



高强桥梁钢 Q420qE 焊接接头 性能控制

张 熹^{1,2,3}, 刘 宏², 郭占山², 王凤会², 杨建炜², 雍岐龙¹

(1.钢铁研究总院,北京 100081;2.首钢技术研究院,北京 100043;3.北京市新一代可循环钢铁流程技术重点实验室,北京 100043)

摘要:对首钢生产的 50 mm 规格 Q420qE 高强桥梁钢进行了最高硬度试验、斜 Y 坡口冷裂纹敏感性试验、CTS 试验及焊接接头热输入适应性试验。试验结果表明:不预热进行焊接,Q420qE 钢板最高硬度为 255 HV₁₀;预热 50 ℃后,最高硬度 237 HV₁₀,钢材淬硬倾向不明显;预热 50 ℃以上可以避免焊接冷裂纹;气体保护焊、埋弧焊分别在 14~16 kJ/cm、30 kJ/cm 焊接热输入范围内,焊接接头性能满足要求。

关键词:Q420qE;高强桥梁钢;焊接接头;性能控制

中图分类号: TG457.11 文献标志码: A 文章编号: 1001-2303(2016)09-0001-06

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2016.09.01

Performance control of Q420qE high strength bridge steel joint

ZHANG Xi^{1,2,3}, LIU Hong², GUO Zhanshan², WANG Fenghui², YANG Jianwei², YONG Qilong¹

(1. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China; 3. Key Laboratory of New Generation Recycling Process for Iron & steel Production Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: In this article, the weld ability of 50 mm Q420qE steel plates were evaluated by max hardness test, cold crack sensibility test, CTS test and heat input adaptability test. The results indicated that the heat affected zone's max hardness of Q420qE steel plate was 255 HV₁₀ with no preheat; after preheat 50 ℃, the heat affected zone's max hardness was 237 HV₁₀. The plate quenching harden ability was not obvious, the 50 mm plate could avoid cold crack at condition that preheat temperature was above 50 ℃. At the condition that GMAW heat input range from 14 kJ/cm to 16 kJ/cm, and SAW heat input at 30 kJ/cm, the properties of weld joint satisfied standard.

Key words: Q420qE; high strength bridge steel; weld joint; property control

0 前言

随着公路、铁路建设的迅速发展,大跨度、大节段成为钢结构桥的发展趋势,这一趋势促使桥梁制造

业对钢材的需求向着高强度、特厚化方向发展,Q420强度级别高强桥梁钢正在逐步替代传统的 Q370 桥梁钢,而且在沪通大桥等国家重点项目上 Q500 级别桥梁钢也将在国内实现首次工程应用。随着桥梁钢强度级别的提高,桥梁焊接钢结构在服役过程中对裂纹等缺陷更加敏感,发生低应力脆断的危险性提

收稿日期:2016-03-07;收稿日期:2016-05-18

作者简介:张 熹(1980—),男,天津人,工程师,硕士,主要从事钢铁材料焊接技术的研究工作。

高,特别是焊接接头,由于经历了焊接热循环的作用,焊接热影响区晶粒显著粗化,并形成淬硬组织,为了保证焊接钢结构桥的安全性,焊接接头的缺陷控制和韧性保障显得尤为重要^[1-4]。近年来首钢承接了白沙沱长江大桥、孟加拉帕德玛大桥等重点工程 Q420qE 钢板的供货,为了保障工程质量,首钢对 Q420qE 钢板的配套焊接技术进行了研究,为同类用户的施工提供参考。

1 试验钢板成分及性能

采用首钢生产的 50mm 规格 Q420qE 钢板,其化学成分及力学性能见表 1 和表 2;所用焊材与母材为等强匹配,分别为京雷焊材生产的 GFL-71Ni 气体保护药芯焊丝,保护气体 CO₂;伊萨生产的 φ4.0 mm OK Autrod 12.34 埋弧焊丝+OK FLUX10.62 焊剂。

表 1 钢材化学成分 %

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(Ni)	w(Cr)	w(Cu)
0.051	0.18	1.46	0.19	0.18	0.20
w(Mo)	w(Nb)	w(Ti)	C _{eq}	P _{cm}	
0.14	0.036	0.011	0.39	0.16	

表 2 钢板力学性能

板厚 /mm	屈服强度 σ _s /MPa	抗拉强度 σ _b /MPa	断后伸长率 δ/%	-40℃冲击功 A _{kv} /J
50	447	577	24	299, 312, 326

钢材焊接热影响区的硬度和冷裂纹倾向与其化学成分密切相关。50mm 规格 Q420qE 的 C_{eq}、P_{cm} 分别为 0.39%, 0.16%, 远低于临界值 0.40%, 0.20%,

表 4 Q420qE 最高硬度试验结果

编号	预热温度 T/℃	硬度测量值/HV ₁₀	HV _{max}	结果	判定
1	不预热	239, 231, 238, 239, 235, 244, 223, 219, 219, 223, 239, 249, 253, 255, 244	255	淬硬倾向小	<350 HV
2	50	227, 233, 232, 234, 236, 234, 228, 222, 221, 237, 227, 225, 224, 225, 226	237		

2.2 斜 Y 型坡口焊接裂纹试验

斜 Y 坡口焊接裂纹试验按 GB4675.1-84《斜 Y 坡口焊接裂纹试验方法》进行,试样尺寸示意如图 2 所示。分别进行不预热、预热 50℃ 两个条件下的试验,从而确定该钢板的最小预热温度。每个试验条件焊接试样 2 块,焊接工艺参数如表 5 所示,焊后将试样静置 48 h 后进行裂纹率测定。

试验结果见表 6。由表 6 可知,50 mm 厚 Q420qE 不预热条件下,表面裂纹率、断面裂纹率、根部裂纹

表明该钢材焊接性优良,冷裂倾向不明显。

2 焊接冷裂纹敏感性评定试验

通过最高硬度试验、斜 Y 坡口冷裂纹敏感性试验、CTS 试验对 50 mm 厚 Q420qE 进行冷裂纹敏感性评价。试验采用京雷焊材生产的 GFL-71Ni 气体保护药芯焊丝,焊丝直径 1.2 mm,保护气体为 CO₂。试验时环境温度 15℃,相对湿度 30%。

2.1 最高硬度试验

试验用钢板的加工及硬度测定按 GB 4675.5-2008《焊接性试验—焊接热影响区最高硬度试验方法》标准进行。焊接工艺参数如表 3 所示,最高硬度打点位置如图 1 所示,硬度试验载荷 10 kg。

表 3 最高硬度试验焊接工艺参数

焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 v/mm·min ⁻¹
200~220	25~26	212

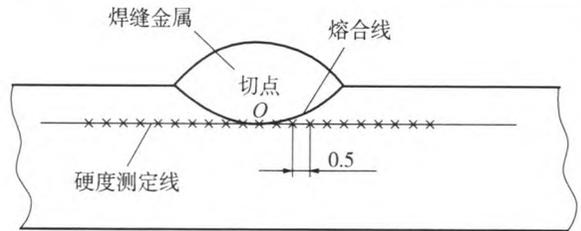


图 1 焊接热影响区硬度测定点位置

试验结果如表 4 所示,该钢板在环境温度 15℃ 下不预热焊接,焊接热影响区最高硬度为 255 HV₁₀;预热 50℃ 后焊接热影响区最高硬度降至 237 HV₁₀。其热影响区最高硬度远低于临界值 350 HV₁₀,表明该钢板淬硬倾向不明显。

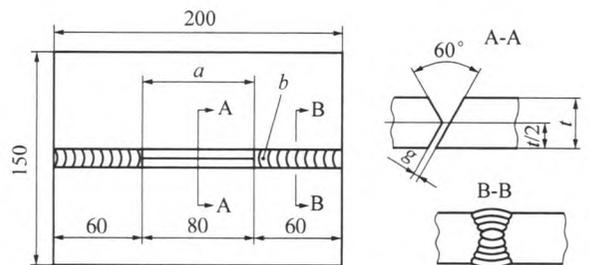


图 2 斜 Y 型坡口焊接裂纹试样示意

率均为 100%,裂纹均在焊缝处,如图 3 所示;预热

表 5 斜 Y 坡口试验焊接工艺参数

焊接材料	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 v/mm·min ⁻¹
GFL-71Ni	180~190	24~26	150

表 6 斜 Y 坡口焊接裂纹试验结果

编号	焊材	焊材直径 φ/mm	预热温度 T/°C	表面裂纹率 /%
1	GFL-71Ni	1.2	不预热	100
2	GFL-71Ni	1.2	50	0

编号	断面裂纹率/%	根部裂纹率/%	结果	判定
1	100	100	不合格	<20%
2	0	0	合格	

注:不预热条件下均裂在焊缝处。

50 °C时表面裂纹率、断面裂纹率、根部裂纹率均为 0%,即采用 GFL-71Ni 气体保护焊丝,焊前预热 50 °C 以上可避免焊接冷裂纹的出现。

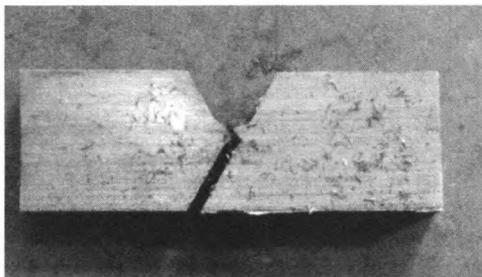


图 3 不预热条件下冷裂试样照片

2.3 CTS 试验

CTS 焊接裂纹试验按 EN ISO 17642-2:2005 《金属材料焊接性破坏性试验 焊接接头冷裂试验 电弧焊工艺》进行,CTS 试样尺寸示意如图 4 所示。试验时先将试样用直径 12 mm 的螺栓固定好,12 h 后进行拘束焊缝的焊接,为避免拘束焊缝开裂,焊前预热 100 °C;试验焊缝焊接前,将试板预热到 50 °C,焊接时将试样呈船型焊位,与水平呈 45°,如图 4 所示,第一道试验焊缝焊好后立即将试板搬运到冷却池中,试板与焊缝末端相反的一侧边缘浸入水里,浸入深度 60±5 mm,确保冷却池的水温低于 30 °C,保持试板在冷却池中,直到降至室温,将试样从冷却池中取出。试板从冷却池中取出 48 h 后,允许进行第二道焊缝的焊接。第二道焊缝的焊接、冷却与第一道相同。第二道焊缝冷却至室温后,放置 48 h 以上再进行金相及硬度试验。

焊接工艺参数见表 7,焊后将试样静置 48 h 后进行裂纹率测定及硬度测定,硬度测定位置如图 5

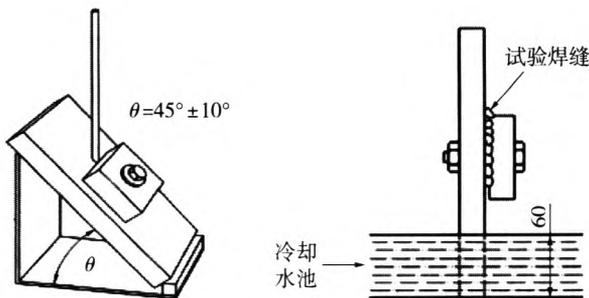


图 4 试验过程示意

所示,CTS 试样及金相检验试样如图 6 所示。

试验结果见表 8,由表 8 可知,50 mm 厚 Q420qE 预热 50 °C 后焊接,CTS 金相检验结果判定为不裂,

表 7 CTS 试验焊接工艺参数

焊接材料	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 v/mm·min ⁻¹
GFL-71Ni	180~190	24~26	150

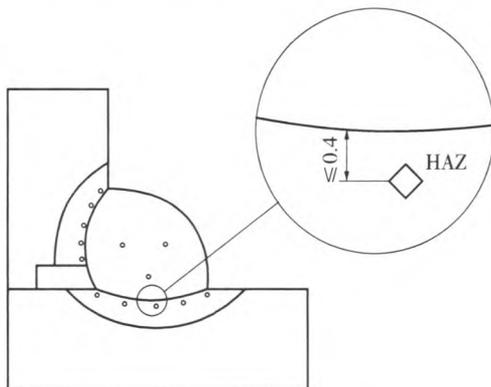


图 5 CTS 试验硬度位置示意

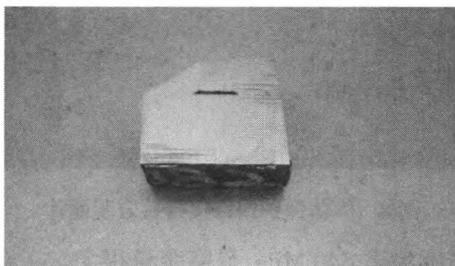


图 6 CTS 试样及金相检验试样

表 8 CTS 试验结果

预热温度 T/°C	金相检验				硬度/HV ₁₀		
	焊脚长度/mm	裂纹率/%	结果	判定	热影响区	焊缝	母材
50	13	0,0,0,0,0,0	不裂	<5%	236,241,242,235,247,244, 254,251,236,236(均值 242)	229,217,226 (均值 224)	184,190,186 (均值 187)

热影响区硬度均值 242 HV₁₀, 焊缝硬度均值 224 HV₁₀, 母材硬度均值为 187 HV₁₀。

3 焊接热输入适应性试验

3.1 气体保护焊焊接工艺试验

为确定首钢 50 mm 厚 Q420qE 钢板气体保护焊工艺适应性,对试验钢板进行平板对焊试验,焊接坡口形式如图 7 所示。试验采用京雷焊材生产的直径为 $\phi 1.2$ mm GFL-71Ni 气体保护药芯焊丝,保护气体为 CO₂,焊前预热 80 °C,层间温度小于等于 180 °C,填充焊道焊接热输入 14~16 kJ/cm,焊接工艺参数如表 9 所示。焊接接头宏观金相照片如图 8 所示,未出现明显焊接缺陷。

焊接接头力学性能如表 10、表 11 所示。焊接接头力学性能结果表明,在 14~16 kJ/cm 焊接热输入下施焊,焊接接头各位置 -40 °C 冲击功大于 47 J,焊接

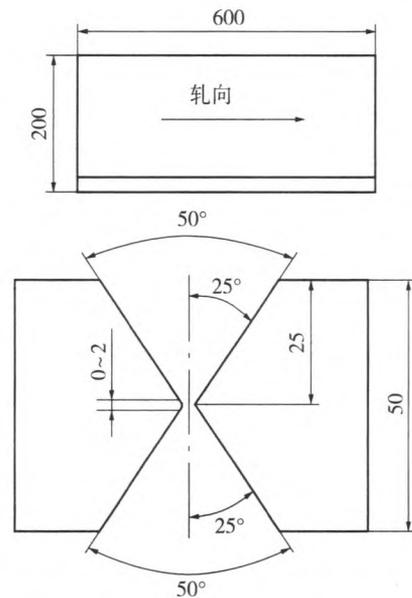


图 7 平板对接试板尺寸及坡口形式

表 9 气体保护焊焊接工艺参数

焊接位置	焊接道次	焊条直径 ϕ /mm	电流 I/A	电压 U/V	焊速 v /mm·min ⁻¹	热输入 Q/kJ·cm ⁻¹	焊接层次示意
平焊	1	1.2	145~155	20~21	155~160	10~12	
	2~27	1.2	200~220	24~26	198~220	14~16	

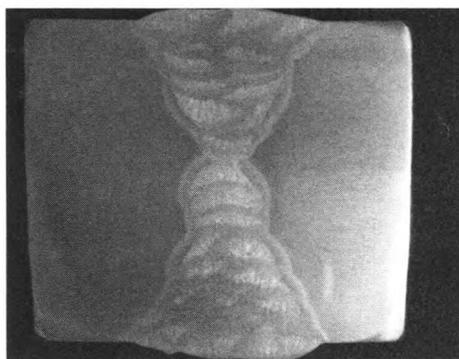


图 8 气体保护焊焊接接头宏观照片

接头强度大于 540 MPa,且富余量很大。

焊接接头硬度结果见图 9,结果表明在 14~16 kJ/cm

表 10 气体保护焊焊接接头冲击性能结果

焊接位置	取样位置	A _k /J(-40 °C)		结果	判定
		焊缝	热影响区		
平焊	1/4 处	93,67,117 (平均 92)	299,273,354 (平均 309)	合格	>47 J

表 11 气体保护焊焊接接头拉伸、冷弯性能结果

拉伸结果				侧弯结果 d=4a,180°	
抗拉强度 R _m /MPa	断裂位置	结果	判定	结果	判定
577,604 (平均 591)	母材	合格	>540 MPa	合格	完好

焊接热输入下施焊,热影响区未出现软化现象。

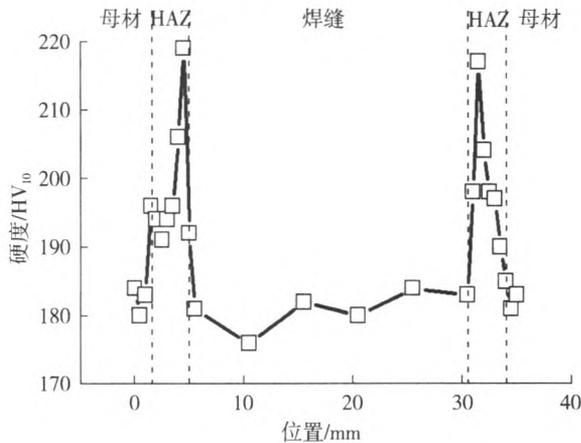


图 9 焊接接头硬度分布

3.2 埋弧焊焊接工艺试验

为确定首钢 50 mm 厚 Q420qE 钢板埋弧焊工艺适应性,对试验钢板进行平板对焊试验,焊接坡口形式如图 7 所示。本试验采用直径 $\phi 4.0$ mm 的伊萨 OK Autrod 12.34 焊丝配合伊萨 OK FLUX10.62 焊剂进行试验,焊前预热 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,层间温度控制在 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,焊接热输入 30 kJ/cm ,焊接工艺参数如表 12 所示。焊接接头宏观金相照片如图 10 所示,未出现明显焊接缺陷。

焊接接头力学性能如表 13、表 14 所示。焊接接头力学性能结果表明:在 30 kJ/cm 焊接热输入下施焊,焊接接头各位置 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功大于 47 J ,焊接接头强度大于 540 MPa ,且富余量很大。

表 12 埋弧焊焊接工艺参数

焊接位置	焊接道次	焊条直径 ϕ/mm	电流 I/A	电压 U/V	焊速 $v/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	热输入 $Q/\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$	焊接层次示意
平焊	1	4.0	450	25	350	19	
	2	4.0	550	27	350	25	
	3~6	4.0	600	29	350	30	
	7	4.0	450	25	350	19	
	8	4.0	550	27	350	25	
	9~17	4.0	600	29	350	30	

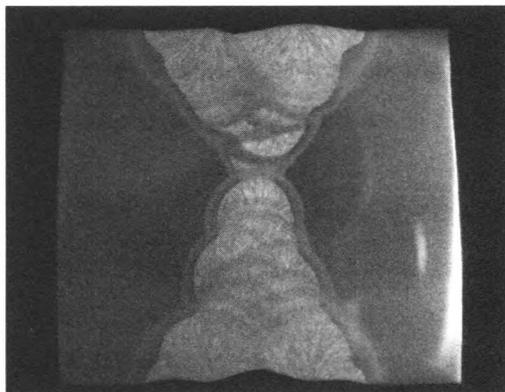


图 10 埋弧焊焊接接头宏观照片

表 13 埋弧焊焊接接头冲击性能结果

焊接位置	取样位置	$A_{kv}/\text{J}(-40\text{ }^{\circ}\text{C})$		结果	判定
		焊缝	热影响区		
平焊	1/4 处	56, 72, 76 (平均 68)	227, 191, 270 (平均 229)	合格	$>47\text{ J}$

焊接接头硬度结果如图 11 所示,结果表明在 30 kJ/cm 焊接热输入下施焊,热影响区出现一定程度的软化现象,但焊接接头抗拉强度满足要求。

表 14 埋弧焊焊接接头拉伸、冷弯性能结果

拉伸结果				侧弯结果 $d=4a, 180^{\circ}$	
抗拉强度 R_m/MPa	断裂位置	结果	判定	结果	判定
581, 581 (平均 581)	母材	合格	$>540\text{ MPa}$	合格	完好

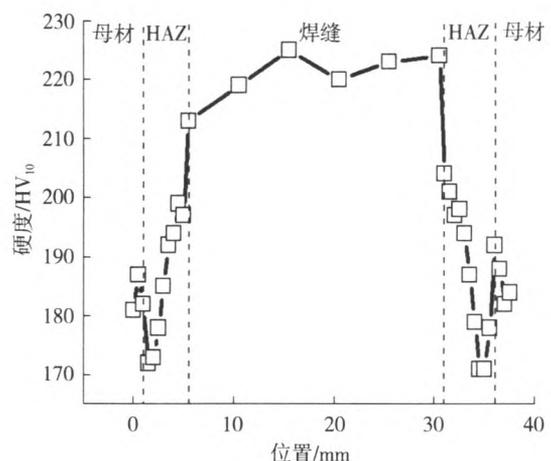


图 11 埋弧焊焊接接头硬度分布

4 结论

(1) 首钢 50 mm 厚 Q420qE 钢板 P_{cm} 为 0.16%，室温 15 °C 不预热条件下焊接，热影响区最高硬度 255 HV₁₀，预热 50 °C 后焊接，热影响区最高硬度 237 HV₁₀，两种试验条件下最高硬度试验结果远低于临界值 350 HV₁₀，表明该钢板淬硬倾向不明显。

(2) 斜 Y 型坡口冷裂纹敏感性试验及 CTS 试验结果表明，首钢 50 mm 厚 Q420qE 采用直径 1.2 mm 的 GFL-71Ni 气体保护焊丝焊接，焊前预热 50 °C 以上可避免焊接冷裂纹的出现。

(3) 对接接头气体保护焊试验结果表明，采用 ϕ 1.2 mm 的 GFL-71Ni 气体保护焊丝，在 14~16 kJ/cm 焊接热输入下施焊，焊接接头冲击、拉伸、冷弯满足标准要求，且富余量很大，焊接热影响区未出现软化现象。

(4) 对接接头埋弧焊试验结果表明，采用伊萨生产的直径 ϕ 4.0 mm 伊萨 OK Autrod 12.34 焊丝配合伊萨 OK FLUX10.62 焊剂，在 30 kJ/cm 焊接热输入下施焊，焊接接头冲击、拉伸、冷弯满足标准要求，且富余量很大，热影响区出现一定程度的软化现象，但焊接接头抗拉强度满足要求。

参考文献：

- [1] 苗张木. 钢箱梁焊接接头 CTOD 断裂韧性评定[J]. 焊接学报, 2006(4): 77-80.
- [2] 柴亮. 南京大胜关长江大桥 Q420qE 钢焊接工艺评定试验[J]. 电焊机, 2012, 42(9): 77-89.
- [3] 魏振鑫. 新型桥梁高强度 Q420qE 与 Q370qE 钢的焊接及应用[J]. 工程建设, 2012(3): 58-70.
- [4] 袁少威, 许少普, 刘庆波, 等. 80 mm 桥梁用抗层状撕裂 Q420qE-Z35 钢板的试制[J]. 中国冶金, 2013(6): 26-29.

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、及本刊公众微信“焊割在线”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、手机版传播、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
2016 年 1 月 1 日