

# 1Cr17Ni13Mo2Ti 焊缝冲击韧性 及冷弯性能研究

夏天东 陈学定

(兰州 甘肃工业大学)

杨光起 赵 峰

(兰州石油化工机器厂)

**摘要** 本文进行了 A212、A207 焊条手工焊接和 TIG 焊接 1Cr17Ni13Mo2Ti 焊缝的冲击韧性和冷弯性能试验, 分析了焊缝显微组织和冲击断口, 测定了焊缝中的  $\delta$  铁素体和氧含量。研究结果表明, 用低氢型 A207 焊条和 TIG 焊焊接的焊缝中氧含量降低, 夹杂物含量减少, 焊缝中  $\delta$  铁素体含量减少, 其分布和形态明显改善, 因而焊缝在延性断裂过程中裂纹形核核心减少, 切割尺寸增大, 塑性变形程度增大, 断裂吸收功增加, 焊缝的冲击韧性和冷弯性能明显改善。

**关键词** 奥氏体焊缝; 韧性; 氧;  $\delta$  铁素体

## 0 序 言

铬镍奥氏体不锈钢用于不锈耐蚀工作环境时, 对于焊接接头的要求主要是耐蚀性。由于通常认为奥氏体钢焊接接头的力学性能不会成为问题, 所以对力学性能没有特殊要求, 只是对其在液氮或液氦温度下的低温韧性有一定的要求。研究工作表明<sup>[1, 2]</sup>, 降低奥氏体不锈钢焊缝中的含碳量、减少  $\delta$  铁素体含量、焊后进行固溶处理等均可明显改善奥氏体不锈钢焊缝低温韧性。采用碱性焊条焊接<sup>[1]</sup>, 也可以改善奥氏体钢焊缝低温韧性, 但其机理尚不清楚。在用 1Cr17Ni13Mo2Ti 制造石油精炼设备时, 工厂的实践表明, 用常用的钛钙型不锈钢焊条焊接的焊缝常温下冷弯不合格; 改变焊接规范, 焊缝冷弯试验仍不合格, 因而, 限制了这种钢材的使用。由此可见, 对 1Cr17Ni13Mo2Ti 焊缝的常温韧性的研究在理论上和生产上都有重要价值。本文采用钛钙型的 A212 焊条、低氢型的 A207 焊条和 TIG 焊, 研究改变手工焊条类型和焊接方法对其焊缝冲击韧性和冷弯性能的影响机理, 找出适合于实际焊接生产并能获得良好焊缝韧性的焊接工艺。由于冷弯试验主要测

定弯曲角且试样难以直接进行微观分析,故本文主要利用较科学地测量断裂吸收功且易于进行微观断裂机理分析的示波冲击试验研究不锈钢焊缝的韧性。

## 1 试验方法及试验结果

### 1.1 试验材料

试验用1Cr17Ni13Mo2Ti(日本产,SUS316),板厚分别为8mm和10mm,焊接试板尺寸为600mm×300mm,60°V型坡口对接焊。无论手工焊还是TIG焊,均采用双面焊,层间温度小于60℃。手工焊焊条直径为4.0mm,A212焊条焊前150℃×1h烘干,A207焊条焊前250℃×1h烘干。TIG焊焊丝为AISI316L,直径2.5mm。焊接规范:手工焊焊接电流140A,电压23~25V;TIG焊焊接电流160A,电压12~18V;控制焊接速度,使手工焊和TIG焊焊接线能量为10kJ/cm。母材及焊缝金属化学成分列于表1,对用A212焊条焊接的焊缝,其中含有0.64%Nb(10mm板)和0.57%Nb(8mm板)。

表1 焊缝和母材金属的化学成分(wt %)

Table 1 Chemical compositions of weld and base metals (wt %)

Thickness of plate (mm)	Material	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb
10	A212 WM	0.065	0.34	1.83	0.004	0.023	18.69	12.68	2.60	0.16	0.64
	A207 WM	0.071	0.72	1.65	0.004	0.026	17.60	12.76	2.49	0.10	0
	TIG WM	0.030	0.81	1.26	0.010	0.027	16.37	11.20	2.70	0.13	0
	BM	0.064	0.68	1.03	0.004	0.027	16.37	12.97	2.70	0.45	0
8	A212WM	0.069	0.68	1.95	0.005	0.021	18.00	13.49	2.50	0.10	0.57
	A207 WM	0.069	0.75	1.65	0.004	0.027	18.00	12.55	2.55	0.10	0
	TIG WM	0.038	0.063	1.57	0.006	0.031	16.68	11.20	2.56	0.12	0
	BM	0.062	0.58	0.94	0.006	0.025	16.64	13.62	2.60	0.41	0

### 1.2 冷弯试验

弯曲试验按照GB2653-81《焊接接头弯曲及压扁试验法》规定进行。面弯、背弯试样各两块,弯轴直径D为2S,支座间距L为4.2S,其中S为试板厚度,冷弯合格弯曲角为100°。

冷弯试验结果表明,A212焊缝面弯、背弯试验弯曲角达到65°~80°时,就在焊缝处发现大于1.5mm的裂纹,裂纹沿焊缝中心截面分布;A207焊缝面弯、背弯弯曲角均可达到180°而无任何裂纹;TIG焊缝面、背弯弯曲角也可以达到180°。由此可见,在三种焊缝中,A207焊缝和TIG焊缝冷弯性能接近,而A212焊缝冷弯性能较差,用低氢型焊条焊接或用TIG焊接1Cr17Ni13Mo2Ti明显改善了焊缝的冷弯性能。

### 1.3 示波冲击试验

焊缝的冷弯性能实际上反映了它的塑性、韧性变化。为了对焊缝的韧性变化进行研究, 进行示波冲击试验。冲击试样尺寸为  $10\text{mm} \times 6\text{mm} \times 55\text{mm}$ , V型缺口, 缺口分别位于焊缝中心区、焊缝和 HAZ 混合区、母材。为了考察常温下不锈钢焊缝韧性, 冲击试验按照 GB2650-81《焊接接头冲击试验法》规定在室温下进行, 试验机为 CIEM-30D-CPC 示波冲击试验机。冲击试验过程中记录如图 1 所示载荷-位移曲线, 并计算动态屈服载荷  $P_y$ 、最大载荷  $P_m$ 、裂纹起始功  $E_i$ 、裂纹扩展功  $E_p$  和冲击吸收总功  $E_t$  列于表 2。

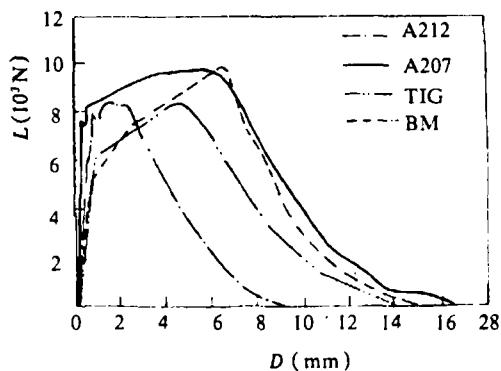


图 1 缺口位于焊缝和母材试样的冲击试验载荷-位移曲线(板厚 10mm)

Fig.1 Load-displacement curves of impact tests of specimens notched in weld and base metals (thickness of plate is 10mm)

表 2 示波冲击试验结果

Table 2 Results of instrumented impact tests

Thickness of plate (mm)	Notch position	$P_y$ (N)	$P_m$ (N)	$E_i$ (J)	$E_p$ (J)	$E_t$ (J)
10	A212 WM	7669	8263	10.7	25.4	36.2
	A212 WM + HAZ	7275	9268	28.3	31.1	59.5
	A207 WM	7494	9557	35.8	45.5	84.7
	A207 WM + HAZ	7747	9809	31.2	36.3	67.2
	TIG WM	6432	8539	29.9	36.9	67.2
	TIG WM + HAZ	6449	9300	41.7	35.6	77.5
8	BM	5973	9668	43.8	33.2	77.0
	A212 WM	8446	9049	10.6	23.4	34.0
	A212 WM + HAZ	8891	10891	27.4	34.6	62.0
	A207 WM	8188	10203	33.0	43.2	73.6
	A207 WM + HAZ	8014	10486	35.2	34.1	69.4
	TIG WM	6472	9355	39.8	42.7	82.5
	TIG WM + HAZ	6352	9607	46.4	43.6	90.1
	BM	8440	10413	22.9	25.9	48.8

\*  $P_y$ —Dynamic yield load,  $P_m$ —Maximum load,  $E_i$ —Crack initiating energy,  $E_p$ —Crack propagating energy,  $E_t$ —Absorbed energy.

从图 1 和表 2 可知, 对于 10mm 的试板, 由全部奥氏体组成的母材, 虽然动态屈服载荷  $P_y$  较低, 即材料的屈服强度略低, 但在冲击断裂过程中最大载荷  $P_m$  仍很高, 而且在最大载荷  $P_m$  下的位移可达 7mm, 表现出良好的韧性。但是, 从图 1 可知, 在母材中塑性对韧性的贡献大于强度对韧性的贡献。由奥氏体和  $\delta$  铁素体双相组成的焊缝, 冲击断裂的动态屈服载荷  $P_y$  和最大载荷  $P_m$  都比较高。A207、TIG、A212 三种焊缝最大载荷下的位移分别为 6.5mm、5mm、2mm。A207、TIG 焊缝既有良好的塑性, 又有较高的强度, 因而韧性就很好; A212 焊缝虽然强度较高, 但塑性很差, 所以韧性较低。从表 2 可知, A207 焊缝冲击功略高于 TIG 焊缝, 而 A212 焊缝的冲击功仅有前者的一半。缺口在焊缝和 HAZ 混合区的试样, 示波冲击断裂载荷—位移曲线与图 1 类似。对于 TIG 和 A212 试样, HAZ 的出现使冲击功有所增加, 但对 A207 焊缝, HAZ 的出现反而使冲击功降低。当试板厚度为 8mm 时, TIG 焊缝韧性略高于 A207 焊缝, A212 焊缝冲击功仍然仅有 A207 焊缝冲击功的一半。可见, 无论板厚如何, 采用低氢型的 A207 焊条或 TIG 焊, 能够明显改善 1Cr17Ni13Mo2Ti 焊缝的韧性, 这一结果与冷弯试验结果是一致的。在本试验中, 值得注意的是, 8mm 板的冲击功仅为 10mm 板的三分之二, 但这一差异并未对焊缝冲击韧性带来影响, 如表 2 所示, 故本文对此不作讨论。

#### 1.4 焊缝显微组织的金相观察

奥氏体钢焊缝显微组织通常为奥氏体和  $\delta$  铁素体双相组织, 但在多层焊缝中有可能出现对韧性及塑性极为不利的  $\sigma$  相<sup>[3]</sup>。本文用 50% 盐酸酒精溶液电解浸蚀制取光学金相试样, 用双喷减薄技术制取 TEM 试样, 分别用光镜和 TEM(JEM-1200EX/S) 观察焊缝中  $\delta$  铁素体的形态和分布; 用专门鉴别焊缝中  $\sigma$  相、即利用  $\text{NaOH}(2\text{g}) + \text{KMnO}_4(4\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(100\text{ml})$  溶液电解将  $\sigma$  相染成桔红色而其他组织皆不显示的光学金相方法<sup>[4]</sup> 和 TEM 观察焊缝中是否有  $\sigma$  相。

奥氏体不锈钢焊缝中的  $\delta$  铁素体一般分为蠕虫状、条状、针状和球状四种<sup>[5]</sup>。图 2 所示为三种焊缝中的  $\delta$  铁素体分布形态。A212 焊缝中树枝晶明显,  $\delta$  铁素体为网状连续分布的蠕虫状和条状  $\delta$  铁素体; TIG 焊缝中主要为任意分布的条状和球状  $\delta$  铁素体, 没有树

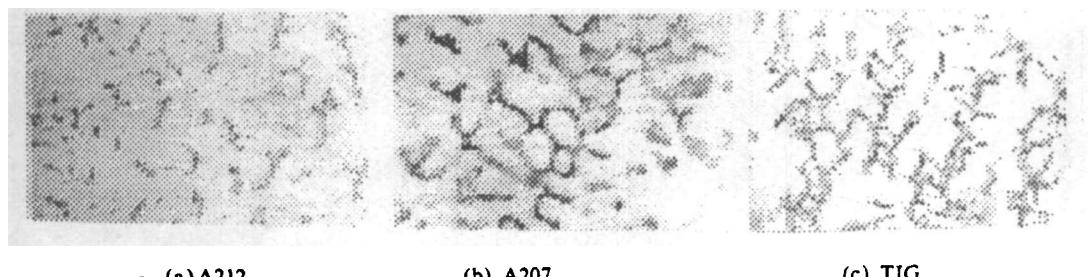


图 2 光镜观察的焊缝中  $\delta$  铁素体  $\times 500$

Fig.2  $\delta$ -ferrite in weld metals observed by OM  $\times 500$

枝晶组织; A207 焊缝中既有蠕虫状的  $\delta$  铁素体, 又有条状和球状  $\delta$  铁素体, 但与 A212 焊缝相比, 其树枝晶不明显, 蠕虫状  $\delta$  铁素体网状连续分布的现象明显改善, 组织形态介于 A212 焊缝和 TIG 焊缝之间。图 3a 所示为 A212 焊缝中一个典型的蠕虫状  $\delta$  铁素体, 图 3b 为 TIG 焊缝中一个典型的球状  $\delta$  铁素体。用光学金相的方法和 TEM 均未在本试验所焊接的多层焊缝中发现  $\sigma$  相, 因此, 焊缝组织仍为奥氏体和  $\delta$  铁素体双相, 在讨论对焊缝韧性的的影响因素时, 可以排除  $\sigma$  相的作用。

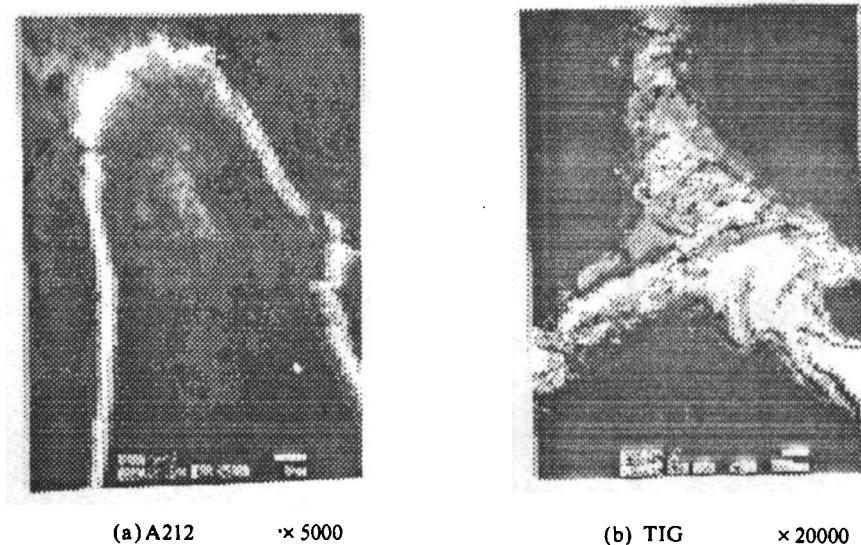


图 3 焊缝中  $\delta$  铁素体的 TEM 暗场像

Fig.3 TEM dark field image of  $\delta$ -ferrite in weld metals

### 1.5 焊缝中 $\delta$ 铁素体和氧含量的测定

用磁性铁素体测定仪根据 GB1954-80《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》测定焊缝中的  $\delta$  铁素体含量; 用 KLS-56 库仑分析仪测定焊缝和母材中的氧含量, 列于表 3。在三种焊缝中, A212 焊缝中  $\delta$  铁素体含量几乎是其它两种焊缝中  $\delta$  铁素体的两倍, 而 A207 焊缝中  $\delta$  铁素体含量与 TIG 大体相近。母材中的氧含量较低, 焊缝中的氧含量较高。手工焊焊接的焊缝氧含量明显高于 TIG 焊缝, A212 焊缝中氧含量甚至是 TIG 焊缝的 2~6 倍。但是, 试验结果表明, 用低氢、碱性的 A207 焊条, 明显降低了手工焊缝中的氧含量。

表 3 焊缝和母材金属中的  $\delta$  铁素体和氧含量

Table 3 Contents of  $\delta$ -ferrite and oxygen in weld and base metals

	10mm plate				8mm plate			
	A212	A207	TIG	BM	A212	A207	TIG	BM
$\delta$ -ferrite (%)	6.3	3.5	3.8	0	7.1	3.7	2.5	0
Oxygen(ppm)	525	312	82	22	417	214	174	35

### 1.6 冲击断口观察及断口上夹杂物分析

用 SEM(S-520) 观察冲击断口微观形貌, 并用 EDX(EDAX9100) 分析断口上夹杂物的成分。

冲击断口微观分析表明, 常温冲击断口主要由剪切唇和纤维区组成, 放射区消失, 是典型的韧性断口。对于不同的焊缝冲击试样, 纤维区形貌有明显差异。如图 4a, 韧性较差的 A212 焊缝冲击断口纤维区韧窝较少, 塑变痕迹不明显, 断口上有较多尺寸较大的夹杂物, EDX 分析表明夹杂物中含有较高的 Al、Mn 或 Ti、Mn 元素。图 4b 为韧性良好的 A207 焊缝断口纤维区的典型的层状断口, 有较多的拉长型韧窝, 而且材料塑变痕迹明显, 在断口上有非常清楚的塑变滑移带。在 A207 和 TIG 焊缝冲击断口上发现的夹杂物较少, EDX 分析表明夹杂物中 Mn、Ti 含量明显降低, 没有发现 Al 元素。

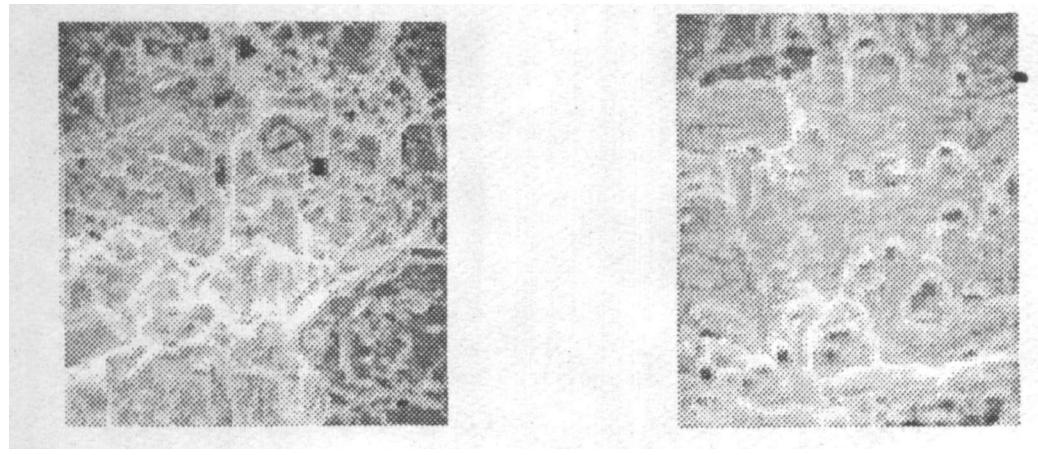


图 4 缺口在焊缝的冲击试样断口形貌

Fig.4 Fracture surfaces of specimens notched in weld metals

## 2 讨 论

本试验中不论冷弯还是冲击试验, 都是典型的延性断裂, 其断裂形式主要是由显微空洞聚集导致的韧窝断裂。韧窝的大小、数量和深浅取决于材料断裂时显微空洞的形核率及扩展速率, 以及显微空洞相互聚集连结之前所发生的局部塑性变形量。材料中存在的非金属夹杂物往往成为显微空洞的形核核心, 一般来说当夹杂物增加时, 显微空洞形核率增加, 而局部塑变量及韧窝尺寸均有所减少<sup>[6]</sup>。焊缝金属中的氧几乎全部以氧化物和硅酸盐夹杂物的形式存在, 当焊缝金属中氧含量较高时, 如表 3 A212 焊缝中氧含量达 471~575ppm 时, 如图 4a 所示, 其冲击断口上韧窝尺寸较小, 数量增多, 深度变浅, 材料局部塑变程度小, 故断裂吸收能量也较低, 冷弯和冲击韧性差。采用低氢型的 A207 焊条或 TIG 焊, 非常明显地降低了焊缝中的氧含量, 因而减少了焊缝中的夹杂物。如图 4b 所示, 断口

上韧窝尺寸较大, 韧窝数量少, 深度较大, 而且沿裂纹扩展方向被拉长, 成为典型的拉长型韧窝, 使材料局部塑变程度大, 断口上呈现出明显的塑性滑移带, 因而断裂时吸收能量亦较多, 焊缝冲击韧性和冷弯性能明显提高。因此, 降低奥氏体不锈钢焊缝中的氧含量, 减少夹杂物, 可以有效改善其韧性, 这一结果与氧对低碳钢韧性的影响<sup>[6]</sup>是一致的, 所以在奥氏体不锈钢的焊接过程中, 同样应注意控制焊缝氧含量。

焊缝中的  $\delta$  铁素体是比奥氏体脆、硬的相。研究表明<sup>[1, 2]</sup>, 全奥氏体焊缝在低温下有非常好的韧性, 因而降低奥氏体钢焊缝中的  $\delta$  铁素体含量有利于改善韧性。A207 和 TIG 焊缝中,  $\delta$  铁素体含量减少, 断裂过程中塑性变形增加, 断口上有明显的塑变滑移带, 如图 4b 所示, 断裂吸收功增加。A212 焊缝中含有增大  $C_{eq}$  的 Nb 元素, 焊缝中  $\delta$  铁素体含量也比 A207、TAG 焊缝略高; 而且文献[1]的研究表明碱性焊条使焊缝中  $\delta$  铁素体减少、焊缝低温冲击韧性高, 所以本试验中 A212 焊缝冲击韧性和冷弯性能变差可能跟其中  $\delta$  铁素体含量增加有关。文献[7]的研究表明, 蠕虫状  $\delta$  铁素体较条状和球状  $\delta$  铁素体对奥氏体不锈钢焊缝低温冲击韧性危害更大。A212 焊缝中含有较多网状连续分布的蠕虫状  $\delta$  铁素体, 造成裂纹容易通过它们进行扩展, 材料局部塑变能力差, 断裂吸收能量低, 因而 A212 焊缝冷弯和冲击韧性差。所以, 减少奥氏体钢焊缝中  $\delta$  铁素体含量、改善其形态和分布, 也可以提高焊缝冲击韧性和冷弯性能。

### 3 结 论

- (1) 用低氢型的 A207 焊条或 TIG 焊焊接 1Cr17Ni13Mo2Ti, 可明显改善焊缝的冷弯性能和冲击韧性。
- (2) 降低奥氏体钢焊缝中的氧含量, 减少夹杂物, 冲击断裂吸收功增加。
- (3) 减少奥氏体焊缝中的  $\delta$  铁素体, 改善其形态和分布, 使材料塑变能力增加, 也可以改善焊缝韧性。

(1993 年 1 月 20 日收到修改稿)

### 参 考 文 献

- 1 Szumachowski E R and Reid H F. Welding Journal, 1978, 57(11):325, ~ 333.
- 2 Charles E W. Welding Journal, 1980, 59(11): 326, ~ 342.
- 3 中国机械工程学会焊接学会. 焊接金相图谱. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- 4 上海市机械制造工艺研究所. 金相分析技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1987.
- 5 David S A. Welding Journal, 1981, 60(4):62, ~ 71.
- 6 田燕. 焊接区断口金相分析. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- 7 Kamiya O and Kumagai K. J Mater Sci, 1990, 25:2017 ~ 2024

**On impact and cold bend properties of 1Cr17Ni13Mo2Ti steel weld metal**

Xia Tiandong, Chen Xueding

(Gansu University of Technology, Lanzhou)

Yang Guangqi, Zhao Feng

(Lanzhou Petroleum and Chemical Machinery Works)

**Abstract** The impact and cold bend tests of 1Cr17Ni13Mo2Ti steel weld metals welded with A212, A207 coated electrodes and TIG process have been carried out. The microstructures of the weld metals and the appearances of the fractured specimens have been investigated. The  $\delta$ -ferrite content and oxygen in the weld metals have been measured. In the weld metals welded with the low-hydrogen type A207 covered electrode and TIG process, there are less oxygen and  $\delta$ -ferrite than that in the weld metal welded with the A212 coated electrode. The morphology and distribution of  $\delta$ -ferrite in the former are improved, and the inclusion particles decrease. As a result, when the former fractures, there is few microcrack originated site and the size of the dimples increase, the weld metal has a strong ability for plastic deformation. So the absorbed energy in fracturing raises and the impact toughness and cold bend property of the weld metal are obviously improved.

**Key words** austenitic weld metal; toughness; oxygen;  $\delta$ -ferrite