304N2不锈钢管全位置A-TIG焊接工艺

刘观辉[1,2],易耀勇[2],刘美华[1],张宇鹏[2],罗子艺[2],许 磊[2]
(1.中南大学 材料科学与工程学院,湖南 长沙 410083;2.广东省工业技术研究院 焊接技术研究所,广东 广州 510650)

摘要:A-TIG焊接是一种采用活性剂来增加焊缝熔深的高效TIG焊接技术。与常规TIG焊相比,A-TIG焊具有焊接效率高、焊缝质量良好及成本低廉等优点。采用A-TIG焊接技术对核电常用的304N2高强度不锈钢管道进行全位置焊接,对焊接接头进行超声波探伤检测、显微组织分析及力学性能测试。试验结果表明,对于不开坡口6 mm厚的304N2高强度不锈钢管采用A-TIG焊接,可实现一次焊透、单面焊双面成形,同时获得外观良好的焊缝,接头显微组织和力学性能均优于常规TIG焊接,且其力学性能均达到标准要求。

关键词:A-TIG焊接;活性剂;304N2不锈钢;全位置焊接
中图分类号:TG457.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2303(2014)07-0006-06
DOI:10.7512/j.issn.1001-2303.2014.07.02

Research on A-TIG welding technology of thick wall 304N2 stainless steel piping

LIU Guan-hui[1,2], YI Yao-yong[2], LIU Mei-hua[1], ZHANG Yu-peng[2], LUO Zi-yi[2], XU Lei[2]
(1.School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Institute of Welding Technology, Guangdong General Research Institute for Industrial Technology, Guangzhou 510650, China)

Abstract: A-TIG welding is a newly and effective TIG welding technology where weld penetration is improved by using activating flux. Compared with conventional TIG welding, A-TIG welding provides higher welding efficiency, better weld quality, lower cost and other advantages. In this experiment type 304N2 high strength stainless steel piping, which is commonly used in nuclear power plant, is adopted by A-TIG all-position welding. Ultrasonic flaw detection, microstructure analysis and related mechanical performance tests of weld joint are carried out. Results show that for type 304N2 high strength stainless steel piping of 6 mm thick, full penetration, one-side welding with back formation and weld joint with good appearance can be obtained in a single pass without groove preparation by means of A-TIG welding, microstructure of weld joint is superior to that by common TIG welding, and mechanical properties can also meet standard requirements.

Key words: A-TIG welding; activating flux; 304N2 stainless steel; all position welding

0 前言

在安装核电站发电机组管道时,传统焊接方法存在15%~30%的焊接缺陷,即使运用全自动焊接方法也不可避免地会产生缺陷[1]。由于在焊接过程中,不同空间位置的熔池液态金属受力不同,难以控制焊接参数和焊炬姿态,熔池与焊缝的成形也很难把握[2]。因此,通过改善或者开发一种新型的焊接工艺,以获得高质量的焊接接头,尤其是在管道全位置TIG焊接中,这个问题一直以来都是管道全位置焊接过程中亟需解决的重要问题[3-4]。

目前,国际上致力于活性剂材料研究的三大焊接研究所(乌克兰巴顿焊接研究所、美国爱迪生焊接研究所和英国焊接研究所)在活性剂增加焊接熔深机理和焊接工艺方面获得很大成功,他们已将A-TIG焊应用于核电管道的焊接[5]。然而,在国内目前只有少数企业和高校在该领域进行研究,如兰州理工大学、哈尔滨工业大学等,通过研究焊缝熔深机理,制备了匹配多种母材的活性剂,并对A-TIG焊

收稿日期:2013-05-24;**修回日期**:2013-09-13
基金项目:国家国际科技合作计划资助项目(2011DFB70130)
作者简介:刘观辉(1988—),男,江西赣州人,在读硕士,主要从事核电制造自动焊接工艺的研究。

接技术与其他技术的结合进行了初步探索[6-8],但是在焊接规范、焊接前后处理工艺及对实际常用材料 A-TIG 焊工艺参数方面[9],还需要做更加深入的研究。其中,在核电管道全位置 A-TIG焊方面尤为欠缺。因此,本研究采用活性 TIG 焊技术对核电常用304N2高强度不锈钢管道进行了全位置焊接,并对不锈钢管道全位置焊接工艺进行研究。

1　试验方法及焊接参数

焊接材料为 304N2 不锈钢钢管,规格 ϕ159 mm×6 mm。焊接前将管道对接端面切平,无间隙对中、夹紧、点固,然后用砂轮和砂纸打磨定位焊固定好的不锈钢管道表面。用丙酮擦拭工件表面以除去表面油污。将准备好的不锈钢管道固定在焊接平台上,用纸板封住待焊管道两个端口,只在其中一个端口留下一个用于通 Ar 气的小孔,在焊接过程中对焊缝背面进行纯氩气保护。

试验采用的焊接设备是乌克兰巴顿焊接研究所研发的新型 A-TIG 焊接设备 Experimental System for A-TIG Welding AD 393 CN,不锈钢活性剂也由该研究所提供。安装固定好不锈钢钢管后,用丙酮将活性剂搅拌成糊状,再用扁平毛刷将糊状活性剂均匀地涂敷在对接工件待焊区域,涂敷宽度约为 15 ~ 20 mm,以遮住金属表面的光泽为宜。活性剂一旦脱落,应该补刷。

待所有准备工作完成后,对 304N2 不锈钢管道进行 A-TIG 焊接试验。焊接方法为直流正接 TIG焊接,钨极直径 2.0 mm,尖角 60°,喷嘴直径 26 mm,保护气体为氩气,纯度 99.99%,焊缝正面保护气体流量 10 L/min,焊缝背面保护气体流量 5 L/min,电弧长度 1.5~2.0 mm。本试验将管道分为上、下两个区,经过多次焊接试验获得的优化焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1　焊接工艺参数

分区	第一区角度 /(°)	第二区角度 /(°)	行走方向	电流方式	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V
2 区	180	190	逆时针	直流	135	8.2

1 区焊速(上半圈) v/mm·min^{-1}	2 区焊速(下半圈) v/mm·min^{-1}	正面保护气流量 Q/L·min^{-1}	预通气时间 t/s	滞后通气时间 t/s
60	48	10	3.0	5.0

焊接过程中记录电弧电压,观察焊接电弧形态。焊接完成后,对焊接接头进行取样检验,如图 1 所示,截取平、仰焊区域附近两个试样用于金相分析,分别截取拉伸试验的试样 B1、B2、B3 和 B4,以及弯曲试验的试样 C1、C2、C3 和 C4。

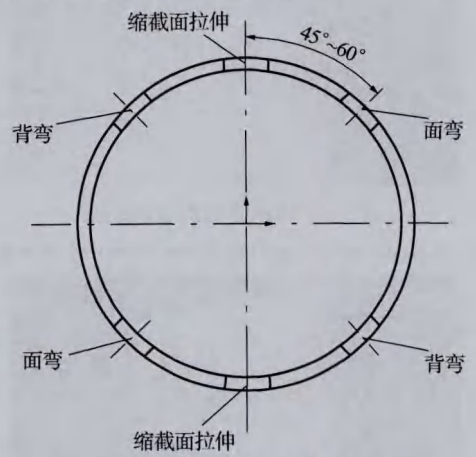


图 1　典型 API 工艺评定取样位置

Fig.1　Sampling positions of typical API procedure

2　试验结果和分析

2.1　焊缝外观观察

焊后管道焊缝外观如图 2、图 3 所示,管道对接焊缝成形良好。腐蚀后的焊缝形貌如图 4 所示,在 A-TIG 焊中母材已完全被焊透,而常规 TIG 焊时熔深不到 3 mm,且A-TIG 焊的熔宽明显窄于 TIG 焊。本试验中,焊接未送丝,在平焊位置的焊缝外表面与仰焊位置的焊缝内表面出现了微小凹陷,这需要优化焊接工艺参数来改善。

图 2　不锈钢管道焊缝外表面

Fig.2　External weld appearance of stainless steel piping

关于 A-TIG 焊接熔深增加的机理,尚未有一致的熔深增加理论,目前两个有代表性的理论为电弧收缩论[10]和表面张力变化影响学说[11]。在试验过程中

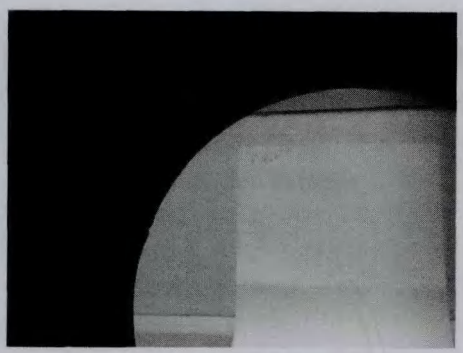
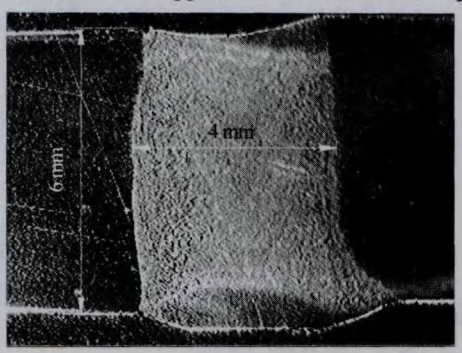
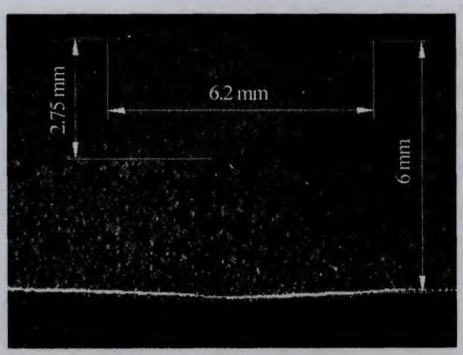


图3 不锈钢管道焊缝内表面

Fig.3 Internal weld appearance of stainless steel piping



a A-TIG 焊



b 常规 TIG 焊

图4 腐蚀后焊缝形貌

Fig.4 Weld appearance after corrosion

观察，相对于电弧更加分散的常规 TIG 焊接，A-TIG 焊接的弧柱出现了比较明显的收缩。根据徐艳丽、魏艳红等人获得的模拟结果[12]表明，活性剂的加入使得熔池表面温度系数$\partial\sigma/\partial T$由负值变为正值，在熔池中产生两个向内的涡流，汇合后的液态金属向熔池中心底部流动，最终得到窄而深的熔池。A-TIG 焊接熔深增加机理的综合作用示意如图 5 所示。本试验中，对比常规 TIG 焊接宽而浅的熔深，使用活性剂后焊缝的熔深显著增加，试验结果与上述模拟结果吻合。这在一定程度上说明了电弧收缩和熔池表面张力变化可能对熔深的增加均有影响。

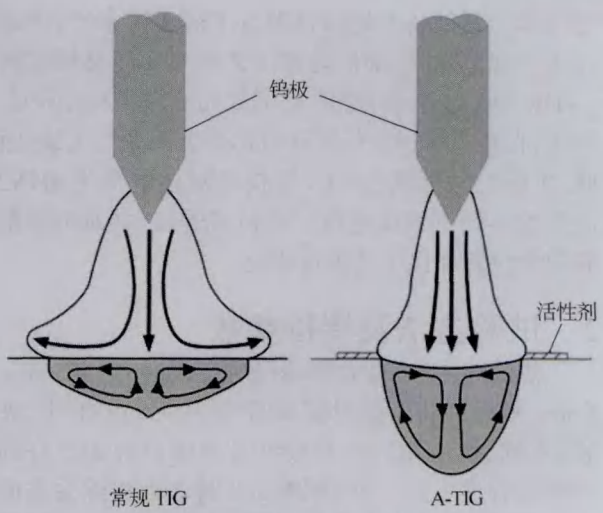


图5 A-TIG 焊接熔深增加机理

Fig.5 Mechanism for penetration improvement of A-TIG

2.2 焊缝显微组织分析

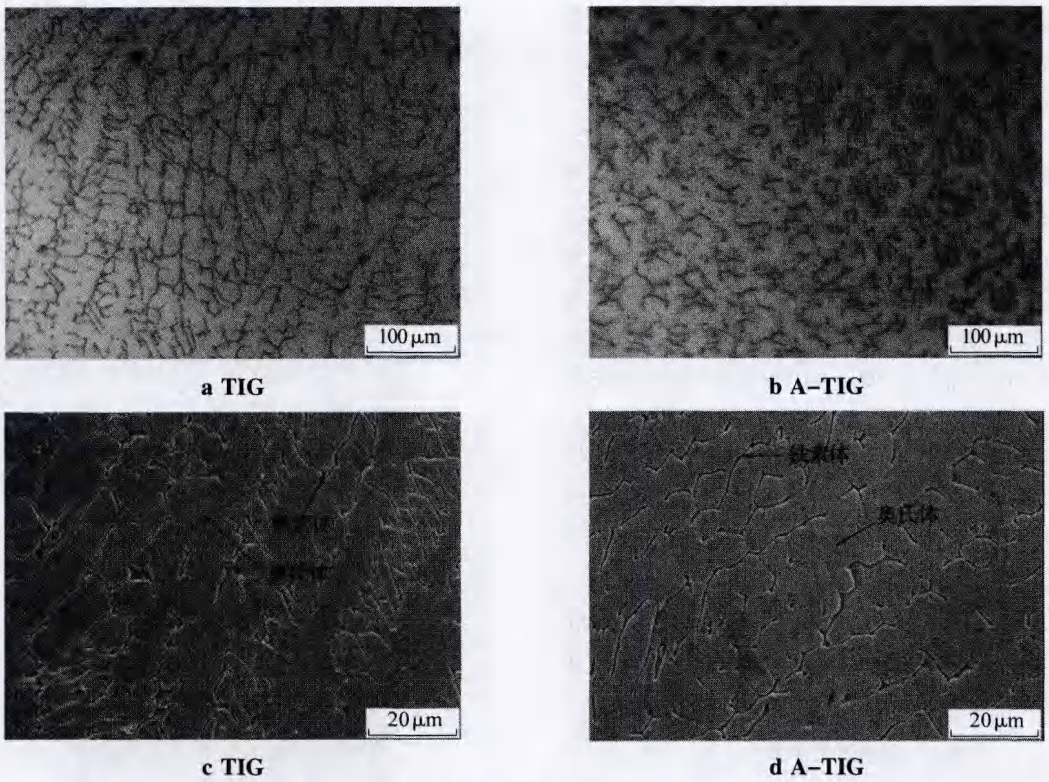
焊缝金相组织如图 6 所示。对照标准奥氏体不锈钢的金相组织分析，可知两个焊缝得到的组织均为奥氏体基体+铁素体的双相组织。铁素体的产生是由于在焊接加热和凝固时铁素体生成元素（主要是铬）发生偏聚，一般只有较低体积分数的铁素体在奥氏体晶界及晶内处析出[13]，呈现树枝状分布。此外，对比图 6 中的 TIG 和 A-TIG 焊缝金相组织，可知 A-TIG 焊缝中的奥氏体组织比常规 TIG 焊接得到的奥氏体组织更加细小、均匀，这可能是由于在焊接过程中，蒸发的活性剂分子使电弧发生收缩[14]，获得更高能量密度的电弧。它有利于改善焊缝组织的均匀程度，达到细化奥氏体不锈钢微观组织的效果[15]，从而提高焊接接头的可靠性，该结论在本试验结果中得到了体现。

2.3 焊缝化学成分分析

利用能谱仪分别对母材、常规 TIG 焊缝和 A-TIG 焊缝进行区域成分和含量分析，如表 2 所示。由测试结果可以看出，A-TIG 与常规 TIG 焊的焊缝成分与母材的化学成分相差不大。使用活性剂对 A-TIG 焊缝的化学成分影响较小。

表2 基材与焊缝金属化学成分对比 %

焊接方法	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Ni)	w(N)
TIG 焊	0.054	0.46	1.38	0.022	0.002	18.22	6.84	0.1
A-TIG 焊	0.054	0.38	1.05	0.024	0.002	16.71	8.40	0.1
母材	0.055	0.54	1.50	0.022	0.002	18.24	8.24	0.1



a TIG　　b A-TIG

c TIG　　d A-TIG

图 6　焊缝金相组织

Fig.6　Metallographic microstructure of weld

2.4　超声波无损探伤分析

根据 GB/T 11345-1989 相关规定,采用 CTS-1002 plus 检测设备对截取的整个环焊缝试样进行超声波检验。检验结果表明,焊缝无明显的裂纹、未焊透、气孔等缺欠,焊缝质量评定级别为 A 类Ⅰ级,接头质量合格。

2.5　焊缝机械性能测试

2.5.1　焊接接头拉伸试验

室温下在拉伸试验机上对焊接试样进行拉伸试验,拉伸试样如图 7 所示,尺寸 110 mm×20 mm×6 mm,焊接接头拉伸试验数据如表 3 所示。

表 3　拉伸试验结果

试样序号	原长 L/mm	断后长度 L/mm	延伸率 δ/%	抗拉强度 σ_b/MPa
B1	110	148	34.5	882
B2	110	145	31.8	821
B3	110	152	38.2	935
B4	110	147	33.6	727

由表 3 可知,试样抗拉强度均高于 304N2 不锈钢拉伸强度最小值 685 MPa。焊接接头出现比较明显的缩颈现象,说明接头塑性较好。除个别情况外,断裂位置基本都在远离焊缝的母材中断裂。可知A-TIG 焊接接头与母材形成了可靠的结合,接头具有

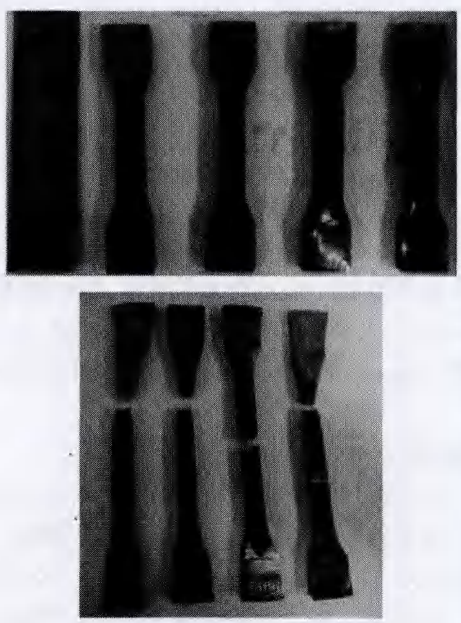


图 7　拉伸试样

Fig.7　Tensile test specimens

优异的拉伸力学性能。根据 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》的评定标准，本试验焊接接头的拉伸性能符合要求。

晶粒大小直接影响焊接接头的机械力学性能。在A-TIG 焊接时，相对集中的焊接电弧能够获得更高能量密度的电弧和相对较快的冷却速度，最终得到的焊缝奥氏体组织晶粒较为细小。但是在常规 TIG 焊接时，焊接相同厚度的材料必须进行多层多道焊，每一道焊接都会使得前面道次的焊缝组织经历不同程度的高温热处理作用，导致焊缝中奥氏体组织因焊接热输入量的增大、高温停留时间的延长，晶粒变得粗大。因此，通常情况下不锈钢 TIG 焊拉伸试样断口主要位于焊缝及热影响区，说明 TIG 焊缝组织及其机械性能相对于 A-TIG 有所下降。

2.5.2 焊接接头弯曲试验

室温下在弯曲试验机上对焊接试样进行弯曲试验，尺寸为 110 mm×20 mm×6 mm，弯曲后试样如图 8 所示，焊接接头弯曲试样数据如表 4 所示。

表 4 弯曲试验结果

试样序号	试验类型	弯曲角/(°)	结果
C1	背弯	150	合格
C2	面弯	150	合格
C3	背弯	150	合格
C4	面弯	150	合格

根据要求对相应管道位置焊缝试样进行横向弯曲试验，其中两个试样进行面弯，两个试样进行背弯。结果表明，当弯曲角达到 150°时，焊缝内、外表面均无裂纹，证明了接头有良好的弯曲性能，可承受单次较小弯曲半径的弯曲变形而不会发生开裂。根据 GB/T232-1999《金属材料弯曲试验方法》的评定标准，本试验焊接接头的弯曲性能符合要求。

图 8 弯曲试样

Fig.8 Bending specimens

3 结论

(1)使用活性剂对 6 mm 厚的 304N2 不锈钢管道进行全位置 TIG 自动焊接工艺试验，制定了相匹配的焊接工艺参数，使用该方法焊接前不开坡口，可实现一次焊透、单面焊双面成形，管道对接焊缝成形良好。

(2)使用活性剂 TIG 焊可以完全焊透 6 mm 厚的 304N2 不锈钢，熔深相当于常规 TIG 焊的两倍，且熔宽要比 TIG 焊的小很多。

(3)A-TIG 焊缝的显微组织为奥氏体、铁素体的双相组织，其显微组织基本与 TIG 焊缝的相似，焊缝奥氏体组织的晶粒相比于 TIG 焊的细小，且 A-TIG 焊缝成分与母材相近，说明活性剂没有进入焊缝。

(4)室温下对焊接接头进行机械性能测试，拉伸试验和弯曲试验均能满足相关标准要求。

(5)试验在平、仰焊位置焊缝发生微小塌陷，这需要继续优化焊接工艺参数来改善。

参考文献：

[1] 冷小冰，张瑞华，王海涛，等.A-TIG 焊在核电管道全位置焊接中的应用[J].电焊机，2009，39(8)：14-16.

[2] Barbara K Henon. Orbital welding technology speeds riser construction of offshore platforms[J]. Welding Journal，1994，73(4)：53-55.

[3] 石　凯,奚运涛,周　勇,等.小口径钢管全位置脉冲 TIG 焊的成型控制及组织调控[J].焊管,2002,27(1):21-24.
[4] 刘秀春,亓安芳,李忠杰.全位置 TIG 对接焊机工艺实验研究[J]. 锅炉技术,2006,37(5):52-55.
[5] 薛松柏,栗卓新,朱颖等.焊接材料手册[M].北京:机械工业出版社,2006:515-527.
[6] 王卫玲,张立武,胡世民. A-TIG 焊接技术在奥氏体不锈钢焊接中的应用研究[J] .固体火箭技术,2003,26(2):49-52.
[7] 张瑞华.活性焊接法及熔深增加机理的数值模拟研究[D].甘肃:兰州理工大学,2005.
[8] 刘凤尧,杨春利,林三宝,等.活性 TIG 焊熔深增加机理的研究[J].金属学报,2003,39(6):661-665.
[9] 魏　钰,许静远,刘爱阳,等.奥氏体不锈钢 A-TIG 焊焊接性能研究[J].宁夏大学学报(自然科学版),2012,33(2):176-185.
[10] Howse, D.S., Lucas, W., 2000. Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding[J]. Sci. Technol. Weld. Join.,5 (3):189-193.
[11] Heiple C R,Roper J R.Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry[J].Welding Journal,1982,61(4):97-102.
[12] Xu Y L,Dong Z B,Wei Y H,*et al*.Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process[J]. Theoretical and applied fracture mechanics,2007(48):178-186.
[13] John C Lippold,Damian.J Kotecki.不锈钢焊接冶金学及焊接性[M].国际制造业先进技术译丛,北京:机械工业出版社,陈剑虹[译],2008:134-136.
[14] Simonik. A G. The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of electro-negative elements[J].Welding Production, 1976(3):49-51.
[15] Rodrigues A,Loureiro A,Batista A,IIW International Conference on Benefits of New Methods and Trends in Welding to Economy,Productivity and Quality[C].The 58th Annual Assembly and the International Conference of the IIW,2005.

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

2014 年 1 月 1 日