

锁具部件异种材料焊接工艺研究

王波

太原重工股份有限公司焦化设备分公司 山西太原 030032

摘要：主要讨论了通过异种钢焊接技术完成的一种锁具部件，锁具的母材为水韧处理后的高锰铸钢和调质处理后的承压铸钢，其中高锰铸钢的组织为奥氏体，承压铸钢的组织为索氏体。两种母材的化学成分、线膨胀系数和热导率等金属特性相差甚远，焊接难度较大。通过讨论锁具部件两种母材的焊接工艺技术，分析了高锰铸钢和承压铸钢的异种材料焊接方法的选用、焊接工艺的优化、焊接质量的检测等。概括总结了高锰铸钢和承压铸钢的异种材料焊接可借鉴的一般工艺技术。

关键词：焊接；异种材料；母材；高锰铸钢；索氏体

Research on welding technology of dissimilar materials for lock component

WANG Bo

Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Coking Equipment Subco, Taiyuan 030032, Shanxi, China

Abstract: The dissimilar steel welding technology of a lock component was discussed in this work. The base material consisted of the high manganese cast steel treated by water toughening and the pressure cast steel treated by tempering, of which the high manganese cast steel had an austenitic structure and the pressure cast steel had a sorbitic structure. For the significant differences in the chemical composition, the coefficient of linear expansion, and the thermal conductivity between these two base materials, the welding between the high manganese cast steel and the pressure cast steel is a big challenge. The welding technology of the method selection, the process optimization, and the quality inspection were analyzed and discussed on these two base materials. And then a general technique for the welding dissimilar materials between the high manganese cast steel and the pressure cast steel was summarized.

Keywords: welding; dissimilar materials; base metal; high manganese cast steel; sorbite

1 序言

异种材料焊接是将两种或两种以上不同材质的材料在一定的工艺条件下进行焊接加工的过程^[1]，异种材料焊接与同种材料焊接相比，有很大不同。因为材料的物理性能、化学成分等有显著差异，异种材料焊接从焊接性和操作技术上都比同种材料焊接难度大。异种材料的线膨胀系数不同，焊接过程中热应力大，容易引起裂纹；异种材料焊接过程中，由于金相组织发生变化，容易影响焊接接头的

质量；异种材料的碳当量和强度不同，增大了焊接难度以及焊接材料的选择难度。因此，异种材料焊接是重要的工艺研究内容，这对企业提高生产制造能力有重大意义。本文通过对一种工业用锁具部件的异种材料焊接工艺技术分析，总结了ZG120Mn13（高锰铸钢）和ZG25CrNi2Mo（承压铸钢）的异种材料焊接技术，该技术对此类高锰铸钢与承压铸钢的异种材料焊接技术都具有一定的指导价值，对普通的异种材料焊接也具有一定的借鉴意义。

锁具部件装配如图1所示。该锁具部件通常应用于采矿行业大型采掘设备拉斗铲等机械装置，是高空作业吊运绳索的力矩传输节点，要求具备优良的综合力学性能和安全性要求。该锁具部件由两种异种钢材料焊接而成，锁具主体铸件材料为ZG25CrNi2Mo，耐磨衬套铸件材料为ZG120Mn13。两种母材的微观组织不同，各项金属特性和化学成分差异也较大，因此承压铸钢、高锰铸钢异种材料的焊接难度较大。在实际生产制造过程中，采用常规方法焊接，熔覆金属和热影响区易出现微裂纹，形成危害较大的焊接缺陷^[2]。本文以改善锁具部件的焊接质量为出发点，通过分析母材、焊接材料自身特性因素，结合实际生产条件，制定合理的焊接工艺，完成了锁具部件的焊接生产制造，获得了良好的对接焊缝，成功避免了焊接裂纹的出现。



图1 锁具部件装配示意

2 锁具母材特性分析

锁具部件由两种铸件焊接而成，分别是锁具主体铸件和锁具耐磨衬套铸件，两种铸件的材质、物

理性能及化学成分不同。

2.1 锁具主体铸件

锁具部件的主体铸件（见图1蓝色部分）材料为ZG25CrNi2Mo，国外材料牌号10Q，化学成分见表1，是一种承压钢铸件，经调质处理 and 高温回火后，硬度可达280~300HBW，在常温下由电子显微镜100倍观察到的组织为回火索氏体（见图2）。回火索氏体是马氏体在高温回火后形成的组织，既有良好的韧性和塑性，又有较高的强度，通常应用在对综合力学性能要求较高的工况环境。

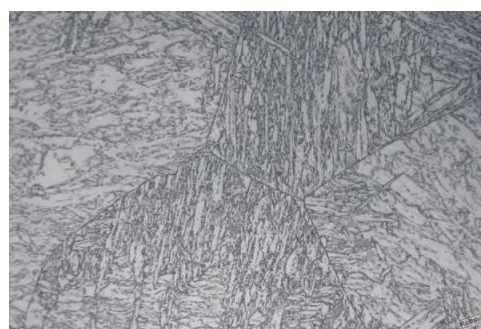


图2 锁具主体铸件索氏体组织

2.2 锁具耐磨衬套铸件

耐磨衬套（见图1黄色部分）的材料是高锰铸钢，牌号为ZG120Mn13，化学成分见表1。高锰铸钢是一种具有优良耐磨性能的钢种，大量应用于矿山的开采和破碎等行业中。将高锰铸钢中Mn含量（质量分数）提高至13%左右，并加入其他合金元素，使其形成以奥氏体为主要组织的钢种，随后加热至完全奥氏体化，进行水韧处理，电子显微镜100倍观察到的组织为奥氏体，如图3所示。高锰铸钢的

表1 母材化学成分（质量分数） (%)

元素	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni
ZG25CrNi2Mo	0.2~0.25	0.4~0.7	0.6~1	≤0.045	≤0.04	0.55~0.9	0.2~0.4	1.4~2
ZG120Mn13	1.05~1.35	0.3~0.9	11~14	≤0.04	≤0.06	—	—	—

奥氏体组织有别于其他不锈钢的奥氏体组织，高锰铸钢奥氏体冷作硬化的效果显著高于其他奥氏体钢种。其在使用过程中受到不断的冲击作用时，表面的组织会由奥氏体转化为马氏体，形成一种“表硬心韧”的状态，使得钢材整体的抗冲击能力进一步提高。经试验验证，在遭受冲击后，高锰铸钢表面的硬度≥450HBW^[3]，由于它的这种特性，高锰铸钢

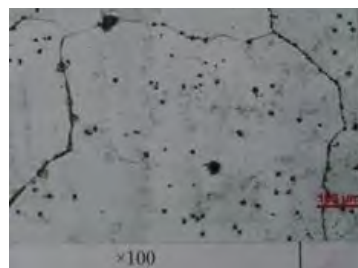


图3 耐磨衬套铸件奥氏体组织

通常被用于受冲击力和摩擦力较大的零部件。

3 焊接性分析及焊接材料选用

从强度等级、金相组织、线膨胀系数及碳当量4个方面来对两种铸件母材的焊接性进行分析,进而选取合适的焊接材料。

3.1 强度等级

两种铸件母材热处理态的部分金属特性参数见表2。根据表2中提供的强度、硬度参数可知,ZG25CrNi2Mo经调质处理后,抗拉强度 $\geq 800\text{MPa}$,按照等强原则,采用ER76-1焊丝是较为理想的选择,该焊丝的强度等级 $\geq 760\text{MPa}$ 。ZG120Mn13的抗拉强度 $\geq 700\text{MPa}$,D256焊条是ZG120Mn13为代表的高锰铸钢焊接常用焊接材料,焊接材料熔覆金属的硬度约170HBW,且化学成分同母材成分接近,有高Mn、高C的特点,因此熔覆金属和母材同样具有冲击硬化的效果。由母材的强度等级可知,两种母材的强度相差约1个等级(100MPa),并且ZG120Mn13有冲击硬化的特点,如果将两种母材对接焊,只能采用不等强焊接的方法,应按照强度较低的母材选择焊接材料。

表2 影响焊接的金属特性参数

牌号	硬度 HBW	抗拉强度 /MPa	组织	碳当量 (%)
ZG25CrNi2Mo	300	≥ 800	索氏体	0.75
ZG120Mn13	170	≥ 700	奥氏体	≥ 2

3.2 金相组织

由表2可知,ZG25CrNi2Mo的组织主要为索氏体。索氏体实际上为较细的片状珠光体,是一种软韧相和硬韧相结合的双相组织,其组织结构稳定,通常采用加热焊接工艺。而ZG120Mn13的组织为奥氏体,常温下表现为软韧相,受热后容易析出碳化物,且碳化物在晶粒或晶界处聚集^[4,5],影响钢的力学性能。由于两种材料的组织相差较大,且奥氏体组织的不稳定性,在异种材料焊接时应特别注意对温度的控制,尽量保持在较低的温度下焊接。

3.3 线膨胀系数

合金钢(ZG25CrNi2Mo归类到合金钢)在0~400℃温度内的线膨胀系数为 $(11\sim 14)\times 10^{-6}/\text{K}$,高锰铸钢在0~400℃温度内的线膨胀系数为 $21.7\times 10^{-6}/\text{K}$ ^[6]。线膨胀系数决定材料的热膨胀率,由数据可知,两种母材的膨胀系数相差较大,高锰

铸钢的线膨胀系数较大,焊接过程中,温度升高和降低时金属的收缩量不同,应力增加,容易产生裂纹。因此在选用焊接材料和制定焊接工艺时,要尽可能降低线膨胀系数带来的影响,预防冷热应力引起的缺陷。

3.4 碳当量

焊接生产前确认母材是否加热以及加热温度,需要对材料的碳当量进行计算。ZG25CrNi2Mo和ZG120Mn13的碳当量见表2。按照补焊规定,碳当量超过0.4%时,焊接前需要加热。ZG25CrNi2Mo碳当量为0.75%,查阅出碳当量相近材料的加热温度,确定加热温度为250~300℃。对于高锰铸钢,碳当量超过2%,理论上需要加热,但当高锰钢加热到一定温度时易发生组织转变,因此在实际焊接前并不需要加热,适合常温下焊接。

3.5 焊接材料选用

综合上述对母材金属的特性分析,从焊接强度的角度选择焊接材料,按照不等强焊接的方法,需要选用D256焊条,然而D256焊条同母材之一ZG25CrNi2Mo不匹配,因此需要另选焊接材料。从金相组织的要求选择焊接材料,由于高锰铸钢组织具有不稳定性,所以选择D256或者熔覆金属为奥氏体不锈钢的焊接材料是合理的。从线膨胀系数分析焊接材料,S309焊丝熔覆金属线膨胀系数近似为 $18\times 10^{-6}/\text{K}$ ^[6],线膨胀系数介于两种母材线膨胀系数之间,因此选用S309焊丝可减少焊接过程中冷热应力,从而减少裂纹。从母材碳当量角度选择焊接材料,两种母材碳当量相差较大,加热温度不能统一,选择在常温下焊接是必然的,因此选用S309焊丝,这是一种适合常温下焊接的奥氏体不锈钢焊丝。由于两种母材金属特性相差较大,所以通过平衡各项金属特性参数,最终选定S309焊丝,作为异种材料对接焊丝。这是因为S309焊丝熔覆金属的金相、强度与高锰铸钢的金相、强度相近,而且S309焊丝对各类不锈钢、合金钢都有着良好的焊接性,可对母材进行焊接。实践证明,在母材不加热的情况下,焊缝熔合良好。ZG25CrNi2Mo的强等级为80kg,大于焊接材料强度等级,因此整体上采用不等强焊接。

4 焊接工艺

适合的焊接工艺与合理的焊接材料选用同样重

要。为了保证良好的焊接质量，焊接工艺应该从焊前预处理、焊接工艺规程、焊接注意事项及检测等几个方面来确保焊接质量。

4.1 对接坡口

如图4所示，对材质为ZG120Mn13耐磨衬套机械加工完成单V形坡口。相比热割坡口，坡口加工不会产生热加工的缺陷和痕迹，而且坡口尺寸准确，是较为理想的坡口加工方式，可最大程度地保证焊接质量。焊前要对坡口进行目视检测，要确保坡口内没有油污和水渍等残存物。同时，对坡口的无损检测也是必要的，应检测施焊区域，确保无裂纹、夹渣等缺陷，若有缺陷，要及时修复或者更换，保证母材质量，提高焊接质量的稳定性。

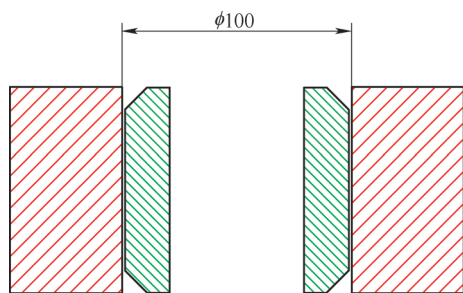


图4 V形坡口

4.2 工艺规程和注意事项

通过上述对母材焊接性的分析可知，奥氏体锰钢的组织在焊接升温过程中不稳定。当加热到320~800℃时，会沿着晶界析出碳化物，温度越高，碳化物析出量也越多，增加了焊接时裂纹出现的可能性，也会对母材的性能产生一定的影响^[6]。因此，工艺规定在常温（20~80℃）下进行焊接，层间温

度不应超过200℃。但是在实际施焊过程中，采用多层多道焊接方法（见图5），很难保证如此低的层间温度。因此，工艺采用每道焊缝焊接一整圈就停歇1h的方法，待焊道冷却至近室温时，再继续进行焊接。由于需要不断停机等待，因此这种焊接方式的生产效率较低。为提高生产效率，需要在工位上同时按顺序放置5件以上的产品，每焊接完100mm的焊缝，就转到下一件产品继续焊接。待所有产品轮流焊接完成100mm后，再返回首件产品进行第二道焊缝的焊接。这种方法的优点是既能保证工艺规定的焊接温度，又满足了生产效率需求。需要注意的是，在焊接过程中用水对焊缝进行降温来加快焊接速度的方法是不可行的，在试焊过程中观察到，焊接过程中通过浇水进行降温，检验到焊接区域存在微裂纹，因此焊缝自然冷却、缓慢降温是较为合理的方法。

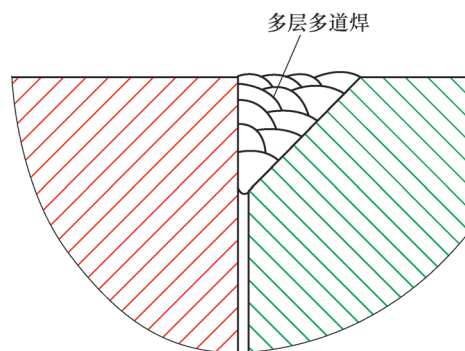


图5 多层多道焊

同时，在焊接工艺中规定敲击去应力、清根等操作要求，达到去应力、减少缺陷的目的。焊接使用气体保护焊方法，具体焊接参数见表3。

表3 焊接参数

焊层	电源极性	电流电压输出方式	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	热输入/(kJ/cm)
1	直流反接	电压脉冲	240	29	30	13.8
2~8	直流反接	电压脉冲	270	27	30	15
9~12	直流反接	电压脉冲	220	26	35	10

5 无损检测

为了确认焊接质量符合使用要求，需要对焊接部位进行无损检测。

对于母材金属特性相差较大的异种材料焊接，需要合理地选用无损检测手段，以保证部件优良的使用性能。由于熔覆金属和母材奥氏体锰钢的磁导

率为1.003~1.03H/m^[6]，几乎没有磁性，故磁粉检测不适用于承压铸钢和高锰铸钢异种材料焊接的无损检测。渗透检测灵敏度相对低，但是操作简便，广泛适用于马氏体、珠光体合金钢和奥氏体钢等材料的表面裂纹检测，因此对于承压铸钢和高锰铸钢异种材料的焊接，选用渗透检测方法^[7]，渗透检测效

果如图6所示。根据GB/T 26952—2011《焊缝无损检测 焊缝磁粉检测 验收等级》验收，焊缝验收等级达到1级。

内部缺陷检测的方法有超声波和射线检测，因母材和熔覆金属是奥氏体组织，晶粒度等级低，超声波检测时的反射波会有一定的衰减，故适用性不强。射线检测的应用范围较广，但是成本较高，因此在产品的焊接生产中可以采用只对首件检测或批次抽检的方式，用来分析其焊接质量。



图6 渗透检测

6 结束语

本文通过对锁具部件承压铸钢和高锰铸钢的异种材料焊接的分析，制定了锁具部件承压铸钢、高锰铸钢母材的焊接方法和焊接工艺，针对焊接难度大、焊缝易裂的情况，提出切实可行的解决方法，并在实际生产中验证，检验结果显示对接焊缝熔合良好，无裂纹缺陷。本文提出的焊接工艺和方法对同品类承压铸钢和高锰铸钢异种材料焊接一般工艺方法具有一定的借鉴和指导作用。

锁具部件承压铸钢、高锰铸钢的异种材料焊接方法总结如下。

1) 为了避免承压铸钢和高锰铸钢异种材料焊接

产生裂纹缺陷（熔覆金属和热影响区的裂纹），需要在满足许用强度的前提下，采用不等强焊接的方案，选用不锈钢焊接材料，保证焊接质量，避免焊接缺陷。

2) 承压铸钢的焊接需要预热，而高锰铸钢焊接不能预热，因此这两种材料对接焊的预热温度和层间温度不能统一。高锰铸钢在升温至一定温度后，组织具有不稳定性，因此焊接温度和层间温度倾向于高锰铸钢，采用冷焊和低层间温度的工艺方法。

3) 相比钢板和锻件，铸件的焊接更容易产生缺陷。为了严格控制焊接质量，有必要采用焊前、焊后两道无损检测工序，焊前无损检测主要为确保母材中没有气孔、夹渣等缺陷，焊后无损检测主要用来检测焊缝的成形质量。

参考文献：

- [1] 叶景峰，吴蔚峰，林羿杰，等. 35CrMnSi与 Q355B 异种材料焊接工艺[J]. 机械工程与自动化，2023（5）：138-140，143.
- [2] 刘小智. 金属材料焊接缺陷防治方法研究[J]. 中国金属通报，2020（9）：87-88.
- [3] 陆文华，李隆盛，黄良余. 铸造合金及其熔炼[M]. 北京：机械工业出版社，2012.
- [4] 杨江. 低温高锰钢焊接热影响区组织演变与力学性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2023.
- [5] 熊运霞. 工程机械用ZGMn13Cr2高锰钢热处理工艺研究[J]. 热加工工艺，2020，49（14）：128-130
- [6] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册[M]. 北京：机械工业出版社，2021.
- [7] 温海军，姚荣茂，陈炳耀，等. 浅析着色探伤剂[J]. 山东工业技术，2018（16）：33，14.

MW 20240819

（上接第65页）

参考文献：

- [1] 韩龙，徐甄真，牛靖，等. 大型离心压缩机焊接叶轮出口流道变形数值分析[J]. 焊接，2020（9）：1-7，61.
- [2] 梁彦荣，王引珠，徐金. 离心压缩机叶轮焊接修复工艺[J]. 金属加工（热加工），2015（6）：72-74.
- [3] 石南辉. 焊接引弧过程中易粘连的原因分析及解决措施[J]. 实验室科学，2021，24（1）：147-149.

- [4] 石里男. 焊接电弧引燃过程的机理分析[D]. 北京：北京工业大学，2011.
- [5] 费庆男，陈帅，丁冬. 离心压缩机窄流道叶轮焊接技术应用探讨[J]. 南方农机，2017，48（2）：91.
- [6] 壮强，戴前玉. 浅析手工电弧焊的焊接工艺[J]. 汽车维护与修理，2019（22）：69-70.

MW 20240807