

一些金属的焊接

张 延 生

在美国焊接学会1980年第61届年会上宣读的九十多篇焊接论文中,关于各种金属材料的焊接计有五十多篇,其中包括以下几个方面。

一、高强钢的焊接

1. 9Cr1Mo钢的焊接

其典型成分为9.0%Cr, 1.0%Mo, 0.1%C, 0.65%Si, 0.45%Mn, $P \leq 0.020\%$, $S \leq 0.070\%$ 。正火回火状态为全马氏体组织,但焊缝和母材热影响区常含有少量 δ 铁素体。铬当量计算公式为:铬当量 = $\%Cr + 6(\%Si) + 4(\%Mo) + 11(\%V) - 4(\%Ni) - 2(\%Co) - (\%Mn) - 40(\%C) - 30(\%N)$ 。铬当量小于12时,接头上少量铁素体在原始奥氏体晶界上形成薄膜。铬当量大于12时,铁素体含量较高,接头中形成粗大的八边形晶粒。少量 δ 铁素体的存在,对阻止热影响区奥氏体晶粒长大是有利的,但数量过多对耐蚀性和机械性能不利。这种钢的焊接条件允许变动范围较窄,有时需要采用较复杂的工艺,例如脉冲电流焊接、多层焊和电流反馈控制等。

2. 稀土元素对低合金高强钢焊接的影响

为了研究稀土元素对电弧电压-电流特性曲线和熔化区尺寸的影响,在充氩箱中进行直流正极钨极氩弧点焊,弧长不变,电流为225~300安。试验用钢为Mn-Mo-Nb钢,其中有0.000%、0.026%和0.260%三种含量的稀土。试验结果表明,与不含稀土的相比较,含0.026%稀土的钢使电弧电压大约下降1%,熔化区穿透和截面大约减少15%。含稀土0.26%的,其影响加倍。无稀土的焊点表面冷却后不

形成熔渣或氧化物。含0.026%稀土的焊点表面有大片熔渣,而含0.260%稀土的焊点表面有熔渣块和氧化物。稀土含量高的钢,由于氧化物在熔池表面浮动,引起电弧漂移。

结论认为,少量稀土(如0.026%),对上述低合金高强钢的焊接行为有重大影响,稀土改变了材料的工作功能和电离电势,因此改变了氩弧焊的电弧物理特性和金属过渡行为。

3. 加入特殊元素以防止焊缝裂纹

在结构钢(80公斤/毫米²级, $Ce = 0.52 \sim 0.53\%$)和AWS E11016(直径4毫米)焊条中加入少量特殊元素,以减少焊缝中的扩散氢含量。母材中单独加入碲(Te),冷裂纹敏感性只有少许改善,而碲与稀土一起加入时,25毫米厚的HT-80钢不预热室温下焊接也无裂纹。厚药皮焊条(或药芯焊丝)中加入碲,HT-80(30~40毫米厚)母材中加入稀土,不预热焊接也无冷裂纹。这是由于碲使熔池中的氢含量减少而熔渣中的氢含量增加的缘故。

二、不锈钢的焊接

1. 奥氏体焊缝裂纹

对于焊缝中形成初生铁素体的合金,已能完全控制结晶裂纹和液化裂纹。然而对于刚性结构的全奥氏体焊缝金属,还不大可能完全避免显微液化裂纹。实验表明,相对地增加锰、钼等某些元素,减少硅、铌等元素,有利于减少液化裂纹数量。但合金元素总含量愈高,在收缩应力作用下焊缝金属裂纹的倾向愈大。

25Cr-20Ni全奥氏体不锈钢焊缝金属,其组织中含5% δ 铁素体,对防止焊缝裂纹是有利的。硫、磷是有害杂质,应分别限制在0.01%以下,最好是0.005%以下。当含硫量大于0.01%时,加入3~6%Mn对防止裂纹是有利的。

除了焊缝金属组织和成分对裂纹的影响以外,焊接条件也有影响,例如焊接电流、焊速、预热和中间加热温度、开始和停焊的位置、焊接次数和接头拘束力等。实验结果表

明, 手工电弧焊条件的变化对微裂纹的影响很小。如果熔敷金属晶粒粗大, 微裂纹更明显, 钨极氩弧焊重熔和脉冲电焊可得到一种比较细致的等轴晶粒和较少微裂的焊缝金属。

结论认为, 单靠控制焊接参数实际上不能保证防止微裂。钨极重熔和脉冲电焊可以减少裂纹, 但不能完全排除裂纹, 且实际应用受到限制。所以目前采用最佳的填充材料成分可以更好地克服微裂。

20Cr-10Ni-2.5Mo铸造奥氏体不锈钢的组织对微裂有影响。弯曲状铁素体(4~8%)和魏氏状奥氏体(>20%)组织的热裂敏感性最小, 有枝晶间共晶铁素体(<2%)的组织的热裂敏感性较高。这都是结晶时形成的初生铁素体和奥氏体起作用的缘故。经电子探针查明裂纹中的铬、钼、磷含量增高, 而镍含量减少。

304L不锈钢的电子束焊缝结晶裂纹研究表明, 焊态组织中含有5~10%(体积)的 δ 铁素体, 对焊缝热裂颇不敏感。

14%(体积) δ 铁素体呈连续网状分布时, 可能使耐蚀性和机械性能下降, 特别是高温长期使用更是如此。全奥氏体焊缝最易热裂。其裂纹一般分布在焊缝中央, 这是由于结晶时镍的偏析引起的, 中央部位最后凝固而富镍成为全奥氏体组织, 并且这里晶界形成富硫的低熔点薄膜, 在收缩应变条件下形成裂纹。

2. 含氮不锈钢的焊接

为了提高奥氏体不锈钢的强度, 加入适量的氮, 例如13Cr-20Ni-0.03N不锈钢。不过氮使熔敷金属出现晶界缺陷, 虽然加入2%Nb可以克服这一缺陷, 但焊态组织的室温抗拉塑性较低, 同时加入锰可以得到改善。含氮量要考虑不致产生气孔。选择焊丝时要考虑具有一定的铁素体含量。热影响区被铜污染时可能引起表面裂纹。NITRONIC 50不锈钢的成分为22Cr-13Ni-5Mn-0.30N, 具有耐蚀性, 其屈服强度高于316、316L奥氏体不锈钢, 耐蚀性优于高强马氏体不锈钢(410钢, 12Cr)。这种钢与410Cb不锈钢组合焊接, 如果焊后采用

426~871℃热处理, 可能引起焊缝金属中 δ 铁素体转变为 σ 相, 导致塑性、韧性下降, 应尽量避免其呈网状分布, 并应控制 δ 铁素体含量并缩短消除应力的加热时间。埋弧焊时, 焊剂可能影响焊缝的铁素体含量, 焊接参数(主要是电压)和焊接次数也有较大影响。

3. 铁素体不锈钢的焊接

含16~18%Cr铁素体不锈钢焊接时有热裂敏感性, 机械性能和耐蚀性受到焊接的有害影响, 其焊接性能比奥氏体不锈钢差。430、444L不锈钢裂纹试验表明, 只在熔合线产生裂纹, 而热影响区无裂纹。扫描电镜分析表明, 变形时枝晶间是液态, 这与热裂液化理论是一致的。对热裂影响最大的元素是硫、磷、碳、氮, 其它元素钛、铌、锰也促使热裂纹产生。钨极氩弧焊(不填丝)试验表明, C+N含量小于0.03%的430、444L低硫磷钢具有抗热裂性。为了改善晶间腐蚀加入一些钛、铌、钼等元素, 发现铌比钛更促使热裂纹产生。结论认为, 为了得到满意的抗热裂和耐晶间腐蚀性能, 430、444L钢中的C+N含量应控制在0.04%以下。

三、低温钢的焊接

1. 液氮温度用不锈钢的焊接

两种含氮不锈钢21Cr-6Ni-9Mn和304LN, 选用焊丝使焊缝为全奥氏体组织时, 低温冲击性能较好, 但发现总有微裂纹。这些裂纹起源于晶间析出相。有理由相信, 残余 δ 铁素体的存在之所以能够改进低温(接近绝对零度)塑性并减少微裂, 是由于它可以吸收那些形成晶间析出相的组成物的缘故。这些晶间相的多少随焊缝金属成分和焊接条件而变化。

2. 低温9Ni钢氩弧焊焊丝的选用

这种钢进行钨极氩弧焊时, 不选用已知的高镍奥氏体焊丝, 而选用成分为0.02C-11.0Ni-Mn-Si-Fe型的铁素体焊丝, 能与母材很好地匹配, 焊接接头和焊缝金属在111K(液化石油气温度)和77K(液氮温度)下, 具有

较高的低温屈服强度和抗拉强度、高的缺口韧性，低温断裂韧性 K_{IC} 值也是满意的。

研究表明，使用这种新的铁素体焊丝能提高焊缝金属和热影响区的缺口韧性和抗裂纹敏感性的原因是：①采用最新的制钢工艺，提高钢材质量；②合理选择填充焊丝；③采用较好的焊速较快的钨极氩弧焊机；④用钨极氩弧焊重熔焊缝表面。

四、铝合金的焊接

1. 结晶裂纹和液化裂纹

Al-Mg 合金焊缝的裂纹敏感性，主要取决于焊缝金属的化学成分。采用变拘束力（Varestraint）试验法，对不同镁、硅、铁含量的合金进行氦气保护钨极电弧焊裂纹试验，结果表明，当镁含量在0~5.7%范围变化时，焊缝裂纹长度随着镁含量的增加而增大。金相检查表明，镁含量增加时， $Al_{12}(Fe, Mn)_3Si$ 和 Mg_2Si 相的数量也增多，裂纹与此有关。这些析出相的质点沿晶界分布，它们之间存在有发状细裂纹，这可能成为裂纹扩展的通道。关于铁和硅的影响，合金中铁含量和硅含量分别在0.06~0.50%之间变化，镁含量在0~5.7%之间变化，如镁含量偏高而硅含量偏低时，裂纹最严重；如镁含量偏低而铁含量也偏低时，裂纹亦最严重。这再次表明，裂纹与 $Al_{12}(Fe, Mn)_3Si$ 相有关。

Al-Mg-Si合金焊接时，必须正确选用填充焊丝的种类和填充量，以免产生焊缝金属结晶裂纹。使用中的断裂事件表明，钨极氩弧焊焊件比熔化极氩弧焊焊件发现的裂纹更多些；采用Al-Mg焊丝的比用Al-Si焊丝的裂纹发生得更多些。扫描电镜分析表明是液化裂纹。用3毫米厚的Al-Mg-Si合金板，交流钨极氩弧焊焊接圆形焊缝，结果采用Al-Mg焊丝的试样均发现裂纹，而采用Al-Si焊丝的没有裂纹。液化裂纹均靠近熔合线或在熔合线上并沿晶界分布。经扫描电镜分析，没有发现微量元素或杂质

是引起晶界液化的原因。分析认为，Al-Mg焊丝与母材熔化后掺和而形成焊缝金属，可能母材的固相线低于焊缝金属，凝固时产生的应变施加于热影响区，这里的晶界处于熔化状态，可能导致裂纹。采用Al-Si焊丝时，母材固相线不一定低于焊缝金属，因此热影响区液化裂纹的可能性减少。但必须指出，这时焊缝金属结晶裂纹的可能性有增大的危险。

2. 焊缝气孔

铝合金熔焊时，线状气孔比分散气孔问题更为重要。一般认为气孔的产生是由于母材污染，或者保护气体和焊丝带进的气体污染造成的。但也有一些个别例外情况，即使污染也不产生气孔，而经过仔细清理的反而产生气孔。实验表明，2014铝合金板焊前表面抛光引起的氧化膜促使其产生气孔。已经证明，对接焊缝存在的间隙和空间，使这里的板材表面暴露于空气中，在熔池和电弧的前面温度升高时，这些表面很快被氧化。有时由于加热膨胀使焊接端面紧密挤压在一起，有可能避免氧化。间隙的大小，相互靠紧之前端面受热的程度不同，产生氧化膜的厚度也会不同。但已证明，氧化膜与线状气孔直接有关。X光透视表明，气孔集中在氧化膜明显存在的部位。金相检查和断口分析表明，线状氧化物与线状气孔的分布之间存在一致性的关系。因此，防止线状气孔的重要措施是，要求保持板材内部和表面的洁净。

在宇航工业大型铝合金部件氩弧焊时，往往采用刚性较大的夹具以防止变形，但要求考虑夹具导热对焊缝气孔的影响。因此建议采用奥氏体不锈钢制造指形压条和垫板，一方面夹具没有磁性，不会产生电弧磁偏吹，另一方面不像紫铜那样导热很快，造成焊缝严重激冷，且夹具不必与焊件表面全部接触。焊缝产生分散气孔的根源是氢气，防止气孔的措施是，或者控制氢的来源，或者创造一种工艺条件让溶解到熔池金属中的氢气跑出去。大型导弹筒形件铝合金氩弧焊时，于75%He+25%Ar保护

航空橡胶密封圈的质量管理

朱兆祥

橡胶密封零件在航空燃油、滑油、液压油系统以及其它系统使用很普遍,用量相当大。其质量的好坏,直接影响航空产品的性能和飞行安全。航空橡胶零件质量故障,在国内外飞机上都曾发生过不少。如美国 F-100 飞机操纵系统发生故障,水平尾翼产生抖动,俯冲转弯时曾发生三次自动偏舵,水平尾翼和方向舵自由浮动,查原因皆是橡胶密封圈损坏,胶末堵塞出油口所致。F-101A、F-105 和 F-111 等飞机,也多次提出液压系统密封零件漏油问题,其中大部分属于低温漏油($-55\sim-40^{\circ}\text{C}$),部分报告也提出高温漏油。在美国喷气客机液压系统的故障中,有三分之二是由于密封件不良而导致系统渗漏。美国空军材料实验室约翰逊气体中加入 0.1% O_2 , 以及采用不锈钢制夹具就是这种具体措施。

3. 铝合金焊丝的选择

气体保护电弧焊接铝合金,对于填充焊丝的选择需要考虑以下六个问题:①焊缝裂纹敏感性,例如焊接 6061 母材,采用 4043 (Al-Si) 焊丝比用 5356 (Al-Mg) 焊丝产生裂纹的倾向性要小,而焊接 5052 母材时,正好相反;②焊缝强度,例如用 4043 焊丝和 5356 焊丝焊接 6061 母材,焊缝金属的焊态横向试样极限强度相同,而焊接接头经固溶处理和时效时,4043 焊丝比 5356 焊丝更能较好地配合热处理,焊后热处理的接头抗拉强度最高,而角焊缝的抗剪强度,5356 的焊缝比 4043 的高 50%;③焊缝塑性,铝合金焊缝熔敷金属的延伸率变化较大,这取决于母材和焊丝二者的组合,例如焊接 6061 母材时,5356 焊丝的焊态焊缝自由弯曲,延伸率比 4043 的高 50% (24% 比 16%),而焊后热

逊曾指出:“非金属材料性能已成为决定飞机系统及飞机性能的一个重要基准,由此才能设计新的先进系统,这一类材料的代表就是弹性体和涂料”。我国航空密封零件存在问题也不少,耐寒性差,冬天漏油漏气,高温使用寿命短,高速轴密封不耐磨,不耐老化,橡胶金属活门不耐冲击等等,外场维修更换密封零件工作量大。橡胶密封零件标准不完善,质量控制不严格等等。

国外空军部门、航空工业公司和橡胶工业公司对航空密封零件的质量问题,都十分重视,对航空橡胶零件的研究、生产、保管和使用,实行严格的质量管理,有一系列的标准控制,以保证用到飞机上的橡胶密封零件是可靠处理使其塑性大大降低。焊后需要校正和成形时,必须考虑这个问题;④高温使用性能的要求;⑤耐蚀性,对于各种介质中耐腐蚀的性能;⑥阳极化处理时焊缝与母材颜色的匹配。

五、钛合金的焊接

用于喷气发动机和导弹的高强钛合金有: Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo-0.25Si; Ti-5Al-5Sn-2Zr-4Mo-0.25Si 等,焊接时熔合区主要是马氏体组织。关于三种亚稳态 β 钛合金: Ti-8V-7Cr-3Al-4Sn-1Zr, Ti-8V-4Cr-2Mo-2Fe-3Al, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, 2.5 毫米厚的退火板材,钨极氩弧焊,焊后时效处理,可获得优质焊缝,其中以 Ti-8V-7Cr-3Al-4Sn-1Zr 合金的综合性能最好。

1.6 毫米厚 Ti-8Al-1Mo-1V 合金钨极氩弧焊,结论认为,为了减少残余应力,补焊圆形焊缝的直径愈小愈好,焊缝愈短愈好。