击角度条件下相比,颗粒的切向速度分量减小,法向速度分量增大。在撞击过程中,材料表面发生局部形变而不均匀,呈现出大量的压实与

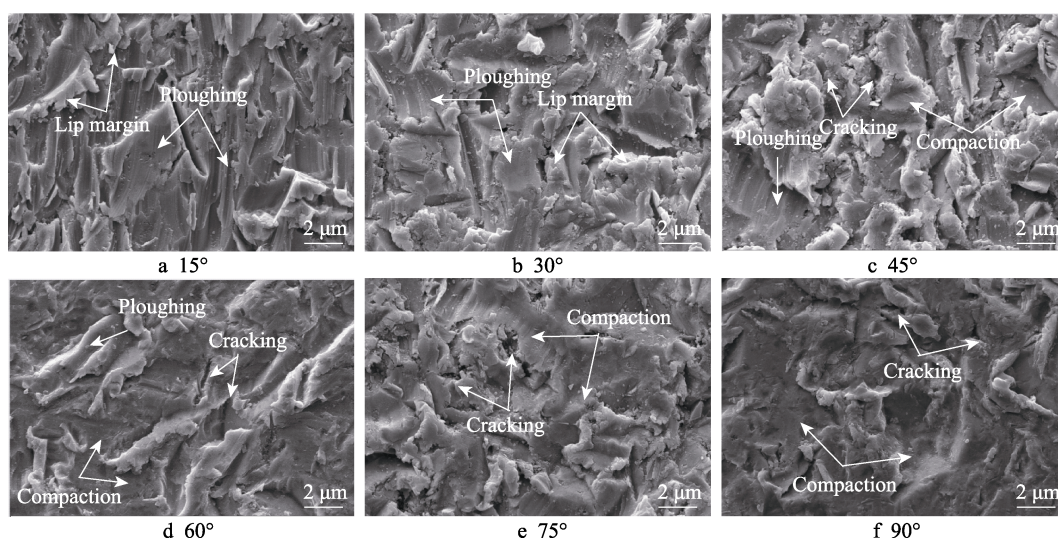


图 11 不同冲击角度下 20G 钢冲蚀微观形貌

Fig.11 Erosion microstructure of 20G steel at different impact angles

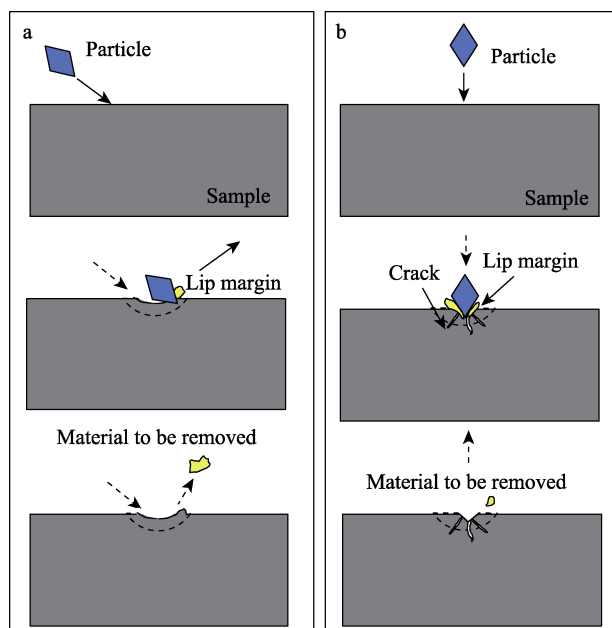


图 12 低冲击角度 (a) 和高冲击角度 (b) 的冲蚀机理示意图

Fig.12 Schematic diagram of erosion mechanism at low impact angle (a) and high impact angle (b)

开裂现象,同时犁削作用效果减弱,属于塑性材料在高冲击角度下的典型特征,造成材料表面发生局部变形而不均匀。在压实的反复作用下,材料可承受的应力极限小于自身表面产生的剪切应力,导致裂纹出现,即开裂现象。由此可见,在 45° 冲击角度下,材料表面出现了犁削、压实和开裂共存现象,其原因是当冲击角度增大时,颗粒的法向撞击分量不断增加,切向分量不断减小,最终导致材料的去除机制出现由低向高冲击角度下的过渡现象。综上所述,在 45° 冲击角度下材料去除机制仍以犁削为主导作用,但压实和开裂也开始显现出重要的辅助作用。

在 60° 冲击角度下的微观形貌如图 11d 所示,可知压实和开裂已经成为主要的去除作用,犁削为次要作用。与 45° 相比,由犁削产生的效果进一步减弱,同时压实作用影响的区域不断增大,开裂现象更加严重。

在 75° 冲击角度下的微观形貌如图 11e 所示,可知,压实和开裂为主要去除作用,犁削作用基本消失。这是由于在高冲击角度下,固体颗粒的法向速度分量远大于切向速度分量,大量颗粒以接近垂直的入射角度撞击材料表面。

在 90° 冲击角度下的微观形貌特征如图 11f 所示,材料的去除机制与 75° 冲击角度下基本相同,未出现犁削特征,材料表面以法向速度分量作用为主,压实和裂纹铺满整个观测表面。在高冲击角度下,压实与开裂原理如 12b 所示。

通过观察如图 11 所示的微观形貌可知,在犁削作用下产生沟槽的宽度小于 $6\ \mu\text{m}$,远低于 Al_2O_3 颗粒最小粒径 ($20\ \mu\text{m}$) 的 $1/3$ 、平均粒径 ($50\ \mu\text{m}$) 的 $1/8$,充分说明颗粒的棱角部分是造成沟槽的主要原因,且颗粒穿透材料表面深度有限。颗粒粒径远大于产生裂纹的宽度,且裂纹包围着整个压实区域,这是裂纹产生的具体原因。

综上所述,在不同冲击角度下,20G 钢的冲蚀行为呈现一定规律,塑性变形是 20G 钢去除机制的最初表现,属于塑性材料的典型冲蚀行为。当冲击角度 (15° 、 30°) 较小时,犁削机制是主要的材料去除方式。随着冲击角度的增大,犁削作用逐渐减弱,取而代之的是压实与开裂机制。在 45° 、 60° 中等冲击角度下,材料的去除机制为犁削、压实和开裂的混合机制。当冲击角度 (75° 、 90°) 较大时,压实与开裂机制成为主要的去除机制。当主要去除机制逐渐由犁削转变为压实与开裂时,去除材料需要更多的能量。这是因

为在压实作用下材料会发生硬化,最终导致冲蚀率降低。由此可知,20G 钢自身的冲蚀机制决定了其冲蚀率随冲击角度变化的规律。

2.2.2 不同冲击速度下冲蚀机理

在不同冲击速度下,冲蚀微观形貌对比(15°、90°)如图 13~14 所示,由图 13、图 14 可知,颗粒的冲击速度对冲蚀机制基本无影响。虽然颗粒在不同冲击速度下,撞击材料表面形成的微观形貌有所不同,但仍然遵循犁削、压实和开裂冲蚀机制。以 15° 冲击角度为例,高速颗粒比低速颗粒具有更高的动能,造成的材料损伤更为严重,形成的沟槽长度更

长。在 90° 冲击角度下,高速颗粒撞击材料表面造成的压痕深度更大,这种差异主要由颗粒动能的不同所致。

上述结果表明,材料的去除机制并不会受到颗粒冲击速度的影响,主要由冲击角度决定。在颗粒冲击过程中,颗粒的动能和撞击角度共同决定颗粒与材料的相互作用效果。在低冲击角度下,颗粒撞击材料表面的入射角度较小,颗粒的切向速度分量较大,故犁削为主要去除机制。相反,在高冲击角度下,颗粒撞击材料表面的入射角度变大,颗粒的切向速度分量减小,而法向速度分量增大,主要的去除机制则为压实

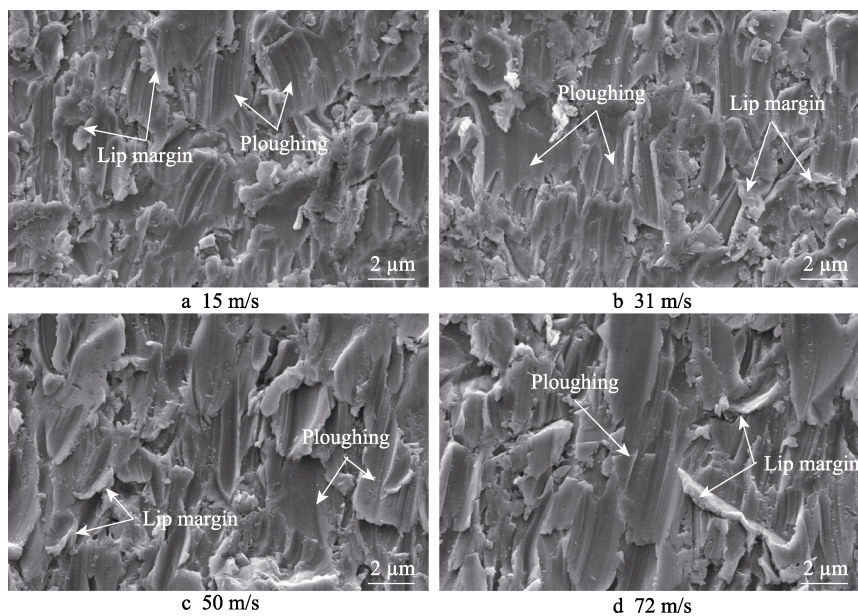


图 13 不同冲击速度下冲蚀微观形貌对比(15°)

Fig.13 Comparison of erosion micromorphology at different impact speed (15°)

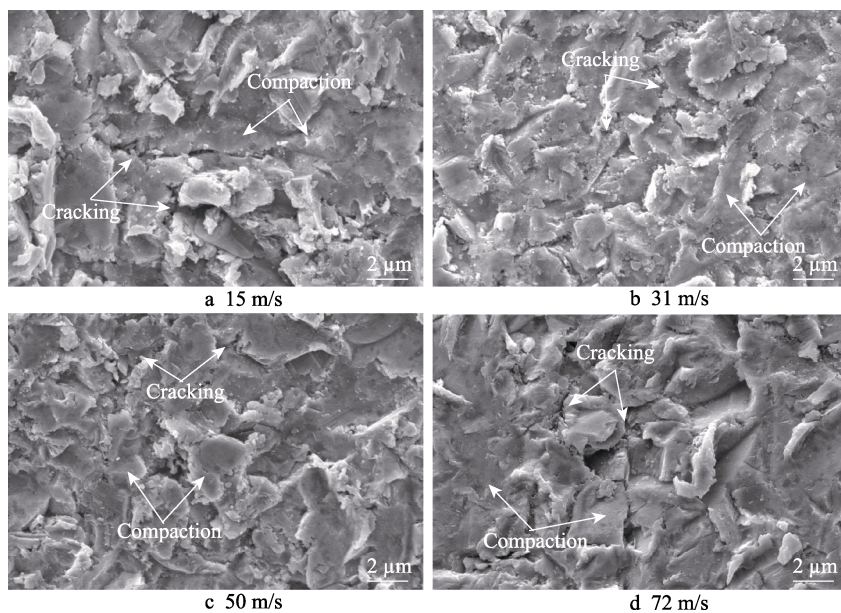


图 14 不同冲击速度下冲蚀微观形貌对比(90°)

Fig.14 Comparison of erosion micromorphology at different impact speed (90°)

和开裂。由此可见, 冲击速度的变化并未改变颗粒与材料的相互作用方式, 只改变了颗粒的动能, 从而影响冲蚀后的形貌变化。

3 建立冲蚀速率方程

为了更好地模拟和预测颗粒的冲蚀行为, 国内外许多研究人员结合实验数据, 建立了各种冲蚀经验模型。这些经验模型通常基于特定材料在特定工况下的冲蚀实验数据拟合而成, 如 Ahlert^[31]模型、Finnie^[32]模型、Oka^[33-34]模型和 Det^[35]模型等, 都是基于塑性材料在气-固两相作用下的冲蚀实验数据而建立, 在实际应用中存在局限性。

为此, 采用经典的 Ahlert 冲蚀模型对气-固冲蚀实验数据进行拟合, 见式 (3) ~ (4), 建立了 20G 钢的冲蚀速率方程, 相关拟合参数如表 3 所示。由表 3、图 15、图 16 可知, 冲蚀率方程的相关系数 R^2 为 0.97, 且冲蚀率方程的预测结果与实验数据吻合良好。表明该方程的拟合精度较高, 可准确描述 20G 钢在不同冲击角度和速度下的冲蚀特性。对比材料的抗冲蚀能力, 颗粒冲击速度指数 ($n=2.4$) 符合塑性材料的规律。

$$E = Kf(\alpha)v^n \tag{3}$$

$$f(\alpha) = \begin{cases} A\alpha^2 + B\alpha & \alpha < \alpha_0 \\ a\cos^2\alpha \sin(b\alpha) + c\sin^2\alpha + d & \alpha \geq \alpha_0 \end{cases} \tag{4}$$

式中: E 为冲蚀率, mg/g ; K 为粒径参数; $f(\alpha)$ 为冲击角函数; α 为颗粒冲击角度, rad ; v 为颗粒冲击速度, m/s ; n 为冲击速度指数; A 、 B 、 a 、 b 、 c 、 d 、 α_0 为冲击角参数。

表 3 冲蚀率方程拟合参数
Tab.3 Erosion rate equation fitting parameters

K	n	A	B	a	b	c	d	α_0
9.1×10^{-6}	2.4	-13.67	7.39	0.29	1	-0.43	0.97	$\pi/12$

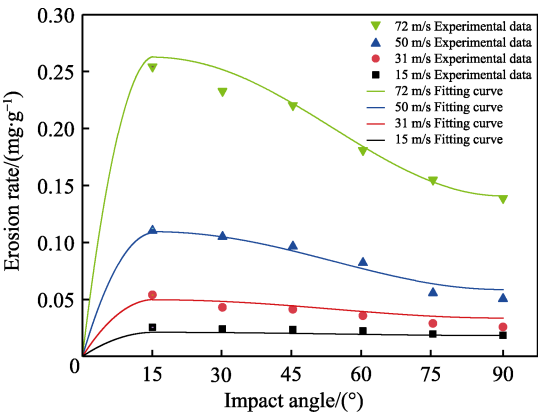


图 15 不同冲击角度下实验数据与冲蚀率方程拟合曲线对比
Fig.15 Comparison of experimental data and fitting curve of erosion rate equation at different impact angles

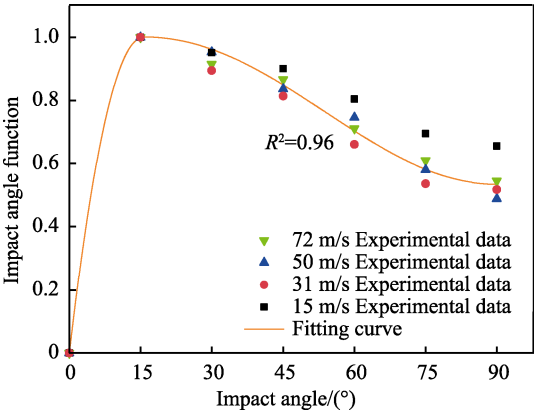


图 16 不同冲击角度下实验数据与冲击角函数拟合曲线对比
Fig.16 Comparison between experimental data and fitting curve of the impact angle function at different impact angles

在建立 20G 钢冲蚀速率方程的基础上, 可将得到的冲击角函数、粒径参数、速度指数等侵蚀模型参数, 实际运用于 20G 钢的冲蚀模拟过程, 得到更为科学准确的 20G 钢冲蚀规律, 可有效支撑 20G 钢的 CFD 冲蚀模拟研究工作。

4 结论

1) 依据 ASTM-G76 测试标准, 对 20G 钢开展不同冲击角度和冲击速度下的气-固喷嘴冲蚀实验。结果表明, 当颗粒冲击角度 ($15^\circ \sim 90^\circ$) 增加时, 冲蚀率减小。当颗粒冲击速度 ($15 \sim 72 \text{ m/s}$) 增大时, 冲蚀率随之增大。由此可见, 20G 钢的冲蚀规律符合典型塑性材料的冲蚀表现。

2) 总结了冲击速度和角度对冲蚀过程的影响规律。结果表明, 当冲击角度增大时, 冲蚀面积减小。颗粒的冲击速度不是影响冲蚀面积的主要原因。当冲击速度增加时, 冲击角度对冲蚀率的影响呈现由弱变强的趋势。此外, 冲击速度不会影响材料的冲蚀机制, 而是通过控制颗粒的动能来影响冲蚀率。在 15° 冲击角度、高冲击速度下的颗粒具有较高动能, 导致材料损伤更为严重, 形成的沟槽长度更长。在 90° 冲击角度下, 具有高冲击速度的颗粒撞击材料表面所形成的压痕深度更大。由此可见, 颗粒冲击角度和冲击速度对冲蚀率的影响不同。上述研究结果对于理解材料在不同冲击条件下的冲蚀行为及设计抗冲击材料的方向具有重要意义。

3) 分析了 20G 钢在固体颗粒冲击下的冲蚀机理, 通过分析微观形貌特征可知, 冲蚀机制呈现一定规律。在低冲击角度 (15° 、 30°) 下, 犁削机制为主要去除机制。在中冲击角度 (45° 、 60°) 下, 冲蚀机制呈现混合形式, 犁削、压实与开裂共同作用于材料表面, 其中犁削沟槽数目减少, 而压实和开裂现象增加。在高冲击角度 (75° 、 90°) 下, 主要以压实和开裂为去除机制, 颗粒的法向速度分量增大, 切向速度分量

减小, 压实和开裂现象存在于整个材料表面。

4) 建立了 20G 钢的冲蚀率方程, 有利于冲蚀模拟工作的开展, 可为冲蚀理论的研究提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 王坤, 杨涛, 梁坤, 等. 碳达峰碳中和战略下天然气的能源优势与发展建议[J]. 能源与节能, 2023(3): 27-31.
WANG K, YANG T, LIANG K, et al. Energy Advantages and Development Suggestions of Natural Gas under Strategy of Carbon Peaking and Carbon Neutrality[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(3): 27-31.
- [2] 黄辉, 刘明明, 王建良. “双碳”目标下中国天然气发展定位与政策建议[J]. 城市燃气, 2023, 580(6): 29-34.
HUANG H, LIU M M, WANG J L. China's Natural Gas Development Orientation and Policy Suggestions under the "Carbon Peaking and Carbon Neutrality" Goals[J]. Urban Gas, 2023, 580(6): 29-34.
- [3] 侯哲. 集输管道泄漏失效案例分析及防蚀措施探讨[J]. 特种设备安全技术, 2022(3): 21-22.
HOU Z. Case Analysis of Leakage Failure of Gathering and Transportation Pipeline and Discussion on Corrosion Prevention Measures[J]. Safety Technology of Special Equipment, 2022(3): 21-22.
- [4] 刘玲. 天然气集输管道三通冲蚀磨损研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
LIU L. Study on Erosion Wear of Tee Joint of Natural Gas Gathering and Transportation Pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [5] 刘冰, 刘旭, 邓宽海, 等. 高速固体颗粒冲击下 30CrMo 钢的冲蚀机理测试研究[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 135-145.
LIU B, LIU X, DENG K H, et al. Erosion Mechanism of 30CrMo Steel Impacted by High Speed Solid Particles[J]. Surface Technology, 2023, 52(9): 135-145.
- [6] 董刚, 张九渊. 固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(2): 307-312.
DONG G, ZHANG J Y. Developments of Reserch on the Solid Particle Erosion of Materials[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003, 21(2): 307-312.
- [7] LIN N, ARABNEJAD H, SHIRAZI S A, et al. Experimental Study of Particle Size, Shape and Particle Flow Rate on Erosion of Stainless Steel[J]. Powder Technology, 2018, 336: 70-79.
- [8] KISHOR B, CHAUDHARI G P, NATH S K. Slurry Erosion Behaviour of Thermomechanically Treated 16Cr₅Ni Stainless Steel[J]. Tribology International, 2018, 119: 411-418.
- [9] ZOU L B, YU C G, FENG G B, et al. Establishment of Erosion Model of Gun Steel Material and Study on Its Erosion Performance[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(4): 244-252.
- [10] ZHAO Y L, TANG C Y, YAO J, et al. Investigation of Erosion Behavior of 304 Stainless Steel under Solid-Liquid Jet Flow Impinging at 30°[J]. Petroleum Science, 2020, 17(4): 1135-1150.
- [11] VYAS A, MENGHANI J, PATEL P, et al. Characterization and Optimization of Slurry Erosion Behavior of SS 316 at Room Temperature[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(4): 839-849.
- [12] 杨向前, 王虹富, 樊建春. 35CrMo 钢冲蚀磨损性能和机制的研究[J]. 石油机械, 2017, 45(7): 72-77.
YANG X Q, WANG H F, FAN J C. Study on Erosion Wear Property and Mechanism of 35CrMo Steel[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(7): 72-77.
- [13] 杨少帅. 304 不锈钢两相流冲蚀腐蚀的实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
YANG S S. Experimental Study on Erosion Corrosion of 304 Stainless Steel by Two-Phase Flow[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [14] 唐春燕. 420 不锈钢表面镀锌涂层的两相流冲蚀腐蚀实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
TANG C Y. Experimental Study on Two-Phase Flow Erosion Corrosion of Galvanized Coating on 420 Stainless Steel Surface[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [15] 王志杰, 姚军, 熊家志, 等. Q345 钢两相流冲蚀实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(4): 891-899.
WANG Z J, YAO J, XIONG J Z, et al. Experimental Research on Erosion of Q345 Steel under Two-Phase Flow Condition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(4): 891-899.
- [16] 张明鲲, 王新辉, 梁治国, 等. 基于喷嘴出口砂质量分数精准测量的 304 不锈钢冲蚀行为[J]. 化工技术与开发, 2023, 52(6): 60-64.
ZHANG M K, WANG X H, LIANG Z G, et al. Precise Measurement of Nozzle Outlet Sand Mass Fraction Based on 304 Stainless Steel Erosion Behavior[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2023, 52(6): 60-64.
- [17] NGUYEN Q B, LIM C Y H, NGUYEN V B, et al. Slurry Erosion Characteristics and Erosion Mechanisms of Stainless Steel[J]. Tribology International, 2014, 79: 1-7.
- [18] 梁兆惠, 石俊峰, 陈逸, 等. 铁粉颗粒对 TP347H 不锈钢的冲蚀磨损特性研究[J]. 化工设备与管道, 2023, 60(3): 1-8.
LIANG Z H, SHI J F, CHEN Y, et al. Study on the

- Erosion Wear Characteristics of TP347H Stainless Steel by Iron Powder Particles[J]. *Process Equipment & Piping*, 2023, 60(3): 1-8.
- [19] 吕祥鸿, 王悦, 张春婉. 316 不锈钢的冲蚀磨损性能研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(24): 48-51.
LYU X H, WANG Y, ZHANG C W. Investigation on Erosion Wear Behavior of 316 Stainless Steel[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(24): 48-51.
- [20] AL-ASADI M M, AL-TAMEEMI H A. The Effect of Diamond Like Carbon Coating on the Solid Particles Erosion Resistance of Grade 410 Stainless Steel[J]. *Wear: an International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, 2023.
- [21] VERMA P, TYAGI R, MOHAN S. Erosive Wear of Dual Phase Steels Containing Different Amount of Martensite[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(1): 314-325.
- [22] ABYAZI A, TAKHT KIYANI M. Solid Particle Erosion Wear Characteristics of WC-Reinforced Ni-Based Coating Deposited by Oxy-Acetylene Flame Welding[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2023, 32(5): 1242-1259.
- [23] SEPETCIOGLU H, DEMET S M, BAGCI M. A Comprehensive Experimental Study of Enhanced Solid Particle Erosive Resistance on the Inner/Outer Surface of Graphene Nanoplatelets Modified Basalt/Epoxy Composite Pipe[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(10): 6944-6956.
- [24] SLIEM M H, FAYYAZ O, SHAKOOR R A, et al. The Influence of Different Preparation Methods on the Erosion Behavior of NiP-ZrO₂ Nanocomposite Coating[J]. *Tribology International*, 2023, 178: 108014.
- [25] VISHNOI M, MURTAZA Q, KUMAR P. Mechanical and Erosion Characterization of Untreated and Solution-Treated Nitrogen-Alloyed (23-8N) Austenitic Stainless Steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(24): 11107-11117.
- [26] 魏秀鹏, 陈家福. 20g 钢的冲蚀磨损性能的研究[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2004, 24(2): 82-84.
- WEI X P, CHEN J F. Properties of 20g Steel Erosion Wear[J]. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 2004, 24(2): 82-84.
- [27] 蒋毅, 蒋洪, 朱聪, 等. 高含硫气田集输管道材质的选择[J]. *油气储运*, 2006, 25(12): 43-45.
JIANG Y, JIANG H, ZHU C, et al. The Choice Material of Gathering Pipeline in Acid Gas Field[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2006, 25(12): 43-45.
- [28] RUFF A W, IVES L K. Measurement of Solid Particle Velocity in Erosive Wear[J]. *Wear*, 1975, 35(1): 195-199.
- [29] 王秋晨. 管道内浆体冲蚀机理及预测研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
WANG Q C. Study on Erosion Mechanism and Prediction of Slurry in Pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [30] LAGUNA-CAMACHO J R, CRUZ-MENDOZA L A, ANZELMETTI-ZARAGOZA J C, et al. Solid Particle Erosion on Coatings Employed to Protect Die Casting Molds[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2012, 74(4): 750-757.
- [31] AHLERT K R. Effects of Particle Impingement Angle and Surface Wetting on Solid Particle Erosion of AISI 1018 Steel[D]. Tulsa: University of Tulsa, 1994: 1-14.
- [32] FINNIE I. Erosion of Surfaces by Solid Particles[J]. *Wear*, 1960, 3(2): 87-103.
- [33] 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(1/2/3/4/5/6): 95-101.
- [34] 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(1/2/3/4/5/6): 102-109.
- [35] DET N V. Recommended Practice RP O501 Erosive Wear in Piping Systems[R]. Technical Report, DNV RP O501-Revision 4.2, 2007: 1-39.