A572与A514异种钢焊接工艺

魏宁，李仁民，姜锡祥，魏成民，王胜林
中国船舶重工集团柴油机有限公司　山东青岛　266000

摘要：详细分析了A572正火钢和A514高强度调质钢焊接存在的冷裂倾向和HAZ脆化及软化问题，通过低强匹配原则选用焊材，采用合适的热输入量，辅以焊接预热及焊后不进行热处理的工艺设计，并经焊接工艺评定试验确定了药芯焊丝气体保护焊的焊接参数，满足AWS D1.1的要求。按照该工艺方案进行生产，获得了满意的焊接接头质量。

关键词：A572+A514焊接；冷裂倾向；HAZ性能；焊接参数

1　序言

某项目燃气轮机底座为焊接结构件，其材质主要为ASTM A572 Gr.50正火钢（以下简称A572），国内同级别材料为Q355钢；底座主承载件材质为ASTM A514 Gr. F高强度调质钢（以下简称A514），国内同级别材料为Q690钢。

异种钢焊接可分为两种：一种是金相组织相同，仅合金化程度不同的异种钢焊接，如不同珠光体钢焊接；另一种是金相组织不同的异种钢焊接，A572与A514焊接属于后者。异种钢焊接要比同种金属焊接复杂，既有不同母材与焊材之间作用带来的冶金反应上的困难，也有因物理性能不同而产生的工艺上的困难，如熔点、线胀系数及热导率等。A572与A514焊接，存在淬硬倾向大，易产生冷裂纹，以及焊接HAZ脆化、软化问题。因此，对A572与A514异种钢的焊接工艺研究，不但可以完善中国船舶重工集团柴油机有限公司的焊接数据库，丰富产品类型，优化产品结构，还可以有效地保障出口产品的焊接质量。

2　材料焊接性分析

2.1　化学成分及力学性能

A572和A514是按照ASTM标准生产的钢板，其化学成分和力学性能分别见表1、表2。

缝焊接时间的65%，且随着板厚增加，这一比例会逐步降低。

6）根据以上分析结果，建议在熔透型坡口焊缝设计时，所有等边焊缝可按非等边焊缝来设计（见图9）。

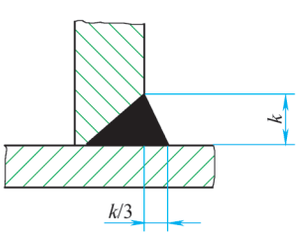


图9　非等边焊缝

5　结束语

通过对非等边焊缝和等边焊缝的试验研究发现，非等边焊缝结构设计满足产品的使用性能要求，因此可采用非等边焊缝结构形式，可提升生产效率，目前，此种非等边焊缝结构设计已在超大挖掘机和矿用货车结构件设计中推广应用。

参考文献：

[1] 胡坤伟，吴帅，吴静.焊缝大小及形式与强度关系分析[J].煤矿机械，2017，38（3）：70-72.
[2] 陈祝年.焊接工程师手册（精）[M].北京：机械工业出版社，2007.
[3] 王诚英，尚军.焊接坡口形式对不同匹配焊接接头性能的影响研究[J].机械强度，1998，20（1）：30-34.
[4] 佐藤邦彦.焊接接头的强度与设计[M].北京：机械工业出版社，1983.

MW 20201124

表1　母材化学成分（质量分数）　（%）

材料	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
A572	0.23	1.35	0.4	0.03	0.03	0.003~0.015	—	—	0.06	—
A514	0.10~0.20	0.60~1.00	0.15~0.35	0.03	0.03	0.70~1.00	0.40~0.65	0.40~0.60	0.03~0.08	0.15~0.50

注：表中单个值均为最大值。

表2　母材力学性能

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）
A572	345	450	18
A514	690	760~895	18

注：表中单个值均为最小值。

2.2　焊接性

焊接性指金属是否适应焊接加工而形成完整的、具备一定使用性能的焊接接头的特性。钢材的化学成分对焊接HAZ的淬硬及冷裂有直接影响，C对冷裂敏感性影响最显著，可以将各种元素都按相当于若干C含量折合叠加起来求得碳当量，进而估计材料冷裂倾向的大小。

采用国际焊接学会推荐的碳当量计算公式，得出A572的最大碳当量为0.48%；A514的最大碳当量为0.73%。一般认为碳当量≤0.4%时，钢材在焊接时无淬硬倾向，焊接性良好。当碳当量为0.4%~0.6%时，钢的淬硬倾向逐步增加。故A572有一定淬硬倾向，而A514碳当量远高于焊接性良好的判定标准。

综上可知，A572与A514异种钢熔焊焊接性较差。对于正火钢与高强度调质钢的焊接，主要存在以下问题。

（1）冷裂倾向　A572为低合金高强钢，热处理状态为正火。其C含量较低，而Mn含量较高，Mn/S高，具有较好的抗热裂性能，正常情况下焊缝中不会出现热裂纹。因为A572最大碳当量不超过0.5%，所以淬硬倾向不严重，焊接性尚可，但随板厚增加往往需要采取预热措施。

A514为低碳调质钢，其C含量较低，Mn含量较高，而且对S、P杂质的控制也较严，因此热裂倾向较小。这类钢的合金化原理，就是在低碳的基础上通过加入多种提高淬透性的合金元素，来保证获得强度高、韧性好的低碳马氏体和部分下贝氏体的混合组织。由于这类钢的淬硬倾向较大，故会有很大的冷裂倾向，但如果从工艺上提供一个“自回火”处理条件，即保证马氏体转变时冷却速度较慢，则冷裂纹是可能避免的。

（2）HAZ性能变化　A572过热区温度在1100~1300℃之间，会发生奥氏体晶粒粗大及难熔质点熔入过程。过热的粗大奥氏体晶粒增加了它的稳定性，冷却过程中会出现粗大的马氏体和M-A组元等脆性组织；难熔质点熔入后往往在冷却过程中来不及析出而使材料变脆。因此，过热区的性能变化取决于高温停留时间和焊接热输入，采用小热输入是避免这类钢过热区脆化的一个可靠措施。

A514过热区形成100%的低碳马氏体时，韧性并非最好，而韧性最佳的组织为马氏体+（10%~30%）下贝氏体[1]，控制好$t_{8/5}$是形成理想组结的关键。当冷却时间超过最佳的$t_{8/5}$时，引起脆化的原因除了奥氏体晶粒粗大外，还有上贝氏体和M-A组元的形成；当冷却时间过快时，易形成单一的马氏体组织。HAZ的软化，是焊接调质钢时的一个普遍问题，凡是加热温度高于母材回火温度至A_{C1}的区域，由于碳化物的积聚长大而使钢材软化。本产品不进行焊后热处理，故HAZ软化问题不可避免，因此制定工艺时应尽量限制软化区域的宽度和软化程度。

3　焊接方法及焊接参数的确定

通过对两种金属材料焊接性的分析可知，A572与A514异种钢焊接主要问题是冷裂纹的产生和焊接HAZ脆化、软化。那么，对于焊接工艺的设计，将着重避免以下问题。

3.1　焊接方法及焊接材料的选择

根据焊接生产效率及热输入量，选择熔化极气体保护焊；由于药芯焊丝熔敷速度高于实芯焊丝，故使用低氢药芯焊丝，熔敷金属扩散氢含量≤8.0mL/100g；A572与A514组织相近，焊接材料选择的原则是焊缝金属化学成分、力学性能不能低于母材中性能较低一侧性能指标，故焊材型号选用AWS A5.20 E71T-1C H8，即低强匹配原则。此种焊材化学成分及力学性能见表3。

3.2 预热及层间温度

（1）预热　对于低碳调质钢，预热的主要目的是降低马氏体转变时的冷却速度，通过马氏体的“自回火”作用来提高其抗裂性。预热温度与母材材质、母材厚度、焊材扩散氢含量及热输入量等因素相关。异种钢焊接时，预热温度按照碳当量较高一侧母材的要求确定，即按A514确定预热温度。根据EN 1011-2—2001《铁素体钢电弧焊》推荐，初步确定预热温度为90℃。

（2）层间温度　过高的层间温度会影响焊缝接头的冲击韧度，异种钢焊接层间温度按照碳当量较高一侧母材的要求确定，不得超过220℃[2]。

3.3 热输入量的确定

对于A572与A514焊接，热输入量关系到冷裂纹的产生、热影响区的脆化及软化，其最大值不宜超过2.5kJ/mm。

4 焊接工艺评定试验

4.1 工艺评定参数

采用K形坡口横焊（即2G），接头形式如图1所示，工艺评定焊接参数见表4。

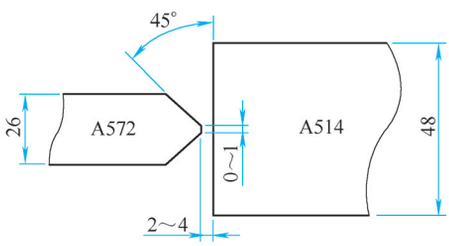


图1　接头形式示意

表4　工艺评定焊接参数

焊材型号	保护气体	焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	预热温度/℃	层间温度/℃	热输入量/kJ·mm^{-1}
E71T-1C H8	CO_2	打底	200~240	25~28	90	—	2.06
		填充	240~280	28~32	—	220	1.56
		盖面	220~240	27~30	—	220	1.40

4.2 工艺评定结果

根据AWS D1.1《钢结构焊接规范》，对试件进行外观检测、超声波检测。无损检测之后，对试件取样，进行拉伸试验及侧弯试验。该项目合同及图样中未规定冲击试验、硬度测试要求，但为进一步验证工艺的合理性，依据母材材质冲击试验温度，进行－40℃冲击试验；同时，增加硬度测试试验。力学性能试验结果见表5，焊缝接头显微硬度检测结果见表6。

从A572与A514焊接工艺评定力学试验结果可以看出：

1）拉伸试验断口位置在A572母材上，抗拉强

表5　力学性能试验结果

项目	抗拉强度R_m/MPa		侧弯试验				冲击吸收能量②KV/J				
	试样1	试样2	试样1	试样2	试样3	试样4	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5
规定值	≥450		180°，缺陷长度≤3mm				－40℃				
试验数据	566①	569①	合格	合格	合格	合格	79	94	101	52	48

① 试样1、试样2的破坏位置在A572母材上。

② 位置1代表试样缺口开在焊缝中心；位置2代表试样缺口开在A572熔合线上；位置3代表试样缺口开在A572距熔合线2mm处；位置4代表试样缺口开在A514熔合线上；位置5代表试样缺口开在A514距熔合线2mm处。所填数值为同一位置3个试样的平均值。

表6　焊缝接头显微硬度检测结果　（HV10）

压痕位置	焊缝	熔合线及HAZ		母材	
		A572侧	A514侧	A572侧	A514侧
距上表面2mm处	215、220、244	192、188、200	291、277、265	154、157、155	305、299、288
距下表面2mm处	233、246、250	176、195、198	255、271、275	164、159、162	311、289、285

度高于A572母材规定值，说明按该工艺方案制作的试件获得了抗拉强度较好的焊缝。

2）侧弯试验采用弯头直径为63.5mm，弯曲角度为180°，4个试样均未出现裂纹缺陷，说明焊缝塑性较好。

3）冲击试验中焊缝中心冲击吸收能量较高，达到101J；A572一侧，冲击吸收能量尚可，说明该种材料HAZ脆化不严重；A514一侧冲击吸收质量较低，说明其HAZ中出现了脆性组织，后续生产中必须控制焊接参数。

4）接头硬度可以间接反应出焊缝冷裂倾向。通常来讲，接头硬度越高，冷裂倾向越大。A572屈服强度≤460MPa，接头硬度应≤380HV10；A514屈服强度≥690MPa，接头硬度应≤450HV10。用显微硬度仪对两侧母材与HAZ、焊缝进行硬度检测。从表6可以看出，焊缝硬度在215~250HV10，硬度分布均匀；A514侧HAZ及熔合线硬度在255~291HV10，较母材硬度低，此种现象说明调质钢焊接后HAZ有一定软化倾向。

5　结束语

1）A572与A514异种钢焊接，采用药芯焊丝气体保护焊，根据低强匹配原则选用E71T-1C H8低氢焊材，焊接工艺评定试验符合AWS D1.1要求。

2）正火钢与低碳调质钢焊接，焊缝接头存在冷裂倾向，HAZ有脆化、软化问题，但辅以适当的预热措施，控制层间温度，采用小热输入，可以得到满意的接头性能。

3）该工艺用于出口燃气轮机底座的焊接生产，产品质量满足客户的技术要求。

参考文献：

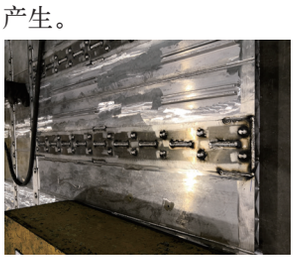
[1] 周振丰.焊接冶金学（金属焊接性）[M].北京：机械工业出版社，1996.

[2] 陈祝年.焊接工程师手册[M].第2版.北京：机械工业出版社，2009.

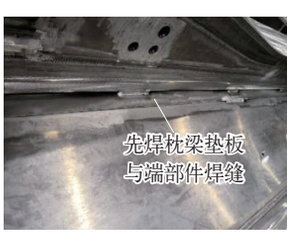
MW 20210324

（上接第78页）

产生。



a）大地板准备



b）装配后实物

图7　大地板装配焊接前的准备

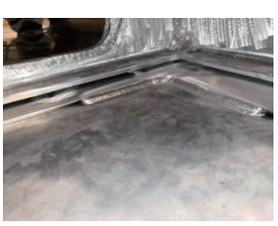


图8　枕梁垫板段焊处的裂纹

（2）设计改进　经多次与相关设计人员沟通后，同意将后期底架部件的单排开孔改为3排塞焊孔枕梁垫板（见图9）。在对3排塞焊孔枕梁垫板进行工艺验证后，未出现裂纹，因此从T-3车开始应用于生产中。

（3）焊后检测（以T-3车为例）　焊后对枕梁垫板焊缝进行PT检测，未发现裂纹（见图10）。在对

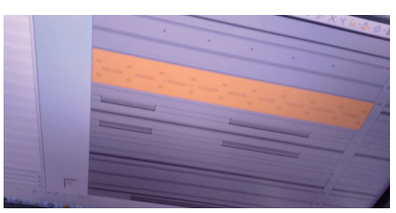


图9　枕梁垫板塞焊孔改进

后续铝合金底架组焊的3台车的跟踪检测，均未发现裂纹，目前相关设计已完成更改。

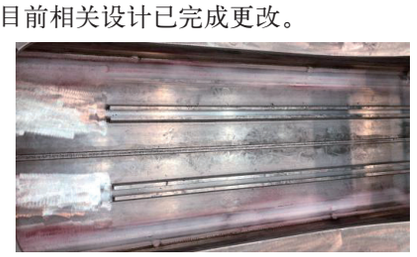


图10　T-3车枕梁垫板的PT检验数据库的采集

6　结束语

通过上述工艺改善方案，使铝合金城际动车底架枕梁垫板焊缝合格率达到了100%，有效地提升了铝合金城际动车底架枕梁垫板的焊接质量；同时也减少了生产班组因返工造成的工时及物料浪费，并为相关工艺、设计等部门提供合理的参考依据。

MW 20210203