

G20Mn5低碳低合金钢拱索索夹铸造质量控制

黄韬睿¹, 杨世杰¹, 邓宏运², 罗晓明³, 沈佳勇¹

1. 中国铁建国际集团有限公司 北京 100855

2. 西安理工大学664信箱 陕西西安 710048

3. 杭州海伦铸钢有限公司 浙江杭州 311116

摘要: 介绍了G20Mn5低碳低合金钢拱索索夹的化学成分及力学性能与技术规范要求, 在拱索索夹首件铸造及热处理生产过程中, 通过优化拱索索夹G20Mn5钢化学成分, 以及拱索索夹与试块的淬火工艺、回火工艺, 生产的拱索索夹达到欧标技术规范要求, 力学性能合格。

关键词: 低碳低合金钢铸件; 淬火及回火; 冲击吸收能量; 拱索索夹

1 序言

拱索索夹是在会展中心、体育场、飞机场等大型民用标志性建筑应用的重要铸钢件, 中国铁建国际集团有限公司总包国外2022年足球世界杯大型体育场拱索索夹, 设计时选用材质为G20Mn5钢, 单重240kg, 外廓尺寸为820mm×535mm×385mm, 主要壁厚90mm。拱索索夹铸造难点如下。

1) 结构复杂, 壁厚不均匀, 存在局部变截面区域, 热节较多, 易产生缩孔、疏松等缺陷。按技术要求需进行超声波、磁粉检测, 首件必须射线检测, 因此铸造工艺措施要科学合理。

2) 拱索索夹铸件无损检测要求高, G20Mn5钢力学性能及冲击吸收能量的试块不同于国标(GB), 力学性能等质量要求高, 同时工期要求紧。

2 拱索索夹有关技术及铸造质量要求

(1) G20Mn5钢化学成分和力学性能要求 拱索索夹G20Mn5钢化学成分要求见表1(欧标EN 10293—2005), 力学性能要求见表2^[1]。

表1 拱索索夹G20Mn5钢化学成分(质量分数)(%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	CEV
0.17~0.23	≤0.6	1.0~1.6	≤0.020	≤0.020	≤0.80	≤0.49

注: CEV为碳当量, $CEV = w_C + w_{Mn}/6 + (w_{Cr} + w_{Mo} + w_V)/5 + (w_{Ni} + w_{Cu})/15$ 。

表2 拱索索夹G20Mn5钢力学性能

热处理状态	厚度 t /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	冲击吸收能量 (常温) /J
调质QT	≤100	≥300	500~650	≥22	≥60

G20Mn5钢C含量低、Mn含量高, 并含有Ni元素, 适合厚大断面且有焊接及调质要求的复杂铸钢结构件。铸造时各个化学元素的选择与控制有以下特点^[2, 3]。

1) C含量: 由于G20Mn5钢C含量要求低, 同时技术要求碳当量≤0.49%, 且C又在碳当量中占有较大的权重, 因此应尽量采购C含量较低的废钢, 这是保证降低碳当量的有效措施, 同时要保证调质后力学性能, C也不能太低, 铸造过程 w_C 最好控制在0.18%~0.21%。

2) Si含量: 硅可强化铁素体, 提高耐热性和耐蚀性, 降低韧性和塑性。 w_{Si} 在0.40%左右能改善热裂倾向。Si含量高时易形成柱状晶, 增加热裂倾向, 因此 w_{Si} 宜控制在0.35%~0.45%。

3) Mn含量: Mn元素会缩小结晶范围, 提高钢液流动性, 且会扩大奥氏体相区, 降低相变温度, 细化相变组织, 同时具有较强的固溶强化作用, 强化基体作用很大, 提高强度和耐磨性。Mn含量过高也会增加体收缩和线收缩, 增加冷裂、热裂倾向, 在低合金范围内增加回火脆性, 降低韧性。因此, 在低碳钢中 w_{Mn} 一般≤2%。

Mn元素能显著提高低碳钢的淬透性和硬度,延迟低碳钢形变,强化相变进程。综合考虑, w_{Mn} 最好控制在1.20%~1.50%。

4) Ni含量:对于更高的屈服强度下仍要求保持冲击性能,则必须考虑加入适量的Ni元素。镍和铁能无限固溶,镍扩大铁的奥氏体区,镍和碳不形成碳化物;镍能固溶强化及降低临界转变温度,降低钢中各元素的扩散速率,提高淬透性,可以细化铁素体晶粒,提高屈服强度,同时改善钢的塑性和韧性,提高钢的疲劳抗力,减小钢对缺口的敏感性。另外,Ni元素加入对钢的显微组织及热处理与力学性能有重要的作用。由于镍的稀缺又是重要的战略物资,所以综合考虑,将 w_{Ni} 控制在0.30%~0.40%。

5) P、S含量:P、S属于有害元素,中频感应电炉熔炼时,要达到G20Mn5钢标准要求,最有效的措施就是采用符合标准P、S含量的优质废钢。

(2) 拱索索夹的试块及铸件本身规范要求 拱索索夹除了满足EN 10293—2015的化学成分、力学性能、热处理要求规范外,拱索索夹的试块及铸件本身要求遵守欧标EN 1559-1及EN 1559-2铸造技术交货条件^[4, 5],拱索索夹外观检查应符合EN 1369—2012铸造外观检查标准^[6, 7]。拱索索夹的试块按照EN 1559-2的要求,试块的横截面积为 $t \times t$,其中 t 为相关壁厚,从试块上截取试样来测试力学性能,按照铸件截面厚度 $>50\text{mm}$,同时 $<100\text{mm}$,试样轴线应在距试块表面距离为22.5mm处。依据订货协议,试块是通过浇注拱索索夹同炉钢液同一浇注系统直接充填的,根据拱索索夹相关壁厚 $t=90\text{mm}$ 及试块几何形状等要求,确定拱索索夹试块尺寸为 $90\text{mm} \times 90\text{mm} \times 300\text{mm}$,这比美标ANSI/ASTM或国标GB/T 11352—2009的基尔试样壁厚大,而且取样深度大^[8, 9]。拉伸试棒为 $\phi 10\text{mm}$,标距为50mm。常温冲击性能采用试块 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 55\text{mm}$ 、2mm深的标准V型缺口测试。

(3) 拱索索夹铸件无损检测 对于拱索索夹的浇冒口根部、所有圆弧部位、有气割和碳弧气刨痕迹处等重点部位,属于高应力区域,应进行目视和磁粉检测,不允许有夹砂和裂纹缺陷存在,也不允许有影响拱索索夹使用性能的密集型气孔、夹渣、缩孔及冷隔等缺陷存在。

1) 拱索索夹首件射线检测,应符合ASTM E94标准,等级为3级。

2) 铸件磁粉检测,应符合BS EN 1369:2012^[8],质量等级如下:非线性缺陷验收等级(SM)-严格级别SM2;线性缺陷验收等级(LM)-严格级别LM2;点线性缺陷验收等级(AM)-严格级别AM2。

3) 铸件超声波检测,应符合BS 12680-1:2003^[9],质量等级如下:平面不连续-无裂纹缺陷验收等级-质量等级2;非平面不连续性缺陷验收等级-质量等级3。

3 拱索索夹铸造工艺设计

拱索索夹模样收缩量为2%,模样起模斜度 $1^\circ \sim 2^\circ$,模样工艺补正量2~5mm,加工余量10~15mm,一箱1件并带2个($90\text{mm} \times 90\text{mm} \times 350\text{mm}$)欧标试块,水玻璃砂 CO_2 硬化法造型,使用醇基锆石粉涂料,涂刷2遍。

拱索索夹采用侧注式浇注系统,直浇道采用 $\phi 60\text{mm}$ 的陶瓷管,横浇道和内浇道一体,截面尺寸 $40\text{mm} \times 50\text{mm}$,为了保证拱索索夹与试块组织致密,不产生缩孔、缩松缺陷,设计5个专用保温冒口,冒口根部及圆角部位使用铬铁矿砂(厚度 $\geq 20\text{mm}$),拱索索夹及2个试块的铸造工艺如图1所示。

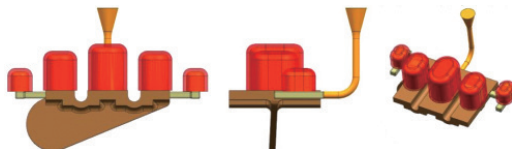


图1 拱索索夹及2个试块的铸造工艺三维示意

4 拱索索夹铸造过程工艺控制

4.1 拱索索夹铸造流程

拱索索夹铸造工艺CAD→木模样制作→造型及制芯→涂料涂刷→合箱→钢液熔炼→炉前化学成分光谱分析→浇注钢液→拱索索夹保温与冷却→落砂清理→目视检测→表面缺陷修补→退火处理→表面打磨→MT/UT检测→调质处理→表面打磨→铸件尺寸检测→RT/MT/UT检测→机械加工→检验→喷砂→涂装→合格拱索索夹待出厂。

4.2 拱索索夹铸造原辅材料要求

为便于碳元素的成分控制,废钢表面要求干

净, 无明显的锈蚀, 无油, 无水, 无泥沙, 无油漆, 无橡胶, 无塑料及铜、铅等有色金属, 不使用废铸铁件、废高锰钢件, 不使用废钢切屑等。选用同材料或成分相近的干净的低碳冲压余料, 优质P08钢冲压边角剩余废钢, 或者同材质浇冒口、废铸件。

选用电解锰、电解镍板、FeSi72硅铁及硅钡稀土合金等, 合金入厂需有化学成分单。

造型砂选用 $\text{SiO}_2 \geq 95\%$ 、粒度40~70目(0.425~0.212mm)的硅砂, 铸造涂料选用醇基锆石粉涂料。

4.3 拱索索夹造型制芯及下芯合箱规程

1) 拱索索夹造型、制芯前, 检查模样、芯盒是否符合工艺图样要求, 检查混砂系统是否完好, 所混制的型砂是否符合要求, 砂芯要求全部使用新砂制芯。

2) 造型时按照工艺要求摆放好浇道, 浇道接口处必须用胶带封牢, 保温冒口套按工艺要求放置好, 冒口套根部使用铬铁矿砂填充。填砂时头砂或尾砂不得用于面砂, 砂型表面80~100mm范围内使用新砂作为面砂, 圆角处采用铬铁矿砂作为面砂, 再生砂作为背砂填充。

3) 涂刷涂料时, 用风管将型腔(砂芯表面)清理干净, 第一遍使用较浓的锆石粉涂料涂刷, 涂刷完成后点火, 待涂料溶剂充分燃烧后, 用砂纸将铸型(芯)表面附砂及堆积的涂料打磨光滑, 用风管将型腔(砂芯表面)清理干净, 涂刷第二遍锆石粉涂料, 并再次用上述方法将表面处理干净。

4) 下芯。确定下芯顺序, 下芯时将砂芯吊平稳, 下入型腔后认真检查各个配合尺寸, 确认无误后将砂芯固定牢, 芯头缝隙用砂填满。

5) 清理型腔合箱。用风管沿一定方向吹型腔、浇道, 并用抽砂管清理型腔内砂子。清理完型腔后将砂型底箱吊至预定的浇注场地, 浇注场地要垫实, 防止浇注时由于钢液压力导致砂型下沉而造成铸件变形、跑火。按照要求经过验箱后再合箱, 砂箱合好后用箱卡或压铁紧固砂箱。等待浇注的砂箱摆放整齐, 砂箱间距 $>500\text{mm}$, 便于浇注人员穿行、引气等工作, 砂箱浇口成一直线, 合箱后6h内必须浇注。

4.4 G20Mn5钢中频感应电炉熔炼与浇注质量控制

2t中频感应电炉熔炼, 首先加入优质废钢, 熔炼中期按照配料组分依次加入电解镍板及FeSi72硅铁继续熔炼, 最后加电解锰。待全部炉料熔清, 测温达 1550°C 后第1次取样进行化学成分光谱分析, 根据光谱分析结果调整有关合金成分, 加入电解锰, 并快速升温到 1600°C , 取样第2次进行光谱分析化学成分, 成分合格后, 在钢液到达 1650°C 时, 按 0.6kg/t 钢液加入硅钡稀土合金脱氧出炉, 并在浇包内按 1.0kg/t 钢液加入脱氧铝, 出炉后钢液上加保温覆盖剂, 浇注温度 $1580\sim 1600^\circ\text{C}$, 每箱浇注重量500kg, 浇注时间30~40s。另外, 熔炼过程、光谱分析、测温、出炉及浇注过程等需要分包商, 3家第三方监理见证。

4.5 拱索索夹保温与落砂清理

浇注后铸件在砂型中缓慢冷却18h后, 开箱落砂清理, 切割浇冒口及毛刺, 并进行打磨。

4.6 拱索索夹退火处理

为了消除拱索索夹铸造应力并有利于粗加工, 对拱索索夹铸件进行退火处理, 如图2所示。装炉时将拱索索夹垫平, 防止铸件变形。

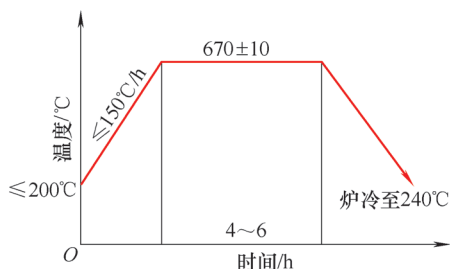


图2 拱索索夹退火处理曲线

5 拱索索夹首件铸造过程质量缺陷及改进

水玻璃砂 CO_2 硬化法造型, 由于型腔砂型强度低, 涂料质量及涂料烘干不稳定, 浇包没有烘烤透, 用钢液烫烤, 浇注系统也没有用过滤网, 以及翻转包浇注挡渣不好, 因此虽然第一炉(炉号0841)浇注后4件化学成分主要合金元素在规范要求内, 但是碳当量为0.52%, 超出 $\text{CEV} \leq 0.49\%$ 的要求, 同时也有拱索索夹出现夹渣、夹砂、冷隔等缺陷, 清理打磨后超声波、MT检测个别部位不能满足规范要求, 全部不合格。

在拱索索夹浇口根部周围存在夹砂和夹渣缺陷，浇注速度快时会造成钢液对砂型的冲击加剧，出现冲砂现象。夹砂的主要原因是由于铸型表面的砂粒与高温钢液接触，剥离后混入钢中形成的。这两种缺陷都是由于砂子渗入铸件内部而产生的，当砂型的紧实度不均匀时，砂型受钢液冲击、砂型未清理干净都会产生夹砂。钢液中混入熔渣后又将钢液注入铸型中，熔渣没有上浮而形成夹渣。采用直浇道下部设置钢液过滤网，控制金属液的流速，注意撇渣和除渣。夹砂和夹渣缺陷的形态都比气孔略有棱角，因此UT检测时，反射波相对较弱，与气孔的反射近似。

冷隔是由于样件生产初期，浇注工人没有掌握

工艺，浇注温度、浇注速度偏低造成的，UT检测时有很强的反射回波。

通过总结，细化拱索索夹铸造质量控制，优化型砂中水玻璃加入量及CO₂硬化时间，保证砂型强度，直浇道下部设置钢液过滤网，提高两遍醇基锆石粉涂料刷涂质量，碳含量向下限调整，浇包接钢液前烘烤1h到400℃以上，钢液温度至1650℃出炉，浇包加铝线与硅钡稀土复合脱氧，出炉后加入保温覆盖剂，保证浇注温度在1570~1600℃，翻转包浇注认真挡渣，连续生产3炉次15件，拱索索夹化学成分见表3。由于铸造过程质量管控严格，拱索索夹表面质量、UT/MT检测全部满足规范要求，拱索索夹RT检测也满足规范要求。

表3 合格G20Mn5钢拱索索夹化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	CEV
欧标要求	0.17~0.23	≤0.60	1.0~1.6	≤0.020	≤0.020	≤0.80	—	—	—	—	≤0.49
炉号0841	0.22	0.41	1.36	0.018	0.011	0.36	0.178	0.038	0.033	0.008	0.52
炉号0851	0.20	0.35	1.11	0.017	0.015	0.26	0.163	0.035	0.031	0.008	0.46
炉号0861	0.19	0.36	1.09	0.016	0.012	0.26	0.157	0.037	0.023	0.007	0.43
炉号0881	0.18	0.35	1.13	0.016	0.016	0.27	0.137	0.024	0.020	0.007	0.42

6 拱索索夹调质处理及力学性能

低碳低合金铸钢拱索索夹 w_c 在0.2%左右，碳当量≤0.49%，低碳低合金铸钢拱索索夹铸态组织为多角粗大的铁素体+珠光体，要求性能满足工程要求，需要利用淬火加高温回火处理的工艺（称为调质处理）来提高综合力学性能。将零件加热到奥氏体化并保持一定时间后，以适当方式冷却淬火，获得马氏体或贝氏体组织。淬火后及时进行回火处理，以消除淬火应力，获得所需综合力学性能。淬火采用75kW台式电阻炉，淬火池大小为2.5m×4m×3m。拱索索夹及试样调质处理前抛丸或打磨表面氧化皮，目的是减少调质处理加热与冷却的热传导。调质工艺如图3、图4所示。

6.1 拱索索夹首件淬火工艺

- (1) 淬火装炉温度 装炉炉温≤350℃，试块与拱索索夹装在框中间隙放置，有利于每件均匀加热、快速冷却；淬火加热升温速度按280~330℃/h控制，升温速度要均匀。
- (2) 淬火保温时间 温度升至（930±10）℃后保温4h。

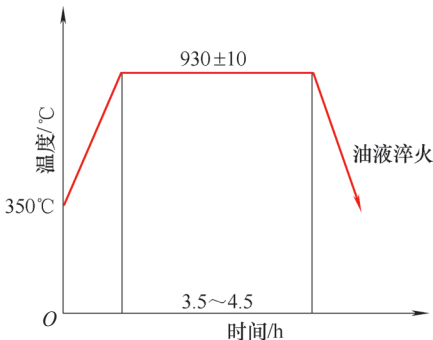


图3 拱索索夹淬火工艺

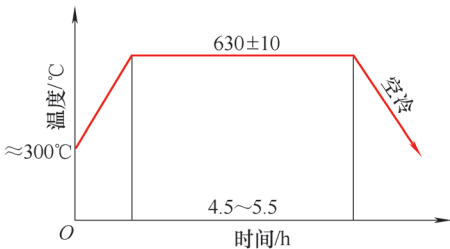


图4 拱索索夹回火工艺

- (3) 淬火冷却 保温结束后快速出炉油淬，保证淬火液量，保持淬火液温度30~40℃，使拱索索夹在淬火池中不停地移动，15min后出淬火液测温，淬火液冷却到300℃左右，转入回火炉进行回

火。

6.2 拱索索夹首件回火工艺

(1) 回火装炉温度 回火装炉炉温 $\leq 300^{\circ}\text{C}$ ，试块与拱索索夹装在框中间隙放置，有利于每件均匀加热；回火加热升温：回火升温速度按 $250\sim 300^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 控制，升温速度要均匀。

(2) 回火保温时间 温度升至 $(630\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 后保温5h。

(3) 回火冷却 保温结束后快速出炉并散放（不能堆积）在专用吹风冷却床上风冷。

6.3 拱索索夹首件力学性能检测

G20Mn5钢拱索索夹试块相关壁厚90mm，拱索索夹与大试块同炉、同工艺QT调质，试样（V型缺口）的形状和尺寸以及试验方法应按照EN ISO 148-1—2016^[10]执行；对规定的G20Mn5牌号，冲击吸收能量平均值应不小于产品标准内的规定值60J；单个值不小于规定值60J的70%，则该单个值可小于规定值60J，测得大试块力学性能及冲击吸收能量结果见表4。从5个炉批调质大试块力学性能检测结果看，G20Mn5钢拱索索夹首件调质处理工艺是合理的，就是接头调质处理要加强对热处理工培训，严格执行调质工艺规程操作。

表4 G20Mn5钢拱索索夹试块力学性能检测结果

调质炉号	冶金炉号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	常温冲击吸收能量/J			
					1	2	3	平均值
920	0841	392	548	28.0	114	128	133	125
922	0851	360	523	27.5	134	149	125	136
923	0861	331	511	29.5	117	140	122	126
925	0881	349	507	30.5	112	159	149	140

7 结束语

1) 采用优质废钢，中频感应电炉熔炼钢液， 1630°C 出炉，浇包加铝线及硅钡稀土复合脱氧，控制浇注温度在 $1570\sim 1600^{\circ}\text{C}$ ，翻转包浇注认真挡渣等严格的铸造质量控制，可以铸造满足欧标各项严格规范要求的拱索索夹铸件。

2) 为了保证调质后力学性能及冲击吸收能量的各项要求，同时满足综合成本因素，G20Mn5钢拱索索夹铸件最佳化学成分为： w_{C} 控制在 $0.18\%\sim 0.21\%$ ， w_{Si} 控制在 $0.35\%\sim 0.45\%$ ， w_{Mn} 最好控制在

$1.10\%\sim 1.30\%$ ， w_{Ni} 控制在 $0.20\%\sim 0.40\%$ ， w_{P} 、 w_{S} 均 $<0.020\%$ 。拱索索夹首件及大试块优化调质工艺，淬火为 $(930\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 保温4h，进入油液淬火并用吊车不停来回移动，保证每个拱索索夹均匀冷却，冷却到 300°C 以下进入台式电阻炉中，回火升温到 $(630\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 后保温5h，快速出炉至专用吹风冷却床空冷，拱索索夹首件及大试块达到欧标EN 10293及EN 1559-1、EN 1559-2中G20Mn5+QT拱索索夹 $90\text{mm}\times 90\text{mm}$ 大试块力学性能及冲击吸收能量的各项要求。

参考文献：

- [1] BSI.Steel Castings for General Engineering Uses: BS EN 10293—2015[S].England: BSI Standards Publication, 2015.
- [2] 童军, 邓宏运, 章舟.碳钢低合金钢铸造生产及实例[M].北京: 化学工业出版社, 2013: 38-43.
- [3] 夏少华, 陈红圣, 曹健峰, 等.G20Mn5铸钢件力学性能研究[J].机车车辆工艺, 2014 (2): 9-10, 20.
- [4] BSI. Founding - Technical Conditions of Delivery - Part 1 General; BS EN 1559-1—2011[S].England: BSI Standards Publication, 2011.
- [5] BSI. Founding -Technical Conditions of Delivery - Part 2 Additional Requirements for Steel Castings; BS EN 1559-2—2014 [S].England: BSI Standards Publication, 2014.
- [6] BSI.Founding-Magnetic Particle Testing; BS EN 1369—2012[S].England: BSI Standards Publication, 2012.
- [7] BSI. Founding-Examination of Surface Condition; BS EN 1370—2011[S].England: BSI Standards Publication, 2011.
- [8] BSI. Founding-Ultrasonic Examination-Part1; Steel Castings Forgeneral Purposes; BS 12680-1—2003[S].England: BSI Standards Publication, 2003.
- [9] 全国钢标准化技术委员会.钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备:GB/T 2975—2018[S].中国国家标准化管理委员会, 2018.
- [10]BSI.Metallic Materials — Charpy Pendulum Impact Test Part 1: Test Method; EN ISO 148-1—2016 [S].England: BSI Standards Publication, 2016.

MW 20210311