

重点关注

采用Cu-xTi合金焊材的紫铜厚大结构件 He-TIG焊缝组织及性能研究

李一楠, 彭子龙

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266000)

摘要:通过在焊材中添加合金元素 Ti 可以有效抑制紫铜厚大结构件焊接时热裂纹的问题, 焊材中的钛与溶入熔池的氧反应生成 TiO_2 上浮至熔池表面, 凝固形成焊渣, 从而避免裂纹源的产生。针对紫铜厚大结构件 He-TIG 焊自行研发了 Cu-xTi 合金焊材。焊材中 Ti 含量对紫铜焊接热裂倾向的影响明显, Ti 含量应控制在 2% 左右。当 Ti 含量达到 4% 时, 由于焊缝中形成了 $(\beta\text{-TiCu}_4 + \text{TiCu}_2)$ 的低熔共晶液膜从而增加了焊缝金属的热裂倾向。力学性能试验表明, 采用 Cu-xTi 合金焊材可以获得良好力学性能的焊缝金属和接头, 通过 Ti 元素的添加, 在不降低焊缝金属及接头冲击韧性和塑性的情况下, 可以大大提高强度和硬度。

关键词: He-TIG 焊; 紫铜厚大结构件; 热裂纹; Cu-xTi 合金焊材

中图分类号: TG42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2303(2013)07-0001-06

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2013.07.01

Microstructure and mechanical performance of the welds by He-TIG welding of copper using Cu-xTi welding alloys

LI Yi-nan, PENG Zi-long

(Department of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266000, China)

Abstract: The hot cracking in copper welding is eliminated by adding element Ti in the welding materials. It has been found that element Ti melt in welding pool combines with oxygen to generate TiO_2 which flow up to the surface of the welding pool and form as slag on the weld bead after solidification. The new welding materials Cu-xTi welding alloys special for copper welding are investigated and developed. The degree of addition of Ti is critical if the susceptibility to cracking is to be reduced. If the level is allowed to exceed 4wt%, more low-melting point eutectics ($\text{TiCu}_2 + \beta\text{-TiCu}_4$) will be formed in the weld, and cracking susceptibility will increase. Although adding Ti increases the strength and hardness of the weld compared to the copper base, the plastic properties and the impact ductility are not significantly decreased.

Key words: He-TIG welding; copper; hot cracking; Cu-xTi welding alloys

收稿日期: 2012-12-13; 修回日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105218)

作者简介: 李一楠(1980—), 女, 山东淄博人, 博士, 主要从事先进焊接技术及工艺、焊接过程数值模拟的研究工作。

0 前言

紫铜具有优良的导电性、导热性、延展性, 以及在某些介质中良好的抗腐蚀性能, 成为电子、化工、船舶、能源动力、交通等工业领域中高效导热和换

热管道、导电、抗腐蚀部件的优选材料。长期以来紫铜的焊接主要是气焊^[1]、焊条电弧焊^[2]、钎焊^[3]、TIG 焊^[4-5]、埋弧焊、扩散焊等方法。随着焊接技术的发展,又采用了电子束^[6]、激光束等高能热源进行焊接,取得了良好的效果,但受设备、成本、生产周期等方面的影响而不能得到广泛的应用。目前,在工业领域中应用最为广泛的是 Ar-TIG 焊。在 TIG 焊接中,由于紫铜材料具有较大的导热系数、热膨胀系数和凝固收缩率等热学特性,热裂纹是紫铜厚大结构件焊接中出现的主要焊接缺陷,成为制约紫铜材料应用的瓶颈。热裂纹的成因一般认为是电弧焊时大气中的 O₂ 被电弧电离并以 O²⁻ 的形式溶于熔池中,在凝固过程中在 α -Cu 晶界上形成了 Cu 和 Cu₂O 的低熔共晶液膜,液膜在收缩应力作用下被拉开形成热裂纹。在工程实际中,对于紫铜厚大结构件的 Ar-TIG 焊一般采取焊前预热的方法,一方面可以弥补氩弧热输入不足所引起的未熔合问题,另一方面可以降低凝固时的收缩应力和应变,避免宏观焊接热裂纹的出现。但是,由于氧的存在,在焊缝中形成了大量微观热裂纹,从而影响了紫铜厚大结构件的使用性能。研究表明,对于 10 mm 厚紫铜板焊接时,氩弧不预热时的温度场分布接近氩弧预热 400 ℃ 时的温度场分布。说明氩弧可以实现紫铜厚大结构件的不预热 TIG 焊接。

针对紫铜厚大结构件 He-TIG 焊微观热裂纹严重的问题,提出了在铜合金焊材基础上添加脱氧元素 Ti 来控制熔池中的氧含量从而达到抑制微观热裂纹的效果,自行研发了新型焊材 Cu-xTi 合金焊材。本研究首先采用 Cu-xTi 合金焊材进行厚板刚性拘束热裂纹实验对焊缝金属的热裂倾向进行测量。其次对焊缝组织的微观形貌进行观察,研究合金元素 Ti 对焊缝组织变化规律及对热裂纹的抑制效果的影响。最后对采用 Cu-xTi 合金焊材的焊缝金属的力学性能进行测量和评价。

1 实验条件

母材选用牌号为 T2 的紫铜材料,工件尺寸 100 mm×250 mm×10 mm。分别采用 HS201 和研发的 Cu-xTi 合金焊材进行刚性拘束热裂纹实验(GB13817-92)评价紫铜厚板的热裂倾向。刚性拘束热裂纹实验过程如图 1 所示,HS201 和 Cu-xTi 合金焊材成分如表 1 所示。分别采用 HS201 和 Cu-xTi 合金焊材进

行了紫铜厚板 He-TIG 焊焊接实验,工艺条件如下:对接接头,30° 单 V 型坡口,焊接电流 280 A,保护气流量 10 L/min,三层多道焊。经切割、打磨、抛光、腐蚀后的焊缝金属采用光学显微镜(Olympus-PMG3)、扫描电镜(S-570)及透射电镜(Philips CM12)观察。采用万用试验机(Instron-5569)、显微硬度计(HXD-1000TM)及摆锤冲击试验机测量焊缝金属的强度、硬度和冲击韧性。

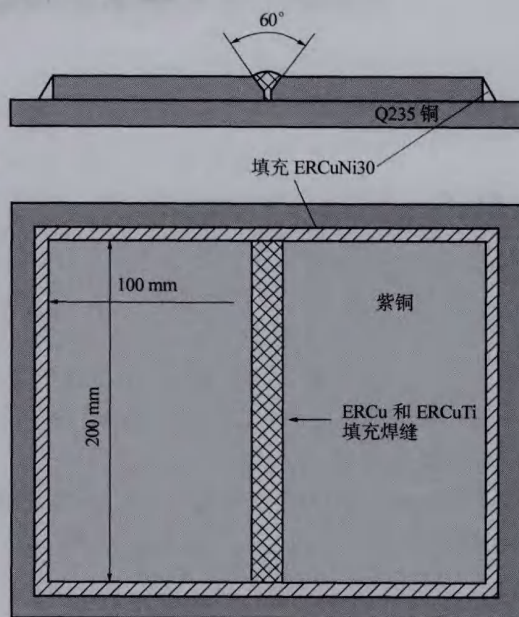


图 1 刚性拘束热裂纹试验示意

表 1 焊接材料成分

焊材	w(Cu)	w(Sn)	w(Mn)	w(Si)	w(Ti) %
HS201	98.4	1.0	0.3	0.3	—
Cu-2Ti	Rem	—	—	—	2.0
Cu-4Ti	Rem	—	—	—	4.0

2 结果和讨论

表 2 为刚性拘束热裂纹实验条件下采用 HS201、Cu-2Ti 及 Cu-4Ti 焊材时焊缝金属的裂纹率。如图 2 所示,采用 HS201 时焊缝表面和断面的裂纹长度超过了焊缝长度的一半。表面热裂纹从弧坑中起裂,逆着焊接方向沿焊缝中心扩展,断面上微观热裂纹沿 α -Cu 晶界开裂。说明在不预热 He-TIG 焊工艺条件下,虽然可以实现紫铜厚板焊缝成形,但却存在着较严重的焊接热裂纹。当在焊材中添加 Ti 后即采用 Cu-2Ti 焊材时,焊缝表面和断面均无热裂纹出现,当焊材中的 Ti 含量提高时即采用 Cu-4Ti

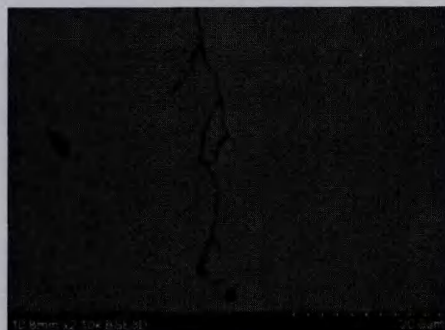
焊材时焊缝断面上出现了 6.5% 的微观热裂纹,如图 3 所示, α -Cu 晶界及亚晶界上存在金属间化合物,裂纹沿着 α -Cu 晶界扩展。

表 2 刚性拘束热裂纹实验条件下采用不同成分焊材焊缝金属裂纹率

焊材	表面裂纹率/%	断面裂纹率/%
HS201	51.3	83.3
Cu-2Ti	0	0
Cu-4Ti	0	6.5



a 表面宏观热裂纹



b 断面微观热裂纹

图 2 使用 HS0201 时焊缝中的裂纹



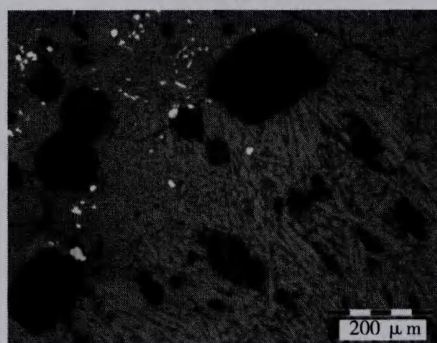
图 3 使用 Cu-4Ti 合金焊材时焊缝中的裂纹

在 He-TIG 焊时,空气中的 O_2 会混入电弧中并被电弧电离,以 O^2 的形式溶解进入熔池,另外由于在电弧加热作用下近缝区的母材表面被氧化,随着温度升高母材表面的氧化层被熔化的 O^2 进入

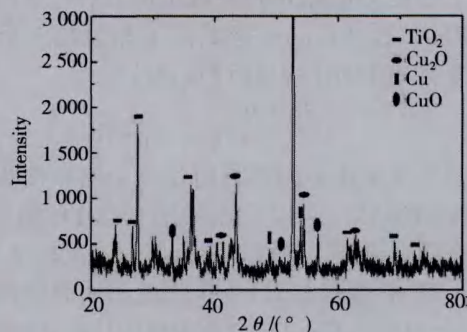
熔池。当熔池中有合金元素 Ti 时,由于高温作用 Ti 原子易失去外层电子形成 Ti^{4+} , Ti^{4+} 与游离在熔池中的 O^2 结合生成 TiO_2 , TiO_2 具有熔点高、密度小的特点,在熔池中不断上浮,最后存留在焊缝表面以焊渣的形式存在。图 4a 为采用 Cu-2Ti 合金焊材焊接时焊缝表面,表面有灰色焊渣,对焊渣微观组织进行观察发现,焊渣内存在条状组织(图 4b)。对焊渣进行 XRD 分析可知,焊渣中主要成分是 TiO_2 及铜的氧化物(见图 4c)。结果说明,在焊材中添加合金元素 Ti 后可以有效抑制由于熔池氧化而形成的焊接热裂纹。



a 焊缝表面的焊渣



b 焊渣的微观组织形貌

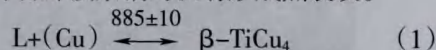


c 焊渣的 XRD 结果

图 4 采用 Cu-2Ti 合金焊材时的焊渣

采用 Cu-2Ti 合金焊材对 10 mm 厚紫铜板进行

He-TIG 焊时焊缝的微观形貌如图 5 所示。从图 5a 可知,焊缝组织主要以块状 α -Cu 为主,形貌接近于 HS201 焊缝组织,唯一不同的是在 α -Cu 晶粒内部存在着点状分布的组织(见图 5b),通过透射电镜和衍射花样分析可知点状组织为金属间化合物 β -TiCu₄。出现 β -TiCu₄ 的原因是在焊缝凝固过程中,合金元素 Ti 首先固溶于 α -Cu 中,由于冷却速度快,Ti 在 α -Cu 中的最大固溶度为 2.55%,其余的 Ti 元素偏聚在 α -Cu 枝晶间,形成显微偏析。当偏聚的 Ti 元素达到一定浓度时,冷却到 885 °C 将发生包晶转变(式 1)生成 β -TiCu₄,依附于先结晶 α -Cu 生长。虽然包晶反应在低于紫铜熔点温度发生,但是由于富钛液相少,凝固前没有形成连续分布低熔液相薄膜,凝固后生成的 β -TiCu₄ 以点状弥散分布在 α -Cu 枝晶间,没有造成开裂的裂纹源,因此采用 Cu-2Ti 合金焊材焊接紫铜时没有形成热裂纹。



采用 Cu-4Ti 合金焊材进行焊接时焊缝中出现了微观热裂纹。图 6a 是 Cu-4Ti 焊缝金属的微观组织形貌,可以看出除了 α -Cu 外焊缝中还存在着连续的网状分布的金属间化合物,经过投射电镜和衍射花样分析可以判断焊缝中存在着 TiCu₂ 和 β -TiCu₄ 两种金属间化合物(图 6c、6d)。Cu-4Ti 焊缝金属的结晶过程与 Cu-2Ti 焊缝金属的有所不同。在凝固过程中,熔池中 Ti 元素含量较高,除了固溶到 α -Cu 中的 Ti 以外,大量的 Ti 元素偏聚在 α -Cu 的枝晶间。凝固进行到约 875 °C 时,发生了共晶反应(见式 2),由于 Ti 含量较高,共晶液相较多,形成了连续的网状分布的 TiCu₂ 和 β -TiCu₄ 共晶组织。凝固时连续分布的 TiCu₂ + (β -TiCu₄) 低熔共晶液相形成了热裂纹的裂纹源,在收缩应力和应变的作用下,TiCu₂ + (β -TiCu₄) 低熔共晶液相被拉开形成了不同于采用 HS201 焊接时的热裂纹。

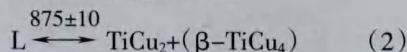
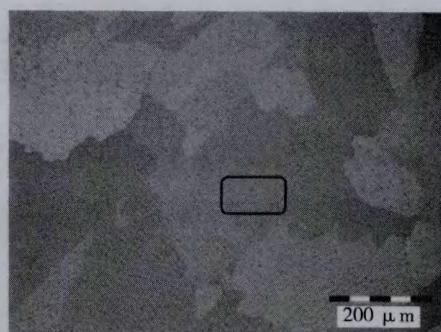
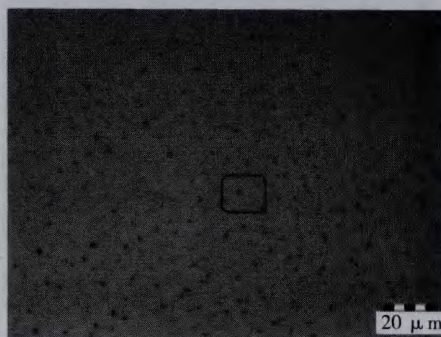


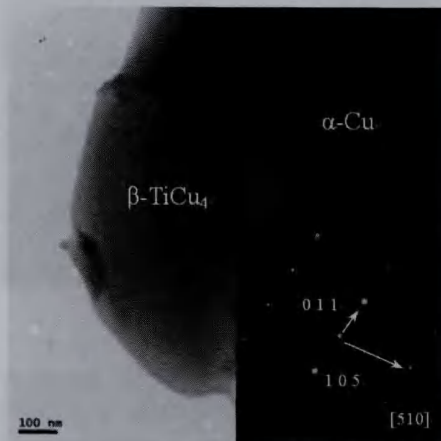
图 7 为采用不同焊材时焊缝金属和接头的力学性能检测结果。可以看出,使用 HS201 时由于焊缝中存在微观热裂纹使得焊缝金属的强度较低,当使用 Cu-2Ti 合金焊材时,抗拉强度和屈服强度均高于母材;当使用 Cu-4Ti 合金焊材焊接时,微观热裂纹的存在使得抗拉强度下降至 100 MPa。从接头的硬度分布可以看出,当使用 Cu-2Ti 合金焊材时,焊缝中心硬度最高位 90 HV,略高于 HS201 焊缝;使用



a α -Cu 上弥散分布金属间化合物



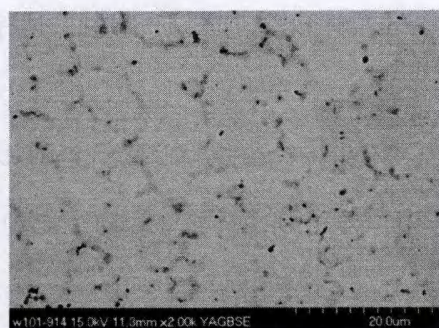
b 金属间化合物呈点状分布



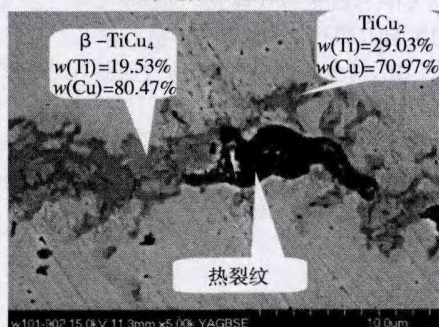
c β -TiCu₄

图 5 Cu-2Ti 焊缝金属的微观形貌

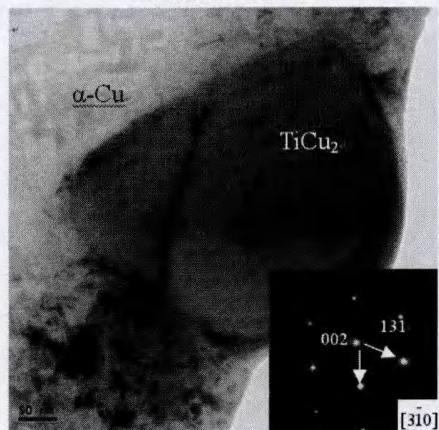
Cu-2Ti 合金焊材时焊缝硬度有大幅度提高,升至 153 HV;使用 Cu-xTi 合金与 HS201 相比强度和硬度高主要与焊缝金属中 Ti 的分布有关。合金元素 Ti 通过以下两种方式对焊缝金属进行强化,一是固溶强化,使用 Cu-2Ti 合金焊材时凝固到室温时 α -Cu 中固溶了 2.55% 的 Ti,Ti 的固溶引起了 α -Cu 的晶格畸变从而达到强化效果。二是第二相强化,凝固时焊缝中生成了第二相质点 TiCu₂ 和 β -TiCu₄,强度和硬度均高于基体。从图 7 中还可以看出,当采用



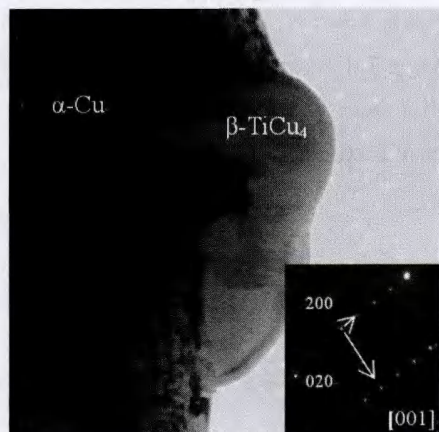
a 焊缝微观组织形貌



b 热裂纹组织形貌

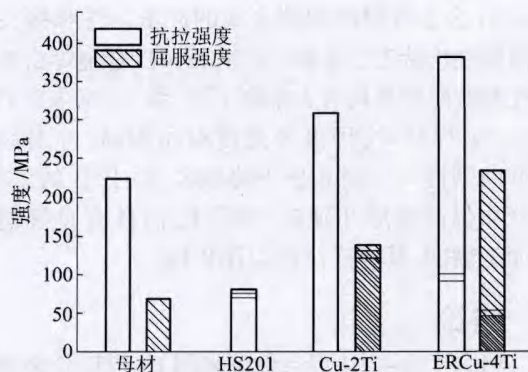


c TiCu₂

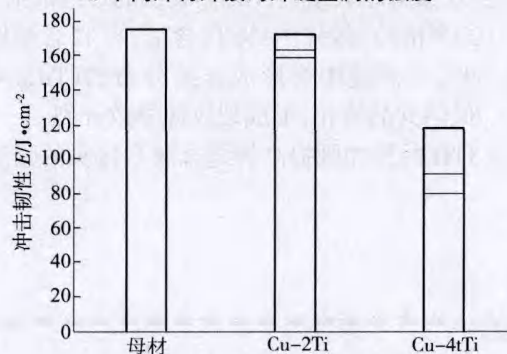


d β -TiCu₄

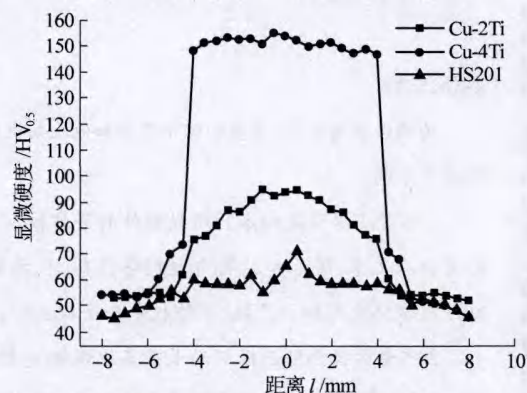
图 6 Cu-4Ti 焊缝金属的微观形貌



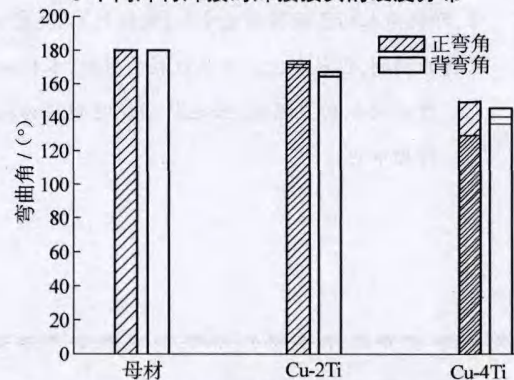
a 不同焊材焊接时焊缝金属的强度



b 不同焊材焊接时焊缝金属的冲击韧性



c 不同焊材焊接时焊接接头的硬度分布



d 不同焊材焊接时焊接接头的弯曲性能

图 7 不同焊材焊接时焊缝金属及接头的力学性能

Cu-2Ti 合金焊材时焊缝金属的冲击韧性和接头的弯曲塑性均接近于母材;采用 Cu-4Ti 合金焊材冲击韧性和弯曲塑性均有大幅度下降。综上,当采用 Cu-2Ti 合金焊材时,硬度和强度有所提高,冲击韧性和弯曲塑性与母材相比下降很少。由于 Ti 的添加,焊缝在提高强度和硬度的同时,仍具有良好塑性和冲击韧性,具有广泛的应用价值。

3 结论

(1)在 He-TIG 焊条件下采用 Cu-2Ti 合金焊材可以实现紫铜厚大结构件无热裂纹的焊缝成形。

(2)严格控制焊材中的 Ti 含量,当 Ti 含量增加到 4%时,在焊缝中会形成连续分布的(TiCu₂+β-TiCu₄)低熔共晶液相,形成裂纹源导致开裂。

(3)Ti 的添加既提高焊缝金属和接头的强度和

韧性,冲击韧性和塑性也接近于母材,具有广泛的使用价值。

参考文献:

- [1] 于霖清.高压电机转子紫铜短路环的气焊[J].焊接技术,1995(6):43.
- [2] 杨凌川,杨文柱.导电紫铜排手工电弧焊[J].安装,1997(10):22-23.
- [3] 刘欢龙,崔全合.紫铜管钎焊工艺[J].山西机械,2000(4):20-21.
- [4] 闫久春,崔西会,李庆芬.预热对紫铜厚板 TIG 焊接工艺性的影响[J].焊接,2005(9):58-61.
- [5] 张 鹏,马金萍.氩氮混合保护 TIG 焊在紫铜厚大件上的应用[J].焊接,2001(7):38.
- [6] Siewart T A, Vigliotti. Mechanical Properties of Electron Beam Welds in Thick Copper[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1990(36):1185-1192.

申 明

各位作者:

为确保杂志质量,尊重和保护作者和他人知识产权、著作权,根据国家期刊出版管理的相关规定,《电焊机》杂志特作以下申明。

1.作者应保证是向本刊所投稿件的著作权人,不得抄袭、剽窃、盗用他人科研成果、文章和信息。文章中引用和参考他人文章、著作和成果(包括网络信息)时,按编辑出版规定,应在文章中以参考文献方式明确标识。如作者的文章涉及侵犯他人知识产权、著作权等合法权益时,一切后果文责自负。

2.作者所投稿件应保证尚未在其他媒体(包括网络)出版或发表,也未向其他媒体投稿。

3.《电焊机》杂志已被多家国内外权威收录机构、数据库、专业网站列为来源刊,收录和引用。凡本刊录用的文章,即视为本刊已获得该文章与《电焊机》相关的网上传播、汇编出版、电子出版、收录和引用等权利。本刊向作者支付的稿酬,已包含上述各项权利的报酬,本刊和其他机构不再另行支付。

作者向本刊投稿时,若无特别说明则视为同意以上申明。如不同意以上申明者请另投它刊。

特此申明。

《电焊机》杂志社

2013 年 1 月 1 日