

# 激光冲击强化电源拓扑及控制

张 伟<sup>1</sup>, 齐铂金<sup>1</sup>, 许海鹰<sup>2</sup>, 邹世坤<sup>2</sup>, 车志刚<sup>2</sup>, 曹子文<sup>2</sup>, 李仁杰<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 采用 IGBT 全桥逆变电路作为钕玻璃激光器本征级和放大级泵浦氙灯驱动电源主电路拓扑, 结合内环为电流控制, 外环为电压控制的双闭环控制电路实现了氙灯驱动电源储能电容的恒流限压充电. 高压脉冲触发电路由气体放电管与高压脉冲变压器构成, 可产生电压峰值高达 30 kV 的高压脉冲信号, 能可靠击穿泵浦氙灯. 设计了脉冲氙灯放电触发脉冲工作时序电路, 当系统工作在调 Q 模式时, 可以获得峰值功率很高的巨脉冲激光输出. 对 TC4 钛合金 TIG 焊接头进行了激光冲击强化处理, 效果显著.

关键词: 脉冲氙灯; 全桥逆变; 激光电源

中图分类号: TN249 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2013)02-0097-04



张 伟

## 0 序 言

激光冲击强化技术 (laser shock processing, LSP) 利用高功率密度 ( $\text{GW}/\text{cm}^2$ )、短脉冲 (ns) 的激光束与工作物质相互作用产生高达数 GPa 的冲击波压力, 使材料表层发生微观塑性变形, 形成残余压应力层, 从而有效地改善了金属材料表面的力学性能, 能大幅度提高材料的疲劳寿命、抗应力腐蚀性能<sup>[1-3]</sup>. 激光冲击处理具有应变影响层深, 冲击区域和压力可控, 对表面粗糙度影响小, 易于自动化等优点, 因此被广泛应用于航空发动机的生产过程中, 不但增强了飞行器的安全系数, 提高了可靠性和使用寿命, 而且取得了显著的经济效益.

目前激光冲击强化技术所用的激光器多数为钕玻璃固体激光器. 由于钕玻璃激光器采用氙灯作为泵浦源, 因此必须具有一台与其相适应的氙灯供电电源. 对于该激光器电源来说, 它的负载是脉冲氙灯. 当氙灯内有脉动大电流流过时, 脉冲氙灯进行弧光放电, 钕玻璃晶体吸收光能形成受激辐射, 从而发出激光.

基于钕玻璃激光器, 采用 IGBT 逆变技术研制了一台激光冲击强化电源, 实现了对脉冲氙灯激励源的触发和脉动大电流快速放电, 成功激发了钕玻璃晶体, 从而获得了峰值功率很高的巨脉冲激光输出. 对 TC4 钛合金 TIG 焊接头进行了激光冲击强化

处理, 获得了显著的效果.

## 1 激光冲击强化电源构成

为了触发脉冲氙灯并使其弧光放电, 激光冲击强化电源必须具有氙灯触发电路、储能电容充电电路, 以及储能电容放电电路.

采用的调 Q 钕玻璃激光器系统包括一路本征级钕玻璃激光振荡器、两路放大级钕玻璃激光主放大器, 因此激光冲击强化电源主要由一路本征级氙灯驱动电源、两路放大级氙灯驱动电源, 以及两路高压脉冲触发电源构成, 如图 1 所示.

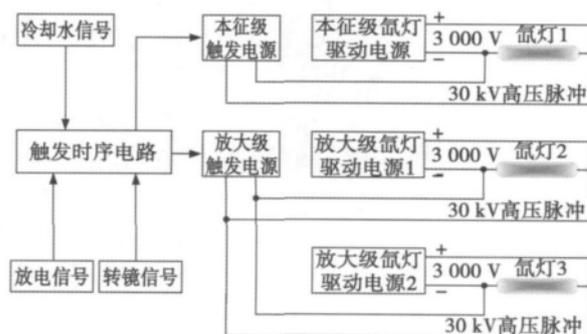


图 1 激光冲击强化电源构成

Fig. 1 Configuration of LSP power supply

在图 1 中, 本征级、放大级氙灯驱动电源输出 2 A 恒定电流, 输出电压 0~3 000 V 连续可调. 高压

脉冲触发电源包括两路,其中一路用于本征级氙灯的触发;另一路可同时触发两路放大级氙灯,触发脉冲宽度  $20 \sim 50 \mu\text{s}$ ,脉冲电压峰值最高达  $30 \text{ kV}$ 。

### 1.1 氙灯驱动电源主电路拓扑

氙灯驱动电源主电路采用 IGBT 全桥逆变主电路拓扑,主要由单相桥式整流电路、LC 滤波电路、IGBT 全桥逆变电路、高频变压器、次级全桥整流滤波电路组成,如图 2 所示。

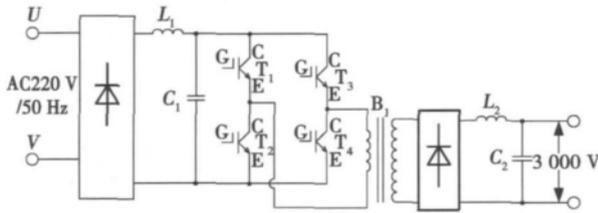


图 2 氙灯驱动电源主电路拓扑

Fig. 2 Main circuit topology of xenon lamp driven power supply

工作原理如下: AC220 V/50 Hz 交流电经单相整流桥、电感  $L_1$  和电容  $C_1$  整流滤波后得到约  $310 \text{ V}$  的稳定直流电压,然后输入由 IGBT 功率开关管  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  组成的全桥逆变电路变换成频率约  $20 \text{ kHz}$  的交流方波,再经高频变压器  $B_1$  耦合到次级的全桥整流电路获得脉动直流输出,最后经电感  $L_2$  对储能电容  $C_2$  进行充电,充电电压  $0 \sim 3000 \text{ V}$  连续可调。其中 IGBT 功率开关管  $T_1$  和  $T_4$ 、 $T_2$  和  $T_3$  交替导通和关断,完成逆变过程。

### 1.2 高压脉冲触发电源拓扑

钕玻璃激光器采用的脉冲氙灯内径为  $2 \text{ cm}$ ,极间距为  $30 \text{ cm}$ ,击穿电压约  $20 \text{ kV}$ 。当高压脉冲触发电源产生的峰值高达  $30 \text{ kV}$  的高压脉冲击穿氙灯后,储能电容  $C_2$  就可以通过电感  $L_3$  ( $L_3$  为空心饱和电感) 向氙灯放电。高压脉冲触发电源主要由  $1000 \text{ V}$  直流充电电源、电容  $C_T$ 、高压脉冲变压器、气体放电管  $GT_1$ 、 $GT_2$  和放电管触发电路组成,其拓扑如图 3 所示。

系统上电后,  $1000 \text{ V}$  直流电源通过限流电阻  $R_2$  向电容  $C_T$  充电,最高充电电压可达  $1000 \text{ V}$ 。气体放电管  $GT_1$  和  $GT_2$  的直流击穿电压为  $800 \text{ V}$ ,二者串联后通过高压脉冲变压器的原边连接在电容  $C_T$  的两端,即电容  $C_T$  的端电压即为加载在气体放电管  $GT_1$  和  $GT_2$  两端的电压。

当电容  $C_T$  充满电时,电容  $C_T$  的端电压 ( $\leq 1000 \text{ V}$ ) 始终小于气体放电管  $GT_1$  和  $GT_2$  的串联击穿电压 (约  $1600 \text{ V}$ ),因此在没有放电触发信号时

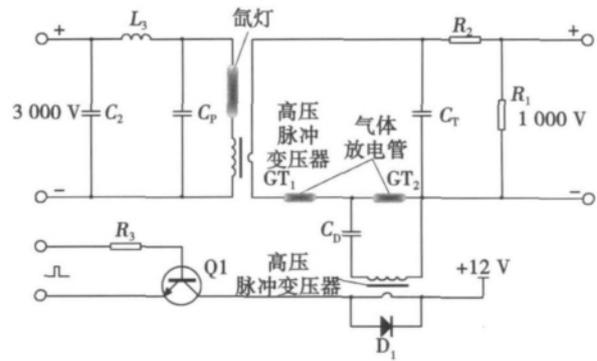


图 3 高压脉冲触发电源拓扑

Fig. 3 High-voltage pulse power supply topology

气体放电管  $GT_1$  和  $GT_2$  处于阻断状态,使高压脉冲变压器的原边回路保持断路。

当系统内部或外部启动放电信号时,触发时序电路根据当前设定的工作模式会产生一个放电触发脉冲使图 3 中的晶体管  $Q_1$  导通,这样  $+12 \text{ V}$  电源通过低压脉冲变压器的原边放电,在其副边就会产生一个大约  $1000 \text{ V}$  的高压脉冲信号。该高压脉冲信号作用于气体放电管  $GT_2$ ,使其瞬时击穿导通,从而使  $GT_1$  和  $GT_2$  的串联击穿电压降为  $800 \text{ V}$  左右。此时,储能电容  $C_T$  两端的电压就高于放电管  $GT_1$  和  $GT_2$  的串联击穿电压,气体放电管  $GT_1$  随之被击穿,从而使得电容  $C_T$  可以通过高压脉冲变压器的原边实现脉冲放电。高压脉冲变压器为升压变压器,变比为  $1:30$ ,因此当放电管  $GT_1$  和  $GT_2$  被击穿而电容  $C_T$  瞬间放电时,在高压脉冲变压器的副边就可以产生电压峰值高达  $30 \text{ kV}$  的高压脉冲触发信号。该高压脉冲触发信号通过高频电容  $C_p$  耦合至脉冲氙灯两端,从而击穿脉冲氙灯。这样,氙灯驱动电源的储能电容  $C_2$  就立即对氙灯进行弧光放电。

## 2 控制电路设计

### 2.1 氙灯驱动电源双闭环控制

氙灯驱动电源为恒流限压输出特性,输出电流恒定为  $2 \text{ A}$ ,输出电压  $0 \sim 3000 \text{ V}$  连续可调。

为了实现氙灯驱动电源恒流限压的输出特性,控制电路采用电流和电压双闭环的控制方法,即内环控制为电流负反馈闭环控制,外环控制为电压负反馈闭环控制。氙灯驱动电源输出特性控制原理框图如图 4 所示。

在氙灯驱动电源向储能电容  $C_2$  充电的过程中,当电容  $C_2$  的电压低于设定的充电电压时,电流负反馈闭环控制电路工作,即氙灯驱动电源将以设定的

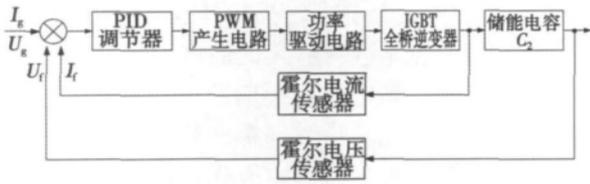


图 4 氙灯驱动电源双闭环控制原理图

Fig. 4 Control schematic of xenon lamp driven power supply

充电电流对电容进行恒流充电;当电容  $C_2$  的电压达到设定的充电电压时,氙灯驱动电源自动切换为恒压充电模式,此时电压负反馈闭环控制电路工作,保持电容  $C_2$  两端的电压为设定的充电电压。

### 2.2 触发时序电路

当储能电容  $C_2$  充满电后,通过冲击强化电源面板上的放电按钮或内部定时器可启动脉冲宽度为 2.5 ms 的放电信号,该信号再通过一系列的触发时序电路后产生高压触发脉冲点燃氙灯。

考虑到泵浦氙灯放电时的强电磁干扰,触发时序电路采用单稳触发器 NE555 为核心的数字电路来实现。触发时序电路由多个 NE555 及其外围电路级联组成,主要包括放电信号产生电路、放电信号与转镜信号同步电路、延迟信号产生电路,以及触发信号产生电路等。单级 NE555 及其外围电路见图 5。

在图 5 中,前级信号的下降沿经电容  $C_{46}$  输入 NE555 的触发端并在其输出端产生宽度可调的脉冲信号,其脉冲宽度由电阻  $R_{57}$ 、可调电位器  $VR_4$ ,以及电容  $C_{49}$  的充电时间决定,调节  $VR_4$  的阻值就可以调节脉冲信号持续的时间。

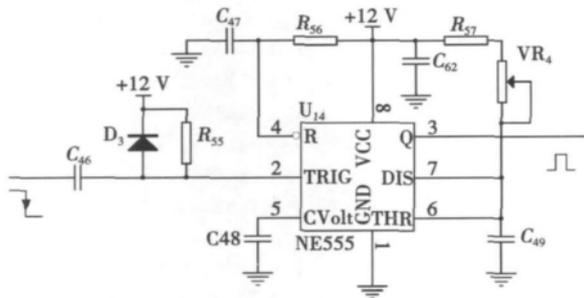


图 5 NE555 及其外围电路

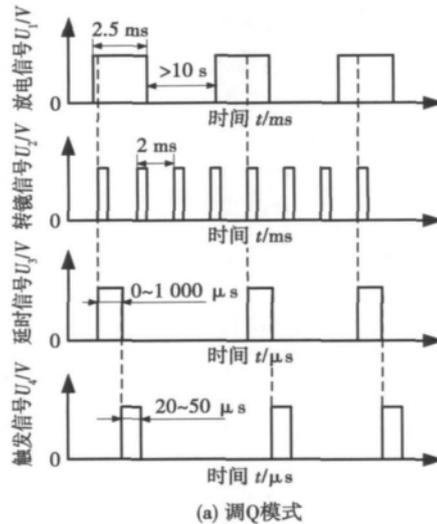
Fig. 5 NE555 and its external circuit

### 2.3 放电触发信号工作时序

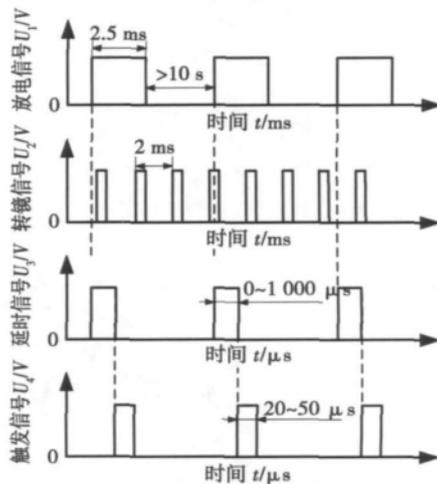
钨玻璃激光器为转镜调 Q 激光器,当泵浦氙灯点燃后,由于棱镜面与腔轴不垂直,谐振腔反射损耗很大,此时腔的 Q 值很低,不能形成激光振荡。在这

段时间内,工作物质在氙灯光泵激励下,激光上能级反转粒子数大量积累,同时棱镜面也逐渐转到与腔轴垂直的位置,腔的 Q 值逐渐升高,到一定时刻就形成激光振荡,并输出巨脉冲激光。因此在调 Q 模式下,为了获得稳定的大功率脉冲激光输出,必须准确地控制延迟时间,即要求在氙灯点燃之后,需要经过一定的延迟时间以保证反转粒子数达到极大值,同时该延迟时间恰好等于棱镜转到成腔位置(两反射镜相平行的位置)所需要的时间,使之形成激光振荡,才能获得最大激光功率输出。

调 Q 模式工作时序如图 6a 所示。通过冲击强化电源面板上的放电按钮或内部定时器可启动脉冲宽度为 2.5 ms 的放电信号,该放电信号与转镜信号一起输入触发时序电路并进行同步,即当放电信号为高电平且在转镜信号的上升沿时触发延时信号;然后在延时信号的下降沿再产生触发信号(20 ~ 50



(a) 调 Q 模式



(b) 自由振荡模式

图 6 氙灯高压脉冲触发信号工作时序

Fig. 6 Timing chart of high-voltage pulse power supply

$\mu\text{s}$  连续可调), 该触发信号驱动图 3 中的晶体管  $Q_1$  导通, 使高压脉冲触发电源产生高压脉冲击穿氙灯, 从而使氙灯驱动电源的储能电容  $C_2$  对氙灯放电, 实现对工作物质的激励. 延迟时间  $0 \sim 1\,000\ \mu\text{s}$  连续可调, 具体的延迟时间可通过现场调试来确定. 因此只要延迟时间合适, 就可以获得峰值功率很高的巨脉冲激光输出.

钕玻璃激光器还可以工作在自由振荡模式, 其工作时序如图 6b 所示. 在自由振荡模式下, 放电信号不与转镜信号同步, 因此激光器输出的功率较小. 自由振荡模式常用于激光器的光路调试.

### 3 试验结果

#### 3.1 激光冲击强化电源的输出特性

图 7 为实测的储能电容  $C_2$  对脉冲氙灯快速放电的电流波形. 测量脉冲氙灯放电电流采用的电流互感器变比为  $1:1\,000$ , 取样电阻为  $0.74\ \Omega$ , 则实测的脉冲氙灯放电电流峰值为  $5\,800\ \text{A}$  左右.

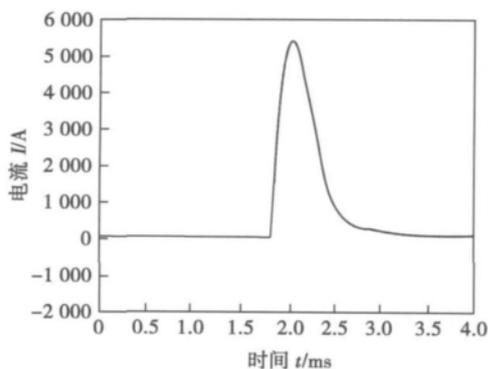


图 7 实测的脉冲氙灯放电波形

Fig. 7 Discharge waveform of xenon lamp

#### 3.2 工艺试验

图 8 为采用该激光电源在铝箔表面冲击形成的激光光斑. 利用该激光冲击强化系统开展了 TC4 钛

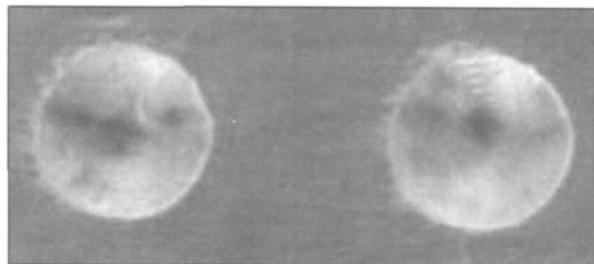


图 8 铝箔表面冲击形成的激光光斑

Fig. 8 Laser spot on aluminum foil surface

合金 TIG 焊接头的激光冲击强化处理. 经过 LSP 处理后, 焊缝横截面靠近材料表面的区域针状  $\alpha$  相数量减少, 热影响区靠近材料表面的区域细小等轴晶数量增加, 接头的拉伸力学性能较好, 其抗拉强度、屈服强度、断后伸长率的平均值分别提高了  $5.6\%$ 、 $8.2\%$  和  $66\%$  [4].

### 4 结 论

(1) 采用 IGBT 全桥逆变电路作为本征级和放大级氙灯驱动电源主电路拓扑, 结合内环为电流控制、外环为电压控制的双闭环控制电路实现了氙灯驱动电源储能电容的恒流限压充电.

(2) 采用气体放电管脉冲放电电路与高压脉冲变压器设计了高压脉冲触发电路, 实现脉冲氙灯的可靠击穿.

(3) 设计了调 Q 模式放电触发脉冲工作时序, 获得了峰值功率很高的巨脉冲激光输出, 并进行了 TC4 钛合金 TIG 焊接头的激光冲击强化处理, 效果显著.

#### 参考文献:

- [1] 周留成, 周 磊, 李应红, 等. 激光冲击强化对不锈钢焊接接头拉伸性能的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 52-54, 58. Zhou Liucheng, Zhou Lei, Li Yinghong, et al. Effect of laser shock processing on tensile strength of welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 52-54, 58.
- [2] 张 洁, 祝 乐, 孙爱华, 等. 激光冲击对电火花修复  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料裂纹力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(12): 17-20. Zhang Jie, Zhu Le, Sun Aihua, et al. Influence of laser shock processing on properties of  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  composite weld crack restored by electro-spark overlaying[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(12): 17-20.
- [3] 邹世坤, 王 健, 王华明. 激光冲击处理对焊接接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 17-20. Zou Shikun, Wang Jian, Wang Huaming. The effects of laser shock processing on mechanical properties of welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 17-20.
- [4] 许海鹰, 邹世坤, 车志刚, 等. 激光冲击次数对 TC4 氩弧焊缝微结构及性能的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 1-5. Xu Haiying, Zou Shikun, Che Zhigang, et al. Influence of laser shock processing times on TC4 argon arc welding joint microstructure and properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(3): 1-5.

作者简介: 张 伟, 男, 1977 年出生, 博士. 主要从事新型电源技术及焊接自动化技术方面工作. 发表论文 11 篇. Email: zhangweibh@buaa.edu.cn

通讯作者: 齐铂金, 男, 教授. Email: qbj@buaa.edu.cn

ang 110136 , China; 2. Department of Mechanical Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China; 3. Nantong CIMC Tank Equipment Co. , Ltd , Nantong 226001 , China) . pp 93 – 96

**Abstract:** The finite volume model of friction stir welding was established on basis of the Fluent software , which considered the practical structure of rotational tool and the relation between the material parameters and temperature. The effect of pin structure on material plastic flow behavior was studied by numerical simulation. The results show that the flow velocity of material decreases with the increase of the distance away from the weldment surface and rotational axis of pin. The flow velocity of material inside weldment increased with decreasing of the cone angle of pine or decreasing of the width of screw pitch. As to the pin with left screw whose rotational direction is clockwise , the flow direction of material near pin is downward while the flow direction near the thermal-mechanical affected zone is upward , which is opposite to that of the pin with right screw.

**Key words:** friction stir welding; flow; pin; numerical simulation

#### Laser shock processing power supply topology and control

ZHANG Wei<sup>1</sup> , QI Bojin<sup>1</sup> , XU Haiying<sup>2</sup> , ZOU Shikun<sup>2</sup> , CHE Zhigang<sup>2</sup> , CAO Ziwen<sup>2</sup> , LI Renjie<sup>1</sup> ( 1. School of Mechanical Engineering and Automation , Beihang University , Beijing 100191 , China; 2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute , Beijing 100024 , China) . pp 97 – 100

**Abstract:** IGBT full-bridge inverter circuit was used as the main circuit topology of the intrinsic and amplifier stage xenon lamp drive power supplies in the Nd glass laser. Double-loop negative feedback control circuits , which include current control in inner loop and voltage control in outer loop , were used in xenon lamp drive power supplies to achieve the constant current charging to the energy storage capacitor at the limited voltage. High-voltage pulse trigger circuit can produce peak voltage of 30 kV and make xenon lamp cut down reliably , which is composed of the gas-discharge tubes and high-voltage pulse transformer. Pulsed xenon lamp discharge trigger circuit is proposed to gain a very high peak power in pulse laser output by adjusting Q mode. This laser shock processing power supply was applied to TC4 titanium alloy tungsten inert gas ( TIG) welding joints , and the effect is significant.

**Key words:** pulsed xenon lamp; full-bridge inverter; laser power supply

#### Development of flux for soldering of 304 stainless steel

GUAN Yongxing<sup>1</sup> , XUE Songhai<sup>1</sup> , HAN Ruonan<sup>1</sup> , HU Yuhua<sup>2</sup> ( 1. College of Materials Science and Technology , Nanjing University of Aeronautics and Astronautics , Nanjing 210016 , China; 2. The 55th Research Institute , China Electronic Technology Group Corporation , Nanjing 210016 , China) . pp 101 – 104

**Abstract:** The spreading properties of Sn-Cu-Ni solder on 304 stainless steel sheet were studied by matching different fluxes , and the results indicated that Sn-Cu-Ni solder has excellent spreadability when it is matched with newly developed flux of

H36. Its spreading area reaches 109.56 mm<sup>2</sup> , which is increased by 249.4% , 239.3% compared with fluxes of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH and ZnCl<sub>2</sub>-NH<sub>4</sub>Cl , respectively. Results also indicated that the emulsifier 6500 can further improve the spreadability , and the largest spreading area reaches 157.49 mm<sup>2</sup>. It was found that , when the optimized flux H36-2 is matched with Sn-Cu-Ni as solder for 304 stainless steels , the mechanical properties of the soldered joints are superior to the existing literature data , the tensile strength and shear strength of the joints reached up to 22.72 MPa and 33.93 MPa , respectively.

**Key words:** 304 stainless steel; soldering flux; spreading areas; mechanical properties

#### Microstructure of 254SMO/Q235B dissimilar steel welded joint

WANG Ke<sup>1</sup> , ZHENG Zhentai<sup>1</sup> , XUE Haitao<sup>1</sup> , SONG Hongwei<sup>2</sup> ( 1. School of Materials Science and Engineering , Hebei University of Technology , Tianjin 300132 , China; 2. Qinhuangdao North Metal Hose Co. , Ltd , Qinhuangdao 066000 , China) . pp 105 – 108

**Abstract:** Manual TIG was used to weld the dissimilar steel 254SMO/Q235B by taking ERNiCrMo-2 , ERNiCrMo-3 , ERNiCrMo-10 ERNiCrMo-12 , ERNiCrMo-13 and ERNiCrMo-14 nickel-based alloy wire as filler metal. After welding , the welded joint microstructures were analyzed by metallurgical microscope , X-ray diffraction , scanning electron microscope and energy disperse spectroscopy. The results show that when the ERNiCrMo-2 , ERNiCrMo-3 and ERNiCrMo-14 welding wire are used , a certain number of cracks will appear in weld. The studies indicate that the welding cracks are solidification cracking. The key factor to cause weld cracking is the difference of physical properties of dissimilar steel and impurity segregation. The welds with good appearance and without welding cracks can be obtained by using the other filler metals.

**Key words:** super austenitic stainless steel; welding of dissimilar steel; hot cracking; microstructure

#### Research and application of joining technology at nanometer scale

HE Peng , JIAO Zhen , WANG Jun , LIN Tiesong ( State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . pp 109 – 112

**Abstract:** Nanomaterials have been widely applied due to their unique properties. Joining technology at nanometer scale is gradually developed with the popularity of nanomaterials , which has broad application prospects in the fields of electronics , aerospace , biology , and health care. The microscopic effects of nanomaterials were introduced and the current development of joining technology at nanometer scale were reviewed. Solid state bonding , soldering/brazing and fusion welding were mainly discussed. The differences in some phenomena and physical processes between nanoscale and macroscale were analyzed. In addition , the function of molecular dynamics simulation in nano-joining field was pointed out. At last , the application prospect of joining technology at nanometer scale was presented.

**Key words:** joining at nanometer scale; nano materials; molecular dynamics simulation