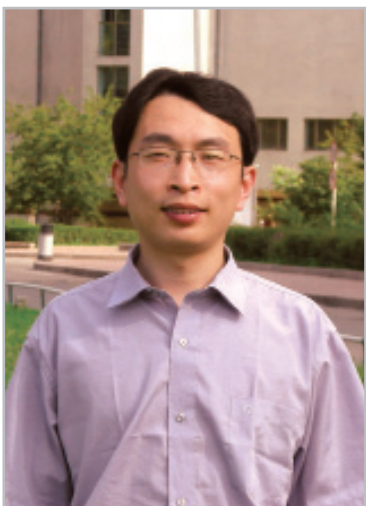


合金元素改善铝/钢异种金属接头性能的研究

Research on Alloy Agent for Improving Welded Joint Properties of Aluminum to Steel Dissimilar Material

哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室 宋建岭 林三宝 杨春利 马广超



宋建岭

博士研究生,主要研究方向为铝/钢异种金属熔钎焊接,已发表论文8篇。

铝/钢异种金属结构能够充分发挥不同材料的各自优点,具有轻质、高强及良好的导热导电性能,以及良好的经济效益,在航空航天、船舶、汽车制造等领域受到了广泛的关注,显示出了良好的应用前景。铝/钢异种金属焊接的主要问题是两者之间的固溶度很低、热物理性能差异大,两者之间极易反应生成脆性的金属间化合物,金属化合物生长速度很快,控制不当将布满整个接头;同时金

针对不同的焊接方法,合金元素以不同的方式加入到焊接材料中,能够研制出含有特殊合金元素的专用焊丝,而无须镀层等附加工艺,直接进行铝/钢熔焊获得高质量的接头,是一个颇具挑战性也是极有应用价值的课题。

属间化合物表现出强烈的应力集中倾向,会导致接头迅速脆性断裂,严重恶化接头的力学性能,这已成为焊接领域的研究热点和难点问题。

近年来,许多学者对铝与钢的连接进行了深入的研究,几乎涉及到焊接领域的各种方法,包括钎焊、压焊和熔焊等,但是无论采用哪种焊接方法,焊接材料对获得优质接头都起到了至关重要的作用,所以,研制出能够适用于铝/钢异种金属焊接的专用焊接材料是一项十分重要的工作。

本文详细阐述了添加合金元素的基本原则,归纳了针对不同的焊接方法,分析了合金元素改善铝/钢接头性能的作用,并对其发展前景作了展望。

添加合金元素的基本原则

铝/钢异种金属焊接过程中,焊接材料起着至关重要的作用。通常,

铝材、钢材、焊接材料的金相组织均不属于同一种类型,焊接接头中容易产生严重的金相组织、化学成分和力学性能的不均匀性以及出现过大的焊接残余应力,同时液态铝基焊料与钢反应还会生成脆性的金属间化合物,严重恶化铝/钢接头的性能,这就要求在铝基焊料中添加特殊的合金元素以改善其性能。特殊合金元素的选用和添加通常有一定的原则和要求:

(1) 添加的合金元素要能够降低焊接材料的熔点,保证液态铝基焊料在钢表面具有良好的润湿性和铺展性。焊接材料熔化后在钢表面的良好润湿铺展情况是实现铝/钢焊接的第一步,液态纯铝焊料在钢表面润湿铺展性很差。在熔焊过程中铝焊丝熔化后在钢表面不润湿铺展,熔滴凝固成球状;在钎焊过程中液态纯铝钎料填缝能力差,同时温度过

高,对铝合金母材熔蚀严重。在铝基焊料中加入特殊的合金元素能改善液态焊料在钢表面的润湿铺展性,也降低了焊料的熔点。

(2) 添加的合金元素要能够抑制 Al-Fe 金属间化合物的生成,改变 Al-Fe 金属间化合物的形态及分布,或者替换 Al-Fe 金属间化合物中 Al 或 Fe 元素,使形成的新金属间化合物具有较高的金属性和塑性。

可以通过以下 2 个方面改善金属间化合物的脆性: 添加间隙式元素,如 B 等,间隙式元素侵入到电子密度稀薄的位置,从而得到比较均质的晶界结合环境,使晶界结合强度增大,提高 Al-Fe 金属间化合物的延性; 添加置换式元素,如 Ga 等,主要调整其键合成分,尤其是共价键成分,即用金属对置换共价性结合对,实际上是用金属键去代替共价键。

(3) 添加的合金元素要能够起到变质处理和形核剂的作用,通过细化晶粒和形成细小金属间化合物的形式来提高接头的塑性。合金元素必须满足具有较低溶解度或能与合金中其他组元素结合,形成细小化合物。金属结晶后的晶粒大小与形核率和长大速度有关,非自发形核是影响形核率和长大速度的重要因素。加入某些合金元素能够促使非自发晶核的形成,大大增加晶核数目,或虽不提供结晶核心,但能改变晶核的长大条件,强烈地阻碍晶核的长大或改善组织形态。

合金元素的作用及添加量

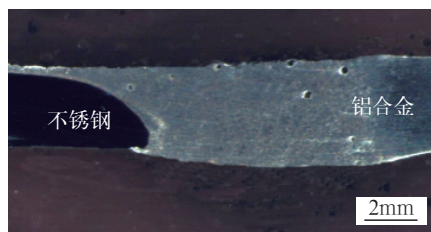
根据添加量的不同,可以把合金元素分为主体添加元素和微量添加元素 2 类,主体添加元素在焊接材料化学成分中占主体地位,它们决定了焊接材料的使用性能,如力学性能、焊接性能、耐腐蚀性能; 微量添加元素有利于辅助改善上述性能,细化焊缝金属的晶粒,降低焊接时生成焊接裂纹的倾向,提高焊缝金属的延性及

韧性。二者对改善接头性能都具有重要的作用。

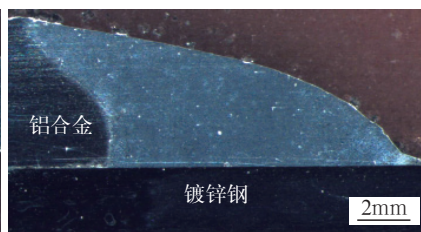
1 主体添加元素的作用及含量

研究发现,能够改善铝/钢异种金属接头的合金元素有多种,包括 Si、Cu、Mn、Zn 等元素,不同合金元素改善接头性能的作用是不同的。

Al-Si 合金焊料具有极好的铸



(a) Al-Si 药芯焊丝对接接头



(b) Al-Si 共晶焊丝搭接接头

Al-Si 焊丝 TIG 熔钎焊接头

造性能、抗腐蚀性、抗热裂性和流动性,焊料中的 Si 元素能够降低焊丝熔点,增强液态焊丝在钢表面的润湿性和铺展性,同时 Si 元素还能够抑制 Al-Fe 脆性金属间化合物的生成,提高接头强度。Si 元素是铝/钢异种金属焊接材料中的主要合金成分,在共晶温度 577℃ 时, Si 在铝基固溶体中的最大溶解度为 1.65%, 尽管溶解度随温度降低而减少,这类合金一般是不能热处理强化的,焊料中 Si 的含量一般在 5% ~ 12% 范围内,过高的 Si 含量会增加焊料的脆性。

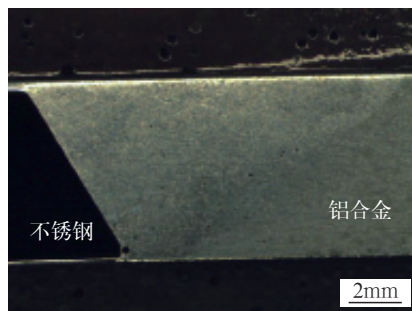
在用 Al-Si 焊丝 TIG 熔钎焊铝镁合金与不锈钢 TIG 熔钎焊接头中,采用药芯焊丝的 TIG 熔钎焊接头中含有较多的气孔缺陷,而用 Al-Si 共晶焊丝焊接的镀锌钢/铝合金接头

成形良好。

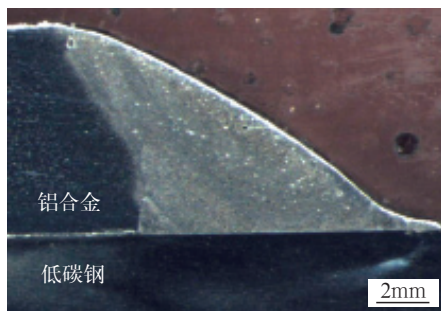
Cu、Mn、Zn 元素既与 Fe 元素有亲和性,又与 Al 元素有一定的互溶性,是铝/钢焊接材料中的重要合金元素。Cu 能够降低焊料熔点,起到产生固溶强化的作用,以此提高接头强度。Al-Cu 合金富铝部分 548℃ 时, Cu 在铝中的最大溶解度

为 5.65%, 温度降到 302℃ 时, Cu 的溶解度为 0.45%, 时效析出的 CuAl₂ 有着明显的时效强化效果, 铝合金中 Cu 含量通常在 2.5% ~ 5%, Cu 含量在 4% ~ 6.8% 时强化效果最好, 铝基焊料含 Cu 量一般处于这个范围, Cu 含量过高会增加焊料的脆性, 难以加工成丝状或片状。

Zn 元素能够改善液态焊料在钢表面的润湿性, 提高接头结合强度, 在铝基焊料中同时加入 Zn 和 Mg, 形成强化相 MgZn₂, 对合金产生明显的强化作用。MgZn₂ 含量从 0.5% 提高到 12% 时, 可明显增加抗拉强度和屈服强度。Al-Zn 合金系在 275℃ 时, Zn 在铝中的溶解度为 31.6%, 而在 125℃ 时其溶解度则下降到 5.6%, 然而 Zn 的熔点(420℃) 和挥发温度(908℃) 较低, 不同焊接



(a) 对接接头



(b) 搭接接头

钢表面镀锌层与铝合金电弧熔钎焊接头

方法中温度要求差别较大,因此 Zn 含量会根据不同的焊接方法有较大的调整。

通过在钢表面镀锌层电弧熔钎焊不锈钢/铝合金接头形貌可以看到,接头成形良好,镀锌层起到了良好的润湿铺展作用。

2 微量添加元素的作用及含量

添加微量元素改善铝/钢异种金属接头性能的效果更为显著。研究证实能够起到改善铝/钢接头性能的微量元素主要包括 B、Zr、Ti、Cr、Ga、Sr 和稀土元素 La、Ce 等,它们分别起到不同的改善作用。不过微量元素的添加量有严格限制,以 Ti、Zr 为例,其最大添加量一般不宜超过 0.25% (质量分数),否则将造成偏析,在焊接材料的不同部位, Ti 及 Zr 的含量将出现大起大落超差现象。

B、Zr 对改善铝/钢接头性能意义重大, B 和 Zr 是增加 Al-Fe 金属间化合物塑性的最有效的元素。B 元素能够以间隙固溶方式存在于 Al-Fe 金属间化合物中,增强 Al-Fe 共价键电子密度,使塑性提高,同时能够细化晶粒,强化晶界,以此提高接头性能。Zr 也是铝合金的常用添加剂,一般在铝基焊料中加入量为 0.1% ~ 0.3%, Zr 和铝形成 $ZrAl_3$ 化合物,可阻碍再结晶过程,细化再结晶晶粒。Zr 元素与 B 相结合对提高 Al-Fe 金属间化合物的塑性效果最为显著, Zr 元素能形成 Zr 的硼化物、碳化物、细化晶粒并保持纤维状的晶粒组织。

Ti 是铝基焊料中常用的添加元素,以 Al-Ti 或 Al-Ti-B 中间合金形式加入。Ti 与 Al 形成 $TiAl_2$ 相,成为结晶时的非自发核心,起细化铸造组织和焊缝组织的作用。Al-Ti 系合金产生包晶反应时, Ti 的临界含量约为 0.15%, 如果有 B 存在则减小到 0.01%。

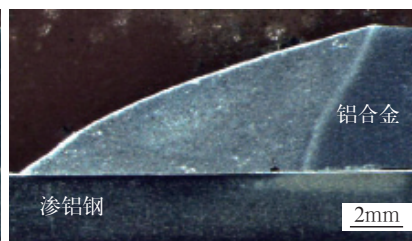
Ga 元素的加入能够提高金属间

化合物周围的电子云密度,减少共价键数量,使晶界电荷均匀化,进而提高位错的可动性,从而减少接头脆性。Ga 和 Sn 同时加入时,两者的金属性都比 Al 强,在钎焊过程中 Ga、Sn 会占据 Al-Fe 金属间化合物中 Al 的位置,使形成的化合物具有一定的金属性,提高接头强度。Ga 元素金属性强,极易氧化,熔点只有 29.8℃,一般只有在铝/钢钎焊中使用,加入量范围 0.20% ~ 0.40%。

Sr 是表面活性元素,在结晶学上 Sr 能改变 Al-Fe 金属间化合物相的行为,用 Sr 元素进行变质处理能改善接头的塑性,含有 Sr 的焊料



(a) 加入 B、Zr 元素接头



(b) 加入 La、Sn 元素接头

特种焊丝TIG熔钎焊搭接接头

在钢表面润湿性好,对钎焊间隙适应性较好,使用范围广,提高了接头的耐腐蚀性能和机械强度。

稀土元素研究较多的是镧系元素,包括 Sc、La、Ce、Er、Yb 等元素,具有异质形核细化晶粒的作用,液态焊料凝固过程中增加成分过冷,细化晶粒,减少二次晶间距,减少合金中的气体和夹杂,并使夹杂相趋于球形,还可降低熔体表面张力,增加流动性,有利于浇注成锭,会对工艺性能产生明显的影响。La、Ce 是表面活性元素,在铝合金中的溶解度很小,形成化合物,增强异质形核。Sc 具有特殊的价值,在焊接材料中加入微量的 Sc,能够更为强烈地发挥细化金属晶粒组织的作用,降低焊接时生成焊接裂纹倾向,提高焊缝金属强度、延性及韧性。各种稀土加入量约为 0.1% (质量分数) 为好,混合稀土 (La-Ce-Pr-Nd 等混合) 的添加,

能产生更为显著的效果,如果铝基钎料中含 Mg 元素,更能激发稀土元素的变质作用。

用特种铝基焊丝 TIG 熔钎焊铝合金与渗铝钢搭接接头,钎料中加入特殊微量元素 B、Zr、La 等,能使界面金属间化合物层具有高的抗裂性,提高接头强度。

结论及展望

通过在焊接材料中添加合金元素,包括主体添加元素和微量添加元素,研究两者在改善铝/钢异种金属接头性能方面的作用具有重要的意义和应用价值。

添加的特殊合金元素必须能够降低焊接材料的熔点,增强铝基焊料在钢表面的润湿性和铺展性,抑制 Al-Fe 金属间化合物的生成,改变 Al-Fe 金属间化合物的形态及分布,能够起到变质处理和形核剂的作用,细化晶粒和形成细小化合物的形式改善铝/钢接头性能。

针对不同的焊接方法,合金元素以不同的方式加入到焊接材料中,能够研制出含有特殊合金元素的专用焊丝,而无须镀层等附加工艺,直接进行铝/钢熔焊获得高质量的接头,是一个颇具挑战性也是极有应用价值的课题。目前,许多合金元素改善铝/钢异种金属接头性能的作用机制还不明确,更多在改善铝/钢接头性能方面能有所作为的特殊合金元素还不清楚,因此在这方面的继续深入研究是十分必要和有意义的。

(责编 依然)