

# 超高压水射流冲蚀船用 A 级钢表面实验研究

程书铭<sup>1</sup>, 曹宇鹏<sup>1,2,3</sup>, 陆华<sup>3</sup>, 花国然<sup>1</sup>, 王振刚<sup>3</sup>, 陈真<sup>3</sup>, 丁海华<sup>3</sup>

(1. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 南通理工学院 3D 打印技术研究所,  
江苏 南通 226001; 3. 南通中远海运船务工程有限公司, 江苏 南通 226006)

**摘要:** 目的 研究超高压水射流与船用 A 级钢表面的相互作用及冲蚀机理。方法 使用 200 MPa 的超高压水对船用 A 级钢进行射流冲蚀实验, 并用 20 MPa 高压水射流进行对比实验。利用 ASMC2-4 电阻应变仪采集水射流冲击过程中船板背面的动态应变信号, 同时使用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X 射线衍射仪等设备对船用 A 级钢冲击前的微观组织、物相和冲击后的材料表面形貌与元素分布进行观察分析。结果 在 200 MPa 压力下船用 A 级钢冲击中心区域背面平均微应变为  $180 \times 10^{-6}$ , 微应变振幅为  $35 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ , 水射流对 A 级钢的冲击力为循环脉动交变应力; 在射流交变应力作用下材料表面发生疲劳破坏, 水射流冲蚀后 A 级钢中心区域以长条状渗碳体硬质相为主, 还存在有未被冲蚀的珠光体组织; 在 200 MPa 超高压射流作用下材料表面还存在着典型的剥落坑、层蚀、穴蚀等断裂形貌。**结论** 建立了船用 A 级钢水射流冲蚀剥离模型, 阐明了水射流冲蚀作用机理。

**关键词:** 超高压水射流; 船用 A 级钢; 冲蚀; 表面形貌; 微观组织; 动态应变

**中图分类号:** O358 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2022)06-0229-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.020

## Experimental Study on Surface Erosion of Grade-A Marine Steel by Ultra-high Pressure Water Jet

CHENG Shu-ming<sup>1</sup>, CAO Yu-peng<sup>1,2,3</sup>, LU Hua<sup>3</sup>, HUA Guo-ran<sup>1</sup>,  
WANG Zhen-gang<sup>3</sup>, CHEN Zhen<sup>3</sup>, DING Hai-hua<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Nantong University, Jiangsu Nantong 226019, China;  
2. 3D Printing Technology Research Institute, Nantong Institute of Technology, Jiangsu Nantong 226001, China;  
3. Nantong COSCO Shipyard Co., Ltd., Jiangsu Nantong 226006, China)

**ABSTRACT:** With advantages such as zero pollution, high degree of automation and high efficiency, ultra-high pressure water

收稿日期: 2021-08-28; 修定日期: 2021-11-23

Received: 2021-08-28; Revised: 2021-11-23

基金项目: 国家工业和信息化部高技术船舶科研专项 (MC-202031-Z07); 国家自然科学基金 (51979138, 52109106); 国家重点研发计划 (2019YFB2005300); 江苏省博士后基金 (2021K606C); 江苏省高校自然科学研究面上项目 (21KJB460018); 南通市科技计划 (JC2020149)

**Fund:** The Special Project of High Tech Ship Scientific Research of the Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China (MC-202031-Z07); the National Natural Science Foundation of China (51979138, 52109106); the National Key Research and Development Program of China (2019YFB2005300); the General Project of Natural Science Research in Colleges and Universities of Jiangsu Province (21KJB460018); the Nantong Science and Technology Planning Project (JC2020149)

作者简介: 程书铭 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光加工与高压水射流复合处理工艺。

**Biography:** CHENG Shu-ming (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: composite technology of laser processing and high pressure water jet.

通讯作者: 曹宇鹏 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光加工与超高压射流与材料相互作用。

**Corresponding author:** CAO Yu-peng (1981-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: Laser processing and interaction between ultra high pressure jet and material.

引文格式: 程书铭, 曹宇鹏, 陆华, 等. 超高压水射流冲蚀船用 A 级钢表面实验研究 [J]. 表面技术, 2022, 51(6): 229-238.

CHENG Shu-ming, CAO Yu-peng, LU Hua, et al. Experimental Study on Surface Erosion of Grade-A Marine Steel by Ultra-high Pressure Water Jet [J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 229-238.

jet rust removal technology is well in line with China's advocacy for green and automated manufacturing and has stood out in the new wave of green vessel repair technologies, making it one of the most intensively studied topics. Grade-A marine steel, as an important material for marine quality steel plates, is highly resistant to corrosion and fatigue and accounts for one fifth of the total vessel building cost. Therefore, researching the interaction between water jet and marine quality steel plate, as well as the matrix damage process after rust removal, is of great significance for green vessel repairing. In order to study the interaction between ultra-high pressure water jet and the surface of Grade-A marine steel and the erosion mechanism of the former on the latter, a jet erosion test on Grade-A marine steel was carried out with 200 MPa ultra-high pressure water, and a comparative experiment was also conducted with 20 MPa water jet. The changes of microstructure, phase and surface morphology of Grade-A marine steel were analyzed under different pressures. The specific experimental process and parameters were as follows: Five groups of samples with specifications of  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  were made respectively for the 200 MPa and 20 MPa erosion tests. Using the jet medium of clean water, the experiment was conducted at room temperature with a jet impact distance of 30 mm and an impact angle of  $90^\circ$ . At times of water jet impacts, ASMC2-4 resistance strain gauge was used to collect the dynamic strain signal on the back of the vessel plate. Scanning electron microscope, transmission electron microscope and X-ray diffractometer were applied to observe and analyze the microstructure, phase and surface morphology and element distribution of Grade-A marine steel before impact. Under the pressure of 200 MPa, the average micro strain on the back of the impact center area of Grade-A marine steel was  $180 \times 10^{-6}$ , micro strain amplitude was  $35 \times 10^{-6}$ - $50 \times 10^{-6}$ , and the impact force of water jet on Grade-A marine steel was cyclic pulsating alternating stress; The impact force of water jet at 20 MPa decreased radially from the center, while the pressure at the center and edge of the jet at 200 MPa was basically unchanged, and the difference in pressure could be ignored. Under the action of jet alternating stress, fatigue failure occurred to the material surface. After water jet erosion, the central area of Grade-A marine steel was dominated by long strip cementite hard phase, and there was also pearlite structure that had not been eroded; Under the action of 200 MPa ultra-high pressure jet, there were also typical fracture morphologies such as spalling pit, layer corrosion and cavitation corrosion on the material surface. Looking at the gradual peeling process of different hardness structures under the action of water jet cyclic alternating stress and water wedge, this paper establishes an erosion stripping model of Grade-A marine steel to discuss the erosion mechanism of water jet.

**KEY WORDS:** ultra-high pressure water jet; Grade-A marine steel; erosion; surface morphology; microscopic tissue; dynamic strain

随着国家对工业绿色发展和环境保护的大力倡导,高压水射流技术作为一项新的绿色工艺革命,利用高压水的冲击压力达到切割材料及清洗抛光表面的目的,已经成为目前清洗领域的热门技术。发达国家的高压水射流清洗技术使用率占清洗市场的80%,美国甚至达到了90%。20世纪80年代,这项技术才被引入到中国,90年代得到迅速发展,目前我国高压水射流清洗使用率占整个清洗行业的20%,船舶除锈方面约占10%。该技术因为具有效率高、适用性广、清洁环保等优点,现已广泛应用于破岩、矿山开采、船舶清洗除锈、材料切割等领域<sup>[1-7]</sup>,同时在流场仿真方面也取得了极大的进展<sup>[8-14]</sup>。国外的Quaisie等<sup>[15]</sup>实验证明了射流压力在20 MPa以下时,水射流冲蚀材料表面成型深度与表面粗糙度随压力的增大而增大。Kapil等<sup>[16]</sup>又进一步证明了射流压力才是对表面质量影响最大的因素,压力为350 MPa时材料表面质量最好。国内赵彦琳等<sup>[17]</sup>通过磨料射流冲蚀316不锈钢实验,探究了不同冲击角度的冲蚀破坏机理,认为小角度冲蚀作用以犁削作用为主,而大角度冲蚀多以

正碰为主。董星等<sup>[18]</sup>在试验条件下,发现水射流喷丸强化后材料试样的疲劳寿命、应力振幅得到显著提高。黎国猛等<sup>[19]</sup>使用高压水射流喷丸技术预处理42CrMo钢,使42CrMo钢在疲劳失效过程中表层及次表层裂纹占主要部分,提升了42CrMo钢的接触疲劳性能。高压水射流技术符合国家绿色制造及自动化的发展方式,在新一轮的绿色修船工艺中表现最为突出,因此,高压水射流除锈也是目前研究的热点。

船用A级钢是应用广泛的海工用钢板,在船舶造价过程中船板占据了1/5的成本,在水射流清洗除锈过程中,当压力不足时需要增加冲击压力以达到较好的清洗效果,但长时间的射流冲击会导致船板基体表面冲蚀破坏,致使钢板表面力学性能下降,会严重影响船舶使用寿命。目前众多学者对水射流的研究多放在射流相关参数对材料加工工艺方面上<sup>[20-26]</sup>,且多集中于岩石、矿物等高脆性材料<sup>[27-29]</sup>,而对于水射流与船用A级钢的相互作用及冲蚀机理的研究鲜有报道。

为了研究超高压水射流除锈后对船板的冲蚀损

伤过程, 使用 200 MPa 的超高压水对 A 级船用钢进行射流冲蚀实验, 并用 20 MPa 高压水做对比实验。水射流冲击时采用 ASMC2-4 电阻应变仪采集船板背面的动态应变信号, 借助透射电子显微镜 (TEM)、X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对船用 A 级钢水射流冲击前材料的微观组织、物相和水射流冲击后材料的表面形貌进行观察分析。根据射流冲击材料时材料的动态应变, 结合微观组织与表面形貌, 研究水射流与船用 A 级钢的相互作用及冲蚀机理, 建立船用 A 级钢水射流冲蚀剥离模型。

## 1 实验

### 1.1 试样制备与实验仪器

试样材料是船用 A 级钢, 该材料具有良好的耐腐蚀、抗疲劳性能, 其主要成分见表 1。按照 50 mm×50 mm×10 mm 的规格制作 200 MPa 冲蚀试样 5 组, 同时制备 5 组 20 MPa 冲蚀试样作为对照实验; 试样在 MP-2T 金相试样磨抛机上使用 80#~1200#砂纸依次打磨。200 MPa 水射流冲蚀实验使用江苏省海洋装备研究院、江苏省海洋技术研究中心的超高压射流实验

平台, 实验所用的超高压柱塞泵见图 1a; 20 MPa 水射流冲蚀实验使用江苏大学国家工程中心水射流实验平台, 实验平台见图 1b。射流介质为清水, 在室温下进行, 具体实验参数如下: 所用喷嘴结构见图 1c, 喉管直径为 1 mm, 喉管长度为 4 mm, 扩张角为 60°, 射流冲击距离为 30 mm, 冲击角度为 90°。在水射流冲击 A 级钢过程中采用 ASMC2-4 电阻应变仪 (见图 2a) 采集试样背面的动态应变信号, 在试样背面 3 个不同位置贴上 BSF-3AA-T 电阻应变片, 应变片的分布情况见图 2b, 应变片的具体参数如下: 阻值为  $(120\pm 0.5)$  Ω, 灵敏度系数为 2.00~2.20, 适用温度范围为 -30~80 °C。其中应变片 2 处于射流冲击中心点背面, 应变片 1 和 3 与应变片 2 在一条直线上。该检测模块每条通道信号采样率  $f_s$  (Samples/Second) 最高可达 12 800, 应变分辨率为  $0.5\times 10^{-6}$ , 应变测量范围最大可达  $\pm 1920000$ , 应变测量误差小于 0.02%。

表 1 船用 A 级钢化学成分

Tab.1 Chemical composition of Grade-A marine steel  
wt.%

C	Mn	Si	Cu	Mo
0.170	0.640	0.210	0.020	0.004

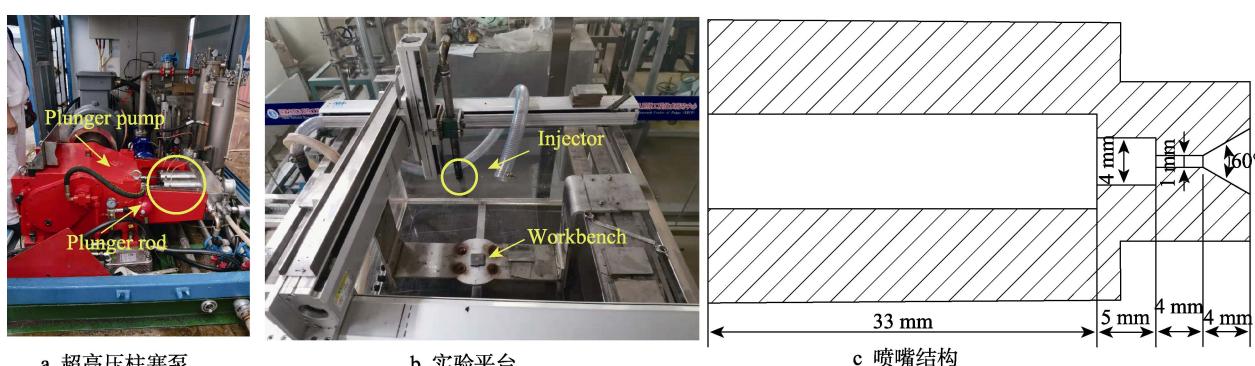


Fig.1 Water jet experimental platform: a) ultra high pressure plunger pump; b) test platform; c) nozzle structure



图 2 动态应变采集装置

Fig.2 Dynamic strain acquisition device: a) ASMC2-4 resistance strain gauge;  
b) schematic diagram of the location of the strain gauge

## 1.2 微观组织及表面形貌检测

使用金相显微镜(Leica DM2700\_M)、透射电镜(FEI TECNAI G2 F20)和X射线衍射仪(Rigaku Ultima IV)对船用A级钢微观组织、物相进行检测分析。使用扫描电子显微镜(FEI Quanta 650F)配合能谱仪检测冲蚀后材料表面的微观形貌和化学成分。对比分析冲蚀前后的检测结果,研究水射流与船用A级钢表面的相互作用及射流冲蚀机理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 船用A级钢物相与微观组织分析

通过X射线衍射仪对船用A级钢试样进行检测,获得了A级钢的XRD图谱。利用Jade软件对XRD图谱依次进行不限定元素的主相检索、限定元素的次相检索和单峰检索,对XRD图谱进行检索-匹配,船用A级钢的XRD物相分析结果如图3所示,其中 $\text{Fe}_3\text{C}$ 是通过搜寻Jade软件卡片库,再结合海工钢材料成分和TEM形貌像综合分析确定的。由图3可知,船用钢板表面衍射主峰对应的物相为铁素体,铁素体

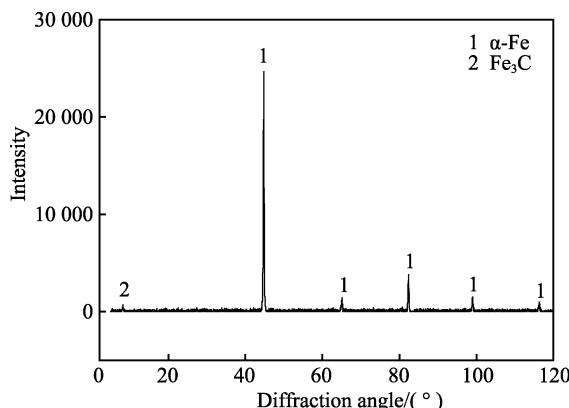


图3 船用A级钢XRD图谱  
Fig.3 XRD pattern of Grade-A marine steel

在A级钢内部含量较高,衍射峰较强;A级钢中还存在渗碳体组织,渗碳体的位置、形状、大小都对钢材的性能有较大影响。

图4a为船用A级钢表面金相组织,由图4a结合XRD物相分析结果可知,船用A级钢表面主要包含铁素体(白色)、渗碳体(黑色)及二者叠加而成的组织。图4b为船用A级钢表面TEM形貌,由图4b可知,复相组织是亮白色铁素体相与黑色渗碳体相交替叠压而成的珠光体组织<sup>[30-31]</sup>,其中长条状渗碳体的宽度约为0.1 μm。

### 2.2 动态应变曲线

200 MPa超高压射流冲蚀下三检测点的动态应变趋于重合,输出图形重叠在一起,且三位置应变片采集的动态应变曲线具有相似的变化规律,以应变片2采集的动态应变曲线为例进行分析。图5a和b分别为200 MPa水射流冲击试样背面的应变曲线和局部放大图,图5c和d分别为20 MPa压力下对比实验采集的应变曲线和局部放大图。观察图5a可知,200 MPa压力下水射流冲击试样约48 ms后,射流冲蚀诱导的动态微应变趋于稳定,其微应变处于 $140 \times 10^{-6} \sim 220 \times 10^{-6}$ ;观察图5b可知,试样背面动态平均微应变约为 $180 \times 10^{-6}$ ,应变振幅约为 $35 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 。观察图5c可知,20 MPa压力下水射流冲击试样4 000 ms后,射流冲蚀诱导的动态微应变趋于稳定,其微应变处于 $100 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$ ;观察图5d可知,试样背面动态平均微应变约为 $115 \times 10^{-6}$ ,应变振幅为 $3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ 。

200 MPa压力下的应变均值与应变振幅相较于20 MPa压力下的动态响应均有所增加,说明试样的平均应变和应变振幅与射流压力都呈正相关。20 MPa压力下试样背面动态应变周期约为50 ms,200 MPa压力下试样背面动态应变周期大约为20 ms,接近此高压泵出口高压水的脉动频率44 Hz,可推知水射流

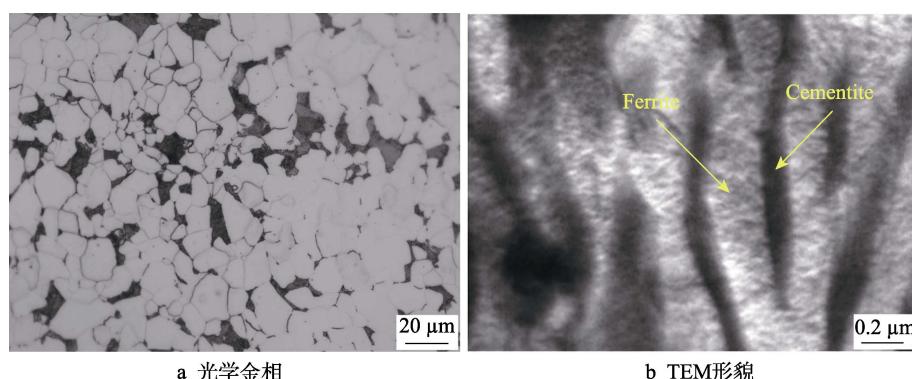


图4 船用A级钢金相与微观组织形貌  
Fig.4 Metallographic and microstructure morphology of Grade-A marine steel:  
a) optical metallography; b) TEM image

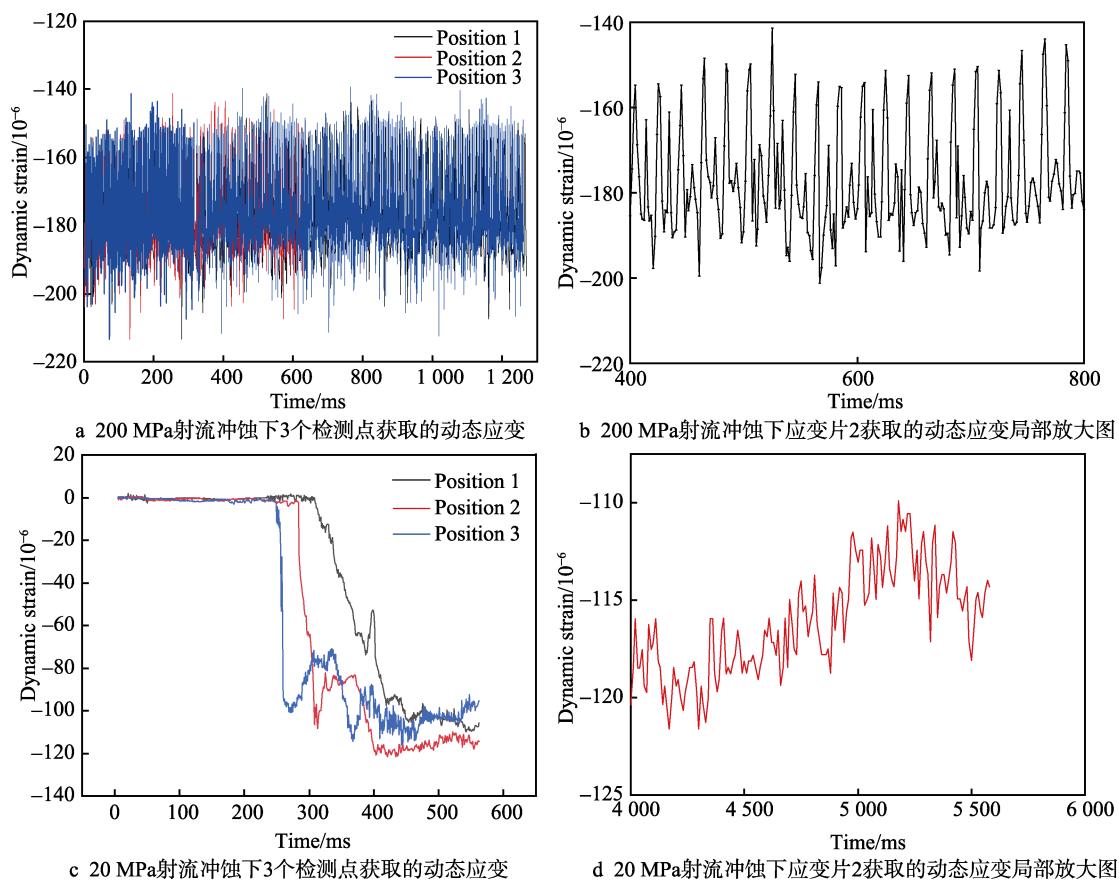


图 5 船用 A 级钢试样背面动态应变曲线

Fig. 5 Dynamic strain curve on the back of Grade-A marine steel specimens: a) the dynamic strain obtained by three detection points under 200 MPa jet erosion; b) the local magnified view of the dynamic strain obtained by the strain gauge 2 under 200 MPa jet erosion; c) the dynamics obtained by three detection points under the 20 MPa jet erosion strain; d) a partial enlarged view of the strain gauge 2 to obtain dynamic strain under 20 MPa jet erosion

作用在船板的动态应变信号主要取决于高压水出口响应频率。根据水射流冲击船用 A 级钢试样背面的动态应变并结合冲击动力学相关理论可推知, 2 种压力下试样表面受到的作用力均为循环脉动交变应力。

### 2.3 船用 A 级钢水射流冲蚀后表面形貌与成分分析

#### 2.3.1 表面形貌分析

利用光学显微镜对不同冲击压力下不同时间水射流冲蚀的试样进行观察, 结果表明, 在 200 MPa 冲击压力下, 冲击 20 s 的试样 1 表面未见破坏; 冲击 40 s 的试样 2 出现圆状的破坏区域; 冲击 50 s 的试样 3 中的破坏区域明显增大; 在冲击 60 s 的试样 4 中, 冲蚀形成的破坏区域与试样 3 中的相比未见明显增大, 但表面已完全破坏; 在冲击 120 s 的试样 5 中, 冲蚀形成的破坏区域直径与试样 4 中的相比未见明显增大, 但破坏深度明显增大。在 20 MPa 冲击压力下, 冲击 0.5 min 的试样 1' 表面未见破坏; 冲击 1 min 的试样 2' 的冲击区域中心开始出现冲蚀破坏; 冲击 2 min 的试样 3' 出现圆状的破坏区域; 在冲击 5 min 的试样 4' 中, 破坏区域明显增大; 在冲击 10 min 的

试样 5' 中, 冲蚀形成的破坏区域与试样 4' 中的相比未见明显增大, 表面已完全破坏。

图 6 为 20 MPa 超高压水射流冲蚀试样 5' 表面整体及局部放大 SEM 形貌。观察图 6a 可知, 水射流冲击区域中心冲蚀磨损比外围区域更为明显, 中心冲蚀磨损区域为直径 300  $\mu\text{m}$  左右的圆形区域, 外围区域为距中心点 150~800  $\mu\text{m}$  左右的环状区域, 外围区域出现不同尺寸的亮白色球状物。图 6b 为冲蚀中心区域的 SEM 形貌, 图 6c 和 d 为外围区域的 SEM 形貌。观察图 6b 可知, 射流冲蚀中心区域存在长条状组织和球状颗粒。材料表面晶界处对损伤抵抗力较低, 首先遭到冲蚀破坏<sup>[32]</sup>, 在水射流交变应力作用下, A 级钢表面冲蚀后在破坏区域边缘晶界处开始产生疲劳微裂纹, 这些微裂纹进一步扩展造成了沿晶断裂。观察图 6c、d 可知, 球状物和其他硬质相组织的临近区域被破坏, 可观察到边界清晰的球状物, 并且在球状物周围还伴随着众多冲蚀微凹坑。

图 7 为 200 MPa 超高压水射流冲蚀试样 4 表面整体及局部放大 SEM 形貌。可以观察到, 200 MPa 超高压水射流冲击中心区域与外围区域表面形貌相似, 与 20 MPa 高压射流因压力差而呈现出中心与边缘区

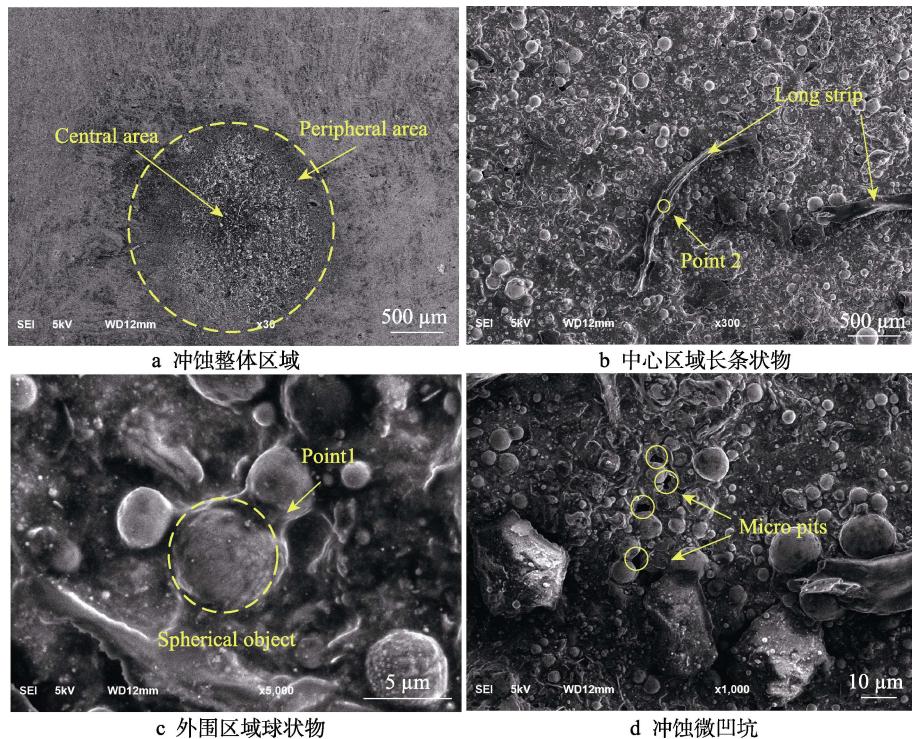


图 6 20 MPa 压力射流冲蚀后材料不同区域表面 SEM 像  
Fig.6 Surface SEM images of different areas of the material after erosion by 20 MPa pressure jet: a) erosion of the entire area; b) long strips in the central area; c) spherical objects in the peripheral area; d) erosion of micro-pits

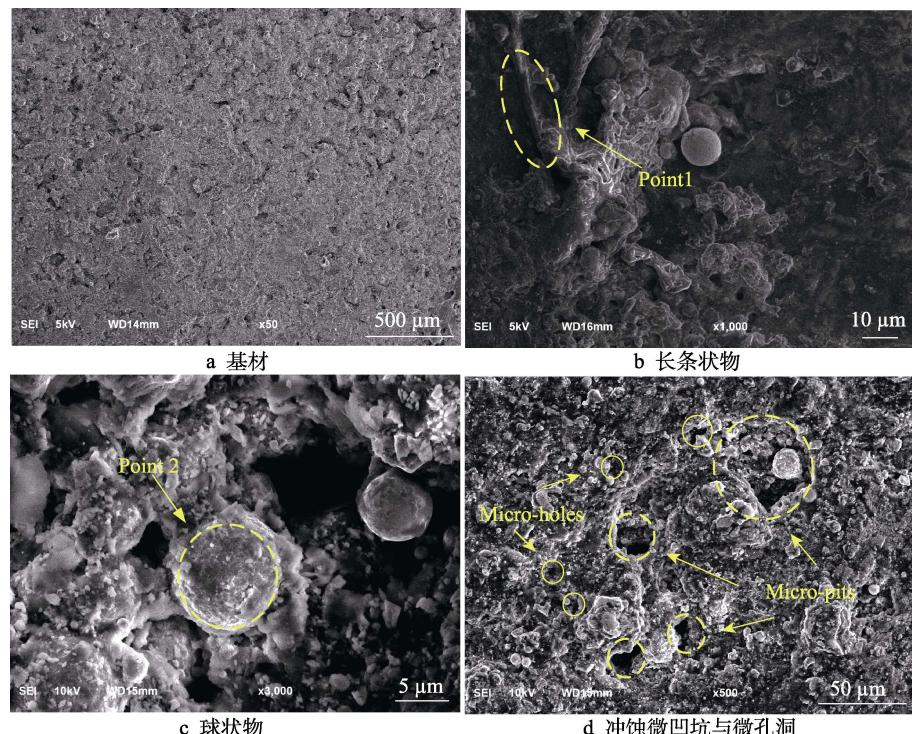


图 7 200 MPa 压力射流冲蚀后材料不同区域表面 SEM 像  
Fig.7 SEM images of different areas of the material after erosion by 200 MPa pressure jet:  
a) substrate; b) long strips; c) balls; d) erosion micro-pits and micro-holes

域明显的形貌变化不同。通过图 6 与图 7 对比分析可推知, 200 MPa 超高压射流中心与边缘压力差较小, 可忽略不计。冲蚀后球状物与长条状物质仍然存在,

但基体中相互连接形成的长条状物与冲蚀微凹坑数明显增加且分布较广。图 7b、c 中长条状物和球状物相较于图 6b、6c 中形状更加突出, 球状物和长条状

物表面更加粗糙、凹凸不平。由图 7c 可知, 相比于 20 MPa 水射流冲蚀实验, 除了有相同形貌的微凹坑外, 在 200 MPa 压力下还出现了众多冲蚀微孔洞。因此, 在水射流循环交变应力作用下, 射流冲蚀破坏严重, 且表面冲蚀凹坑分布较广。由于水射流打击力较高, 除了低压力冲蚀沿晶界开始破坏的形式外, 还出现了不同的破坏方式, 部分与基体结合较差的组织被直接冲蚀剥离, 形成微孔洞, 促进了水楔作用, 加剧了水射流冲蚀疲劳破坏。

### 2.3.2 200 MPa 压力下冲蚀断口分析

在 200 MPa 水射流冲击作用下, 船用 A 级钢还存在着典型断裂形貌, 如图 8 所示。在超高压水射流循环应力作用下, 当材料表面沿晶界破坏析出软相或脆性相时, 软相组织在射流高冲击压力下破碎形成裂纹, 部分裂纹沿晶界扩展, 造成材料表面沿晶界断裂, 如图 8a 所示。一些裂纹在水楔作用下加速剥落, 先前破碎的粒子充当磨料挤入裂纹表面, 加速裂纹沿深度发展, 形成剥落坑, 如图 8b 所示。同时材料表面微观缺陷处受到循环剪切应力, 也开始萌发裂纹并逐渐扩展, 由于层状结构结合强度较低, 裂纹的扩展很容易导致层状结构的分离而产生层蚀, 如图 8c 所示。层蚀区域面积较大, 深度较深, 并且有陡峭的呈梯度分布的边缘。超高压水射流作用在材料表面微裂纹与微凹坑处, 在极小范围内形成了较大的压力差, 当射流局部压力低于饱和蒸气压时产生空化现象, 射流中气体逐渐分离, 气泡逐渐发展, 在高压区溃灭, 气泡

溃灭时产生的高温高压以冲击波形式向四周传播, 导致材料表面剥落, 形成麻点状及针状的穴蚀孔洞, 如图 8d 所示。

### 2.3.3 水射流冲蚀后船用 A 级钢 EDS 成分对比分析

为避免微小相在采样过程中引入背景信息, 确保 EDS 检测所得数据不受仪器随机误差的影响, 利用能谱仪分别采集了 20 MPa 和 200 MPa 压力作用下不同位置的同一物相的元素含量, 然后通过对分析不同位置同一物相的检测结果, 去除采样时可能引入的背景信息。分别对 20 MPa 和 200 MPa 水射流冲蚀后外围区域的球状物(见图 6c、7c)和中心区域的长条状物(见图 6b、7b)进行 EDS 分析。图 9 为水射流冲蚀后射流外围区域球状物的能谱分析谱图。由 EDS 结果可知, 20 MPa 冲蚀球状物主要包含 Fe、C、O、Mn、Si 等元素, Fe、C、O 原子分数分别为 82.8%、14.4%、1.9%; 200 MPa 冲蚀球状物主要包含 Fe、C、O、Mn、Si 等元素, Fe、C、O 原子分数分别为 79.2%、17.6%、2.1%。对比 20 MPa 试样中球状铁素体元素含量, 200 MPa 试样中 Fe、C、O 含量与之接近, 但 Fe 元素含量较低。结合图 4 中船用 A 级钢基体金相和组织形貌、EDS 结果与前文 XRD 的物相分析, 按原子比例计算可知, 此球状物多为铁素体与渗碳体( $Fe_3C$ )叠压而成的珠光体。在超高压水射流交变应力作用下, 钢基体发生塑性变形, 脆性片状渗碳体不断破断, 并分裂成球体<sup>[33-36]</sup>。由于渗碳体呈球体时, 表面自由能最低, 所以有长大成球状物的趋势, 渗碳

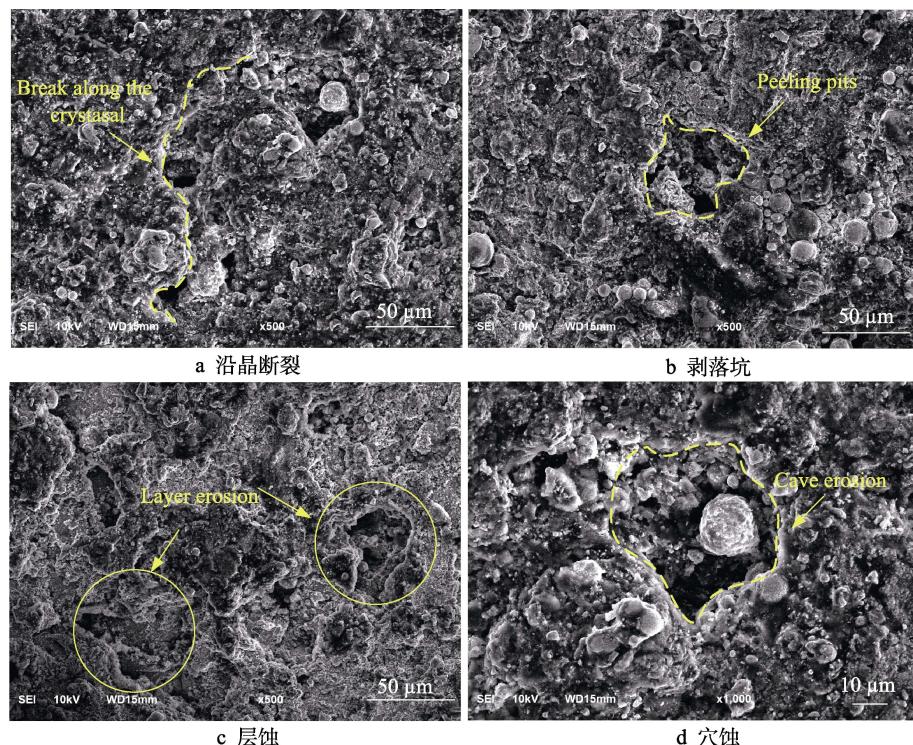


图 8 冲蚀后材料表面断裂 SEM 像

Fig.8 SEM image of material surface fracture after erosion: a) fracture along the grain; b) spalling pit; c) stratification; d) cavitation

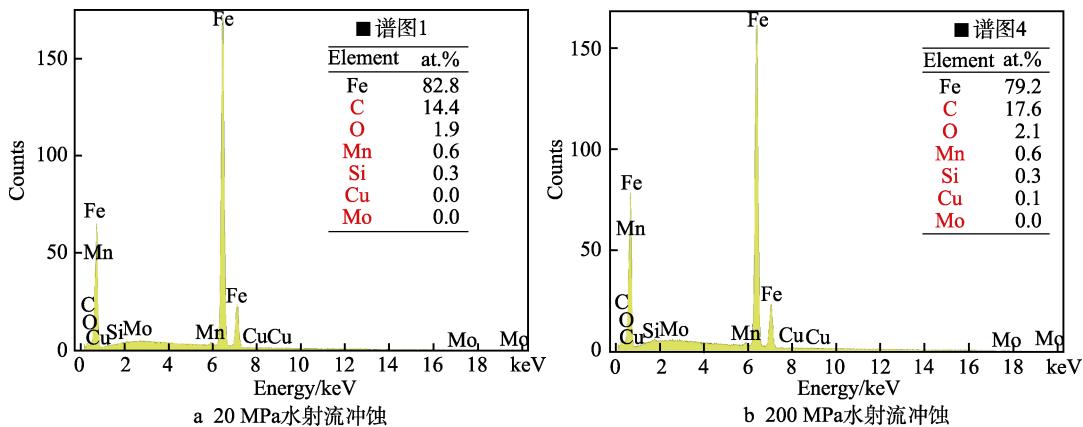


图9 球状物EDS元素分析图

Fig.9 EDS elemental analysis of globules: a) 20 MPa water jet erosion; b) 200 MPa water jet erosion

体叠压在铁素体上，就形成了图 6c、7c 的球状物。球状物临近区域易造成应力集中，促进疲劳裂纹的产生，在一定条件下裂纹加速扩展，就形成了图 6d 中球状物周围的众多微凹坑。

图 10 为水射流冲蚀后射流中心区长条状物的能量分析谱图。由 EDS 结果可知，20 MPa 冲蚀长条状物主要包含 Fe、C、O、Si、Mn、Mo 等元素，Fe、C、O 原子数分数分别为 71.9%、22.0%、4.8%。铁含量降低，碳、氧、硅、锰等元素含量升高，且铁碳原子数比接近 3:1；200 MPa 冲蚀长条状物主要包含 Fe、C、O、Mn、Si 等元素，Fe、C、O 原子数分数分别为 73.1%、19.4%、5.6%，接近 20 MPa 试样中长条状渗碳体元素含量，C 元素含量稍低。结合前文 XRD 的物相分析，按原子比例计算可知，此长条状物主要以渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 为主。另外氧元素含量增加 1 倍以上，其他金属元素含量也同样增加，可见除了硬度较高的渗碳体组织外，还有各种金属氧化物等硬质相在渗碳体周围析出。在持续的超高压射流冲蚀下，部分与基体结合较差的渗碳体和硬质相就被直接冲蚀剥离，形成了图 7d 所示的微孔洞。一些剥离的渗碳体和硬质相充当磨料挤入微凹坑和微孔洞中，这些微凹坑和微

孔洞被加速破坏，并沿深度和广度发展，形成图 8b 所示的剥落坑。片层状珠光体结构之间为机械结合，结合强度较低，当 200 MPa 超高压水射流作用在船用钢表面，表面微凹坑、微孔洞、穴蚀等微观缺陷处受到循环剪切应力时，容易导致层状结构的分离而产生如图 8c 所示的层蚀破坏。

### 2.3.4 船用 A 级钢水射流冲蚀剥离模型

由前文动态应变分析可知，水射流冲击作用力为交变应力，船用 A 级钢试样因交变应力发生疲劳破坏；由前文 SEM 表面形貌、EDS 分析可知，射流诱导交变应力产生疲劳破坏，船用 A 级钢试样表面出现不同的组织形貌，图 11a-f 为“船用 A 级钢在 200 MPa 压力下水射流冲蚀剥离模型”示意图。水射流冲击加载船用 A 级钢试样表面如图 11a 所示，射流冲击产生的交变应力使试样表面疲劳，在 200 MPa 压力下先从晶界处开始产生微裂纹，如图 11b 所示；还有部分硬度较低的组织也被剥离形成微孔洞，如图 11c 所示；在水射流循环交变应力与水楔作用下，材料表面微裂纹和孔洞不断扩张、发展，如图 11d 所示；由于船用 A 级钢表面铁素体等硬度较低，因此率先遭到疲劳破坏。随着水射流冲击时间的延长，射流冲

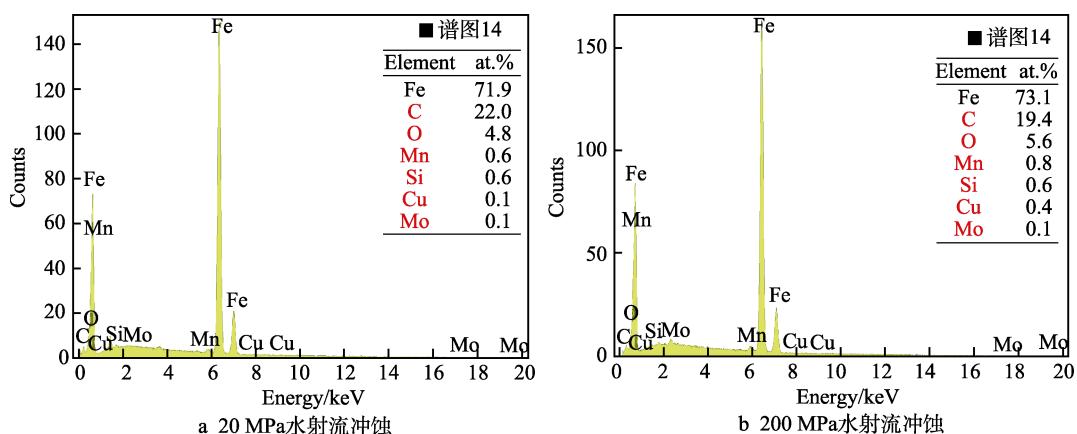


图10 长条状物EDS元素分析图

Fig.10 EDS element analysis of long strip: a) 20 MPa water jet erosion; b) 200 MPa water jet erosion

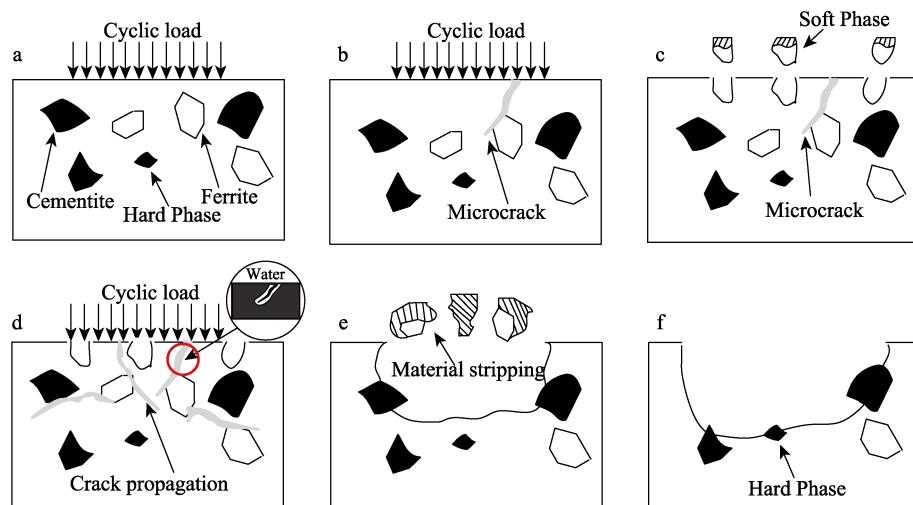


图 11 船用 A 级钢水射流冲蚀剥离模型  
Fig.11 Grade-A ship steel jet erosion and peeling mode

击区域裂纹扩张过程中硬度较低的铁素体几乎被完全冲蚀, 部分与基体结合力较差的硬相组织也被逐步剥离, 如图 11e 所示; 不同硬度组织逐步剥离后在材料表面相互贯穿形成冲蚀凹坑, 射流后只留下渗碳体等硬质相以及与之结合较为紧密的组织, 最终形成如图 11f 所示的形貌。

### 3 结论

1) 在 200 MPa 压力下 A 级钢中心区域背面平均微应变为  $180 \times 10^{-6}$ , 微应变振幅为  $35 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ , 水射流作用在船板的动态应变响应频率主要取决于高压水出口脉动频率, 超高压水射流对材料的冲击为循环脉动交变应力; 20 MPa 压力下水射流打击力由中心沿径向衰减, 而 200 MPa 压力下射流中心和边缘压力基本不变, 压力差基本可以忽略。

2) 船用 A 级钢基体由铁素体与珠光体组织组成, 在射流交变应力作用下材料表面发生疲劳破坏, 冲蚀后 A 级钢中心区域以长条状渗碳体硬质相为主, 还有未被冲蚀的珠光体组织; 同时, 在 200 MPa 压力冲蚀后 A 级钢表面存在着典型的剥落坑、层蚀、穴蚀等断裂形貌。

3) 建立了船用 A 级钢水射流冲蚀剥离模型, 阐述了水射流循环交变应力和水楔作用下不同硬度组织逐步剥离过程, 发现 20 MPa 压力下材料表面从晶界微裂纹处开始破坏, 200 MPa 压力下从晶界和软相剥离后的微凹坑处开始破坏, 阐明了水射流冲蚀作用机理。

### 参考文献:

- [1] VAN H R, KORT W J, TEN K F J, et al. Water-Jet-Cooled Nd: YAG Laser Coagulation: Selective Destruction of Rat Liver Metastases[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 1991, 11(5): 445-454.
- [2] TANG Sheng-nan, YUAN Shou-qi, ZHU Yong. Convolu-
- tional Neural Network in Intelligent Fault Diagnosis Toward Rotatory Machinery[J]. IEEE Access, 2020, 8: 86510-86519.
- [3] BAI Ling, ZHOU Ling, JIANG Xiao-ping, et al. Vibration in a Multistage Centrifugal Pump under Varied Conditions[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1-9.
- [4] ALSOIFI M S. State-of-the-Art in Abrasive Water Jet Cutting Technology and the Promise for Micro- and Nano-Machining[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 2017, 5(1): 1.
- [5] PENG Guang-jie, FAN Feng-yi, ZHOU Ling, et al. Optimal Hydraulic Design to Minimize Erosive Wear in a Centrifugal Slurry Pump Impeller[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 105105.
- [6] TABIE V M, KORANTENG M O, YUNUS A, et al. Water-Jet Guided Laser Cutting Technology an Overview [J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2019, 6(2): 189-203.
- [7] PETER L H T. Advanced Waterjet Technology for Machining Curved and Layered Structures[J]. Curved and Layered Structures, 2019, 6(1): 41-56.
- [8] HWANG P, POON Y, WU J. Temperature Effects on Generation and Entrainment of Bubbles Induced by a Water Jet[J]. Journal of Physical Oceanography, 1991, 21(10): 1602-1608.
- [9] SCHUMACHER B, CHARTON J P, NORDMANN T, et al. Endoscopic Submucosal Dissection of Early Gastric Neoplasia with a Water Jet-Assisted Knife: A Western, Single-Center Experience[J]. Gastrointestinal Endosc, 2012, 75(6): 1166-1174.
- [10] YANG Yang, ZHOU Ling, SHI Wei-dong, et al. Interstage Difference of Pressure Pulsation in a Three-Stage Electrical Submersible Pump[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107-653.
- [11] WANG Chuan, WANG Xi-kun, SHI Wei-dong, et al. Experimental Investigation on Impingement of a Submerged Circular Water Jet at Varying Impinging Angles and Reynolds Numbers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,

- 2017, 89: 189-198.
- [12] PENG Guang-jie, HUANG Xin, ZHOU Ling, et al. Solid-Liquid Two-Phase Flow and Wear Analysis in a Large-Scale Centrifugal Slurry Pump[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 114(C): 104602.
- [13] KUMAR N, SHUKLA M. Finite Element Analysis of Multi-Particle Impact on Erosion in Abrasive Water Jet Machining of Titanium Alloy[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2012, 236(18): 4600-4610.
- [14] LASHERAS J C, VILLERMAUX E, HOPFINGER E J. Break-up and Atomization of a Round Water Jet by a High-Speed Annular Air Jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 357: 351-379.
- [15] QUAISIE J K, WANG Yun, XU Zhen-ying, et al. Experimental Study on Water-Jet Shock Microforming Process Using Different Incident Pressures[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 1-9.
- [16] KAPIL G, KHAN M A, SUNIL P. Surface Morphology Investigation of Miniature Gears Manufactured by Abrasive Water Jet Machining[J]. International Journal of Surface Science and Engineering, 2020, 14(2): 158-173.
- [17] 赵彦琳, 柳灏, 姬忠礼, 等. 316 不锈钢在含沙两相射流中长时间冲蚀的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(2): 361-365.
- ZHAO Yan-lin, LIU Hao, JI Zhong-li, et al. Experimental Investigation of Long Time Erosion Behavior of 316 Stainless Steel by Sand-Water Flow Jet Impingement[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(2): 361-365.
- [18] 董星, 段雄. 高压水射流喷丸强化技术[J]. 表面技术, 2005, 34(1): 48-49.
- DONG Xing, DUAN Xiong. Technology of Water Jet Shot Peening at High Pressure[J]. Surface Technology, 2005, 34(1): 48-49.
- [19] 黎国猛, 梁益龙, 范航京, 等. 水射流喷丸预处理对 42CrMo 钢氮化后接触疲劳性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(18): 3107-3112.
- LI Guo-meng, LIANG Yi-long, FAN Hang-jing, et al. Effects of Water Jet Shot Peening Pretreatment on Contact Fatigue Properties of 42CrMo Steel after Plasma Nitriding[J]. Materials Reports, 2019, 33(18): 3107-3112.
- [20] BEGIC-HAJDAREVIC D, CEKIC A, MEHMEDOVIC M, et al. Experimental Study on Surface Roughness in Abrasive Water Jet Cutting[J]. Procedia Engineering, 2015, 100: 394-399.
- [21] TANGWARODOMNUKUN V, WANG J, HUANG C, et al. Heating and Material Removal Process in Hybrid Laser-Waterjet Ablation of Silicon Substrates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 79: 1-16.
- [22] NARESH BABU M, MUTHUKRISHNAN N. Investigation on Surface Roughness in Abrasive Water-Jet Machining by the Response Surface Method[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(11/12): 1422-1428.
- [23] HABAK M, LEBRUN J L. An Experimental Study of the Effect of High-Pressure Water Jet Assisted Turning (HPWJAT) on the Surface Integrity[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(9): 661-669.
- [24] ESCOBAR-PALAFOX G, GAULT R, RIDGWAY K. Characterisation of Abrasive Water-Jet Process for Pocket Milling in Inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 404-408.
- [25] MELAIBARI A A, ZHAO Jing-nan, MOLIAN P, et al. Ultrahard Boron Nitride Material through a Hybrid Laser/Waterjet Based Surface Treatment[J]. Acta Materialia, 2016, 102: 315-322.
- [26] ALEX C, RAMULU M, HASHISH M. Waterjet and Water-Air Jet Surface Processing of a Titanium Alloy: A Parametric Evaluation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(1): 165-174.
- [27] KARAKURT I, AYDIN G, AYDINER K. An Experimental Study on the Depth of Cut of Granite in Abrasive Waterjet Cutting[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27(5): 538-544.
- [28] 沈春明, 林柏泉, 吴海进. 高压水射流割缝及其对煤体透气性的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2058-2063.
- SHEN Chun-ming, LIN Bai-quan, WU Hai-jin. High-Pressure Water Jet Slotting and Influence on Permeability of Coal Seams [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2058-2063.
- [29] DEHKHODA S, HOOD M. An Experimental Study of Surface and Sub-Surface Damage in Pulsed Water-Jet Breakage of Rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 63: 138-147.
- [30] YU Zhao-xiao, MING Zhao-xian, BIN Han-huai, et al. Enhancement of Pearlite Transformation by Warm Rolling in 1.0C-1.5Cr Steel[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36(13): 1431-1439.
- [31] SHIMIZU N, TAMURA I. Effect of Discontinuous Change in Cooling Rate during Continuous Cooling on Pearlitic Transformation Behaviors of Steel[J]. Tetsu-to-Hagane, 1975, 61(10): 2375-2390.
- [32] HUANG L, FOLKES J, KINNELL P, et al. Mechanisms of Damage Initiation in a Titanium Alloy Subjected to Water Droplet Impact during Ultra-High Pressure Plain Waterjet Erosion[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2012, 212(9): 1906-1915.
- [33] 胡显军, 谢骏, 周立初, 等. 渗碳体形态对珠光体钢丝拉拔形变的影响[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(2): 120-126.
- HU Xian-jun, XIE Jun, ZHOU Li-chu, et al. Effect of Cementite Morphology on Pearlitic Wire Drawing Deformation [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(2): 120-126.
- [34] 向嵩, 向梓杰, 沈涛. 渗碳体形态对高碳珠光体钢组织及性能的影响[J]. 湖南大学学报, 2017, 44(12): 47-54.
- XIANG Song, XIANG Zi-jie, SHEN Tao. Effect of Cementite Morphology on Microstructure and Properties of High Carbon Pearlite Steel[J]. Journal of Hunan University, 2017, 44(12): 47-54.
- [35] 李凯丽. 钢中渗碳体和铁素体协调变形机制及其位向关系的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016: 1-68.
- LI Kai-li. Coordination Deformation Mechanism and the Orientation Relationship between Ferrite and Cementite in Steel[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016: 1-68.
- [36] 谢骏. 渗碳体的形态和分布对珠光体钢丝拉拔形变及性能的影响[D]. 南京: 东南大学, 2015: 1-70.
- XIE Jun. Influence of Morphology and Distribution of Cementite on the Drawing Deformation and Properties of Pearlite Steel Wire[D]. Nanjing: Southeast University, 2015: 1-70.