

关于影响连铸坯火焰切割成本的优化研究

张良明*, 陈富豪#, 尹丰, 朱卫群, 刘威, 孙海军

马鞍山钢铁有限责任公司长材事业部, 安徽 马鞍山

收稿日期: 2025年4月10日; 录用日期: 2025年6月5日; 发布日期: 2025年6月13日

摘要

本文针对马鞍山钢铁公司长材2#连铸机火焰切割燃气成本较高的问题, 通过设备改造与工艺优化实现降本增效。研究分析了燃气单耗的影响因素, 提出基于拉瓦尔管割嘴的优化方案。通过改造长明火供气系统及采用收缩扩张结构的拉瓦尔管割嘴, 提升燃气燃烧效率与气流速度(超音速), 并结合切割速度优化实验, 实现燃气单耗降至0.11 kg/t。实验表明, 改造后切割时间缩短13~19秒, 表面粗糙度(Ra)由原46.5 μm 降至8.7 μm , 且挂渣程度显著改善, 并通过t检验验证了改进效果的显著性。研究为连铸坯火焰切割的精细化成本控制提供了理论与实践依据, 具有工业推广价值。

关键词

燃气单耗, 拉瓦尔管割嘴, 切割速度, 表面粗糙度, 成本控制

Research on the Optimization of the Impact of Flame Cutting Costs of Continuous Casting Billets

Liangming Zhang*, Fuhao Chen#, Feng Yin, Weiqun Zhu, Wei Liu, Haijun Sun

Long Material Division, Ma'anshan Iron & Steel Co., Ltd., Ma'anshan Anhui

Received: Apr. 10th, 2025; accepted: Jun. 5th, 2025; published: Jun. 13th, 2025

Abstract

This study addresses the issue of high gas consumption in flame cutting at Ma'anshan Iron and Steel Co. Ltd.'s long-materials No. 2 Continuous Casting Machine by implementing equipment modifications and process optimizations to achieve cost reduction and efficiency improvement. Through analysis of

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张良明, 陈富豪, 尹丰, 朱卫群, 刘威, 孙海军. 关于影响连铸坯火焰切割成本的优化研究[J]. 冶金工程, 2025, 12(2): 48-57. DOI: 10.12677/meng.2025.122007

factors affecting gas consumption, an optimization plan based on a Laval nozzle was proposed. By modifying the pilot flame gas supply system and adopting a converging-diverging Laval nozzle, gas combustion efficiency and gas flow velocity (supersonic) were improved. Combined with cutting speed optimization experiments, gas consumption was reduced to 0.11 kg/t. Experimental results showed that cutting time was shortened by 13~19 seconds, surface roughness (Ra) decreased from 46.5 μm to 8.7 μm , and slag adhesion was significantly improved. A t-test further validated the significance of the improvements. This research provides theoretical and practical foundations for refined cost control in continuous casting billet flame cutting and demonstrates industrial promotion value.

Keywords

Gas Consumption, Laval Nozzle, Cutting Speed, Surface Roughness, Cost Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前国内连铸机切割铸坯主要采用两种方式,一种为火焰切割,多用在板坯、异型坯和小方坯连铸机;一种为液压剪,主要用于小方坯连铸机[1]。马鞍山钢铁有限公司长材2#机铸坯切割的断面较为复杂,包含方坯 165 mm*165 mm、矩形坯 165 mm*225 mm、异型坯 320 mm*220 mm*85 mm、异型坯 430 mm*300 mm*90 mm 四种断面,故采用火焰切割。

Table 1. Flame cutting costs of continuous casting process for long materials at Ma'anshan Iron and Steel Co. Ltd. in 2024
表 1. 马钢长材连铸工序 2024 年火焰切割成本表

月份	产量(吨)	吨钢单耗(元/吨)	吨钢单耗(kg/吨)
1月	39,515	2.35	0.16
2月	52,387	2.18	0.15
3月	54,288	2.38	0.16
4月	38,574	2.13	0.14
5月	42,441	2.30	0.16
6月	49,027	2.16	0.15
7月	64,014	1.96	0.14
8月	53,586	2.38	0.17
9月	89,850	2.35	0.17
10月	77,987	2.32	0.17
11月	98,598	2.32	0.17
12月	100,942	2.44	0.17
平均	63,434	2.27	0.16

火焰切割是连铸工序的重要步骤,也是影响连铸工序成本和产品质量的重要一环,目前马鞍山钢铁

有限公司长材连铸生产工序主要使用数控火焰切割技术进行连铸坯的切割，数控火焰切割作为一种热切割工艺，具备生产稳定且效率较高的特点。但在实际生产过程中火焰切割燃气成本容易被忽视，随着市场经济体系升级转型及国家供给侧改革政策形成的产业升级压力背景下[2]，钢铁企业控制成本进入精细化阶段，而火切燃气成本也成为国内多家钢铁企业连铸工序关注的热点。

马钢长材连铸工序2#机的2024年火切燃气(氧+丙烷)综合成本如表1所示，其2024年燃气单耗为0.16 kg/t，成本相对邵凯旋等人[3]关于丙烷应用于切割铸坯的理想单耗0.12~0.14 kg/吨的研究较高。

近年来，拉瓦尔管(Laval nozzle)因其独特的流体力学特性与材料创新，成为降低燃气成本、提升切割质量的核心技术方向。拉瓦尔管通过收缩-扩张结构实现气流加速至超音速，其喉部截面积与出口截面积的优化设计显著提升燃气动能的传递效率[4][5]。Li等[5]的数值模拟表明，与传统直管割嘴相比，拉瓦尔管的气流速度可提升30%以上。Liu等[6]对比实验显示，采用拉瓦尔管割嘴的铸坯表面粗糙度(Ra)从25.3 μm 降至12.7 μm ，且热影响区宽度缩小33% (1.2 mm \rightarrow 0.8 mm)。Zhang等[7]研发的碳化硅陶瓷复合拉瓦尔管，在高温环境下仍能保持气流稳定性，长期使用中燃气单耗波动率降低至 $\pm 3\%$ (传统金属割嘴为 $\pm 8\%$)，进一步提升了成本控制的可靠性。

本文旨在降低目前马钢长材连铸工序的火切成本现状，针对影响马钢长材连铸工序2#机铸坯火焰切割生产综合成本较高的原因进行热力学分析，并系统探讨设备改造与工艺优化对火焰切割成本的降低效果，设置对比实验及统计学验证，为行业提供参考。

2. 影响2#机火焰切割成本分析

铸坯火焰热切割工艺的主要原理是利用气体火焰(氧气与燃气形成的火焰)加热钢板，使之局部达到燃点，然后通入高速切割氧流，使铸坯发生剧烈的燃烧反应并释放热量，铸坯持续燃烧，高速切割氧流利用其动能将铸坯燃烧后的金属氧化物熔渣吹除并形成割缝[8][9]。

2#连铸机作为马钢长材目前的主要生产铸机之一，使用燃气丙烷(C_3H_8) + 氧气(O_2)进行铸坯切割，进行火焰切割的工艺流程主要分为两个阶段：

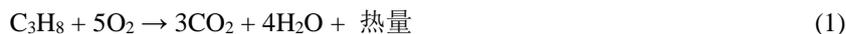
第一阶段为丙烷与氧气的燃烧(即预热阶段)：由长明火(长明火的主要燃料丙烷)点燃割枪到达限位喷射出的丙烷与氧气的混合气，其与割枪的设备构成如图1所示，两种燃烧产生的化学反应如公式(1)所示，此阶段丙烷作为燃料与氧气混合燃烧，产生高温火焰以预热金属至燃点此反应释放大量热量，使金属表面达到氧化温度。



Figure 1. Schematic of the lance and pilot flame in operation
图1. 割枪与长明火工作图

第二阶段为铁的氧化反应(即切割阶段):其产生的化学反应如公式(2)所示,此阶段当金属被预热至燃点后,高压纯氧喷射到金属表面,引发铁的剧烈氧化反应,生成液态或气态氧化铁(渣),并被氧气流吹离切口。

铸坯火焰切割的全过程中丙烷均参与,第一阶段中负责提高燃烧的热值,第二阶段中负责配合高压氧气的燃烧,以使铸坯的切割过程顺利进行。



根据以上原理进行热力学分析,第一阶段需要热量需求为公式(3)所示。

$$Q_{\text{preheat}} = \rho \times C_p \times V \times (T_{\text{ignition}} - T_{\text{ambient}}) \quad (3)$$

式中, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, C_p 为钢的比热容, $V = A \times L$ 为切割体积, A 为切口截面积, L 为切割长度, T_{ambient} 为铸坯表面温度, T_{ignition} 为金属至燃点温度。

切割阶段需维持氧化反应,热量平衡方程为如公式(4)所示。

$$Q_{\text{cut}} = m(\text{O}_2) \times \Delta H_{\text{oxidation}} + m(\text{C}_3\text{H}_8) \times \Delta H_{\text{combustion}} \quad (4)$$

式中, $\Delta H_{\text{oxidation}} = 4.8 \text{ MJ/kg}$ (铁的氧化焓), $\Delta H_{\text{combustion}} = 50.3 \text{ MJ/kg}$ (丙烷燃烧焓), $m(\text{O}_2)$, $m(\text{C}_3\text{H}_8)$ 为氧气与丙烷质量流量。

则火焰切割过程中需要的总热量如公式(5)所示。

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{preheat}} + Q_{\text{cut}} \quad (5)$$

综合以上论述及徐鑫关于数控火切机切割成本的研究[10],可以得出燃气消耗由热量需求与燃烧效率共同决定,则可以建立模型如公式(6)所示。

$$m(\text{C}_3\text{H}_8) = Q_{\text{total}} \div (\Delta H_{\text{combustion}} * \eta) \quad (6)$$

式中, η 为燃烧效率,受割嘴设计影响。

又知切割时间 $t = L/v$, 其中 L 为切割距离, v 为切割速度,则总燃气消耗可以建立模型如公式(7)所示。

$$m(\text{C}_3\text{H}_8) = m(\text{C}_3\text{H}_8) \times t = (Q_{\text{total}} \times L) \div (\Delta H_{\text{combustion}} \times \eta \times v) \quad (7)$$

综合以上公式,则可以构建铸坯切割过程中的综合模型如公式(8)所示。

$$\text{燃气单耗} = m(\text{C}_3\text{H}_8) \div \text{产量} = Q_{\text{total}} \div (\Delta H_{\text{combustion}} \times \eta \times v \times \rho \times A) \quad (8)$$

简化此模型可得公式(9)。

$$\text{燃气单耗} \propto \frac{1}{\eta \times v} \quad (9)$$

通过以上分析可以得出火焰切割过程中,影响燃气单耗的因素主要是切割速度与燃气燃烧效率,其中切割速度受燃气效率制约,燃气效率提高,切割速度才能增加,燃气效率又由割嘴类型影响。

3. 设备改造与工艺参数优化

根据前文中关于影响火切燃气成本的论述,针对 2#机与以上分析相关的设备和工艺参数进行改造和优化。

3.1. 长明火设备改造

首先针对长明火管道进行调查,其设备如下图 2 所示,由图 2 可以看出,两枪间隔 140 mm,其距离

割枪较远，需要更大的丙烷压力。且现有长明火设备管道中，直接连接丙烷管道，根据公式(1)可知，其单独通入丙烷并不能充分燃烧，造成较多的空燃浪费，燃气效率较低，故对其进行改造。



Figure 2. Schematic diagram of the original flame cutting machine and pilot flame distance
图 2. 原有火切机与长明火距离图

考虑到长明火仅作为引燃使用，仅需保证在火焰切割铸坯的过程中保持燃烧不熄灭，故选用成本更低的压缩空气管道与长明火输出管道连接，再将丙烷管道与压缩空气合并入长明火管道使用。针对距离过远的问题，经过现场勘察和分析，设计将长明火枪随火切机同时行走方式，改造后的设备如图 3 所示。



Figure 3. Post-modification flame cutting machine equipment diagram
图 3. 改造后火切机设备图

3.2. 割嘴改造与相关参数优化

首先针对 2#机火焰切割机相关工艺参数和割嘴的设备状况进行调查统计，经过调查各个断面的割嘴

型号、切割时间如表 2 所示，割嘴的设备现状如图 4 所示。

Table 2. Original flame cutting parameter table for machine 2
表 2. 原 2#机火焰切割参数表

断面(mm)	165*165	165*225	430*300*90	320*220*85
切割时间(s)	59	76	112	98
枪速(mm/min)	210	210	160	200
割嘴孔径(mm)	2.3	2.3	2.6	2.6

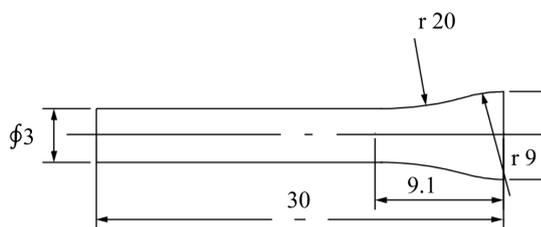


Figure 4. Schematic diagram of the flame cutting nozzle of machine 2
图 4. 2#机火焰切割嘴示意图

丙烷的流量与割嘴型号的大小呈现正相关关系，而根据生产实践反馈，其无法使用较小的割嘴型号主要原因为无法切断铸坯。由图 4 可知其割嘴内孔为非拉瓦尔管结构，此种形状的割嘴会导致燃气在切割铸坯过程中存在汇聚气流能力不足，进而出现火焰分散的现象，严重影响火焰切割的切割性能[11]。结合前文中对于割嘴效率的分析和论证，将其改造为拉瓦尔管形状，这种形状的割嘴使燃气气流在进入割嘴后先收缩再扩张，使燃气的气流在喉道处能够进一步的加速进而达到超音速的速度，使燃气的燃烧效率显著改善[12]，改造后的割嘴形状如图 5 所示。

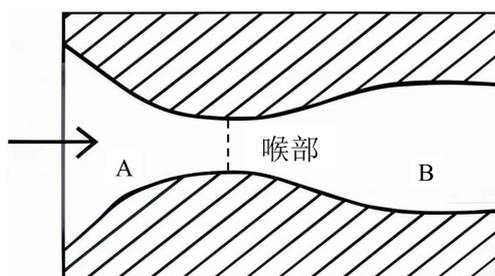


Figure 5. Laval nozzle structure diagram
图 5. 拉瓦尔管结构图

将改造前后的割嘴在相同断面的铸坯上进行实验，改造后的割嘴参数如表 3 所示。发现改造后小型号的割嘴能具备切断相同断面大型号割嘴的能力，改造后的割嘴孔径参数如表 3 所示。

Table 3. Parameter table of flame cutting nozzle for machine 2 after modification
表 3. 改造后 2#机火焰切割割嘴参数表

断面(mm)	165*165	165*225	430*300*90	320*220*85
割嘴孔径(mm)	1.9	1.9	2.3	2.3

运行表 2、表 3 中相关割嘴参数对进行改造前后的断面情况，使用轮廓仪检测改造前后铸坯断面的表面粗糙度(Ra)，结果如表 4 所示，改造后的断面以 160 mm*160 mm 为例对比如图 6 所示。

Table 4. Table of comparison of cross-sectional surface roughness values of machine 2

表 4. 2#机断面表面粗糙度值对比表

断面(mm)	165*165	165*225	430*300*90	320*220*85
原割嘴 Ra (μm)	46.5	38.9	37.6	34.3
拉瓦尔管割嘴 Ra (μm)	8.7	9.9	10.5	9.2



Figure 6. Comparison of cast strand cross-section before and after modification

图 6. 改造前后铸坯断面对比图

通过表 4、图 6 可以明显看出，割嘴经过拉瓦尔管改造后，更小的割嘴不仅能够保持切断，且断面质量也有了明显的改善。

由前文模型可知，燃气单耗与切割速度呈现负相关关系，切割速率受燃气效率限制，速度过慢，过多的火焰热量会使铸坯熔融金属堆积，污染切割氧通道，造成表面割痕凹坑；速度过快，金属燃烧不充分，氧化渣吹除不彻底，影响表面光洁度，形成割缝挂渣，更严重的会产生切割丢失出现切不断的现象[13]。在改善了火切割枪割嘴后，火焰切割燃气效率得到了大幅度的提升，在相同燃气压力下将各个断面的切割速度进行加速调整实验，将断面挂渣程度与表面粗糙度(Ra)的值作为速度是否合适的指标，实验方案如表 5 所示。

Table 5. Flame cutting speed improvement experiment of machine 2

表 5. 2#机火焰割速提升实验表

断面 mm	165*165	165*225	430*300*90	320*220*85
原枪速(mm/min)	210	210	160	190
枪速 1 (mm/min)	220	220	170	200
枪速 2 (mm/min)	230	230	180	210
枪速 3 (mm/min)	240	240	190	220
枪速 4 (mm/min)	250	250	200	230
枪速 5 (mm/min)	260	260	210	240

对各组枪速下相应断面铸坯割缝挂渣情况进行统计如表 6 所示，同时对各组枪速下相应断面铸坯的

表面粗糙度进行测量，如表 7 所示。

Table 6. Dross adhesion inspection checklist
表 6. 挂渣情况检查表

断面(mm)	165*165	165*225	430*300*90	320*220*85
原枪速挂渣程度	无	无	无	无
枪速 1 挂渣程度	无	无	无	无
枪速 2 挂渣程度	轻微	无	无	轻微
枪速 3 挂渣程度	轻微	轻微	轻微	轻微
枪速 4 挂渣程度	明显	明显	明显	明显
枪速 5 挂渣程度	严重	严重	严重	严重

Table 7. Surface roughness results
表 7. 表面粗糙度结果表

断面(mm)	165*165	165*225	430*300*90	320*220*85
原枪速 Ra (μm)	8.7	9.9	10.5	9.2
枪速 1 Ra (μm)	9.1	10.2	11	9.5
枪速 2 Ra (μm)	10.5	11	12.5	10.8
枪速 3 Ra (μm)	12	12.5	14	12.3
枪速 4 Ra (μm)	15.2	16	18.5	15.8
枪速 5 Ra (μm)	20.1	21.5	24	19.7

通过表 6、表 7 中可以看出当速度提升至第 5 组时，铸坯出现了严重挂渣，且表面粗糙度也大幅增加，这已经影响到了铸坯的断面质量。枪速 3 中各断面 Ra 值(12.0~14.0 μm)在可接受范围内，且挂渣程度轻微，符合工业选择依据，故选择第 3 组作为工业切割参数，对各个断面的切割时间进行统计与原切割时间对比如表 8 所示。

Table 8. Cutting time table before and after optimization
表 8. 优化前后切割时间表

断面(mm)	165*165	165*225	430*300*90	320*220*85
原切割时间(s)	59	76	112	98
现切割时间(s)	46	57	96	84
减少时间(s)	13	19	16	14

从上表可以看出，割嘴改造和参数优化后的火切时间相对原切割时间有了大幅度的提升，铸坯断面也未有明显挂渣，铸坯断面表面粗糙度也得到了一定程度的改善，验证了本次参数优化是可行的。

4. 工业实践结果验证

对以上改造前和改造后产生的丙烷成本进行观察，对 2#机每生产 24 h 使用的丙烷燃气为一组进行成本统计，以观察上述改善后的效果，对改造前后分别 10 组燃气统计结果如表 9、表 10 所示。

Table 9. Statistics of comprehensive gas cost before reconstruction

表 9. 改造前燃气综合成本统计表

时间	成坯量(t)	吨钢单价(元/t)	吨钢耗量(kg/t)
24 h	4125	2.3	0.16
24 h	4223	2.28	0.17
24 h	4334	2.23	0.16
24 h	4545	2.31	0.17
24 h	4205	2.36	0.17
24 h	4302	2.37	0.17
24 h	3998	2.35	0.17
24 h	4437	2.24	0.16
24 h	3982	2.26	0.16
24 h	5302	2.12	0.15
平均	4345	2.28	0.16

Table 10. Statistics of comprehensive gas cost after reconstruction

表 10. 改造后燃气综合成本统计表

时间	成坯量(t)	吨钢单价(元/t)	吨钢耗量(kg/t)
24 h	4223	1.60	0.12
24 h	4198	1.54	0.11
24 h	4198	1.51	0.11
24 h	4956	1.52	0.11
24 h	4109	1.56	0.12
24 h	3685	1.61	0.12
24 h	5447	1.49	0.10
24 h	3705	1.58	0.11
24 h	5372	1.49	0.10
24 h	4634	1.51	0.11
平均	4453	1.54	0.11

运行 t 检验法对改造前和改造后成本数据中的燃气吨钢耗量进行分析, 取显著性水平 $\alpha=0.05$, 计算方法如公式(10)所示, 自由度 df 计算如公式(11)所示。

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (10)$$

$$df = n_1 + n_2 - 2 \quad (11)$$

式中 \bar{X}_1 , \bar{X}_2 : 两组样本均值;

S_1^2 , S_2^2 : 两组样本方差;

n_1, n_2 : 样本量。

通过公式(10)、公式(11)的计算方法,对表 9、表 10 中的数据进行计算,可以得出 $t=1973$, $df=18$ 。

则在 $df=18$ 、显著性水平 $\alpha=0.05$ 的情况下,对应 p 值接近于 0,表明改造前后的燃气单耗差异几乎不可能由随机误差引起,结合 t 值结果,说明设备优化(如拉瓦尔管割嘴改造)和工艺参数调整对成本控制效果显著,具有工业推广价值,也表明 2#机的燃气综合成本得到了显著的下降,吨钢耗量从原有的 0.16 kg/t 减少到现在的 0.11 kg/t,证明了本文所实施的一系列改进的有效性。

5. 结论

1) 通过对火焰切割燃气原理及热力学的分析,建立了燃气单耗的数学模型,为降低火焰切割成本提供了理论依据;

2) 通过对长明火装置和割嘴型号的设备改造及切割参数的优化,提高了 2#机长明火燃气(丙烷)的燃烧效率,同时改善了铸坯断面的表面质量;

3) 运用 t 检验法对工业实践结果进行了验证,表明了设备优化和工艺调整(如拉瓦尔管割嘴改造)对成本控制效果显著,对同行具有一定借鉴性。

参考文献

- [1] 郭琴. 小方坯连铸机切割方式对比分析[J]. 山西冶金, 2021, 44(2): 166-167.
- [2] 吕浩增. 钢铁企业成本控制存在的问题及对策研究[J]. 中国集体经济, 2025(1): 109-112.
- [3] 邵凯旋, 白晓路, 蒋鹏, 等. 不同燃烧介质在连铸坯切割生产中的应用[J]. 连铸, 2024(1): 9-17.
- [4] 杨大师, 顾翔, 邓正泉, 等. 火焰切割机割嘴拉瓦尔管道设计与成形试验研究[J]. 制造技术与机床, 2016(6): 77-82.
- [5] Li, Z., Zhang, G., Li, Z., Zhang, Y. and Xu, W. (2008) Simulation of Gas Flow Field in Laval Nozzle and Straight Nozzle for Powder Metallurgy and Spray Forming. *Journal of Iron and Steel Research International*, **15**, 44-47. [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(08\)60264-2](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(08)60264-2)
- [6] Liu, X., et al. (2023) Machine Learning-Based Parameter Optimization for Flame Cutting of Continuous Casting Billets. *Journal of Materials Processing Technology*, **312**, 118-130.
- [7] Zhang, H., et al. (2024) High-Temperature Resistant SiC Composite Laval Nozzle for Efficient Flame Cutting. *Ceramics International*, **50**, 4567-4575.
- [8] 李亚江. 切割技术及应用[M]. 北京: 北京工业出版社, 2004.
- [9] 毋燕. 浅析连铸坯火焰切割在龙钢的应用[J]. 中国高新技术企业, 2014(9): 25-27.
- [10] 徐鑫. 数控火焰切割机的特性及切割工艺的优化研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(4): 33-35.
- [11] 徐良, 王威, 李小宇, 等. 大功率激光水下切割用喷嘴设计[J]. 焊接学报, 2013, 34(11): 57-60, 116.
- [12] 周文祥, 黄金泉, 周人治. 拉瓦尔喷管计算模型的改进及其整机仿真验证[J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2601-2606.
- [13] 陈立敏, 周昀, 宋世和. 厚板火焰切割的影响因素及工艺性研究[J]. 电焊机, 2024, 54(5): 98-103.