

低合金高强钢焊缝金属中 AF 的研究进展

栗卓新¹, 张天理¹, Kim H J²

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

(2. 韩国工业技术研究院高级熔焊研究组, 天安 330-825)



栗卓新

摘要: 综述了国内外对于低合金高强钢(HSLA, High Strength Low Alloy)焊缝金属中针状铁素体(AF, Acicular Ferrite)的最新研究进展得出, 要想获得较多的 AF, 主要从3个方面加以有效控制: ①合金元素中含0.05%~0.10% C, 且C当量小于0.39, 合理控制 Mn, Ni, Ti, B之间的相互比例, 保持硼氮比(B/N)在0.6~0.8之间, 铝氧比(Al/O)在0.43~0.73之间, 降低 N, S, P 含量; ②夹杂物尺寸为0.5~0.8 μm, 表面富10~20 nm TiO 薄层且呈球形, 促使生成更多的第Ⅲ、Ⅳ类夹杂物; ③较低热输入(HI, Heat Input)时合金元素烧损较少, 冷却速率较快, 焊缝组织得以细化。

关键词: 低合金高强钢; 针状铁素体; 合金元素; 夹杂物; 热输入

中图分类号: TG425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)01-050-06

Research Progress on AF in Weld Metal for HSLA Steel

LI Zhuoxin¹, ZHANG Tianli¹, Kim H J²

(1. The College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Advanced Joining Research Team, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan-si 330-825, Korea)

Abstract: This paper reviews the newest worldwide research progress on acicular ferrite (AF) in weld metal for high strength low alloy (HSLA) steel. More AF can be mainly obtained by the effective control of three aspects: ① when C content is between 0.05 and 0.10% with a carbon equivalent of less than 0.39, the ratios between Mn, Ni, Ti, and B can be reasonably controlled, and the ratio of B/N is between 0.6 and 0.8, Al/O is between 0.43 and 0.73, while N, S, P contents are reduced; ② when the size of inclusion is in the range of 0.5~0.8 μm with 10~20 nm TiO in the inclusion surface and with its shape being globular, then more third and fourth types of inclusions can be obtained; ③ When heat input becomes lower, the burning loss of alloy elements becomes less, while the cooling rate becomes higher, and the welding microstructure gets finer.

Key words: HSLA; AF; alloying elements; inclusions; HI

1 前言

随着全球焊接材料向高强、高韧、洁净、节能、环保及高效自动化方向发展^[1], 低合金高强钢(HSLA)焊缝金属已由传统的 Mn-Si 合金系, 发展到可获得特征参数适当的夹杂物, 增加针状铁素体(AF)形核的 Ti-B 合金系, 新一代焊材可获得更多更细 AF。AF 是 HSLA 焊缝金属的理想组织, 具有细小的晶粒尺寸和高密度位错, 当含量大于 65%, 平均板条尺寸约为 1 μm 时, 焊缝金属将具有优异的强韧性。

近年来众多学者从不同的角度对 AF 形核及影响进行了大量的研究^[2-6], 但到目前为止, 对于 AF 形核机

制及其控制还没有统一的观点, AF 在焊材设计中的应用还是非可控的。尽管不同焊接方法, 不同合金系, 不同 N, O 含量, 不同夹杂物特征参数等对 AF 的影响不尽相同, 但是合金元素、夹杂物及热输入(HI)是影响 AF 的主要因素已成为共识。因此, 本文综述了国内外对于以上三个因素的最新研究成果。

2 合金元素对 AF 形核的影响

合金元素是控制焊缝金属组织和力学性能的一个主要因素。焊缝金属中 C 可推迟奥氏体的转变温度, 具有强烈的淬硬性, 其含量一般为 0.05%~0.15%^[5]。Ramirez J E^[7]认为, 当 C 含量在 0.05%~0.10% 时, 随 C 当量在 0.26~0.39 增加, 晶界铁素体(GBF)含量减少, 侧板条铁素体(FSP)和 AF 含量增加, 焊缝再热区转变为等轴块状铁素体; C 当量高于 0.47 时, 包括马氏体(M)在内的低温转变产物增加。当 C 含量在

收稿日期: 2011-09-09

作者简介: 栗卓新, 男, 1963 年生, 博士生导师, 教授

通信作者: 张天理, 男, 1985 年生, 硕士

0.10%~0.15%时,焊缝再热区出现高比例的如珠光体或碳化物的第二相沉淀。

Kim J H^[8]研究了药芯焊丝电弧焊(FCAW)焊缝金属中Ni含量分别为0.03%,1.52%时,焊缝金属微观组织变化,其中Mn含量保持在1.2%左右。结果表明:含1.52%Ni的焊缝金属由82%AF+6%GBF+12%含第二相的铁素体(FS)组成,而含0.03%Ni的为54%AF+19%GBF+27%FS。Mn对焊缝金属具有细化和硬化两种相反的作用,Beidokhti B^[9]通过对X70管线钢埋弧焊(SAW)焊缝微观组织的研究,表明当Ti含量在0.02%~0.08%,Mn含量在1.92%~2.00%范围内可获得较多的AF。进一步添加Mn,则会使得贝氏体(B)的晶界形核率高于AF晶内形核率,焊缝硬度增加。

Avazkonandeh-Gharavol M H^[10-11]分别研究了0.14%~0.94%Cu与0.05%~0.91%Cr对Cr-Ni-Cu低合金钢电弧焊(SMAW)焊缝金属中AF形成的影响,认为随着焊缝金属中Cu,Cr含量增加,AF数量增加,焊缝微观组织得到细化,柱状区和粗晶区中先共析铁素体(PF)及FS减少,冲击韧性随着Cu含量增加而降低,随Cr含量的增加而增加。

Beidokhti B^[12]研究了Ti对X70管线钢SAW焊缝金属微观组织的影响,认为获得最优组织和冲击性能组合的Ti含量范围为0.02%~0.05%,进一步增加Ti,会促使焊缝金属中强化元素Mn,Si含量增加,焊缝组织会由AF,GBF,魏氏体(WF)向AF,GBF,B,M-A组织转变。Paniagua-Mercado M^[13]同样研究了焊缝金属中Ti含量为0.014%~0.048%对Q235板材SAW焊缝金属组织的影响,焊缝金属主要由等轴铁素体和AF组成,随着Ti含量的增加,AF含量增加且长度减少,焊缝金属韧性提高,这是由于焊缝金属中Ti含量高于Al含量,TiO₂夹杂促进AF形核占主导作用。然而Ti含量在0.05%~0.30%之间变化时,将不会引起焊缝组织的较大变化^[14]。

文献[15-16]研究了B对抗拉强度为700~1100MPa级高强钢焊缝金属中微观组织和韧性的影响,当抗拉强度小于800MPa时,B含量小于0.0015%的焊缝金属中形成GBF,冲击韧性较低;当抗拉强度大于800MPa时,其焊缝金属中AF替代B或M-A组元,产生了更多的AF,韧性较高,随抗拉强度的增大冲击韧性降低,见图1。Lee H W^[17]研究了FCAW焊缝金属中分别含0.0032%,0.0060%和0.0103%B时AF形成的情况,得出AF随B含量在0.0032%~0.0103%之间的增加而减少,在0.0103%时焊缝金属中上贝氏体(UB)替代AF。其中B含量从0.0032%增加至0.0060%时

焊缝金属冲击能轻微减少,B含量从0.006%增加至0.0103%,冲击能显著降低,这是B导致共析温度的降低的原因。文献[18]研究得出,向焊丝中添加较高的Ti,且保证较低的碱度,焊缝金属中硼氮比(B/N)在0.6~0.8的范围内,则可以生成有利于AF有效形核的含Ti氧化物夹杂,在HI=100kJ/mm时,焊缝金属仍可获得100J以上较好的冲击韧性值,见图2;B/N高于0.8时,M-A组元含量增加,冲击韧性降低。

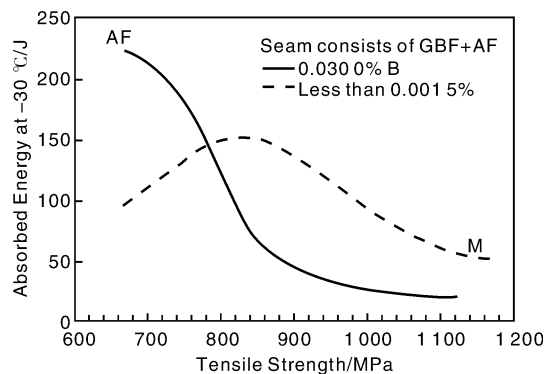


图1 不同B含量的焊缝金属中冲击吸收功与强度的关系
Fig. 1 Relationship between absorbed energy and tensile strength in weld metals on various B content

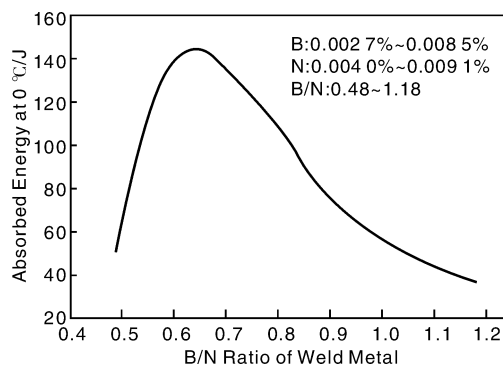


图2 焊缝金属中B/N对冲击韧性的影响
Fig. 2 Effect of B/N ratio on toughness of weld metal

文献[19]研究了低合金钢焊缝金属中Al/O为0.2和0.43时AF形成情况,认为在Al/O小于0.45时,适当高的Al/O均可促使产生较多的0.2~0.8μm夹杂物,促进AF形核,从而对韧性有利。Yamada T^[20]进一步在Al/O为0.48,0.73,1.52的夹杂物表面,用离子束制备一层富Ti薄膜,研究富Ti层和AF之间的关系。结果表明:Al/O为0.48和0.73时,促进AF形成的夹杂物被厚度为10~40nm窄小的TiO层包覆,TiO薄层有助于AF异质形核。Al/O对焊缝金属微观组织变化的CCT曲线见图3^[21]。

N对焊缝金属的韧性有害,当其含量超过0.01%

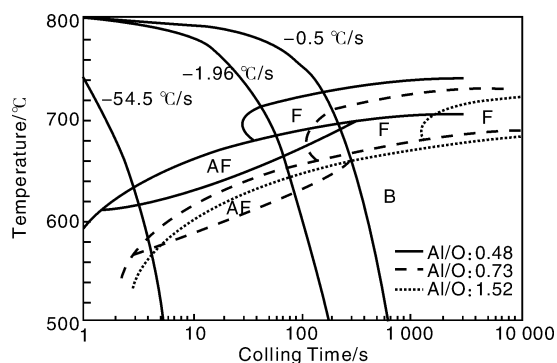


图3 含不同 Al/O 的焊缝金属 CCT 曲线图

Fig. 3 CCT diagrams in different Al/O ratio for weld metals

时, 冲击韧性急剧下降。O 和 S 是焊缝金属中限制性杂质元素。焊缝金属中常加入 Al, Mg 等强还原剂来脱氧固氮, 然而生成的多边形的 AlN 脆性夹杂物, 却会严重的损害焊缝金属的低温韧性, 文献[22]针对 BaF₂-Al-Mg 高韧性全位置自保护 FCAW 渣系, 提出通过向药芯中加入适量 LiF, 会在电弧区与 N 生成 Li₃N, 从而显著

降低焊缝金属中 N 含量, 减少 AlN 有害夹杂数量。然而 Garcia-Mateo C^[23] 却提出 N 与 V 沉淀生成 V(C, N) 相会促进 AF 形核。焊缝金属中 O 含量较少时, 焊缝组织中会存在粗大的 FSP 和 GBF, 从而对韧性不利, 药芯中添加适量 Fe₂O₃、MnO₂ 等, 可提高焊缝金属中 O 含量, 降低残留的 Al 含量, 生成以 Al₂O₃ 为主的圆形夹杂, 得到以 AF 为主的焊缝组织^[22]。Liu Z Z^[24] 研究了钢中硫化物夹杂对 AF 形核的影响, 认为 Mn-Fe-Si-O 复合氧化物和纯 SiO₂ 对 AF 形核无作用, 而含有少量 Mn 和 Cu 的 FeS 颗粒对 AF 形核有效, 这主要是由于 FeS 夹杂附近形成的贫 Mn 区和富 P 区引起的; Cu₂S 颗粒对 AF 形核无效。Sarma D S^[5] 得出由于奥氏体和 MnS 之间热膨胀系数相差很小, MnS 包覆的颗粒作为 AF 形核的可能性明显低于含 Ti 的氧化物包覆颗粒。Ti 的氧化物夹杂表面沉淀 MnS 层会降低 AF 在夹杂物上形核率。

综上所述及其它相关文献报道, 总结得出对于 AF 形成有利的焊缝金属中各合金元素的合适范围见表 1。

表 1 焊缝金属中合金元素对 AF 的影响

Table 1 Influence of alloying elements on AF in weld metals

Element type	Alloying element	Optimum range/%	Effect on AF in weld metal	Base metal	Welding process
Increase austenite zone	Mn	0.6 ~ 1.8	Mild increase	C-Mn	SMAW
		1.9 ~ 2.0		X70	SAW
	Ni	1.0 ~ 3.0	Moderate increase	C-Mn	SAW/FCAW
	C	0.05 ~ 0.1	Small increase	C-Mn	SMAW
	Cu	0.14 ~ 0.94	Moderate increase	Cr-Ni-Cu	SMAW
Increase ferrite zone	Cr	0.9 ~ 1.0	Small increase	C-Mn/Cr-Ni-Cu	SMAW
	Si	0.2 ~ 0.4	Small increase	C-Mn	SMAW
	Al	0.014 ~ 0.035	Moderate increase	Ti-B	SAW
	Ti	0.01 ~ 0.05	Moderate increase	Q235/X70	SAW
	B	0.003 ~ 0.006	Small decrease	EH32	FCAW

3 夹杂物对 AF 形核的影响

焊缝金属中夹杂物的大小、数量、成分、冶金等因素对 AF 形成至关重要。随着夹杂物直径从 0 到 1 μm 的增大, 夹杂物颗粒表面积增大, AF 在夹杂物上异质形核能垒降低。但当夹杂物直径大于 1 μm 时, 形核能垒只轻微降低, 因此, 再进一步增大夹杂物直径将没有意义。作为 AF 异质形核的夹杂物颗粒直径的极限值为 1 μm 见图 4。图 5 为焊缝金属中所有夹杂物和可促使 AF 形核的夹杂物分布情况, 可以看出 AF 形核数量最多的地方对应的夹杂物直径范围为 0.5 ~ 0.8 μm。然而, 在这些夹杂物上 AF 形核率却比在直径大于 1 μm 的夹杂物上形核率小^[3]。Ramirez J E^[7] 却认为夹杂物直径的平均值和最大值分别在 0.3 ~ 0.6 μm、0.9 ~ 1.7 μm 之间。Li Z X^[3] 得出作为 AF 形核的核心的夹杂物尺寸大多数在 0.2 ~ 0.6 μm 之间, 并且是含有多种元素的复合

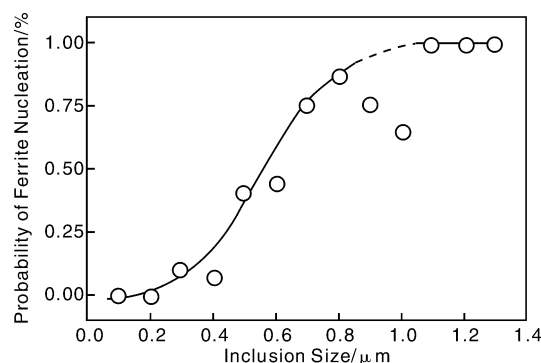


图4 焊缝金属中夹杂物尺寸对 AF 形核的影响

Fig. 4 Effect of inclusion size on AF nucleation in weld metals

夹杂物, 具有化学成分不均匀性。焊缝金属中可促使 AF 有效形核的夹杂物体积分数为 36%, 其中第Ⅲ类夹杂物占 26%, 第Ⅳ类夹杂物占 10%, 而不能形核的第Ⅰ, Ⅱ类夹杂物体积分数分别为 38%, 26%^[5]。

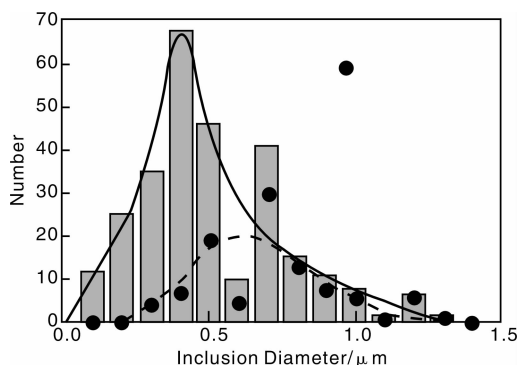


图 5 低碳钢焊缝中夹杂物分布图

Fig. 5 Inclusion distribution diagram in weld metals of mild steel

Yamada T^[6, 25] 在研究低碳 Ti-B 焊缝金属中夹杂物与 AF 形成的关系时, 得出充当 AF 形核质点的夹杂物主要由 Si-Mn 系的非晶相, MnS, MnAl₂O₄ 组成。Bose-Filho W W^[14] 研究得出在 Ti 含量较低时, 焊缝金属中的夹杂物主要组成为 MnOSiO₂; 进一步添加 Ti, 则会使得夹杂物中 Ti 含量增加, 夹杂物主要组成变为 MnOSiO₂, Ti₂O₃, TiO; 当 Ti 含量高达 0.070% 时, 夹杂物中 Ti 含量将高达 60% ~ 70%, 此时夹杂物表面将被 Ti₂O₃、TiO 包覆。Hidenori T^[26] 研究得出焊缝金属含 0.022% Al 时, Mn-Al-Si-O 系中玻璃相作为主要的脱氧产物充当夹杂物核心; 0.035% Al 时对应的为 Al₂O₃ 和特定的玻璃相。

Yamada T^[6, 25] 也研究得出 AF 和夹杂物表面厚度为 10 ~ 20 nm TiO 薄层间存在 Baker-Nutting 取向关系, 与奥氏体基体间存在 Kurdjumov-Sachs 取向关系, 见图 6。TiO 和 AF 间晶格匹配度为 3.0%, 从而有利于 AF 异质形核。含 Ti 的氧化物是 AF 形成的最好质点。富 Ti 的夹杂物可加速焊缝金属中 AF 形成的动力。Paniagua-Mercado M^[13] 通过 SEM 观察到含 Ti 夹杂物为亮白色的圆形, 当焊缝金属中 Al 含量低于 Ti 含量时, 夹杂物将以 TiO 为主, 相反则为 Al₂O₃, 此时 Ti 通常与 N 生产 TiN 夹杂物, 含 Ti 的白色夹杂物会充当 AF 异质形核质点。Ramirez J E^[7] 得出焊缝金属中含有球形、面形和块状的不同形状的夹杂物核心主要由不同比例的 Ti, Mn, Si, Al 等的氧化物组成, 表现为复合脱氧产物, 其中圆形夹杂物由于不会引起钢基体应力集中, 比有棱角夹杂物对 AF 形核有利。

综上所述, 根据夹杂物对 AF 形核的影响, 可将其分为活性夹杂物和惰性夹杂物, 两者对 AF 形核的影响如表 2 所示^[3]。直径 0.5 ~ 0.8 μm、体积分数 36%、表面富 TiO 薄层且成圆球形的夹杂物一定可促进 AF 形核。

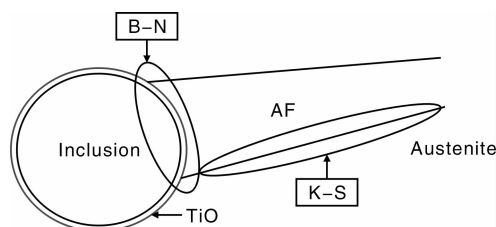


图 6 AF、奥氏体和夹杂物三者之间晶体学取向关系

Fig. 6 Orientation relationships among AF, austenite and inclusion

表 2 夹杂物的化学组成对 AF 形核的影响

Table 2 Influence of chemical composition of inclusions on AF nucleation in weld metals

Compound added	Active inclusions	Inert inclusions
Simple oxides	Ti-oxides (Ti ₂ O ₃ and TiO)	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Ti ₂ O ₃
Complex oxides	(Ti, Mn) ₂ O ₃ , TiO ₂ -(MnO-Al ₂ O ₃) Galaxite spinel MnO-Al ₂ O ₃	MnO-SiO ₂ , MnO-FeOx-SiO ₂ , MgO-Al ₂ O ₃ MnO-Al ₂ O ₃
Simple nitrides	TiN, VN	TiN
Simple sulfides		MnS, CuS
Complex oxy-sulfides and multi-phase inclusions	Al ₂ O ₃ -MnS, TiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MnS Ti-and Ti-Ca-oxy-sulfides Ti ₂ O ₃ -TiN-MnS, TiO _x -TiN-MnS FeS-(Mn, Cu)S, MnS-VC, MnS-V(C, N)	

4 热输入对 AF 形核的影响

焊接参数如 HI、工件形状、气体流量等的不同可引起焊缝金属微观组织和韧性的变化, 其中 HI 是主要影响因素。文献[27]通过 HI = 1.0 ~ 2.75 kJ/mm 对高强度钢 12Ni3CrMoV 气体保护焊丝焊缝金属强韧性的研究表明, 随着 HI 增加, C, Mn, Ti 等合金元素烧损增加, 合金含量下降, 淬硬性降低, 焊缝金属的冷却时间延长, 从而有利于强度较低、低温韧性较差的铁素体生成。焊缝金属组织由 GB、小块状铁素体和 AF 向粗大的块状铁素体及 GB 转变。且得出 HI 与 -50 °C 冲击功间拟合式(1), 其中 R 为拟合相关系数(R₂ = 0.487 5)。

$$A_{KV-50^{\circ}C} = 68.86 + 2.65HI - 0.099HI^2 \quad (1)$$

然而 Song S P^[28] 在研究了 HI = 1.507 ~ 2.987 kJ/mm 对 E71T-8J 自保护 FCAW 焊缝金属的影响时, 结果却表明: 随着 HI 增大, 夹杂物的数量、形态、粒径、分布等均无明显变化, 合金元素的烧损轻微, 主要是焊缝金属的显微组织发生了粗化, 其中 PF 含量增加, AF 和粒状贝氏体(GB)含量减少, 熔敷金属低温韧性降低, -40 °C 冲击吸收功由起初的 153 J 降低到 31 J, 也得出

HI 与 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功拟合式(2), 其中 $R^2 = 0.930\ 89$ 。Bajic N^[29]研究了 HI 在 0.75 kJ/mm 和 2.1 kJ/mm 两种焊接条件下, X60 管线钢 SAW 焊缝金属微观组织的变化, 也得出较低 HI 对 AF 形成有利, AF 含量可达 72%。

$$A_{KV-40^{\circ}\text{C}} = 69.67 + 110.12\text{HI} - 40.39\text{HI}^2 \quad (2)$$

文献[30]研究了 HI 在 2.0 ~ 3.8 kJ/mm 对 X80 管线钢 SAW 焊缝组织和性能的影响, 结果表明: 焊缝金属微观组织由 PF、AF 和 B 构成, 随着 HI 增大, 焊缝金属中柱状晶宽度增大, AF 板条粗化, 低温冲击韧性先升后降趋势, 其中 HI = 3.1 kJ/mm 时, AF 相互交织, 呈高角度和高位错组合分布, 低温冲击韧性最好。

Bang K S^[31]研究了随着 HI 在 1.4 ~ 4.5 kJ/mm 间的增加, 分别增大焊接电流(I)、焊接速度(V)及电压(U)对 E81T1-Ni1 型金属芯焊丝焊缝金属微观组织的影响见图 7, 可以看出, 分别随着 I, U, V 增大, AF 所占面积减少; 冲击韧性主要与焊缝金属中的粗晶区的长度有关, 而与 AF 的比例、细晶区长度无关; 随着 HI 的增大, 粗晶区长度增大, 冲击韧性降低。Lee J S^[32]研究了 HI = 1.8 kJ/mm 条件下, U, V, I 对 FCAW 焊缝金属微观组织和冲击韧性的影响, 随着 V 降低, 焊缝晶粒尺寸增大; 焊缝金属的冷却速率随 U, I 增大而降低; 在同等热输入条件下, 合金元素没有明显变化, 焊缝金属的冷却速率更多地由 U 和 I 决定, V 影响很小, 较低的 U, V, I 将具有较高的冷却速率可使焊缝金属组织细化, AF 的体积分数增加, 从而相应的冲击韧性得以提高。

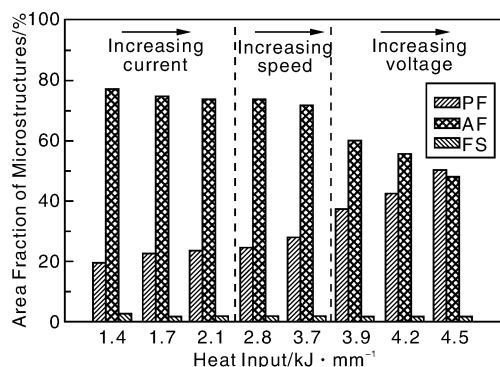


图 7 HI 对焊缝金属中微观组织的影响

Fig. 7 Effect of HI on microstructures in weld metals

综上所述, 焊缝金属的冷却速率主要由 U 和 I 决定, V 影响很小; 较低 HI 时合金元素烧损较少, 焊缝组织细化, 对 AF 形成有利。

5 结 语

(1) C 含量控制在 0.05% ~ 0.10% 之间且碳当量小于 0.39, 合理控制 Mn, Ni, Ti, B 之间的相互比例,

并保持 B/N 在 0.6 ~ 0.8 之间, Al/O 在 0.43 ~ 0.73 之间, 降低 N, S, P 含量, 将对 AF 形核有利。

(2) 夹杂物核心主要由 MnS 和其它非晶相组成; 尺寸为 0.5 ~ 0.8 μm , 体积分数 36%, 表面富 10 ~ 20 nm TiO 薄层且呈球形的夹杂物, 一定可促进 AF 形核。

(3) 冷却速率主要由 U 和 I 决定, V 影响较小; 较低 HI 时合金元素烧损较少, 冷却速率较快, 焊缝组织细化, 对 AF 形核有利。

参考文献 References

- [1] Li Zhuoxin(栗卓新). 危机尚未过去竞争更加激烈[J]. *Metal Forming*(金属加工), 2010, (14): 4-5.
- [2] Song Shaopeng(宋绍朋), Li Zhuoxin(栗卓新), Li Guodong(李国栋). 自保护药芯焊丝初化机理及电弧特性的研究进展[J]. *China Mechanical Engineering*(中国机械工程), 2010, 21(14): 1752-1757.
- [3] Li Z X, Zhang T L, Frank Y. Global Progress and Trends on Welding Consumables for HSLA Steel[C]//Editorial Committee of This Lecture. India; 64th IIW Invited Lecture, 2011.
- [4] Park K T, Hwang S W, Ji J H, et al. Inclusions Nucleating Intragranular Polygonal Ferrite and Acicular Ferrite in Low Alloyed Carbon Manganese Steel Welds[J]. *Met Mater Int*, 2011, 17(2): 349-356.
- [5] Sarma D S, Karasev A V, Jonsson P G. On Role of Non-Metallic Inclusions in Nucleation of Acicular Ferrite in Steels[J]. *ISIJ International*, 2009, 49(7): 1063-1074.
- [6] Yamada T, Terasaki H, Komizo Y. Lattice Misfit between Inclusion and Acicular Ferrite in Weld Metal of Low Carbon Low Alloy Steel[J]. *Symposium of Welding Society*(溶接学会论文集), 2009, 27(2): 114s-117s.
- [7] Ramirez J E. Characterization of High-Strength Steel Weld Metals: Chemical Composition, Microstructure, and Nonmetallic Inclusions[J]. *Welding Journal*, 2008, 87: 65s-75s.
- [8] Kim J H, Seo J S, Kim H J, et al. Effect of Weld Metal Microstructures on Cold Crack Susceptibility of FCAW Weld Metal[J]. *Metals and Materials International*, 2008, 14(2): 239-245.
- [9] Beidokhti B, Koukabi A H, Dolati A. Influences of Titanium and Manganese on High Strength Low Alloy SAW Weld Metal Properties[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60: 225-233.
- [10] Avazkonandeh-Gharavol M H, Haddad-Sabzevar M, Haerian A. Effect of Copper Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Multipass MMA, Low Alloy Steel Weld Metal Deposits[J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 1902-1912.
- [11] Avazkonandeh-Gharavol M H, Haddad-Sabzevar M, Haerian A. Effect of Chromium Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Multipass MMA, Low Alloy Steel Weld Metal[J]. *J Mater Sci*, 2009, 44: 186-197.
- [12] Beidokhti B, Koukabi A H, Dolati A, et al. Effect of Titanium Addition on Microstructure and Inclusion Formation in Submerged

- Arc Welded HSLA Pipeline Steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 4 027 - 4 035.
- [13] Paniagua-Mercado M, Lopez-Hirata M, Dorantes-Rosales J. Effect of TiO_2 -Containing Fluxes on the Mechanical Properties and Microstructure in Submerged-Arc Weld steels[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60: 36 - 39.
- [14] Bose-Filho W W, Carvalho A L M, Strangwood M. Effects of Alloying Elements on the Microstructure and Inclusion Formation in HSLA Multipass Welds[J]. *Materials Characterization*, 2007, 58: 29 - 39.
- [15] 濱田 昌彦, 岡口 秀次, 小溝 裕一. 高強度溶接金属の組織? 靱性に及ぼすB添加の影響[J]. *Symposium of Welding Society Lecture Essentials on National Congress of Welding Society*(溶接学会全国大会講演概要), 2007, 2007s: 16 - 17.
- [16] 濱田 昌彦, 岡口 秀次, 小溝 裕一. Ti 含有溶接金属の組織および靱性に及ぼす引張り強さとボロン添加の影響[J]. *Symposium of Welding Society Lecture Essentials on National Congress of Welding Society*(溶接学会全国大会講演概要), 2009, 27(13): 1 - 6.
- [17] Lee H W, Kim Y H, Lee S H, *et al.* Effect of Boron Contents on Weldability in High Strength Steel [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2007, 21: 771 - 777.
- [18] 木谷 靖, 池田 倫正, 小野 守章等. 低炭素鋼大入熱エレクトロスラグ溶接金属の高靱性化[J]. *Symposium of Welding Society Lecture Essentials on National Congress of Welding Society*(溶接学会全国大会講演概要), 2009, 27(3): 240 - 246.
- [19] 児嶋一浩, 長谷川 俊永, 皆川 昌紀. アシキュラーフェライトの生成に及ぼすアルミニウムの影響[J]. *Symposium of Welding Society Lecture Essentials on National Congress of Welding Society*(溶接学会全国大会講演概要), 2008, 83: 138 - 139.
- [20] Yamada T, Terasaki H, Komizo Y. Relation between Inclusion Surface and Acicular Ferrite in Low Carbon Low Alloy Steel Weld [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(7): 1 752 - 1 757.
- [21] 山田 知典, 寺崎 秀紀, 小溝 裕一. Al-O 比が異なるTi-B 系低炭素鋼溶接金属の組織形成挙動[J]. *Symposium of Welding Society Lecture Essentials on National Congress of Welding Society*(溶接学会全国大会講演概要), 2007, 25(4): 514 - 518.
- [22] Zhang Zhanwei(张占伟), Li Wushen(李午申), Xue Zhenkui(薛振奎). 自保护药芯焊丝熔敷金属中 O, N 的控制及其对显微组织和韧性的影响[J]. *Journal of Tianjin University*(天津大学学报), 2010, 43(2): 186 - 189.
- [23] Garcia-Mateo C, Capdevila C, Caballero F G, *et al.* Influence of V Precipitates on Acicular Ferrite Transformation Part I -The Role of Nitrogen[J]. *ISIJ International*, 2008, 38(9): 1 270 - 1 275.
- [24] Liu Z Z, Kobayashi Y, Yin F X, *et al.* Nucleation of Acicular Ferrite on Sulfide Inclusion During Rapid Solidification of Low Carbon Steel [J]. *ISIJ International*, 2007, 47(12): 1 781 - 1 788.
- [25] 山田 知典, 寺崎 秀紀, 小溝 裕一. 酸素量の異なるTi - B 系低炭素鋼溶接金属におけるアシキュラーフェライト生成機構[J]. *鉄と鋼*, 2010, 96(10): 608 - 613.
- [26] Terasaki H, Yamada T, Komizo Y. Analysis of Inclusion Core under the Weld Pool of High Strength and Low Alloy Steel [J]. *ISIJ International*, 2008, 48(12): 1 752 - 1 757.
- [27] Yao Shangwei(姚上卫), Xu Jingxian(徐景贤), Chen Xin(陈新). 热输入对高强度气体保护焊丝焊缝金属强韧性的影响[J]. *Development and Application of Materials*(材料开发与应用), 2008, 23(4): 47 - 49.
- [28] Song S P, Li Z X, Li G D, *et al.* Effect of Heat Input on Toughness of Deposited Metal at -40 °C of Self-Shielded Flux-Cored Wire[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 291 - 294: 979 - 983.
- [29] Bajic N, Sijacki-Zeravic V, Rakin M, *et al.* Effect of the Welding Mode and Filler Content on the Structure of Microalloyed NbTi Steel Weldments [J]. *Materials Science*, 2010, 46(1): 124 - 133.
- [30] Zhai Zhanjiang(翟战江), Wei Jinshan(魏金山), Peng Yun(彭云), *et al.* 热输入对 X80 焊缝金属低温冲击性能的影响[J]. *Hot Working Technology*(热加工工艺), 2011, 40(9): 146 - 149.
- [31] Bang K S, Park C, Chang W S, *et al.* Influence of Heat Input on Mechanical Properties of Multipass Low-Alloy Steel Weld Metal [J]. *Materials Science Forum*, 2008, 580 - 582: 17 - 20.
- [32] Lee J S, Jeong S H, Lim D Y, *et al.* Effects of Welding Heat and Travel Speed on the Impact Property and Microstructure of FC Welds [J]. *Met Mater Int*, 2010, 16(5): 827 - 832.