

# 高端板材表面除鳞清理工艺研究<sup>①</sup>

黄海花, 柯熠, 毛桂庭, 韩德奎, 欧阳邓培, 高波

(长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

**摘要:** 为改善高端板材除鳞清理表面质量, 将钢铁生态除鳞 (SED) 技术与不同的表面预处理工艺相结合, 形成不同的组合工艺路线并开展试验研究, 分析不同组合工艺处理后的表面样貌、表面粗糙度和表面微观形貌、表面能谱情况, 获得最佳的处理工艺为 SED+辊刷液浸泡+百洁布轮抛磨+高压冲洗, 经该工艺处理后, 试样表面色泽均匀、整体呈金属色, 表面粗糙度和氧含量明显降低, 能有效提高汽车用第三代 AHSS 钢板清理后的表面质量。

**关键词:** 高端板材; 钢铁生态除鳞; 表面清理; AHSS 钢; 磨料射流; 表面除鳞

中图分类号: TG142

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.032

文章编号: 0253-6099(2025)04-0175-05

## Surface Descaling and Cleaning Process for High-End Plates

HUANG Haihua, KE Yi, MAO Guiting, HAN Dekui, OUYANG Dengpei, GAO Bo

(State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

**Abstract:** To improve the surface quality of high-end plates by descaling and cleaning process, an experimental study was carried out with different process routes that are determined based on the combination of Steel Eco Descaling (SED) technology and other surface pretreatment processes. Based on the analysis of surface appearance, surface roughness, surface micromorphology and surface energy spectrum of the plates treated by different processes, an optimal descaling process is finally determined, consisting of SED, soaking with roller brush cleaner, polishing with scouring pad buffering wheel, and high-pressure flushing. After cleaning treatment with this process, the plate sample is overall in a uniform metallic color, with significantly reduced surface roughness and oxygen content. It is concluded that after treatment with this combined process, surface quality of the third-generation advanced high-strength steel (AHSS) plates for automotive can be effectively improved.

**Key words:** high-end plates; steel eco descaling (SED); surface cleaning; advanced high-strength steel (AHSS); abrasive jet; surface descaling

汽车板、家电板等高端板材是汽车、家电等行业的重要工业原材料,其强度高、塑性好、表面质量要求高,通常需要进行冷轧镀锌等深加工,是钢铁板材的高端应用领域<sup>[1-3]</sup>。钢板在热轧生产过程中,表面会形成一层致密的氧化膜,在进行冷轧等深加工前,需要去除该表面氧化膜、露出金属基体。传统的除鳞清理工艺为酸洗工艺,该工艺会产生大量酸雾、废酸和酸泥,且无法避免“跑冒滴漏”,会对大气、土壤和水体造成严重污染。因此,国内外纷纷加大表面氧化鳞皮无酸清理技术的研发力度,以满足日益严格的环保要求,如采用铁粒摩擦

除鳞、抛丸除鳞、光滑清洁表面 (smooth clean surface, SCS)、生态清洗表面 (eco-pickled surface, EPS) 等,但因各自技术局限,除鳞清理后的表面质量并不理想,不适用于后续深加工,未在汽车板、家电板等高端板材表面除鳞清理中得到应用<sup>[4-6]</sup>。

钢铁生态除鳞 (steel eco descaling, SED) 是长沙矿冶研究院有限责任公司自主研发的技术,其基于高压水射流喷丸除鳞技术,采用“高压磨料打击磨削+高压水楔强力冲蚀”的物理方法,可高效清除金属表面氧化膜、油脂、锈蚀、泥垢、水垢、积碳等污物,目前已在普碳钢板冷轧前

① 收稿日期: 2025-02-23

基金项目: 中国五矿集团有限公司科技专项计划项目 (2019ZXB03); 湖南省科技创新计划项目 (2022GK4032)

作者简介: 黄海花 (1984—), 女, 湖南长沙人, 工程师, 主要研究方向为高压水射流技术和深海采矿技术。E-mail: huanghh@minmetals.com

的除鳞清理中得到了验证,生产过程绿色环保<sup>[7]</sup>。但采用 SED 技术对汽车板、家电板等高端板材常规除鳞后,基体表面存在色差,亟须研究新的技术或工艺解决此问题。

本文基于 SED 技术,结合钢铁行业中常用的表面预处理工艺,如机械抛磨(磨料丝轮抛磨、百洁布轮抛磨)、钝化处理(辊刷液)等<sup>[8]</sup>,形成不同的 SED 组合工艺路线;针对汽车用第三代 AHSS 钢<sup>[9-11]</sup>,在高压磨料射流表面除鳞试验装置上开展试验,观察除鳞清理后的表面样貌、检测其表面粗糙度,进行 SEM 和 XPS 分析,探究不同 SED 组合工艺对板材表面质量的影响,以期找到适宜的工艺路线,以提高清理后的板材表

面质量、满足高端板材的表面质量要求。

## 1 试验方法及装置

### 1.1 试验装置

本文依托深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室的高压磨料射流表面除鳞试验装置开展试验研究,该试验装置由高压射流喷丸装置、钝化处理装置、机械抛磨装置、高压冲洗装置和干燥装置等组成(如图 1 所示),驱动电机带动移动平台在输送辊上前后移动,试验试样固定在移动平台上并随其移动,可以完成除鳞清理、冲刷钝化、机械抛磨和高压冲洗等处理。

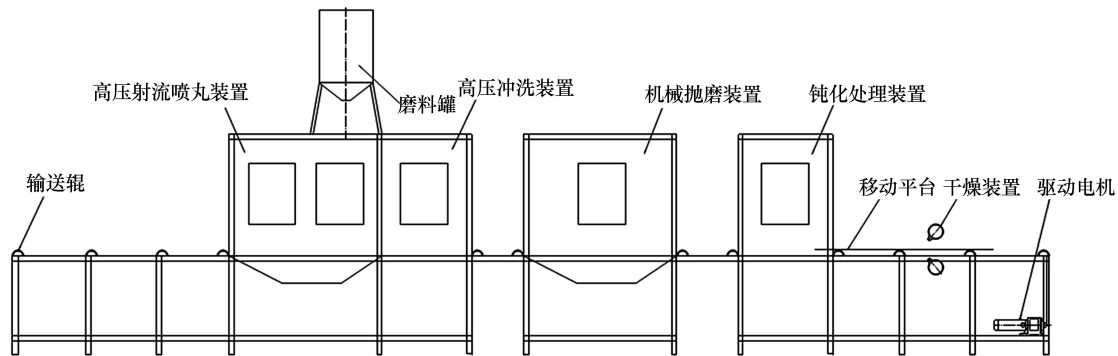


图 1 高压磨料射流表面除鳞试验装置

Fig.1 Testing device for surface descaling by high-pressure abrasive waterjet

### 1.2 试验材料和方法

试验材料由无锡某新材料有限公司提供,为 AHSS 钢板,其屈服强度达 800 MPa,是汽车板减重降能用钢板<sup>[10-11]</sup>。试验材料分割成 130 mm × 60 mm 规格的试样。试验中,SED 工艺参数为:工作压力 50 MPa、靶距 210 mm、进给速度 30 m/min,磨料为 0.2 mm 钢丸。

试样经 SED 清理后再进行不同工艺的表面处理,分别是:辊刷液浸泡、磨料丝轮抛磨、百洁布轮抛磨,不同表面清理工艺组合如表 1 所示,其中机械抛磨速度为 10 m/min。试验后,观察试样的表面样貌、测量其表面粗糙度;利用场发射扫描电子显微镜观察其表面微观形貌;利用 XPS 能谱仪对表面元素分布进行分析。

表 1 不同表面清理工艺组合

Table 1 Different combined process routes for surface cleaning

试验方案	除鳞工艺
标样 1	SED
标样 1(冲洗后)	SED→50 MPa 高压冲洗 3 s
方案 1	SED→磨料丝轮抛磨→50 MPa 高压冲洗 3 s
方案 2	SED→辊刷液浸泡 10 s→50 MPa 高压冲洗 3 s
方案 3	SED→辊刷液浸泡 10 s→磨料丝轮抛磨→50 MPa 高压冲洗 3 s
方案 4	SED→辊刷液浸泡 10 s→百洁布轮抛磨→50 MPa 高压冲洗 3 s

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面样貌和表面粗糙度

不同方案下试样除鳞清理后表面样貌如图 2 所示。由图 2 可知,所有试样表面均存在细微的凹坑,表面整体并不均匀一致,这是因为所有试样经过高压磨料射流除鳞清理,磨料射流速度和冲击角度并不一致,导致试件表面形成不一致的细微凹坑,使得高端板材除鳞清理后表面存在漫反射,这是试样表面存在外观色差的主要原因。经方案 4 处理的试样,表面样貌较为均匀一致、整体光洁,较其他 3 个方案处理的试样,表面更好。

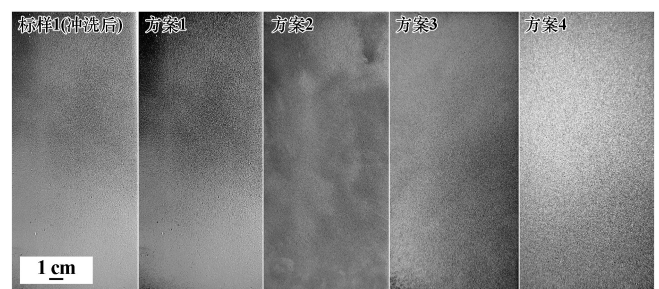


图 2 不同方案下试样除鳞清理后表面样貌

Fig.2 Surface appearance of samples treated by different descaling schemes

在试验后的各试样表面以面积等分成4个区域,每个区域中心点作为测量点位,利用表面粗糙度仪测量其表面粗糙度,结果如表2所示。由表2可知,经方案1和方案3处理的试样表面粗糙度较标样1(冲洗后)明显增大,这是由于这2个方案中有磨料丝轮抛磨处理,导致试样表面粗糙度增大。经方案2处理的试样,表面粗糙度变化不大,这也反映单一的辊刷液浸泡对试样表面微观结构的改变作用不大。经方案4处理的试样表面粗糙度明显下降,这是由于百洁布抛磨的作用力远弱于磨料丝轮抛磨的作用力,对高压磨料射流除鳞清理后的表面微观结构起到了一定的改善作用,但并不能完全去除表面细微凹坑。这与图2中各试样处理后的表面样貌相吻合。

表2 不同方案除鳞清理后试样表面粗糙度

Table 2 Surface roughness of samples treated by different descaling schemes

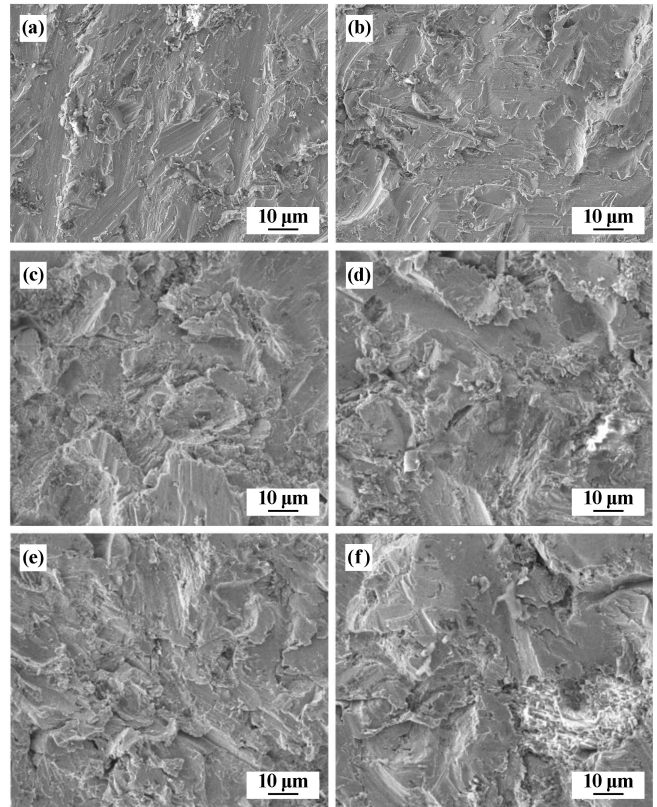
试验方案	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$				
	点位1	点位2	点位3	点位4	平均值
标样1(冲洗后)	3.43	3.47	3.58	3.38	3.47
方案1	3.89	4.03	4.17	4.11	4.05
方案2	3.33	3.56	3.37	3.55	3.45
方案3	3.92	4.13	4.22	4.06	4.08
方案4	2.91	2.87	3.15	3.21	3.04

钢板表面粗糙度直接影响冲压成型及冷轧时的金属流动特性,适当的表面粗糙度有利于储存并保持油膜,有利于后续冷轧等工艺。过小的表面粗糙度会导致后续冷轧轧辊打滑;而过大的表面粗糙度会导致冷轧轧辊磨损过快,冷轧后表面质量不佳。适宜的表面粗糙度一般为 $2.5\sim 3.5\ \mu\text{m}$ ,经方案4处理的试样表面粗糙度符合要求。

## 2.2 表面微观形貌

对清洗后的各试样进行取样,利用场发射扫描电子显微镜进行表面微观形貌分析,结果如图3所示。从图3(a)、(b)可以看出,磨料冲击试样表面,在磨料的切削和冲蚀下,试样表面呈现高低不平的起伏,以及大小不一的冲击坑,表面残留有破碎的金属微粒;再经 $50\ \text{MPa}$ 高压喷嘴冲洗后,表面微观形貌差异不大,但表面附着的破碎金属微粒明显减少,表面更为干净。

经过4个方案处理后的试样,其表面微观形貌均存在微小的凹坑和尖峰。经过磨料丝轮抛磨的试样表面可以观察到钢丝在钢板表面打磨的痕迹,而经过百洁布抛磨的试样表面也有部分磨削痕迹,但不如磨料丝轮抛磨明显。



(a) 标样1; (b) 标样1(冲洗后); (c) 方案1;  
(d) 方案2; (e) 方案3; (f) 方案4

图3 不同试样表面微观形貌

Fig.3 Surface micromorphology of samples after treatment

## 2.3 表面能谱

表面残留氧化磷皮是影响成品表面外观和冷轧冲压成型质量的重要因素。对试验后的试样取样,利用XPS能谱仪进行表面氧元素含量检测,间接分析不同组合工艺处理时表面氧化磷皮变化情况,只要有氧化磷皮存在必然存在氧元素峰,其峰值高低间接反映检测区域氧化磷皮残留量的多少。

不同方案处理后试样表面氧元素能谱图见图4。由图4可知,钢板表面氧化物成分及形态不同,所出现的氧元素分峰结合能大多在 $529\sim 534\ \text{eV}$ ,与标准的 $529.5\sim 531.5\ \text{eV}$ 有差异。方案1和方案2试样表面能谱出现了2个明显的分峰,右边分峰一般为表面晶格氧,左边高而尖的分峰为表面吸附氧;方案3和方案4表面的晶格氧峰不明显。从图4可知,方案1~3的表面吸附氧峰值相近,而方案4中表面吸附氧峰值明显下降,氧元素结合能向低场方向迁移,这也说明经方案4处理后试样表面氧元素显著减少。

在试验后的各试样表面以面积等分成3个区域,每个区域中央选取 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 作为检测样本,在每块样本表面进行XPS表面氧含量能谱检测,每种方案

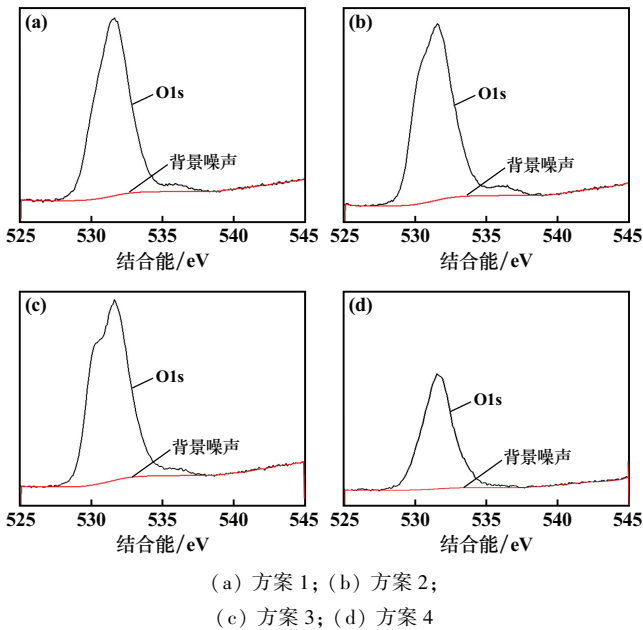


图4 不同方案处理后试样表面氧元素能谱图

Fig. 4 Spectra of molecular oxygen on sample surface after different descaling treatment

获得3个平行点位,统计各点位表面氧含量并取平均值,结果如图5所示。由图5可知,钢板经SED除鳞后再经方案1磨料丝轮抛磨和方案2辊刷液浸泡处理后的表面氧含量不降反增。这是因为磨料丝轮抛磨产生高温,表面二次氧化形成新的氧化膜;而辊刷液浸泡处理提高了表面活性,进而导致表面氧化程度加重。经方案3处理后的试样表面氧含量位于方案1和方案2之间。而经方案4处理后的试样表面氧含量明显降低,降幅达到44%,这表明辊刷液浸泡+百洁布轮抛磨+高压冲洗对破碎松散的氧化鳞皮有一定去除

清理作用。对比方案3和方案4,百洁布轮抛磨和磨料丝轮抛磨存在明显差异,这主要是由于两者材质不同,在抛磨时作用力不同、产热升温不同,得到的处理效果也不同。这也印证了不同组合工艺处理后,试样表面微观形貌和表面粗糙度的变化情况。

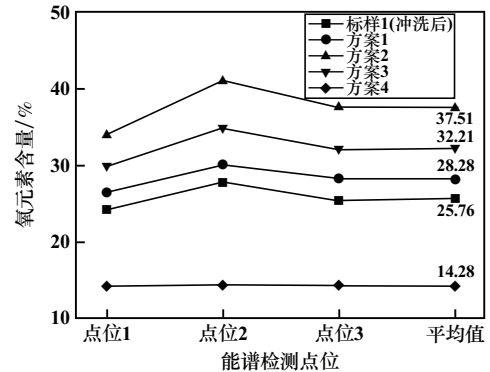


图5 不同表面清理工艺除鳞后试样表面氧含量对比图

Fig. 5 Comparison of oxygen content on sample surface after different descaling treatment

## 2.4 分析与讨论

综合上述表面样貌、表面粗糙度和表面微观形貌、表面能谱氧含量的结果,不同组合工艺表面处理效果如表3所示。由表3可知,AHSS钢板经方案4处理后,获得的表面效果更好。钢板经SED处理后使用辊刷液浸泡10s,继而使用百洁布轮抛磨并经50MPa高压水冲洗,处理后的表面色泽均匀、整体呈金属色,表面粗糙度明显降低,但在有益区间内,辊刷液浸泡+百洁布轮抛磨对表面破碎松散的氧化鳞皮起到了一定的去除作用,表面氧含量明显降低,均有利于提高AHSS钢板清理后的表面质量,提高成品质量。

表3 不同组合工艺表面处理效果

Table 3 Effect after treatment with different combined descaling processes

试验方案	工艺组合	表面样貌	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	氧含量/%
标样1(冲洗后)	SED→50 MPa 高压冲洗 3 s	不均匀、有色差	3.47	25.76
方案1	SED→磨料丝轮抛磨→50 MPa 高压冲洗 3 s	不均匀、有色差、有明暗区域	4.05	28.28
方案2	SED→辊刷液浸泡 10 s→50 MPa 高压冲洗 3 s	不均匀、有色差、有明暗区域	3.45	37.51
方案3	SED→辊刷液浸泡 10 s→磨料丝轮抛磨→50 MPa 高压冲洗 3 s	不均匀、有色差、有明暗区域	4.08	32.21
方案4	SED→辊刷液浸泡 10 s→百洁布轮抛磨→50 MPa 高压冲洗 3 s	均匀、表面光洁、有金属光泽	3.04	14.28

本研究受涂装前表面处理工艺的启发,结合抛磨、钝化等处理工艺,与SED相结合进行了试验研究,鉴于抛磨工艺、钝化工艺与SED结合仍存在诸多未探索的内容,建议下一步从以下方面开展研究:辊刷液的种类、浓度、浸泡时间对表面质量的影响;抛光时间、抛光速度对表面质量的影响。

## 3 结语

SED除鳞+辊刷液浸泡+百洁布轮抛磨+高压冲洗这一工艺路线是本文最佳工艺路线。经该工艺处理后的试样表面色泽均匀、整体呈金属色,表面粗糙度从SED除鳞+高压冲洗处理后的 $3.47\ \mu\text{m}$ 降低至 $3.04\ \mu\text{m}$ ;

辊刷液浸泡+百洁布轮抛磨+高压冲洗对表面破碎松散的氧化鳞皮起到了清理作用,表面氧含量从 SED 除鳞+高压冲洗后的 25.76%降低至 14.28%,能有效去除表面残留氧化鳞皮。经 SED 除鳞+辊刷液浸泡+百洁布轮抛磨+高压冲洗处理后,试样表面色泽均匀,表面粗糙度和氧含量明显降低,能有效提高汽车用第三代 AHSS 钢板清理后的表面质量。

#### 参考文献(References):

- [1] 王永恒. 冷轧高强度汽车板工艺及设备优化探讨[J]. 山西冶金, 2023,46(12):264-265.  
WANG Yongheng. Discussion on the process and equipment optimization of cold rolled high strength automotive plate[J]. Shanxi Metallurgy, 2023,46(12):264-265.
- [2] 余铁峰,王俊海. 国内主要家电用钢板生产企业专利及研发情况综述[J]. 四川冶金, 2019,41(3):11-14.  
YU Yifeng, WANG Junhai. Patents and R & D of major domestic manufacturing enterprise steel plate for household appliances[J]. Sichuan Metallurgy, 2019,41(3):11-14.
- [3] 王耀东. 浅析汽车板的开发与应用[J]. 山西冶金, 2015,38(2):1-2.  
WANG Yaodong. On the development and application of automobile panels[J]. Shanxi Metallurgy, 2015,38(2):1-2.
- [4] 柯熠. 高压磨料水射流磨蚀分布及除鳞机理研究[D]. 长沙:长沙矿冶研究院, 2017.  
KE Yi. Study on abrasion distribution and descaling mechanism of high-pressure abrasive waterjet[D]. Changsha: Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, 2017.
- [5] 徐言东,顾洋,马树森,等. 几种钢材表面的少酸化除鳞设备[J]. 轧钢, 2019,36(4):54-57.  
XU Yandong, GU Yang, MA Shusen, et al. Introduction of several

- acid-reducing descaling equipment for steel products[J]. Steel Rolling, 2019,36(4):54-57.
- [6] 于邦超. 带钢无酸除鳞技术应用进展[J]. 金属世界, 2019(3):6-8.  
YU Bangchao. Application progress of acid-free descaling technology for steel strip[J]. Metal World, 2019(3):6-8.
- [7] 雷武军. 无酸除鳞技术在冷轧宽带应用的探索与实践[J]. 中国金属通报, 2021(1):81-82.  
LEI Wujun. Exploration and practice of acid-free descaling technology in cold rolled wide strip[J]. China Metal Bulletin, 2021(1):81-82.
- [8] 刘斌. 汽车涂装前处理过程中的铁类杂质消除工艺研究[J]. 汽车维修技师, 2022(9):128.  
LIU Bin. Study on iron impurities elimination process in automobile painting pretreatment process[J]. Auto Maintenance, 2022(9):128.
- [9] 日产 Rogue 使用 AHSS 和铝制车身面板以减轻重量[J]. 铝加工, 2022(4):9.  
Nissan Rogue uses AHSS and aluminum body panels to reduce weight[J]. Aluminium Fabrication, 2022(4):9.
- [10] 罗茜. 第三代 AHSS 钢的组织调控及其抗氢脆性能研究[D]. 南京:东南大学, 2023.  
LUO Qian. The third generation of advanced high strength steel organization control and hydrogen brittleness resistance study[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [11] 孙荣生,王静,刘仁东,等. 1 200 MPa 级冷轧先进高强钢轧制稳定性的分析及控制[J]. 轧钢, 2020,37(6):40-43.  
SUN Rongsheng, WANG Jing, LIU Rendong, et al. Analysis and control on the cold rolling stability of 1 200 MPa grade AHSS[J]. Steel Rolling, 2020,37(6):40-43.

- 引用本文:黄海花,柯熠,毛桂庭,等. 高端板材表面除鳞清理工艺研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):175-179.  
HUANG Haihua, KE Yi, MAO Guiting, et al. Surface descaling and cleaning process for high-end plates[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):175-179.

(上接第 174 页)

- [19] YU Y, ZOU B, WANG X F, et al. Rheological behavior and curing deformation of paste containing 85 wt%  $Al_2O_3$  ceramic during SLA-3D printing[J]. Ceramics International, 2022, 8(17):24560-24570.
- [20] KOMISSARENKO D A, SOKOLOV P S, EVSTIGNEVA A D, et al. DLP 3D printing of scandia-stabilized zirconia ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021,41(1):684-690.
- [21] 张报清,孙应,李亚东,等. 钛粉烧结工艺参数控制研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):134-138.  
ZHANG Baoqing, SUN Ying, LI Yadong, et al. Experimental study on sintering parameters control of titanium powder[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(4):134-138.
- [22] HU K H, WEI Y M, LU Z G, et al. Design of a shaping system for

- stereolithography with high solid loading ceramic suspensions[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2018,5(4):311-318.
- [23] 杜智渊,吴茂,邱婷婷,等. Al-Cu-Mg-Si 系铝合金的注射成形[J]. 中国有色金属学报, 2019,29(11):2471-2480.  
DU Zhiyuan, WU Mao, QIU Tingting, et al. Metal injection molding of Al-Cu-Mg-Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019,29(11):2471-2480.

- 引用本文:乔聪卓,刘子瑞,徐麒凯,等. 复杂形状  $SiC_p/Al$  复合材料的光固化增材制造[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):168-174.  
QIAO Congzhuo, LIU Zirui, XU Qikai, et al. Additive manufacturing of complex shaped  $SiC_p/Al$  composite by photocuring process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):168-174.