



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.05

电焊机能效提升路径与供电电源品质对能效测试结果的影响

黄 震, 阳宜均, 杨庆轩

成都三方电气有限公司, 四川 成都 610051

摘要: 电焊机是工业领域的耗能大户之一,其能效在近年来很受重视,且已经纳入能效标识管理范围。简要介绍了电焊机能效的概况,汇总分析了在检测过程中发现的影响电焊机能效的部分因素,并提出了针对性的提升方案。同时,选取三相/单相、逆变/工频电焊机,在网压、感应式调压、变频器、净化电源 4 种供电条件下开展对比测试,探究供电电源品质对效率(η)和功率因数(pf)检测结果的影响。研究表明,优化安装结构、调整电路参数、改进制造工艺等措施可有效降低设备内部损耗,使电焊机达到更高能效等级;供电电源的谐波畸变程度会对同一台电焊机的能效检测结果产生影响,能效测试需严格遵循相关标准中关于供电电源品质的要求。本文对电焊机的能效提升和能效检测有一定的参考价值。

关键词: 电焊机能效;能效提升;供电电源品质;能效检测结果

中图分类号: TG43 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)12-0032-07

Pathways for Improving Energy Efficiency of Welding Machines and the Impact of Power Supply Quality on Energy Efficiency Test Results

HUANG Zhen, YANG Yijun, YANG Qingxuan

Chengdu Sanfang Electrical Co., Ltd., Chengdu 610051, China

Abstract: Welding machines are among the major energy consumers in industrial fields. Their energy efficiency has received significant attention in recent years and has been incorporated into the scope of energy efficiency labeling management. This paper briefly introduces the current status of energy efficiency in welding machines, summarizes and analyzes factors affecting their energy efficiency identified during testing processes, and proposes targeted improvement strategies. Additionally, comparative tests were conducted on three-phase/single-phase and inverter/mains frequency welding machines under four power supply conditions—grid voltage, induction voltage regulation, frequency converter, and purified power supply—to investigate the impact of power supply quality on measurement results of efficiency (η) and power factor (pf). Research indicates that optimizing installation structures, adjusting circuit parameters, and improving manufacturing processes can effectively reduce internal losses in equipment, enabling arc welding machines to achieve higher energy efficiency ratings. The harmonic distortion level of the power supply significantly affects energy efficiency test results for the same welding machine, necessitating strict adherence to relevant standards regarding power supply quality requirements during efficiency testing. This study provides reference value for enhancing energy efficiency and conducting energy efficiency evaluations of arc welding machines.

收稿日期: 2025-10-12 修回日期: 2025-11-20

作者简介: 黄 震(1985—),工程师,主要从事电焊机、电子电气产品、测量仪表、石油产品检验检测工作。E-mail:461086311@qq.com。

Keywords: energy efficiency of welding machines; energy efficiency improvement; power supply quality; energy efficiency test results

引用格式:黄震,阳宜均,杨庆轩.电焊机能效提升路径与供电电源品质对能效测试结果的影响[J].电焊机,2025,55(12):32–38.

Citation:HUANG Zhen, YANG Yijun, YANG Qingxuan. Pathways for Improving Energy Efficiency of Welding Machines and the Impact of Power Supply Quality on Energy Efficiency Test Results[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 32–38.

0 引言

电焊机作为工业领域不可或缺的加工设备,其应用范围遍布制造业的各个角落。电焊机产品在使用中的年耗能总量在工业产品中高居第5至第8位,是工业领域典型的高耗能设备之一^[1]。在全球“双碳”目标与绿色制造战略^[2]深入推进的背景下,提升电焊机能效已成为降低工业能耗、推动制造业可持续发展的关键路径,也成为电焊机行业技术升级的核心方向。

回顾电焊机能效标准的发展历程,20世纪80年代后期至90年代中期,ZBJ 64006—88《弧焊变压器》标准^[3]曾对电焊机的效率(η)^[4]、功率因数(pf)^[4]和空载电流占比(I_{10}/I_N)^[5]提出了明确的要求;但受技术发展阶段与市场需求导向影响,在20世纪90年代后期至2010年,电焊机的标准基本没有对能效提出要求,导致电焊机能效研究与应用陷入近20年的空白期。近十几年来,面对严峻的能源与环境形势,能效再次成为标准和市场的核心焦点:GB/T 15579.1—2024《弧焊设备 第1部分:焊接电源》^[4]、GB 28736—2019《电焊机能效限定值及能效等级》^[5]等标准重新明确了效率(η)、空载功耗(P_{10})^[5]等关键能效参数要求,CEL043—2023《电焊机能源效率标识实施规则》^[6]更将能效标识纳入强制性管理范畴。

团队在电焊机能效的检测和协助制造商整改的过程中,总结汇总了部分对能效影响较大的因素,本文拟通过分析安装结构、电路结构和参数、功率元件、制造工艺等对电焊机能效的影响,提出部分提升能效的改进建议。此外,通过测试验证比对发现,电焊机能效测试用电源的品质会对能效测试结果产生影响,本文将通过汇总对比不同输入电源品质条件下的电焊机能效结果,分析输入电源品质对电焊机能效检测结果的影响。

1 电焊机能效

电焊机的能效是指其将输入电能转化为焊接所需有效热能的能力,核心评价指标为效率 η ,即输出功率与输入功率的比值。作为综合性技术指标,能效并非仅由效率单一决定,而是受到功率因数(pf)、空载损耗(I_{10} 或 P_{10})以及电源质量(如谐波失真THD)等多因素共同影响的系统工程^[7]。同时,电焊机作为电网负载,其谐波电流需符合GB/T 14549《电能质量 公用电网谐波》要求^[8],且运行也依赖于GB/T 15945《电能质量 电力系统频率偏差》规定的稳定电网频率^[9]。

电焊机的工作遵循以下基本规律:(1)功率转换基础: $P=I \cdot U$ 或 $P=I^2 \cdot R$,在电流(I)一定时,降低系统总阻抗(R 或 Z)可以减少内部电能损耗,提升效率;(2)频率(f)与阻抗: R (或 Z) $\propto f$,系统阻抗随频率升高而增加,这意味着非线性器件产生的高频谐波分量会导致额外的涡流、磁滞损耗,从而降低能效;(3)功率因数的影响: $\text{pf} \propto \text{CF}$ (峰值系数)或 Kf (波形系数),功率因数与电流波形的畸变程度密切相关,波形越偏离正弦波(峰值系数或波形系数越高) $\rightarrow$ 功率因数越低 $\rightarrow$ 导致视在功率增大 $\rightarrow$ 电网传输损耗增加;(4)空载损耗: $I_{10} \propto B$ (工作磁密度),空载电流的大小直接反映了变压器铁心的磁化水平,与铁心的工作磁密度成正比,优化磁路设计、选用高性能磁性材料是降低空载损耗、提升轻载能效的关键。

目前,大部分电焊机是采用变频逆变技术,在逆变过程中,输入电焊机的电流波形畸变严重,波形畸变就会产生大量的谐波。谐波会使电焊机的输入功率和功率因数发生变化,从而影响能效指标中的效率 η 和功率因数(pf)。其作用机理如式(1)、式(2)、式(3)所示。

$$\text{有功功率: } \cos(\varphi_n) \quad (1)$$

$$\text{视在功率: } S = \sqrt{U_{\text{eff}}^2 \cdot I_{\text{eff}}^2} \quad (2)$$

$$\text{功率因数: } pf = \frac{P}{S} \quad (3)$$

式中 U_{eff} 为输入有效电压值; I_{eff} 为输入有效电流值; U 为输入电压的有效值; I_1 为输入电流基波的有效值; ϕ 为基波电压与基波电流的相位差; I_n 为输入第 n 次谐波电流有效值; U_n 为输入第 n 次谐波电压的有效值。

电焊机的安装结构、电路拓扑和参数选择、功率器件选型以及制造工艺等因素对能效的影响容易被忽视。实践证明,通过优化这些方面来提升能效,并不一定意味着成本增加。例如,一个更优的电路结构可能降低对散热的要求,这些都可能在实际生产中实现性能提升与成本降低的双赢。

2 安装结构优化对电焊机能效的提升

通过安装结构的改进,如减少接头、控制导体冗余长度,可以降低基于 $P=I \cdot U$ 或 $P=I^2 \cdot R$ 的损耗。

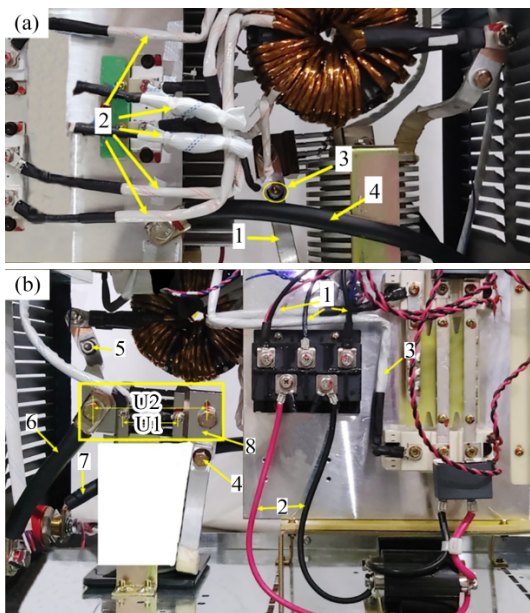


图1 安装结构与 η 相关的示意

Fig. 1 Schematic diagram of the installation structure related to η

(1) 基于 $P=I^2 \cdot R$ 的线损优化。

电焊机电流主回路的导线、导电排等导体存在固有内阻 r 。次级回路的导线/导电排,如图 1a 中的 4 和图 1b 中的 6、7 这种次级的导线或导电排虽截面

积较大,但工作电流可达数百安培,电流的平方更大,线损就大;初级回路部分导线,如图 1a 中的 2 和图 1b 中的 1、2、3,虽工作电流仅数十安培,但因导线的截面积小导致内阻偏大,同样线损明显。

以 500 A 的 MMA 举例,结合表 1 中导体电阻参数进行量化分析。输入回路主线路采用标称截面积 6 mm^2 的导体,平均有效电流为 35 A,若存在 1 m 导体冗余长度,其线损 $P_{1r} = (35 \times 35 \times 3.08 \text{E-}3) \times 3 \approx 11 \text{ W}$; 输出回路采用标称截面积 70 mm^2 的导体,330 mm 冗余长度对应的线损 $P_{2r} = (500 \times 500 \times 0.268 \text{E-}3) \times 0.33 \approx 22 \text{ W}$ 。可见,次级回路因工作电流更大,其导体冗余长度对总损耗的影响更为明显。

表1 电焊机的电流主回路常见电缆的每米电阻值

Table 1 Resistance per meter of common cables in the main current circuit of welding machines

导体标称截面积 /mm ²	20 °C 时每米最大导体电阻(Ω/m)	
	铜	铝
2.5	7.41E-3	—
4	4.61E-3	—
6	3.08E-3	—
10	1.83E-3	3.08E-3
16	1.15E-3	1.91E-3
25	0.727E-3	1.20E-3
35	0.524E-3	0.868E-3
50	0.387E-3	0.641E-3
70	0.268E-3	0.443E-3
95	0.193E-3	0.320E-3

(2) 基于 $P=IU$ 的损耗优化。

图 1b 中标识 8 为分流器,本身存在固有压降。以 400 A 额定输出的焊机为例,采用 500 A/75 mV 规格分流器,当通过 400 A 电流时,分流器 $U_1=75 \text{ mV}$,其 U_2 (测量点分别放在分流器主电流接线端外侧) 假设为 100 mV,则分流器的功耗 $P_{\text{FL}} = 400 \times 100 \text{E-}3 = 40 \text{ W}$,所以不能忽略传感器的功耗。图 1a 中的标识 3、图 1b 中标识 4、5 是次级回路的转接头,有的产品为了安装和加工方便,可能出现多个转接头,流过接头产生的压降会带来损耗,因此次级主电路应尽量减少接头数量。

(3) 工程案例验证。

选取某型号 ZX7-500 手工弧焊电源为测试对象,其初始能效测试效率为 86.5%,未达到 GB 28736—2019《电焊机能效限定值及能效等级》中 2

级能效(效率 $\geq 87\%$)要求。通过拆解焊机发现该焊机存在两项安装结构缺陷:一是电抗器与输出端距离较远,需要附加一根铝排;二是采用 500 A 分流器进行电流取样。客户调整了产品安装结构:将电抗器靠近输出端安装,取消了原来的附加铝排,电抗器直接与输出端子连接,并将电流取样改为霍尔元件传感器取样。优化后重新进行能效测试,其效率为 88.2%,达到 2 级能效。

3 电路拓扑结构和电路主要参数选择

电路拓扑结构的选型与电路主要参数的匹配是决定电焊机能效的先天性因素。不同的电路结构在效率(η)、功率因数(pf)、空载电流(I_0)和谐波失真(THD)等方面表现出显著差异:(1)工频交流焊机:具有 η 高的优点,但其pf低, I_0 大,且通常不考核THD影响;(2)工频直流焊机:其 η 低于工频交流焊机,同时pf较低, I_0 较大,THD较小;(3)硬开关逆变与软开关逆变相比,硬开关逆变 η 较低,pf较低, I_0 较大,且THD较高;(4)三相逆变与单相逆变相比,三相输入结构在能效上更具优势,表现为 η 高、pf高、THD低;(5)带pfc与无pfc的逆变相比,增加功率因数校正(pfc)电路能有效改善输入特性,使电路具有 η 高、pf高、THD低的综合优势;(6)空载电压 U_{20} 越高,维持空载状态所需的能量越大,导致 η 下降;(7)弧压 U_{2N} ,在相同的输出功率下,较高的额定弧压通常意味着更高的效率($U_{2N} \uparrow \rightarrow \eta \uparrow$),因此,手工电弧焊(MMA)的效率通常高于钨极惰性气体保护焊(TIG)。

在主电路参数的选择上,多项因素共同影响能效,如导磁材料、主导线截面、逆变主频、滤波电容的容量和损耗角($\tan\delta$)、空载电压等。需要明确的是,不同规格和焊接工艺的焊机,其电路参数存在差异。参数选择的优先级应为:首先保证产品的稳定可靠,继而满足工艺要求,最终目标是满足并持续提高产品质量。

案例验证。测试某客户的WS-350氩弧焊电源的功率因数是0.86,客户希望自行整改,使之能达到2级能效(2级要求功率因数不低于0.89)。查看焊机的主回路电路图,其输入整流之后的滤波电容是

由多只电容并联,并联后的总容量为 240 μF ,过大的电容容量导致输入电流波形畸变加剧。客户基于参数优化逻辑,将滤波电容总容量调整为 180 μF 。重新测试,其功率因数为 0.91,达到 2 级能效。

4 变压器制造工艺对工频焊机能效的影响

如图 2a 所示,变压器有焊接方式和夹紧方式两种,焊缝的数量、宽度及深浅,夹件的辅助绝缘等,都会直接影响到变压器的涡流损耗。如图 2b 所示,电阻焊变压器的穿心式拉紧螺栓若与铁心未实现有效绝缘,尤其是单相变压器,会导致涡流损耗差异很大。铁心压紧后的焊接工艺应注意:(1)工艺要固定,不允许随意加大焊接规范;(2)不能随意在夹件上起弧,造成夹件与铁心短路;不能随意对焊缝进行补焊。

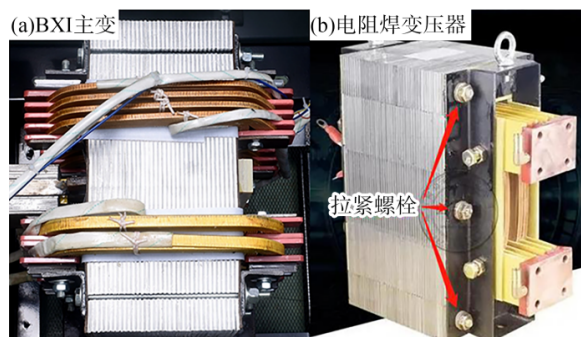


图 2 变压器制造工艺

Fig. 2 Transformer manufacturing process

案例验证。某 DN1-200 电阻焊机(工频)在能效测试过程中,预热阶段电阻焊机的机身(外壳)发热严重,测试数据显示其短路损耗达到 12 kW,空载电流达到 50 A,未达到电阻焊机能效门槛 3 级的要求。与客户联合排查发现,问题是变压器与机身距离过近,且未对机身采取减小涡流的措施,造成机身钢板(厚度 25 mm)的涡流很大,钢板发热严重。重新加工机身,将相关部分加工多个条状孔,阻断涡流通路,组装后重新测试,短路损耗降至 7.5 kW,空载电流降至 32 A,符合电阻焊机 3 级能效的要求。

通过对上述四个方面的分析可见,提升电焊机的能效会涉及电路结构及其参数选择、内部结构优化、核心部件制造工艺提升、安装结构优化等,需要

经过设计和验证,是一项系统性的工程。实践证明,提升电焊机的能效并非必然导致成本增加,“高能效等于高成本”的观点并不正确。

5 供电电源品质对能效检测的影响

经查询,包括但不限于GB 20943—2025《交流—直流和交流—交流电源能效限定值及、能效等级》、GB 21521《复印机、打印机和传真机能效限定值及能效等级》、GB 24850《平板电视与机顶盒能效限定值及能效等级》等存在非线性电器元件产品的能效标准对能效测试的电源品质都有要求,电焊机产品的能效标准GB 28736亦不例外,大部分是要求用于能效测试的供电电源的谐波不能超过一定的百分比数值,如3%、5%等,也有用电压峰值与有效值的比值来表达对电源品质的要求,如规定测试电压的峰值介于其正有效值的1.34倍至1.49倍之间,只是对电源波形品质要求的表达方式,要求的实质是一样的。

现行的GB/T 8118《电弧焊机通用技术条件》第7.8b)条是测试用电源电压符合要求(电源电压无畸变)^[10],电焊机的为输入电流为非正弦波形(有畸变)时前提,将式(1)简化为

$$pf = \frac{U \times I_1 \times \cos \phi}{U \times I} = \frac{I_1}{I} \times \cos \phi = k_d \times k_\phi \quad (4)$$

$$pf = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD)^2}} \times \cos \phi \quad (5)$$

式中 U 为输入电压的有效值; I_1 为输入电流基波的有效值; ϕ 为基波电压与基波电流的相位差; I 为输入电流有效值; k_ϕ 为位移因数, $k_\phi = \cos \phi$ 。

畸变因数 k_d 表示基波电流相对值(以非正弦波电流有效值 I 为基值)

$$k_d = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 + \dots}} \quad (6)$$

输入电流的总谐波畸变率THD为

$$THD \approx \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (7)$$

式中 I_n 为第 n 次谐波电流有效值。

式(1)与式(4)的表达方式有差异,但其实际一致,式(1)或某些教科书采用的是定义,这是理论基础。在实际应用中,若电压和电流同时存在较大的谐波,会带来很大的测试难度,测试的可操作性不强。为了实现可操作性,通常是约定供电的电压符合要求,就是通常说的“源是干净的”,这样就只需考虑用电设备(如电焊机)自身带来的谐波电流。

有了这些公式作为理论依据,就不难理解后面给出的不同供电电源情况下的电焊机能效测试结果出现差异的原因。

如图3所示,随机选取6台电焊机(S1~S6,含三相与单相逆变机型),在不同的供电电源品质条



图3 电焊机产品基本信息

Fig. 3 Basic information of welding machine products

件下进行能效对比测试,再对测试结果进行比较。分别为:厂家1的S1(3相)、厂家2的S2(3相)、厂家3的S3(1相)、厂家4的S4(1相)、厂家5的S5(1相)和厂家6的S6(1相)。

对于同样的产品、相同状态下,(1)用网压、(2)

感应式调压、(3)变频器、(4)净化电源分别作为电焊机能效测试的电源输入,做四个能效测试结果对比。测试数据包括空载电流、额定输入电流、额定输入功率、额定输出功率、功率因数、电焊机输入端口处的电源品质-谐波,对比结果请见表2、表3。

表 2 不同企业的三相电弧焊机在不同输入电源条件下能效测试结果

Table 2 Energy efficiency test results of three-phase welding machines from different enterprises under different input power conditions									
负载	参数	S1(3相)				S2(3相)			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
空载	I_{10}/A	0.3	0.2	0.3	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4
	Uthd(品质)/%	3.3	3.2	0.3	0.4	3.4	3.2	1	0.3
额定 负载	U_{AN}/V	223.4	220.9	217.2	222.4	224.9	219.8	217.4	222.4
	U_{BN}/V	224.5	220.1	218.2	222.3	226	220.7	247.7	222.3
	U_{CN}/V	224.4	219.2	223.5	222.1	225.7	218.7	223.5	222.2
	I_a/A	17.3	13.6	13.7	17.2	13.2	15.4	11.1	11.23
	I_b/A	17.3	13.9	14	16.95	13.3	15.6	11.2	11.17
	I_c/A	16.9	13.7	13.6	17.25	13.1	15.4	11	11.31
	P_1/kW	6.26	6.26	6.25	6.373	6.43	6.43	6.40	6.464
	pf/kW	0.542	0.69	0.69	0.558	0.72	0.631	0.873	0.864
	U_2/V	28	28.1	28.1	28.14	28	28	28	28
	I_2/A	200.1	200.4	200.8	200.4	200.1	200.1	200.1	200
	P_2/kW	5.603	5.631	5.642	5.639	5.603	5.603	5.603	5.6
	I_{10}/A	4.9	6.1	4.6	0.52	6.5	8	4.5	0.25
η (计算值,%)		89.50	89.95	90.27	88.48	87.14	87.14	87.55	86.63

表 3 不同企业的单相电弧焊机在不同输入电源条件下能效测试结果

Table 3 Energy efficiency test results of single-phase welding machines from different enterprises under different input power conditions																	
负载	参数	S3(1相)				S4(1相)				S5(1相)				S6(1相)			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
空载	I_{10}/A	0.3	0.4	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.39	0.5	0.5	0.5	0.72
	Uthd(品质)/%	3.1	6.1	0.9	0.4	3.1	6.6	0.9	0.7	3.2	5.8	1.1	0.4	2.6	5.2	1	0.7
额定 负载	U_{AN}/V	223.1	126.9	124.8	128.5	224.7	127.2	125.3	223.1	223.4	220.1	217.3	222.1	221	221.5	216.1	222.2
	U_{BN}/V	—	127.1	126.5	129.6	—	127.4	126.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I_a/A	36.7	33.9	38.6	38.46	37	32.3	34.8	36.7	35.5	32.3	35	38.19	42.1	38.6	42.4	43.91
	I_b/A	—	33.9	38.6	38	—	32.3	34.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	P_1/kW	5.03	5.11	5.14	5.10	4.68	4.89	4.55	5.03	4.98	4.87	4.87	4.988	6.02	5.86	5.93	5.988
	pf/kW	0.609	0.599	0.525	0.602	0.556	0.602	0.515	0.609	0.621	0.598	0.63	0.589	0.64	0.609	0.639	0.669
	U_2/V	26.3	26.3	26.3	26.44	25.9	26.3	25.5	26.3	26.4	26.3	26.3	26.2	24	24	24	24.1
	I_2/A	160.5	160.4	160.7	160	155.7	160.6	154	160.5	160.9	160	160.2	160.4	200.6	200	200.6	200.5
	P_2/kW	4.221	4.219	4.226	4.224	4.033	4.224	3.927	4.221	4.248	4.208	4.213	4.202	4.814	4.8	4.814	4.832
	Uthd(品质)/%	6.2	11	5.6	1.42	2.4	11.7	5.7	2.2	5.8	10.5	4.9	1.2	6.2	11.8	4.8	1.3
η (计算值,%)		83.92	82.56	82.22	82.82	86.18	86.38	86.31	83.92	85.30	86.41	86.51	84.24	79.97	81.91	81.18	80.69

由表2、表3可知,在不同的供电电源品质条件,即供电电源的电压存在不同的畸变,电压谐波 Uthd 不同,同一台电弧焊机的能效测试结果出现差异,而且与供电电源的谐波 Uthd 的大小无规律可循。

从能效的测试结果对比可见,包括电焊机在内的存在非线性用电器件的电器产品的能效测试必须保证测试用供电电源的品质达到相应产品的能效标准要求,否则可能出现能效测试结果的差异。

参考文献:

- [1] GB/T 2900.22—2005, 电工名词术语 电焊机[P].2005.
 - [2] 李潮东. 绿色环保节能减排是全球共同的使命[EB/OL]. (2023-08-16) [2025-10-12]. https://www.cqn.com.cn/pp/content/2023-08/16/content_8969930.htm.
 - [3] JB/T 7834—1995, 弧焊变压器[P].1995.
 - [4] GB/T 15579.1—2024, 弧焊设备 第1部分: 焊接电源[P].2024
 - [5] GB 28736—2019, 电焊机能效限定值及能效等级[P].2019.
 - [6] CEL 043—2023, 电焊机能源效率标识实施规则[P].2023.
 - [7] 俞珊, 徐志望, 董纪清. 开关电源中电解电容寿命预测分析[J]. 电源学报, 2016, 14(6): 87-92+121.
YU S, XU Z W, DONG J Q. Analysis of Electrolytic Capacitor Life Prediction in Switching Power Supply [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(6): 87-92+121.
 - [8] GB/T 14549, 电能质量 公用电网谐波[P].1993.
 - [9] GB/T 15945, 电能质量 电力系统频率偏差[P].1995.
 - [10] GB/T 8118, 电弧焊机通用技术条件[P].2010.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>
-
- ☞ 上接第31页
- ferrous Metals, 2022, 32(09): 2556-2567.
 - [5] 蒋召平, 冯梦楠, 罗震, 等. 铝/铜异质金属超声波焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2018(47): 82-87.
JIANG Z P, FENG M N, LUO Z, et al. Study on ultrasonic welding technology of aluminum/copper heterogeneous metals [J]. Welding Technology, 2018, 47: 82-87.
 - [6] 王文明, 刘兰胜, 程根健, 等. 铜铝异种金属激光焊接接头形貌及性能研究[J]. 装备制造技术, 2021(12): 144-146.
WANG W M, LIU L S, CHENG J G, et al. Study on the morphology and properties of laser welded joint of Cu-Al dissimilar metals [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(12): 144-146.
 - [7] 亓永新, 杨瑞鹏. 铝铜焊接进展[J]. 焊接技术, 2000, 29(5): 4-5.
Qi Y X, YANG R P. Progress of aluminum/copper welding[J]. Welding Technology, 2000, 29(5): 4-5.
 - [8] Peng H, Chen D L, Bai X F, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Mg-to-Al Dissimilar Welded Joints with an Ag Interlayer Using Ultrasonic Spot Welding[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(2): 552-563.
 - [9] GB/T 2654—2008, 焊接接头拉伸试验方法[S].
 - [10] 宋成. 纳米颗粒诱导低能量超声焊接铜—铝接头的组织和性能[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2020.
SONG C. Microstructure and Property of Nanoparticle-induced Low Energy Ultrasonic Welding of Cu-Al Joint [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2020.
 - [11] Massalski T B, King H W. Alloy phases of the noble metals [J]. Progress in Materials Science, 1963, 10: 3-78.
 - [12] 谷晓燕, 孟政宇, 刘婧, 等. 焊接能量对 Mg/Ti 超声波焊接接头微观组织与力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(06): 2139-2146.
GU X Y, MENG Z Y, LIU J, et al. Effect of welding energy on microstructure and mechanical properties of Mg/Ti ultrasonic welded joints [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(06): 2139-2146.
 - [13] Witusiewicz V T, Hecht U, Fries S G, et al. The Ag-Al-Cu system II. A thermodynamic evaluation of the ternary system [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 387(1-2): 217-227.
 - [14] 马勇成. 铜铝超声波焊接接头组织及性能研究[D]. 吉林: 长春工业大学, 2022.
MA Y C. Study on Microstructure and Properties of Ultrasonic Welded Joint of Copper and Aluminum [D]. Jilin: Changchun University of Technology, 2022.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>