

石油钻杆形变热处理摩擦焊工艺

周 军<sup>1</sup>， 秦国梁<sup>2</sup>， 齐秀滨<sup>1</sup>

(1. 机械科学研究院 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080; 2. 山东大学 现代焊接技术研究所, 济南 250061)

摘 要: 对石油钻杆 37CrMnMo 管体和 42CrMoA 管接头进行了形变热处理摩擦焊接, 对接头金相组织和力学性能分析检测. 结果表明, 接头完全淬火区晶粒度达到 8 级, 不完全淬火区窄且其被形变区完全覆盖, 回火后不完全回火区组织为回火索氏体 + 铁素体或碳化物过分长大的回火索氏体; 管体和管接头热影响区的硬度最大下降幅度分别仅为 6.9% 和 4.2%; 接头屈服强度比为 0.905, 冲击吸收功平均达 95 J, 拉伸试验断裂位置为 37CrMnMo 管体侧母材, 接头力学性能均超出国家标准 SY/T5561—1999 和美国石油学会标准 APISPEC5D 的要求, 表明形变热处理克服了石油钻杆摩擦焊接头韧度大幅降低和热处理热影响区边界硬度下降的难题.

关键词: 摩擦焊; 石油钻杆; 形变热处理; 组织性能

中图分类号: TG453.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2011)08-0001-04



周 军

0 序 言

目前国内外石油钻杆生产厂家普遍采用美国的专利技术将接头组织恢复到调质热处理组织状态, 即摩擦焊接后要经感应加热退火 + 调质(淬火 + 回火) 三道工序. 但目前常用的焊后感应加热热处理工艺仍然存在接头韧度有较大幅度降低和焊后局部热处理热影响区边界硬度、强度下降等两方面问题.

国内研究人员基于感应加热对石油钻杆焊后热处理工艺进行了改进. 张浩等人<sup>[1]</sup>通过调整正火工艺参数, 细化珠光体组织, 提高了接头冲击吸收功. 胡荣生等人<sup>[2]</sup>采用在线喷雾气冷, 提高冷却速率, 冲击韧度值大幅度提高. 毛信孚等人<sup>[3]</sup>设计了感应加热穿透调质工艺方案, 通过提高淬火温度、实现在钻杆表面不过热的条件下使奥氏体均匀化. 但李鹤林等人<sup>[4]</sup>对从全国各油田收集的近百件石油钻杆焊接接头断裂失效样品进行分析, 结果表明, 绝大多数属于低应力脆断, 其根本原因在于接头韧度低, 并认为热处理不当是接头韧度低的主要原因. 这充分说明改进后的焊后感应加热调质处理仍未从根本上解决钻杆接头韧度低的问题. 综上所述, 当前焊后感应热处理工艺已很难满足日益发展的深层并对石油钻杆强度和韧度的要求, 开发新的热处理工艺已成为石油钻杆制造亟待解决的一项关键技术. 根据

摩擦焊和形变热处理的特点, 文中将两过程有机结合起来, 开发了石油钻杆形变热处理摩擦焊新工艺, 实现了石油钻杆的高强高韧焊接.

1 试验方法

设备选用带形变热处理功能的 HSMZ-130 混合型摩擦焊机, 如图 1 所示. 摩擦焊接过程在优化的工艺参数下施焊. 试验材料采用石油钻杆管体和接头常用的 G105 钢级材料组合, 管体采用 37CrMnMo 调质钢管材, 管接头采用 42CrMoA 锻件调质钢, 其化学成分如表 1 所示. 管体和管接头均为调质状态, 组织均为回火索氏体.

形变热处理过程采用液-气雾化冷却介质, 即

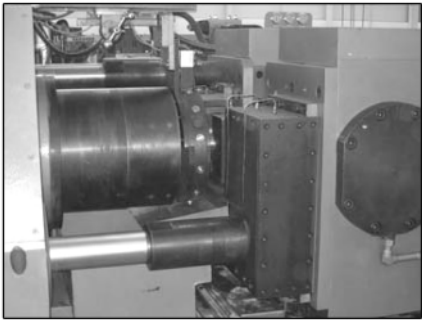


图 1 形变热处理摩擦焊机

Fig. 1 Thermomechanical heat treatment friction welding machine

表 1 管体和管接头化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical compositions of pipe body and joint

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu
管体 37CrMnMo	0.37	0.25	0.71	0.013	0.002	1.03	0.15	0.061	0.010	0.007	0.036
管接头 42CrMoA	0.43	0.26	0.91	0.010	0.002	1.11	0.28	0.078	0.027	0.008	0.071

水 + 压缩空气的复合介质,调节介质喷施工工艺参数如气、水压力、流量等参数以达到最优的冷却效果.形变淬火以后采用 690 ℃ 回火处理.

2 接头组织与性能分析

2.1 形变热处理摩擦焊接头组织

将摩擦焊和形变热处理过程结合起来得到的接头组织是淬火组织.

图 2 为摩擦焊形变淬火接头及金相组织.从图 2a 中可以看出,形变热处理摩擦焊接头具有狭窄的焊接热影响区.图 2b 中左侧为 37CrMnMo 钢,右侧为 42CrMoA 钢,为完全淬透的马氏体组织.热影响区与母材界面处为不完全淬火区,金相组织为细晶马氏体 + 铁素体 + 少量贝氏体,如图 2c、d 所示.

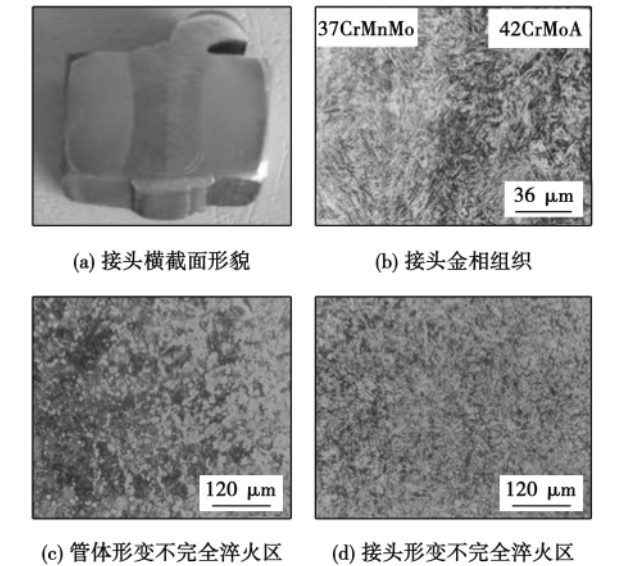


图 2 摩擦焊形变淬火接头及金相组织  
Fig. 2 Joint of pipe by thermomechanical quenching treatment and its microstructures

为了恢复接头塑韧性,必须对淬火后的接头进行回火处理.回火处理则一般采用感应加热 690 ℃ 回火.图 3 为摩擦焊接头形变淬火 + 690 ℃ 感应回火的金相组织形貌.从图 3 中可以看出,两侧组织均为回火索氏体,晶粒度在 8 级左右,37CrMnMo 侧金相组织为回火索氏体 + 铁素体或碳化物过分积聚

长大的回火索氏体,如图 3a 所示;42CrMoA 侧金相组织为全部回火索氏体,如图 3b 所示.经过 690 ℃ 回火处理后,37CrMnMo 侧不完全回火区金相组织为细晶回火索氏体 + 铁素体或碳化物过分积聚长大的回火索氏体,宽度约为 0.6 mm 左右,如图 3c 所示;42CrMoA 侧不完全回火区金相组织为回火索氏体 + 碳化物过分积聚长大的回火索氏体,宽度为 0.3 mm 左右,如图 3d 所示.

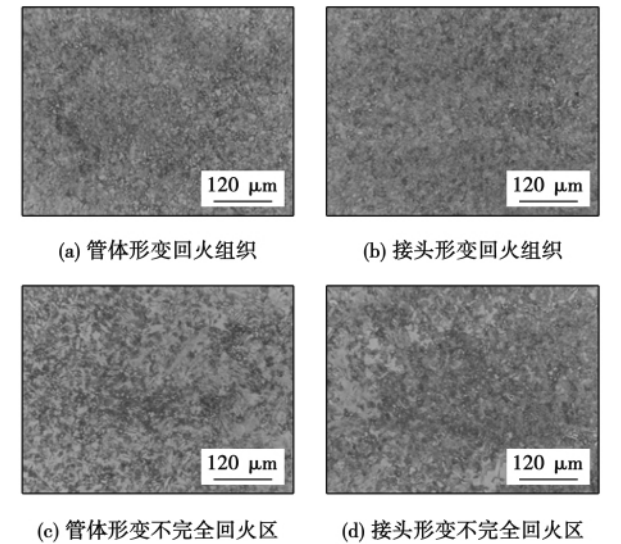


图 3 摩擦焊形变热处理接头淬火 + 感应回火组织形貌  
Fig. 3 Microstructures of joint treated by quenching and induction tempering

2.2 形变热处理摩擦焊接头力学性能

表 2 为形变热处理摩擦焊接头拉伸试验结果.从表 2 中可以看出,形变热处理摩擦焊接头的屈服强度为 765 MPa,抗拉强度为 845 MPa,接头屈强比为 0.905,拉伸试件断裂位置为 37CrMnMo 管体侧,如图 4 所示;接头断后伸长率为 15%,分别达到两母材的 88.2% 和 75.0%;室温下的冲击吸收功为 95 J.力学性能检测结果表明,石油钻杆形变热处理摩擦焊接头具有良好的综合力学性能,接头各项力学性能指标均超出国家标准 SY/T5561—1999 和美国石油学会标准 APISPEC5D.

接头内硬度分布可以说明石油钻杆摩擦焊接头经热处理之后焊接热影响区的软化程度.图 5 为形

表 2 摩擦焊形变热处理接头力学性能  
Table 2 Mechanical properties of joint

材料	屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	冲击吸收功
	$R_{eL}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A(\%)$	$A_{KV}/\text{J}$
5 号石油钻杆	765	845	15	95
SY/T5561—1999	$\geq 655$	$\geq 724$	$\geq 13$	$\geq 20$
APISPEC5D	724 ~ 931	793	$\geq 14$	$\geq 38$

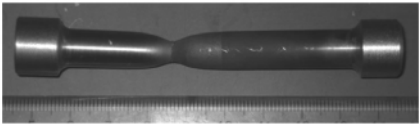


图 4 摩擦焊形变淬火拉伸试验断裂位置  
Fig. 4 Fracture position in tensile test

变热处理摩擦焊接头硬度测试点的分布及硬度测试结果. 从图 5b 接头硬度的分布看, 尽管在管体和管接头两热影响区硬度均有不同程度下降, 但下降幅度很小, 在管体 37CrMnMo 钢一侧硬度最大下降仅有 6.9%, 而在管接头 42CrMoA 钢一侧下降幅度更

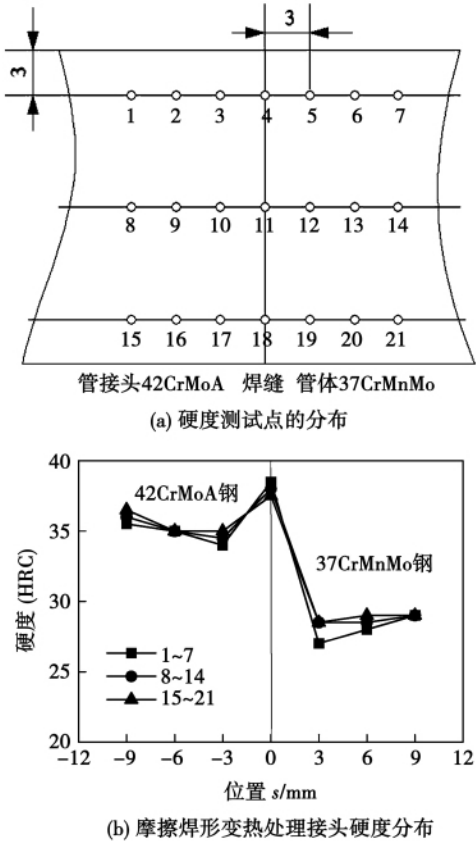


图 5 接头硬度测试点的分布及硬度测试结果  
Fig. 5 Distribution of testing points for hardness in joint and test results

小, 最大仅为 4.2%. 因此, 石油钻杆形变热处理摩擦焊可以有效抑制接头硬度在热处理之后的降低.

### 3 摩擦焊形变热处理强化机制分析

形变热处理是在金属材料上有效地综合利用形变强化(加工硬化)及相变强化, 将压力加工与热处理操作相结合, 使成形工艺与获得最终性能统一起来的一种复合强韧化处理方法<sup>[5-8]</sup>.

摩擦焊形变热处理的加热过程是通过摩擦焊本身的焊接过程实现的, 摩擦焊接过程既是焊接过程的实现过程同时又是为形变淬火进行热循环的准备过程. 既要满足摩擦焊工艺本身对热循环要求同时又要满足形变淬火对热循环的要求, 既满足摩擦焊焊缝强韧度要求的同时, 要求焊缝的加热组织是均一稳定的细晶奥氏体组织, 同时令正火区和不完全正火区域尽可能窄.

与高温感应淬火相比, 摩擦焊形变余热淬火是在高温条件下经过形变后的淬火, 由于高温形变的作用, 加上加热速度快, 同时是在形变过程中升温, 晶粒来不及长大. 因此, 除不仅可以保留高温淬火有利提高韧度的组织特征外, 还可以克服高温感应淬火带来的缺点, 即摩擦焊形变余热淬火获得的是薄壳状残余奥氏体所包围的位错板条马氏体组织, 消除了孪晶片状马氏体和粗大的马氏体, 得到较为细小的马氏体, 并且改变了 MnS 的分布状态, 这些组织特征都有利于焊缝强韧度的提高.

摩擦焊形变余热淬火过程中, 奥氏体状态下的形变可使淬火所得到的马氏体的位错密度显著增加, 嵌镶尺寸减少. 对石油钻杆摩擦焊形变余热淬火的焊缝区组织分析可以很容易观察到大量位错形成的位错胞——大量的位错是在摩擦焊接时由于形变而产生的. 这种结构特征是从形变奥氏体继承来的, 一般来说, 也是摩擦焊形变余热淬火后强度和韧度得以提高的原因之一. 试验也证明, 这种强韧化效果可以遗传: 高温奥氏体形变后回复过程中, 通过多边化形成了有利于马氏体转变时位错发生增值的稳定的亚结构, 并被淬火马氏体所继承, 而再次加热时将由于沿这种亚结构边界析出能钉扎这些边界的碳化物, 使这些亚结构变得更加稳定, 因此使强韧化效果得以遗传. 摩擦焊形变余热淬火后的焊缝再次回火加热, 钻杆仍然保留着比普通摩擦焊后感应淬火具有的更高强度与韧度, 而不使形变强化效果丧失.

形变热处理摩擦焊局部加热所形成二次热影响区与感应局部加热有所不同, 摩擦焊形变余热淬火

的局部摩擦加热除了加热速度快、加热温度高、加热时间短、热影响区窄以外,另一主要特征是加热过程伴随有激烈的形变,强化了焊缝区的形变程度,使顶锻焊接过程中应力状态发生有利变化,形变量大增,形变区加宽并扩大到回火区,覆盖了回火热影响区边界,即所谓的硬度低谷处。在回火热影响区边界处由于焊接过程形变条件的强化,形变效果也十分明显,将本来因轧制伸直的流线变为波浪型曲折。因此,一般局部热处理加热中,过回火区所谓的失强软化现象在摩擦焊形变热处理过程中由于形变强化的作用已不复存在,形变范围覆盖了焊接热影响区、回火热影响区,形变的硬化作用抑制了热影响区加热回火软化过程。

石油钻杆经摩擦焊形变余热淬火的强度与韧度同时得到提高的原因是多方面的,如接头为锻造组织、焊缝区金属晶粒细化、组织致密夹杂物弥散分布等。因此焊缝不会产生与熔化和凝固冶金有关的一些焊接缺陷和焊接脆化现象,如粗大的柱状晶、气孔、偏析夹杂和裂纹等焊接缺陷。接头强度远大于熔焊、钎焊的强度,达到甚至超过母材的强度。

## 4 结 论

(1) 接头完全淬火区晶粒度达到 8 级,不完全淬火区窄且其被形变区域完全覆盖。经过 690 ℃ 回火处理后,37CrMnMo 侧不完全回火区金相组织为细晶回火索氏体+铁素体或碳化物过分积聚长大的回火索氏体,宽度约为 0.6 mm 左右;42CrMoA 侧不完全回火区金相组织为回火索氏体+碳化物过分积聚长大的回火索氏体,宽度为 0.3 mm 左右。

(2) 接头硬度测试结果表明,尽管在管体和管接头两个热影响区的硬度均有很小幅度的下降,在管体 37CrMnMo 钢一侧硬度最大下降仅有 6.9%,而在管接头 42CrMoA 钢一侧下降幅度最大仅为 4.2%。因此,石油钻杆形变热处理摩擦焊可以有效抑制接头硬度在热处理之后的降低。

(3) 形变热处理摩擦焊接头屈强比为 0.905,冲击吸收功平均为 95 J,拉伸试验试件断裂位置为 37CrMnMo 管体侧。接头的综合力学性能均符合中国石油标准 SY/T5561—1999 和美国石油协会标准

APISPEC5D 的要求,避免了摩擦焊接后采用感应热处理带来的摩擦焊接头韧度较大幅度的降低。

## 参考文献:

- [1] 张 浩,唐俊强,梁晓辉. 提高钻杆接头冲击功的工艺方法[J]. 热加工工艺,2006,20(35): 77-78.  
Zhang Hao, Tang Junqiang, Liang Xiaohui. Technique for enhancing impact force of drill pipe joint[J]. Materials & Heat Treatment, 2006, 20(35): 77-78.
- [2] 胡荣生,刘开源,李启堂. 石油钻杆焊缝喷雾热处理[J]. 金属热处理,1999,24(10): 18-20.  
Hu Rongsheng, Liu Kaiyuan, Li Qitang. Spray quenching for welding area of drilling pipe[J]. Materials & Heat Treatment, 1999, 24(10): 18-20.
- [3] 毛信孚,傅 莉,尚高锋,等. S135 钻杆摩擦焊接头热处理后的组织和性能[J]. 金属热处理,2004,29(12): 22-26.  
Mao Xinfu, Fu Li, Shang Gaofeng, et al. Microstructure and mechanical properties of friction welded joint for drill rod S135 after heat treating[J]. Materials & Heat Treatment, 2004, 29(12): 22-26.
- [4] 李鹤林,冯耀荣,李京川,等. 钻杆接头和转换接头材料及热处理工艺的研究[J]. 石油机械,1992,20(3): 1-6.  
Li Helin, Feng Yaorong, Li Jingchuan, et al. Study on materials of drill pipe joint and conversion joint and their heat treatment process[J]. China Petroleum Machinery, 1992, 20(3): 1-6.
- [5] 王经文. 高温形变热处理及其应用[J]. 安徽机电学院学报,2000,15(1): 1-9.  
Wang Jingwen. High temperature thermomechanical treatment and its application[J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering, 2000, 15(1): 1-9.
- [6] Coret M, Calloch S, Combescure A. Experimental study of the phase transformation plasticity of 16MND5 low carbon steel under multiaxial loading[J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18: 1707-1727.
- [7] ĆIRIĆ R, RADÓVIC N. Dynamic recrystallization in M2 tool steel during friction welding[J]. Journal of Metallurgy, 2005, 11(4): 315-319.
- [8] Sia N N, Guo W G. Thermomechanical response of HSLA-65 steel plates: experiments and modeling[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37: 379-405.

作者简介: 周 军,男,1963 年出生,硕士,研究员,硕士研究生导师。主要从事摩擦焊工艺及装备的研究。发表论文 20 余篇。Email: mch-zhoujun@tom.com

## MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

**Friction welding process with thermomechanical heat treatment for oil drill pipe** ZHOU Jun<sup>1</sup> , QIN Guoliang<sup>2</sup> , QI Xiubin<sup>1</sup> ( 1. Harbin Welding Institute , Harbin 150080 , China; 2. Institute of Advanced Welding Technology , Shandong University , Jinan 250061 , China) . p 1 – 4

**Abstract:** By the thermomechanical heat treatment friction-welding machine , the pipe body of 37CrMnMo steel and the pipe joint of 42CrMoA steel were welded , and the mechanical properties and microstructures of the joint were tested and analyzed. The experimental results show that the grain size in the full quenching zone can reach 8 grade , the partial quenching zone is narrow and covered by thermomechanical zone. After tempering treatment , the microstructure in partial quenching zone is the mixed microstructure of tempered sorbite and ferrite or the tempered sorbite with the grown carbide. The hardness in heat-affected zones at pipe body and joint decreases by 6.9% and 4.2% respectively. The yield ratio of the joint is up to 0.905 , its average impact energy is 95 J , and the fracture in tensile test appears at 37CrMnMo steel side. The mechanical properties of the joint meet the national standard of SY/T5561 – 1999 and America Petroleum Institute standard of APISPEC5D. The studied results indicate that the thermomechanical heat treatment can avoid the great reduction of impact toughness of weld and the decrease of hardness at the boundary of HAZ.

**Key words:** friction welding; oil drill pipe; thermomechanical heat treatment; microstructure and mechanical properties

**Effects of welding heat input on structure and properties of 800 MPa ultra fine grained steel welding joints** ZHAO Hongyun<sup>1</sup> , LIU Jiakun<sup>1</sup> , LUO Zong'an<sup>2</sup> , HU Haifeng<sup>1</sup> , WANG Guodong<sup>2</sup> ( 1. School of Materials Science and Engineering , Harbin Institute of Technology at Weihai , Weihai 264209 , China; 2. State Key Laboratory of Rolling and Automation , Northeastern University , Shenyang 110004 , China) . p 5 – 8

**Abstract:** The HAZ microstructure and mechanical properties of the 800 MPa grade ultra fine grained steel under different welding heat input were studied. The results showed that HAZ grain of the 800 MPa grade ultra fine grained steel had grown up distinctly under welding thermal cycle , and there was a more obvious growth trend along with the increase of welding heat input. HAZ contained ultra-low carbon bainite and thin ferrite , and the structure of overheated zone changed obvious under the effect of welding heat , which was the birthplace of the fracture cracks. By comparing to that of the base metal , the hardness value of the whole HAZ was decreased , and there were two distinct softened regions under different welding heat input. The yield strength of the welded joints was reduced gradually with the increase of welding heat input.

**Key words:** ultra fine grained steel; low carbon bainite;

softened region

**A novel WMM method based de-noising for ultrasonic signal** CHI Dazhao , GANG Tie ( State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . p 9 – 12

**Abstract:** Ultrasonic TOFD ( time of flight diffraction) has the shortcoming of sensitive to noise for the lower amplitude in the tested signal. According to the characteristics that the defect waves have strong correlation and the noise non-correlation in TOFD tested two adjacent A-scan lines , an improved WMM ( wavelet modular maximum) method based de-nosing is proposed. Computer simulated and weld tested signals are de-nosing processed by using conventional and improved WMM methods correspondingly. The experimental results show that the improved method is more effective in noise suppression and has better adaptability for different noise. Compared with the conventional method , the proposed technique can greatly improve the ability of identifying defect wave.

**Key words:** ultrasonic TOFD; de-noising; wavelet modular maximum

**PFC control strategy of variable polarity TIG welding power supply** DING Kun , YAO Heqing ( College of Mechanical & Electrical Engineering , Hohai University , Changzhou 213022 , China) . p 13 – 16

**Abstract:** The output power of variable polarity TIG welding power supply was studied. The results show the output power changes with the period and duty ratio of variable polarity welding , and the output power in electrode positive is far large than that in electrode negative. The periodically changing output power will cause the variable polarity TIG welding power supply to absorb power from power grid periodically. The input current of the power supply was distorted seriously by using normal PFC ( power factor correction) circuit and control strategy. A new PFC control strategy based on load observer is presented to reduce the harmonics of variable polarity inverter arc welding power supply. Experiments result shows that this control strategy is available and near unity power factor is obtained.

**Key words:** variable polarity; power factor correction; periodic load; load observer

**Microstructure and properties of aluminum alloy welded by electric current supported laser welding** ZHANG Xinge , LEI Zhenglong , GUO Xinjian , CHEN Yanbin ( State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . p 17 – 20

**Abstract:** The 2219 aluminum alloy with 3 mm thickness was carried out by electric current supported laser welding , and the influences of electric current on the macrostructure , micro-