

# X80 管线钢埋弧焊用烧结焊剂的研制

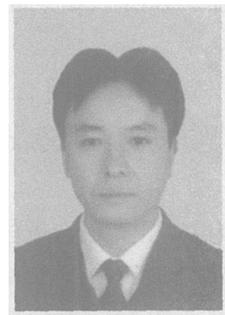
张 敏, 姚成武, 李继红, 刘 斌

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048)

摘 要: 从高强度低合金钢(HSLA)焊缝熔敷金属中的针状铁素体形核机理出发, 确定以  $\text{CaF}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-TiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  氟碱性渣系进行高强韧性埋弧焊烧结焊剂设计。结果表明, 焊剂中添加 MnO 有利于焊缝中 Mn 元素的过渡, 降低  $\gamma \rightarrow \alpha$  温度, 从而抑制高温铁素体的生成而对焊缝中针状铁素体的形成有利。由于焊缝金属裂纹敏感指数( $P_{cm}$ )较高, 焊后空冷奥氏体晶粒较细, 过量添加 MnO, 将会导致焊缝中 Mn 元素过高而细化奥氏体晶粒, 使得奥氏体晶界增加。进一步冷却, 贝氏体形核质点增加, 因而对晶内形核的针状铁素体不利。稀土元素对提高焊缝金属中针状铁素体含量有一定的促进作用。

关键词: 烧结焊剂; 强韧性; 针状铁素体; 晶内形核; 相变温度

中图分类号: TG113 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)10-029-04



张 敏

## 0 序 言

近年来, 低碳低合金高强钢(HSLA)的开发越来越受到重视, 其强度和韧性的指标不断提高, 给埋弧焊接材料及其焊接接头的质量提出了新的要求。

通过正交设计和因素轮换法试验, 对 X80 高等级管线钢用埋弧焊丝及与其相匹配的烧结焊剂进行试验研究, 着重分析焊剂成分变化对超低碳低合金高强钢焊缝力学性能的影响规律。

## 1 焊剂渣系的设计思想

### 1.1 焊缝熔敷金属显微组织的确定

针状铁素体显微组织为细晶互锁结构, 具有较高的位错密度, 与多边形铁素体、珠光体以及细晶铁素体相比, 具有更高的强度和优良的韧性<sup>[1]</sup>。实际上, 针状铁素体也是一种晶内形核的贝氏体, 二者的唯一区别在于贝氏体形核于奥氏体晶界部位, 而针状铁素体往往形核于奥氏体晶粒内部的非金属夹杂物表面, 二者转变行为的本质是相同的<sup>[2]</sup>。

尽管焊缝中针状铁素体的强度低于贝氏体, 但由于其形成过程中, 针状铁素体片之间的“相互碰撞”而导致混乱的“篮筐编结”显微结构, 从而使焊缝金属中的韧性优于贝氏体<sup>[1]</sup>。因此, 为使焊缝具有

高强度, 同时又有优良的韧性, X80 管线钢用埋弧焊缝组织主要是以针状铁素体和贝氏体为主, 且必须确保针状铁素体的含量。

### 1.2 焊剂渣系的选择和碱度确定

一般来说, 管线钢埋弧焊接工艺确定以后, 焊缝金属的冷却速度基本不变, 而加速冷却在实际生产中并不可行。因此, 从烧结焊剂方面考虑, 增加焊缝晶内形核质点位置、减少合金元素(Mn, Mo 等)损失以确保相对较低的  $\gamma \rightarrow \alpha$  的贝氏体转变温度, 无疑是增大针状铁素体含量的一种有效途径。

氟碱型渣系焊剂由于含有较多的碱性氧化物, 有利于清除焊缝中的 S, P 等杂质, 而且与  $\text{SiO}_2$  结合有利于降低  $\text{SiO}_2$  的活度, 使钢中的  $[\text{Si}]$  与  $[\text{O}]$  更易形成  $\text{SiO}_2$ , 促使焊缝脱氧, 减少合金元素的烧损, 从而与合适的焊丝配合, 有利于提高焊缝的冲击韧度<sup>[3,4]</sup>。

氟碱型焊剂在埋弧焊时的主要困难是工艺性能不易保证, 电弧燃烧不稳定, 特别是使用交流焊接工艺方法时更加困难。为了使电弧燃烧稳定, 焊剂中必须含有电离势低的成分。从焊接冶金观点来说, 氟化物会阻止电弧区的电离反应, 所以要加入其它一些成分加以调整, 例如加入  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和少量易电离成分  $\text{K}_2\text{O}$  及  $\text{Na}_2\text{O}$ 。

综合以上分析, 对焊剂的渣系和碱度提出如下要求。

(1) 在保证焊接工艺性的条件下, 尽量提高焊剂的碱度, 使焊剂渣系具有较小的氧化性, 以保证焊丝合金成分较小的烧损和焊缝合金的过渡, 为此选

取具有较低分压的氧化物 MnO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

(2) 为除去氢的有害作用, 加入适量 CaF<sub>2</sub> 以降低扩氢的含量, 故选用 CaF<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO 主要渣系进行 L<sub>g</sub>(3<sup>4</sup>) 正交试验, 各组分相互组合。

(3) 由于稀土和 B 为活泼元素, 若在焊丝用钢的冶炼中加入, 其成分难以控制, 因而在焊剂合金剂中加入 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和稀土 Mg, 达到渗 B 和净化焊缝的目的。

## 2 焊剂的配料设计

为了找出造渣剂最佳成分范围, 选用造渣剂主要组分 CaF<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MnO, 并添加合金剂 TiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Re (Mg) 和辅加组分 Na<sub>2</sub>O (或 K<sub>2</sub>O), ZnO<sub>2</sub> 进行正交试验。

经过大量焊剂配方调试, 确定了具有良好工艺性能的 CaF<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO-TiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系烧结焊剂的基础配方, 见表 1。

表 1 焊剂主要组分(质量分数, %)

Table 1 Composition of flux

CaF <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
20~25	25~30	10~15	5~10	15~20	7~12	1~3

## 3 试验结果

### 3.1 试验材料和焊接工艺

焊接设备为 ZD5-1000 型埋弧焊机。焊接材料为研制的烧结焊剂, 匹配焊丝选用 H08C, 其组分见表 2。并选择了目前广泛使用的 SJ101-G<sup>[3]</sup> 焊剂作对比试验。

试验用钢材为 X80 管线钢, 厚度为 7.9 mm, 采用不开坡口双面焊接, 正面焊完后反面清根焊接, 钢材化学成分见表 3。焊接工艺参数: 电流 520~530 A, 电压 30~32 V, 焊速 26 m/h。

表 2 试验焊剂的主要组分(质量分数, %)

Table 2 Composition of experimental fluxes

序号	CaF <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Re(Mg)	其它
1	20.3	25.8	12.0	—	5.1	20.6	1.7	0.2	3~7
2	20.0	24.0	13.1	8.1	8.0	18.6	1.9	—	3~7
3	20.7	21.5	11.3	16.1	7.6	18.2	2.1	—	3~7
4	20.1	27.7	15.1	—	9.4	20.7	2.2	—	3~7

表 3 X80 管线钢的化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of X80 pipeline steel

C	Si	Mn	Nb	V	Cu	Ni	Mo	S	P
0.06	0.24	1.57	0.04	0.01	0.045	0.14	0.29	0.005	0.033

### 3.2 熔敷金属的力学性能

采用上述组分的试验焊剂, 所获得的焊缝熔敷金属的化学成分和力学性能分别见表 4, 表 5。

表 4 试验焊剂熔敷金属的主要化学成分(质量分数, %)

Table 4 Chemical composition of deposited metals using experiment fluxes

序号	C	Mn	Si	Mo	Ti	B	S	P
1	0.06	1.04	0.24	0.023	0.020	0.001	0.008	0.013
2	0.06	1.68	0.22	0.020	0.018	0.001	0.012	0.018
3	0.07	1.95	0.27	0.025	0.017	0.001	0.011	0.017
4	0.07	1.09	0.21	0.021	0.019	0.001	0.014	0.020

表 5 熔敷金属力学性能

Table 5 Mechanical properties of deposited metals using experiment fluxes

序号	屈服	抗拉	断后	断面收	冲击功	
	强度	强度	伸长率	缩率	0℃	-20℃
	R <sub>el</sub> /MPa	R <sub>m</sub> /MPa	A <sub>c</sub> (%)	Z(%)	A <sub>k</sub> /J	
1	534	631	24.2	55.47	128	110
2	557	681	24.2	55.47	186	162
3	572	662	21.6	56.76	127	103
4	548	611	20.7	48.24	84	75
SJ101-G	531	603	20.7	48.24	167	149

## 4 试验结果分析

### 4.1 试验焊剂熔敷金属组织

试制的焊剂与 H08C 焊丝匹配, 其熔敷金属的典型组织见图 1。从图 1 中可以看出, 1 号、2 号、4 号试样的焊缝熔敷金属主要为针状铁素体、粒状贝氏体(白色小颗粒岛状相)以及先共析块状铁素体组织。从针状铁素体数量上看, 2 号试样含针状铁素体最多, 呈典型的“篮筐编结”形态(图 1b)。1 号试样的针状铁素体略多于 4 号, 且 4 号试样沿原奥氏体晶界析出块状铁素体, 而整个原奥氏体晶内均有部分针状铁素体形成, 从而使得块状铁素体呈断续分布, 相比较而言, 4 号试样沿原奥氏体晶界和晶内析出的块状铁素体则连成一片(图 1d)。3 号试样的

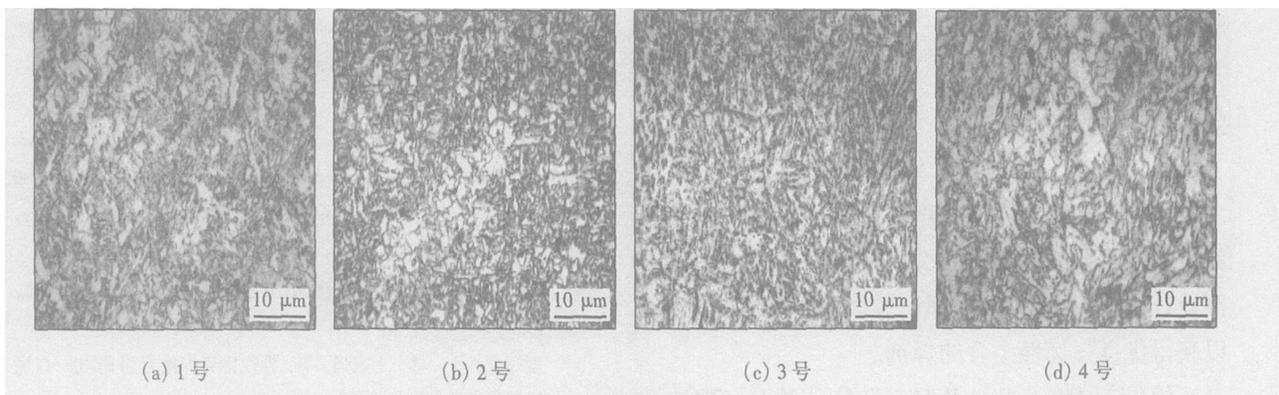


图 1 试验焊剂熔敷金属组织

Fig. 1 Optical microstructure of deposited metal using test fluxes

焊缝熔敷金属几乎全部为粒状贝氏体组织, 原奥氏体晶界清晰可见, 晶粒较细。焊缝的力学性能和组织有密切的关系, 块状先共析铁素体为高温铁素体, 影响焊缝的韧度, 焊缝冲击韧度随块状高温铁素体组织变化的趋势可用下式表示为<sup>9</sup>

$$T(^{\circ}\text{C})\text{CVN} = (-a)\%vein + b(\text{J}), \quad (1)$$

式中:  $\%vein$  为块状的高温铁素体网在金相组织中的比例;  $a, b$  为正常数。式(1)表明, 块状高温铁素体含量越高, 焊缝的冲击韧度越低。比较 1 号~4 号试样的焊接接头力学性能(表 5)和显微组织(图 1), 由于 1 号, 4 号试样焊缝熔敷金属块状高温铁素体含量较高(图 1a, 图 1d), 因而韧性较低。

2 号试样熔敷金属针状铁素体含量较多, 因而在形态分布上表现为彼此咬合、互相交错分布, 当裂纹沿着大量互相穿插交错的针状铁素体扩展时, 路径曲折, 消耗能量较大, 同时由于 1 号试样熔敷金属大量针状铁素体的存在, 高温铁素体网几乎消失(图 1a), 因而具有优良的韧性。

粒状贝氏体是由 M-A 组元和贝氏体铁素体所组成<sup>17</sup>, 相对于针状铁素体, M-A 组元提高了粒状贝氏体基体的强度, 但硬度增加、塑性降低, 在形变过程中与粒状贝氏体中的铁素体基体之间的变形协调能力较差, 因而易在 M-A 组元与铁素体基体的界面上产生微裂纹, 使整个焊接接头冲击韧度下降, 这也是 3 号试样虽然有较高的强度, 但韧性却显著低于 2 号试样的主要原因。

#### 4.2 试验焊剂组分对焊缝金属显微组织的影响

焊接熔池中, 随着 MnO (焊丝、焊剂、母材都会产生 MnO) 浓度的提高, MnO 的还原反应愈激烈, Mn 向焊缝中过渡就会越多, 如下式所示<sup>41</sup>, 即

$$\Delta[\text{Mn}] = 4.4[(\text{MnO})_f - 0.12], \quad (2)$$

式中:  $\Delta[\text{Mn}]$  为向焊缝中过渡的 Mn 量,  $(\text{MnO})_f$  为焊剂中 MnO 的摩尔数(mol)。

从熔敷金属的化学成分来看(表 4), 2 号, 3 号

试样熔敷金属中 Mn 元素含量明显较高, 由于 2 号, 3 号试样焊丝、母材相同, 因而由式(2)可以认为, 这与焊剂中加入 MnO 有关(表 3), 焊剂中 MnO 浓度越高, 焊缝熔敷金属中过渡的 Mn 元素就越高。

从材料的化学成分对组织影响来分析, Mn 元素是奥氏体稳定化元素, 能够降低  $\gamma \rightarrow \alpha$  转变的相变温度, 当  $\gamma \rightarrow \alpha$  相变温度降至  $B_s$  (贝氏体开始转变温度) 以下时, 即抑制了高温铁素体的相变, 从而有利于针状铁素体组织的形成。由于含有较高 Mn 含量的 2 号焊缝金属, 其  $\gamma \rightarrow \alpha$  相变温度降低, 因而抑制了高温铁素体的生成, 进而促进针状铁素体的形成。

1 号~4 号试样焊接加工过程中, 焊接工艺条件相同, 焊后均为空冷, 都没有进行加速冷却措施, 因而焊缝  $\gamma \rightarrow \alpha$  降至  $B_s$  以下时可以抑制上贝氏体形成, 但生成下贝氏体很难, 唯一可能出现的是针状铁素体和粒状贝氏体, 它们的形成温度均低于上贝氏体、高于下贝氏体。粒状贝氏体形成温度略高于针状铁素体, 因此该情况下针状铁素体和粒状贝氏体生长处于一种竞争状态。研究表明<sup>8,91</sup>, 由于针状铁素体在奥氏体晶内形核, 贝氏体为晶界形核。一般来说, 如果焊缝金属高  $P_{cm}$  值, 则奥氏体晶粒较小。比较 2 号, 3 号试样(表 4), 其主要区别是 Mn 元素含量, 由于 3 号试样有较高的 Mn 含量而大大降低  $\gamma \rightarrow \alpha$  转变温度, 熔池凝固过程中原奥氏体晶粒进一步细化, 晶界数量增加, 贝氏体形核质点增加, 因而其熔敷金属显微组织以粒状贝氏体占优(图 1c)。

比较 1 号, 4 号焊剂试样(表 2), 唯一的区别是 1 号试样焊剂中加入了 0.2% 的镁稀土 (Re(Mg)), 反映到其焊缝金属显微组织, 使用 1 号焊剂的熔敷金属试样中针状铁素体较多一些(图 1a, 图 1d), 这是由于稀土元素对焊缝金属中夹杂物起到细化、球化作用, 进一步增加了针状铁素体形核核心, 从而为获得较多的针状铁素体组织提供了条件。从焊缝的力学性能来看(表 5), 3 号焊剂优于目前广泛使用的

SJ101-G 焊剂。

## 5 结 论

(1) 从针状铁素体的形核机理分析出发, 选择氟碱性渣系进行低碳低合金钢高强钢用埋弧烧结焊剂设计, 结合相变动力学理论适当控制焊剂组分, 可以获得优良强韧性组合的焊剂。

(2) 试验的  $\text{CaF}_2-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MnO}-\text{TiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$  渣系烧结焊剂中, 适当添加  $\text{MnO}$  的含量, 焊缝中的  $\text{Mn}$  元素过渡增加, 从而有利于焊缝中针状铁素体的形成。但过量添加  $\text{MnO}$ , 将导致焊缝中  $\text{Mn}$  元素过高,  $\gamma \rightarrow \alpha$  温度过低, 奥氏体因晶界处高温铁素体薄片几乎难以生成而不能粗化, 使得奥氏体晶界增加并造成贝氏体形核质点增加, 对晶内形核的针状铁素体不利。

(3) 稀土元素对提高焊缝金属中针状铁素体含量有一定的促进作用。

### 参考文献:

- [1] Sudarsanam S B. The mechanism of acicular ferrite in weld deposits [J]. Current Opinion in Solid state and Materials Science, 2004, 8(3-4): 267-278.

[上接第 25 页]

作用仅在于得到较大范围的  $J_R$  值, 以便  $J_R$  曲线的外推<sup>[8]</sup>。因此对  $J_R$  值上限的放宽便于高韧性材料  $J$  积分测试的操作, 而不会影响所确定的  $J_{IC}$  的结果。

## 4 结 论

(1) 应用国家标准 GB2038-91 处理试验结果时, 试验得到的 14 个数据点都是无效的, 试验严格按照标准进行, 不存在任何不合理之处。然而应用英国标准 BS7448 试验标准进行数据处理时, 基本能满足试验要求, 建立  $J-R$  曲线, 从而可以直接确定断裂韧度  $J_{0.2}$  的值。

(2) 根据以上试验结果分析, 认为国家标准对有效数据限制太严格是造成  $J_{IC}$  测试困难的主要原因。其中钝化线规定存在一些不合理之处, 致使左界限等排除线将一些合格数据点排除在外。另外上界限的规定与国际标准相比也存在一定的局限性。

- [2] Byun J S, Shim J H. Inoculated acicular ferrite microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319-321: 326-331.
- [3] Kanjilal P, Majumdar S K, Pal T K. Prediction of submerged arc weld-metal composition from flux ingredients with the help of statistical design of mixture experiment[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2004, 33(3): 146-159.
- [4] 苏仲鸣. 焊剂的性能与使用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [5] 孟润全, 任林, 王志强, 等. 管线钢管焊接专用 SJ101-G 烧结焊剂的研制[J]. 焊管, 2001, 24(5): 17-23.
- [6] Snyder J P, Perse A W. The effects of titanium on submerged arc weld metal[J]. Welding Journal, 1982, 61(7): 201-211.
- [7] Mazancova K, Mazanec K. Physical metallurgy characteristics of the M/A constituent formation in granular bainite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 64(1-3): 287-292.
- [8] Babu S S, Bhadeshhi H K D H. Mechanism of the transition from bainite to acicular ferrite[J]. Materials Transactions, JIM, 1991, 32(1): 679-688.
- [9] Nobuo T, Chiaki S. Toughness degradation mechanism for reheated Mo-Ti-B bearing weld metal[J]. ISIJ International, 1995, 35(10): 1232-1238.

**作者简介:** 张敏, 男, 1967 年 7 月出生, 教授, 博士。主要从事新型焊接材料、焊接结构断裂强度及焊接工程结构方面的研究, 发表论文 40 余篇。

Email: ZHMMN@263.net

### 参考文献:

- [1] 马良. 海洋石油管道工程[M]. 北京: 海洋出版社, 1987.
- [2] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 国家标准 GB2038-91: 金属材料延性断裂韧度  $J_{IC}$  试验方法[S]. 1991.
- [4] British Standard, BS 7448: Part 4, 1997, Method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials[S].
- [5] British Standard, BS 7448: Part 2, 1997, Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K<sub>IC</sub>, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials[S].
- [6] 崔振源. 断裂韧性测试原理和方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [7] 钟伯明, 魏嘉荃. 低温延性断裂韧度  $J_{IC}$  测试技术编制说明[J]. 大庆石油学报, 1990, 14(3): 100-106.
- [8] Broek David. Elementary engineering fracture mechanics[M]. Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

**作者简介:** 邓彩艳, 女, 1979 年出生, 天津大学博士后。主要研究方向为焊接结构的强度与断裂, 已发表论文 10 余篇。

Email: tjck.dcy2003@126.com

pass welding with large current (DS) was put forward. The experimental results show the tensile strength of the DS joint is up to 296.4 MPa, equivalent to 61.2% of that of base metal and the impact toughness of the DS joint improved simultaneously. The DS weld zone is composed of  $\alpha$  phase and eutectic structure grains. Hardness of the weld is the lowest on the whole weldment, and the hardness of the HAZ is higher because the  $\theta$  phase dissolve and separate out renewedly.

**Key words:** 2519 high strength aluminum alloy; tandem gas metal arc welding; procedure

#### Numerical simulation on fracture mechanics parameters of welded joint with damage

ZHANG Jian-xun, LI Ji-hong (State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China). p19-22

**Abstract:** The fracture mechanics parameters of welded joint with damage were numerically simulated with fully coupled strain and damage elastic-plastic finite element method for center-cracked specimens with welded joint. The results show that the rupture strain of base metal has large effects on the fracture behavior of crack in weld metal. If mechanical parameters of weld metal are kept constant, the plastic strain along the ligament and the J-integral increase with the decrease of the rupture strain of base metal for any strength matching ratio. With the decrease of strength matching ratio (viz. the increasing of the strength of base metal), the effect of the rupture strain of base metal on the J-integral is weakened gradually.

**Key words:** damage; welded joint; fracture mechanics parameters; finite element method

#### Discussion on determination of J-integral and comparison of different test standards

DENG Cai-yan, ZHANG Yu-feng, HUO Li-xing (School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p23-25, 32

**Abstract:** According to different fracture toughness test standard, J-Resistance curve tests were conducted at  $-5^{\circ}\text{C}$  in welded joints of X56 pipeline steel in the multiple specimen method and the test result were compared. According to the double P-V curves of each weld metal and heat affected zone specimen obtained from the two notch opening displacement, the load-line displacement and the value of J were calculated. Finally, the best fitted curve was determined the valid data points according to GB2038-91 and BS7448, respectively. The result indicates that BS7448 is superior to GB2038-91 on blunt line, exclusion lines and so on. J-Resistance curves and  $J_{0.2}$  was obtained. But there are no valid data points according to GB2038-91 and no further calculation.

**Key words:** J integral; resistance curve; blunt line

#### A numerical calculation on contact surface stress field of metals explosive welding

XIE Fei-hong<sup>1,2</sup>, LUO Guan-wei<sup>3</sup>, WANG Xu-guang<sup>4</sup> (1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. College of Mechanical-Electronics Engineer-

ing, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 4. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China). p26-28, 93

**Abstract:** The impact pressure produced by explosive detonation is essential condition of the base plate and cladding plate coalescence for metal explosion welding. Based on Rayleigh-Ritz calculating model and elasticity variation principle, elasticity problem is considered as functional arrest ental equation, and boundary condition of the problem is given. Differential equation and corresponding boundary condition are derived. Instantaneous stress field at impact points was calculated, and analog calculating of different collision angles and impact pressures were carried out. Basic law of stress field distribution at impact points was found. The calculating stress field distribution law can be applied to evaluation and guidance of practical engineering.

**Key words:** explosive welding; calculation model; impact pressure; stress field; value calculation

#### Agglomerated alkali flux for submerged arc welding of high strength-toughness steel X80

ZHANG Min, YAO Cheng-wu, LIU Bin, LI Ji-hong (School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China). p29-32

**Abstract:** Through analyzing acicular ferrite nucleating mechanism in the weld metal of the high strength low-alloy structural steel (HSLA), a submerged arc welding agglomerated flux with the  $\text{CaF}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-TiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  fluorine was developed by using alkali flux system. The results indicate that the existence of MnO in the flux benefits the transition of Mn to weld metal, and brings down the  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation temperature, thus high temperature ferrite production is held down, but the acicular ferrite increases in the weld metal. Because the  $P_{cm}$  of weld metal is higher, the austenite grain is thinner as welded in air cooling condition. However, a excessive content of MnO in the flux will lead to the excessive Mn in the weld metal and a too low  $\gamma \rightarrow \alpha$  transform temperature. Thereby, the austenite grain boundaries cannot be decorated by allotriomorphic ferrite, thus the austenite grain boundary increases, which make more bainite nucleation site being produced. It is disadvantageous to the intragranularly nucleated acicular ferrite. In addition, the rare-earth element has some contributions to enhance the acicular ferrite content in the weld metal.

**Key words:** agglomerated flux; strength and toughness; acicular ferrite; intragranular nucleation; phase transformation temperature

#### CO<sub>2</sub> laser welding process of aluminum alloy with filler powder

CHEN Kai, XIAO Rong-shi, ZHANG Seng-hai, ZUO Tie-chuan (College of Laser Engineering, National Center of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p33-36

**Abstract:** The experiments were carried out with CO<sub>2</sub> (slab) laser. The five stages of the inter actions between laser and powder in the laser welding with powder were analyzed. The influences of the filler metal powder on the laser power density threshold value, weld formation and process stability were studied during CO<sub>2</sub> laser