

Al 元素对高强钢药芯焊丝焊缝金属组织和性能的影响

刘政军, 武丹, 苏允海, 裘荣鹏

(沈阳工业大学, 沈阳 110870)

摘要: 采用自行研制的高强钢药芯焊丝焊接 Q960 钢, 通过改变药芯成分中 Al 元素的含量获得了含有不同 Al 元素的焊缝金属。利用拉伸试验、不同温度下冲击试验对焊缝金属的强度和韧性进行了测试; 结合金相组织、扫描电镜观察等手段分析了 Al 元素对焊缝金属组织和性能的影响机理。结果表明: 焊缝金属中 Al 元素含量的变化对接头抗拉强度和断后伸长率影响不大, 但对焊缝金属冲击吸收能量影响较大。随着 Al 元素含量的增加, 冲击吸收能量呈现先增大后降低的趋势。当 Al 元素含量较低时, 易生成 Al_2O_3 氧化物, 针状铁素体易形核和长大, 有利于提高焊缝金属冲击吸收能量; 当 Al 元素含量较高时, 易生成 AlN 氮化物, 同时组织中存在着 δ -铁素体组织, 造成焊缝金属冲击能量降低。

关键词: 药芯焊丝; 针状铁素体; 冲击吸收能量; 夹杂物

中图分类号: TG422.3

0 前言

低合金高强钢因具有强度高、塑性好、耐腐蚀、抗疲劳等优点而广泛的应用在管道运输、桥梁、造船、海洋平台、矿山机械等行业重要场合^[1-2]。但这类钢在焊接时冲击韧性难以保证, 尤其是低温冲击韧性较低, 限制了该类钢材在更广的范围内使用。目前, 大多数高强钢焊接常采用“低强匹配”的实心焊丝进行焊接, 但在保证了焊缝金属韧性的同时牺牲了接头的强度^[3-4]。药芯焊丝作为一种新型的焊接材料在国外已经取代了焊条、焊丝等传统焊材, 并在各行业中大面积使用, 在国内还只停留在重要结构中使用。该类焊丝具有成分易调节、焊缝成形好、易操作等优点, 尤其可针对不同母材合理配比药芯的成分使其针对性更强, 接头的质量更高。有研究学者认为, 理想的高强钢焊缝金属组织是以针状铁素体作为韧化相, 因为针状铁素体组织具有大角度晶界和高密度位错, 既可以提高焊缝金属的强度, 又可以在裂纹扩展时改变裂纹扩展路径, 增加裂纹扩展所需的能量。因此, 阻碍了裂纹扩展, 达到提高焊缝金属冲击吸收能量的目的^[5-6]。

合金化、控制热输入或焊后冷却速度, 以及焊后热处理。其中, 在焊缝合金化方面利用药芯焊丝成分可调节的特点, 将有益的合金元素过渡到焊缝金属中, 如: Mn, Ti, B, 稀土等, 通过获得理想的焊缝组织来提高焊缝金属的冲击韧性是十分有效的方式, 也成为国内外相关研究的热点^[7-9]。在焊缝金属中 Al 元素具有脱氧、脱氮、净化焊缝的作用, 形成的氧化物和氮化物一部分进入熔渣, 一部分会进入到焊缝中, 进入到焊缝中的 Al 元素的氧化物和氮化物既可以成为形核质点, 利于焊缝金属形成针状铁素体组织, 进而提高焊缝金属强度和韧性。同时, 也可以成为微裂纹源, 降低冲击吸收能量。因此, 文中在自行设计的高强钢药芯焊丝中, 通过拉伸试验、冲击试验等测试方法, 结合金相组织观察、扫描电镜和透射电镜分析等检测手段, 研究了 Al 元素对高强钢药芯焊丝焊缝金属组织和性能的影响, 力求为高强钢药芯焊丝的研制提供一些可借鉴的依据。

1 试验材料和方法

试验用母材为舞阳钢铁公司产 Q960 高强钢, 其组织为低碳马氏体, 尺寸为 300 mm × 150 mm × 10 mm, 化学成分和力学性能见表 1。药芯焊丝为自行研制, 采用钢带成形法制备, 直径为 1.6 mm, 药粉主要成分包括 Mn, Mo, Cr, Ni, Ti, B, Al 等元素, 分别以电解锰、钼粉、

表1 Q960 钢化学成分及力学性能

化学成分(质量分数,%)									抗拉强度	断后伸长率	(-20℃)冲击吸收能量
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	B	R_m /MPa	A(%)	KV/J
0.18	0.5	1.6	0.8	1.0	0.6	0.05	0.03	0.005	≥960	>12	≥30

金属铬、镍粉、钛粉、硼铁和铝粉等形式加入到粉体中,粒度在 200~100 μm 之间。

焊前装配时,将两块试板以平板对接位置放置,始焊端 1 mm,终焊端 3 mm,坡口角度为 60°,焊缝两侧经打磨、清洗干净以便去除氧化皮、铁锈、油污等。采用钨极氩弧焊进行焊接,共 4 层,7 道焊缝。焊接电流为 190~210 A,焊接电压为 26~29 V,钨极伸出长度为 12 mm,保护气体为纯氩气,气体流量为 18~20 L/min,层间温度控制在 100℃左右。焊后,按 GB/T 17493—2008《低合金钢药芯焊丝》标准要求截取试样。在奥林巴斯 GX-51 上观察焊缝金属组织形貌,利用其自带软件进行夹杂物尺寸的统计;在 Hitachi S-3400N 扫描电子显微镜上观察断口形貌,并对夹杂物进行能谱分析;焊缝金属中各合金元素成分是通过化学分析确定。按 GB/T 2652—2008《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》标

准进行拉伸试验,每种成分取 5 个试样的平均值;按 GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》进行冲击试验,冲击试验温度分别为室温(25℃),0℃,-20℃,-40℃和-60℃,每种成分取 3 个试样平均值。

2 试验结果与分析

2.1 Al 元素含量对焊缝金属组织的影响

表 2 为 Al 元素含量变化时,焊缝金属中各合金元素的含量。可以看出,随着焊缝金属中 Al 元素含量的增加,Mn 元素含量增加,O,N 元素含量减少,其余各合金元素含量变化不大。这是因为在焊缝金属中 Al 和 O,N 具有较强的结合能力,能够形成 Al_2O_3 和 AlN,从而减少了焊缝金属中 O,N 含量。同时,因为 Al 元素的存在,减少了 Mn 元素与 O 的结合机会,使得更多的 Mn 元素过渡到焊缝金属中。

表2 焊缝金属化学成分(质量分数,%)

Al	Mn	Mo	Cr	Ni	Nb	Ti	B	O	N
0	1.09	1.40	0.89	1.19	0.05	0.43	0.005	0.016	0.028
0.21	1.14	1.43	0.90	1.18	0.06	0.45	0.005	0.016	0.019
0.40	1.20	1.43	0.90	1.19	0.05	0.42	0.005	0.015	0.020
0.64	1.21	1.42	0.90	1.20	0.06	0.43	0.005	0.010	0.017
0.81	1.20	1.45	0.88	1.20	0.05	0.43	0.005	0.007	0.014
1.05	1.22	1.41	0.90	1.20	0.07	0.40	0.005	0.005	0.010

图 1 为 Al 元素含量变化对焊缝金属组织的影响。当焊缝金属中没有加入 Al 元素时,焊缝金属组织由晶界铁素体、针状铁素体和少量粒状贝氏体组成,如图 1a 所示。随着焊缝金属 Al 元素含量的增加,焊缝金属组织中针状铁素体含量增加,晶界铁素体含量减少,如图 1b,1c 所示;继续增加 Al 元素含量,焊缝金属中出现粗大的骨架状组织,如图 1d,1e 和 1f 所示,经分析认为是 δ-铁素体组织。这是因为 Al 元素为强铁素体形成元素,具有扩大铁素体形成相区,缩小奥氏体形成相区的作用。当焊缝金属中 Al 元素含量较高时,在焊缝金属凝固冷却过程中首先从液态金属中析出 δ-铁素体组织,因焊缝金属中固溶了大量的 Al 元素缩小了奥氏体

相区,阻碍了奥氏体的形成,使得生成的 δ-铁素体在随后的冷却过程中不能完全转变为奥氏体,而以粗大的骨架状保留到焊缝金属组织中,从而对焊缝金属的力学性能产生了不利影响。

2.2 Al 元素对焊缝金属拉伸强度的影响

焊缝金属 Al 元素含量对接头抗拉强度和断后伸长率的影响如图 2 所示。从图中可以看出,随着焊缝金属中 Al 元素含量的增加,除 0.21% Al 以外,其余接头的抗拉强度在小幅度范围内呈线性增加,但增幅不大。同时,接头断后伸长率随着焊缝金属 Al 元素含量的增加呈小幅度下降趋势。这说明,虽然焊缝金属中 Al 含量的变化使得焊缝金属组织发生了较大的改变,

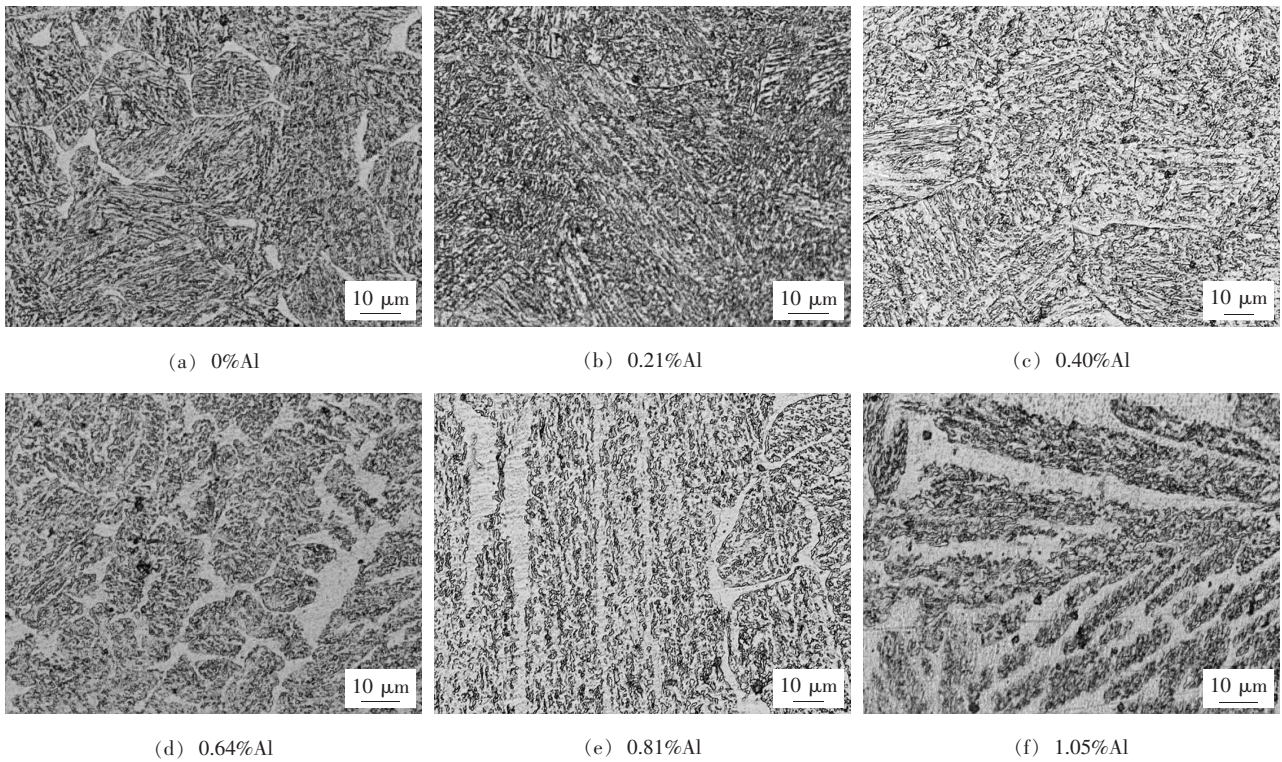


图1 Al元素含量对焊缝金属组织形态的影响

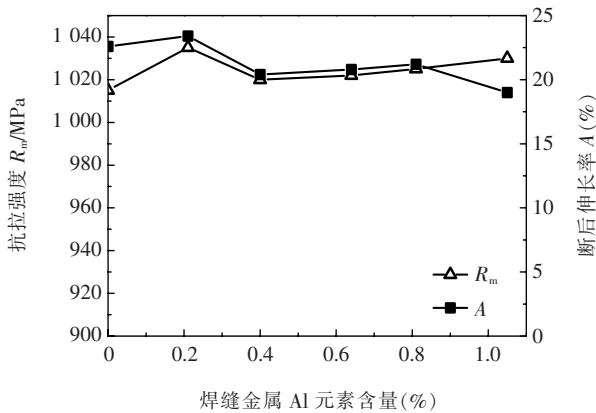


图2 Al元素含量对焊缝金属拉伸性能的影响

但这一变化只在 0.21% Al 时有一定影响外,其余含量下对接头的拉伸性能影响不大。

2.3 Al元素含量对焊缝金属冲击吸收能量的影响

焊缝金属 Al 元素含量对焊缝金属冲击吸收能量的影响如图 3 所示。可以看出,当试验温度为室温(25℃),0 ~ -60℃时,焊缝金属冲击吸收能量均在 0.21% Al 时出现了极值,此后随着 Al 元素含量的增加呈现出下降的趋势,甚至当焊缝中 Al 元素含量为 1.05% 时,各试验温度下冲击吸收能量比不加入 Al 元素焊缝金属冲击吸收能量还低。经分析认为,这与焊缝金属组织的变化有关。焊缝金属的冲击吸收能量与焊缝组织

中的夹杂物大小、形貌、分布以及微观组织转变有着非常重要的关系^[10]。例如:多边形夹杂物对冲击吸收能量的危害比圆球形夹杂物大,大尺寸夹杂物的危害比小尺寸大。

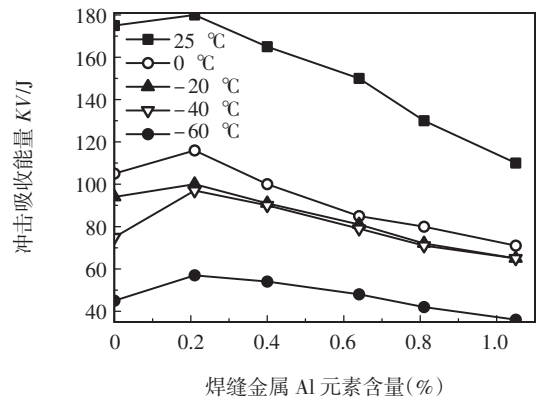
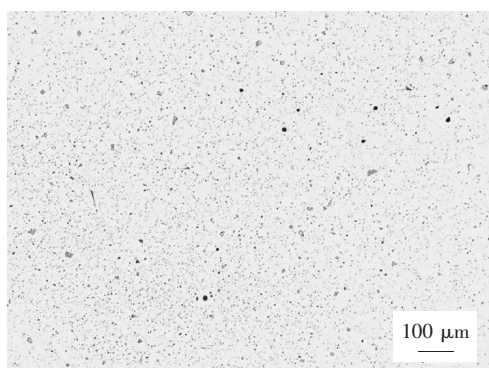


图3 Al元素含量对焊缝金属冲击吸收能量的影响

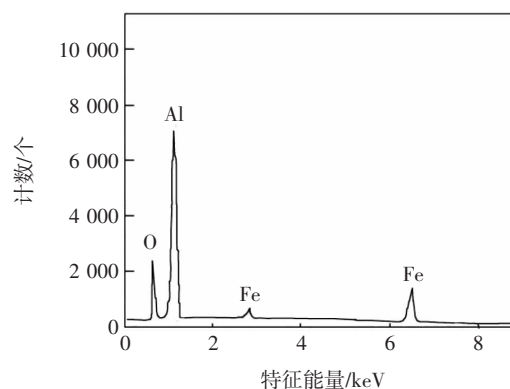
当焊缝金属 Al 元素含量为 0.21% 时,焊缝金属冲击吸收能量出现极值是因为组织中存在着大量的针状铁素体,如图 1b 所示。针状铁素体组织在焊缝金属中为中温转变产物,一般在晶内形核长大,以大角度分布,取向自由度大,具有高密度位错,因此可在微裂纹扩展时增加裂纹扩展路径,从而提高强度和韧性,分别如图 2,3 所示。焊缝金属中针状铁素体一般为晶内形

核,以夹杂物为核心进行形核和长大。因此,夹杂物的数量、大小和分布对针状铁素体的形核有较大的影响。当焊缝金属中加入 Al 元素后,Al 元素可以与 O,N 发生反应生成 Al_2O_3 氧化物和 AlN 氮化物,这些氧化物和氮化物一部分会进入到熔渣中排除在焊缝之外,一部分会进入到焊缝金属中。进入到焊缝金属中的夹杂物既可能会成为针状铁素体的形核质点,也可能成为裂纹源。经研究发现,当 Al 元素含量较低时,在焊缝金

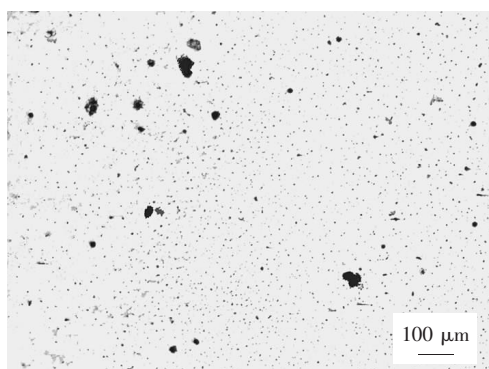
属冷却过程中 Al 元素优先与 O 发生反应生成 Al_2O_3 氧化物,这种氧化物通常尺寸较小,呈弥散分布,形状为圆球形,如图 4a,4b 所示。这种氧化物有利于针状铁素体以此为核心进行形核和长大。当 Al 元素含量增加时,Al 元素易与 N 发生反应生成 AlN 氮化物,为多边形,尺寸较大,如图 4c,4d 所示。这种氮化物在受到外力作用下,因夹杂物与周围基体组织之间的弹性模量不同,裂纹将会从夹杂物周围开始形成并向远处扩展。



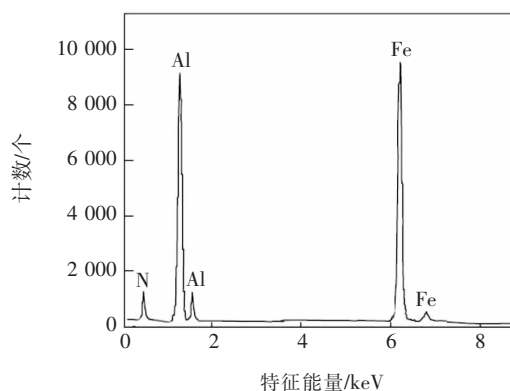
(a) 氧化物



(b) 氧化物能谱分析



(c) 氮化物



(d) 氮化物能谱分析

图4 焊缝金属中夹杂物形态及能谱图

表3为焊缝金属中 Al 元素含量分别为 0.21% 和 1.05% 时,在相同视场内夹杂物尺寸的统计。可以看出,当 Al 元素含量为 0.21% 时,焊缝金属中大部分夹杂物尺寸均小于 $1.0 \mu m$,结合图 4a,4b 分析小尺寸的夹杂物为 Al_2O_3 氧化物,这种氧化物一方面可以作为针状铁素体的形核中心,增加形核机率,另一方面因尺寸

小,外表呈圆球形而降低了对周围基体组织的割裂作用,因此,对焊缝金属冲击吸收能量的提升是有利的。当 Al 元素含量为 1.05% 时,焊缝金属中大于 $2.0 \mu m$ 的夹杂物增多,结合图 4c,4d 分析生成的夹杂物为 AlN 氮化物,颗粒大,呈多边形,对焊缝金属冲击吸收能量不利。同时,当焊缝金属中 Al 元素含量多时,焊缝金

表3 焊缝金属中夹杂物尺寸及分布

Al 元素含量 (%)	0 ~ 0.5 μm	0.5 ~ 1.0 μm	1.0 ~ 2.0 μm	大于 2.0 μm
0.21	107	135	8	5
1.05	99	76	6	12

属组织中还存在着凝固过程中来不及转变的骨架状 δ -铁素体组织,因此更加使得焊缝金属冲击吸收能量降低,甚至比不加入 Al 元素时焊缝金属的冲击吸收能量还低。

3 结论

(1) Al 元素对高强钢焊缝金属不仅具有脱氧、脱氮、净化焊缝的作用,同时对组织转变也有所影响。当 Al 元素含量较低时,焊缝金属组织以针状铁素体组织为主;随着 Al 元素含量增加,白色骨架状 δ -铁素体组织增多。

(2) 随着焊缝金属中 Al 元素含量增加,接头抗拉强度呈小幅度增大趋势,断后伸长率呈小幅度降低,但变化不大。Al 元素含量的变化对焊缝金属冲击吸收能量影响较大,呈现先增大后降低的趋势,极值出现在 Al 元素含量为 0.21% 时。这主要与焊缝金属的组织转变和夹杂物的种类、尺寸和形状有关。

(3) 当焊缝金属中 Al 元素含量较低时,组织中易形成 Al_2O_3 氧化物夹杂物,呈圆球形,尺寸较小,为弥散分布,可成为针状铁素体形核质点,有利于提高焊缝金属冲击吸收能量;当焊缝金属中 Al 元素含量较高时,组织中形成 AlN 氮化物,颗粒较大,为多边形,易在夹杂物和周围基体间产生微裂纹,对焊缝金属冲击吸收能量有不利影响。

- 织性能研究[J]. 热加工工艺,2018,47(11): 220-224.
- [2] 董明水,陈明. 低合金高强钢 WELDOX700 与 WELDOX900 的焊接[J]. 焊接,2006(6): 45-46.
- [3] 刘军华. Q690E 低合金高强钢 MAG 焊接工艺研究[J]. 焊接,2017(9): 65-69,84.
- [4] 裘荣鹏,武丹. 保护气体中氧气含量对低合金高强钢熔敷金属组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(23): 52-55,59.
- [5] 王恒辉,万响亮,李光强,等. 低合金高强度钢焊缝针状铁素体联锁组织与性能[J]. 材料热处理学报,2014,35(12): 114-120.
- [6] 张敏,陈阳阳,刘明志,等. 超低碳贝氏体钢埋弧焊焊接接头初化机理分析[J]. 焊接学报,2016,37(6): 45-49.
- [7] 陈翠欣,薛海涛,陈翠玲,等. 纳米氧化物合金化对低合金高强钢熔敷金属组织和性能的影响[J]. 焊接学报,2016,37(9): 29-34.
- [8] 杨军,吴鲁海,毛及放. 低合金高强钢焊缝熔敷金属强初化机理[J]. 焊接学报,2006,27(3): 86-90.
- [9] 隋少华,蔡玮玮,宋天革,等. Ti-B 微合金化焊缝金属的初化机理[J]. 焊接学报,2004,25(6): 103-106.
- [10] 王爱华. 690 MPa 级海洋平台用钢焊缝夹杂物对熔敷金属低温韧性影响的分析[J]. 焊接,2015(6): 47-50.

参考文献

- [1] 叶美英,皇甫双娥. 低合金高强钢结构的焊接工艺与组

第一作者简介: 刘政军,1962 年出生,博士,教授,博士生导师;主要从事焊接冶金、特种焊接材料及表面强化等方面的研究;已发表论文 100 余篇。

2019' 中国焊接产业论坛

主办单位: 中国焊接协会
 指导单位: 中国机械工程学会
 协办单位:

美国焊接学会
 新加坡焊接学会
 中国电器工业协会电焊机分会
 北京工业大学, 上海交通大学

承办单位:
 中国焊接协会焊接设备分会

主题: 高效焊接
 技术及应用

时间: 6月22~24日

地点: 上海

支持单位:

上海库茂机器人有限公司
 深圳市麦格米特焊接技术有限公司

宣传媒体: 《焊接》、《电焊机》、
 《金属加工》、《焊接技术》、
 《CHINA WELDING》、《机器人
 在线》、《机器人技术与应用》
 《机械制造文摘——焊接分册》

<http://www.cwa.com.cn>

联系人 宋金玲 010-63943751/13261211870 zghjsb@vip.163.com
 李波 0451-86340850-1008/18724611763 cwalibo@126.com