DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.03.023

ADI 砼泵弯管 QTD1600-2 的研制和创新

李朝霞[1],李国平[1],王定祥[2]
(1.焦作固德联合机械制造有限公司,河南 焦作 454150; 2.青岛市机械研究所,山东 青岛 266033)

摘　要:历经 5 年研制出 ADI QTD1600-2 砼泵弯管,包括:牌号性能、化学成分、熔炼、铸造、等温淬火工艺、检测标准,成为以 ADI QTD1600-2 材料为主大批量生产的企业。

关键词:ADI;砼泵弯管;等温淬火;奥铁体

中图分类号: TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)03-0303-05

Development and Innovation of QTD1600-2 for Elbow of ADI Concrete Pump

LI Zhaoxia[1], LI GuoPing[1], WANG Dingxiang[2]
(1.Jiaozuo Gude United Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jiaozuo 454150,China; 2. Qingdao Institute of Machinery, Qingdao 266033, China)

Abstract: The bend pipe of ADI QTD1600-2 concrete pump was first and exclusively developed at home and abroad. After five years of research and development, we have developed a complete set of product management and control technology, including brand performance, chemical composition, smelting, casting, isothermal quenching technology, isothermal quenching equipment and testing standards and means, and become a large-scale production enterprise with ADI QD1600-2 material as the main material.

Key words: ADI; concrete pump elbow; isothermal quenching; austenite

砼(混凝土)泵弯管是混凝土泵车输送管道的关键耐磨部件,混凝土泵车是用于城市建筑、水利工程、建筑施工的工程机械设备。砼泵将混凝土搅拌料通过管道输送到工作面。中国自主制造的混凝土泵车是目前世界输送距离最长的 101 m (中联重工制造),见图 1, 图 2。可以从地面将混凝土搅拌料输送到 30 层楼高, 因此对砼泵弯管的耐磨性要求很高。砼泵弯管一般是无缝钢管做的,还有铸钢的、高锰钢的、45Mn·55Mn 的、高铬铸铁的、高铬铸铁与基体材料复合的、还有无缝钢管内涂碳化钨的。无缝钢管的不耐磨、铸钢的承压差、高锰钢的因加工硬化不足使用寿命短、45Mn·55Mn 的仍嫌耐磨性不足、高铬铸铁太脆易裂、高铬铸铁与基体材料复合以及无缝钢管涂覆碳化钨的耐磨性好, 但是太贵。研制一种高强韧性、高耐磨性、制造工艺简便,和性价比高的砼泵弯管有十分重大的意义。

焦作固德联合机械制造有限公司长期生产出口美国、日本的球墨铸铁件,也生产 ADI 振动棒端,混凝土喷射管、挖掘机斗齿、球磨机衬板、破碎机锤

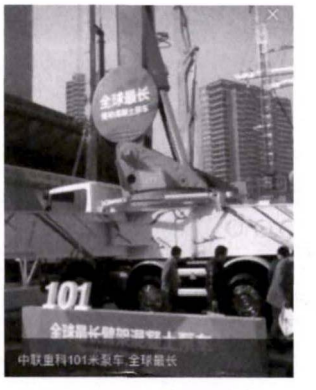

图 1 101 m 混凝土泵车
Fig.1 101m concrete pump truck

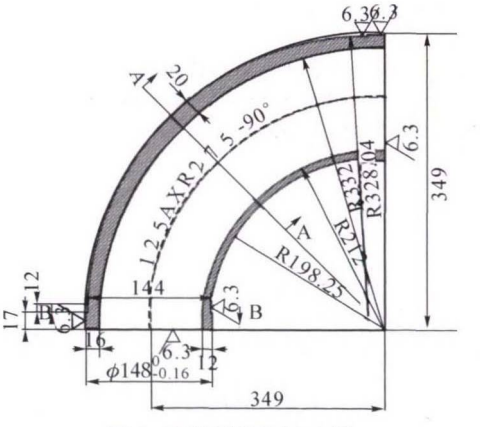

图 2 砼泵弯管的尺寸图
Fig.2 Dimension drawing of concrete pump elbow

收稿日期:2019-10-21

作者简介:李朝霞(1972-),女,河南焦作人,助理工程师.主要从事铸造材料管理工作.电话:13939101943,
E-mail:13939101943@163.com

头等耐磨件,对生产球墨铸铁和 ADI 有一定基础和经验。ADI 具有高的强度,高的硬度,高的冲击韧度及良好的耐磨性[1-4]。ADI 弯管的使用寿命数倍于目前市场传统的铸钢、高锰钢弯管,价格仅比后者高30%,成为市场的佼佼者,产品受到用户认可。市场上还有一种进口的砼泵弯管:德国 ESSER 公司和美国 Conferm 公司生产的高铬铸铁内胆焊接型钢的双层复合弯管,高铬铸铁硬度高(58~62 HRC),弯管耐磨性好,但是高铬铸铁内胆材料硬脆,当遇到管道混凝土堵塞需要敲击振动进行疏通时,外来敲击力会造成内胆破裂,轻者致使弯管损毁需停机更换,严重的拥堵还可以造成整条管线瘫痪报废。因此,研制开发一种高质量的抗磨耐磨、制作工艺相对简单和性价比高的砼泵弯管,具有广阔的市场前景。该项目成为固德联合机械有限公司近年来的重点课题。经过攻关,研究出了砼泵弯管 QTD1600-2 全套的技术(一种混凝土泵车弯管的铸造方法。发明专利:证书号第 2691446 号)。关于牌号性能、化学成分、熔炼铸造、等温淬火工艺、检测手段、产品检查标准以及自主设计的等温淬火设备实现了批量生产,成功成为以等温淬火球墨铸铁 QTD1600-2 牌号生产砼泵弯管的企业,实现了 ADI 牌号、材料、生产工艺、自主设计等温淬火设备等的创新突破。产品荣获发明专利 2 项,实用新型专利 8 项。公司制定的 Q/JZGD 01-2016 等温淬火球墨铸铁(ADI)砼泵弯管企业标准高于国标 GB/T24733-2009 等温淬火球墨铸铁件及国际标准 ISO17804:2005[1-7]。

1 砼泵弯管的牌号、化学成分、力学性能、显微组织

国标 GB/T24733-2009 等温淬火球墨铸铁 [5]规定了 5 个牌号,其中的高牌号为 QTD1400-1 及耐磨牌号 QTDHBW400 和 QTDHBW450,该牌号伸长率数据较低,见表 1 和表 2。

表 1 等温淬火球墨铸铁单铸或附铸试块的力学性能
Tab.1 Mechanical Properties of austempered ductile iron specimens with single casting or attached casting

牌号	铸件主要壁厚 /mm	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 (%)
QTD1400-1	$t \leqslant 30$	1 400	1 100	1
	$30 < t \leqslant 60$	1 170	供需双方商定	
	$60 < t \leqslant 100$	1 140		

国标 GB/T24733-2009 等温淬火球墨铸铁件等同采用国际标准 ISO17804:2005[6],规定了最低力学性能指标,并以规范性附录规定了高抗磨性布氏硬度及其他性能并加 HBW 规定值与国际标准 ISO17804:2005 接轨。

表2 抗磨等温淬火球墨铸铁的牌号
Tab.2 Grade of wear-resistant austempered ductile iron

牌号	布氏硬度 (HBW)	其他性能(仅供参考)		
		抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 (%)
QTD HBW 400	400	1 400	1 100	1
QTD HBW 450	450	1 600	1 300	/

焦作固德联合机械制造有限公司对 ADI 砼泵弯管制定了企业标准,等温淬火球墨铸铁(ADI)砼泵弯管,于 2016 年 -01-06 发布与实施。等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的牌号及力学性能见表 3。等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的化学成分见表 4。等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的显微组织及质量要求见规定。

1.1 等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的牌号和力学性能,见表 3

1.2 等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的化学成分见表 4

1.3 等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的显微组织

石墨组织:石墨球化级别应符合 GB/T 9441 中的 1 级或 2 级,不低于 3 级,石墨球数不低于 100 个/mm^2。

基体组织:等温淬火球墨铸铁的基体组织主要为由针状铁素体和富碳奥氏体组成的奥铁体,允许极少量的其它组织(如马氏体、珠光体等)存在。

1.4 等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的质量要求

无缩松、缩孔、气孔、夹渣、裂纹等铸造缺陷;非加工表面光洁;弯管通过 18 MPa 耐水压试验,保证使用过程不出现开裂现象。

2 熔炼、铸造工艺

中频感应电炉熔炼,炉料为高纯生铁及优质废钢加高效增碳剂等原材料进行熔炼。研制“一种盖包法球化处理包”(实用新型专利专利证书号第 5306389 号),研制瞬时喷吹孕育机,加入了富镧稀土镁球化剂、长效瞬时孕育剂等使球化等级有所提高,同时球墨圆整度提高,球墨大小均匀,球墨数量增加,组织晶粒得到了细化,缩松和缩孔倾向也有明显的改善。

采用垂直分型铁型覆砂铸造工艺,经对比试验它比水平分型好。解决了漂芯造成的壁厚差问题,铸件冷却速度快,提高铸件致密性,提高球墨铸铁球化率及球化数量,尺寸精度高及表面质量好,实现砼泵弯管无冒口连续机械化生产。铁型覆砂对比湿粘土砂型铸造的 ADI 砼泵弯管试样的力学性能见表 5,说明采用铁型覆砂铸造工艺优于粘土砂铸造工艺。

表3 等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的牌号及力学性能

Tab.3 Grade and mechanical properties of concrete pump elbow of austempered ductile iron

牌号	抗拉强度 /MPa(≥)	屈服强度 MPa(≥)	伸长率(%)(≥)	冲击韧度 /(J/cm²)(≥)	洛氏硬度 HRC(≥)
QTD1600-2	1 600	1 300	2	70	47
QTD1400-3	1 400	1 100	3	80	43

注 1：砼泵弯管铸件的壁厚为 5 mm～25 mm。

注 2：冲击试验采用无缺口冲击试样。

表 4 等温淬火球墨铸铁砼泵弯管的化学成分 w(%)

Tab.4 Chemical composition of concrete pump elbow of austempered ductile iron

元素	C	Si	Mn	S	P	RE	Mg	Cu	Mo
最终值(%)	3.3～3.8	2.4～2.8	<0.5	≤0.02	≤0.05	0.01～0.02	0.03～0.05	≤1.0	≤0.3

注：可用铸态试块或铸件上取样检验。

表 5 铁型覆砂铸造和粘土砂铸造的 ADI 砼泵弯管试样的力学性能对照表

Tab.5 Comparison of mechanical properties of Adi Concrete Pump Elbow cast with sand-coated iron mould and clay sand

试样编号	铸造工艺	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)	硬度 HRC	冲击韧度 α_k/(J/cm²)	备注
1	湿粘土砂型	1 591	1 234	2.0	47	78.5	
2	铁型覆砂	1 642	1 305	5.0	48	93.4	

垂直分型铁型覆砂铸造砼泵弯管生产线实现批量生产，对解决铁型、模具、浇注系统、下芯、合型、移动铁型、浇注和开箱等各种工序在生产线上完成。

3 等温淬火工艺

等温淬火工艺是 ADI 砼泵弯管生产工艺中的核心技术，奥氏体化温度一般在 870～950 ℃，根据砼泵弯管的化学成分、壁厚及微观组织确定，奥氏体化温度要达到相对平衡的饱和状态，出炉的冷却速度以不形成珠光体进入硝盐槽，在一定的温度等温获得所需的奥铁体组织及力学性能。通过适当添加 Cu、Mo 合金元素，在等温淬火时避免形成不需要的珠光体、马氏体和碳化物，获得富碳奥氏体+针状铁素体+球状石墨。砼泵弯管经试验奥氏体化要求合适的温度及保温时间，奥氏体化温度低或者保温时间短，奥氏体中含碳量未达到饱和状态而溶入不足，铸件强度、硬度较高，而伸长率及冲击韧度偏低；奥氏体化温度高或保温时间过长，在等温过程中获得较多的残余奥氏体，奥氏体中含碳量超过饱和状态过多，强度、硬度偏低而伸长率及冲击韧度较高。

根据目前生产的砼泵弯管的型号、规格、几何尺寸及具体的化学成分，确定等温淬火工艺曲线见图 3。

4 砼泵弯管的结构与加工工艺的创新

根据砼泵弯管的使用，发现弯管易磨损工作面与不易磨损工作面厚度比例不匹配。对弯管结构进行了改进，改进了弯管磨损工作面和不易磨损工作面的厚度比例，在原有砼泵弯管的尺寸基础上，重新设计了弯管工作面的弧度，使弯管在结构上受力更加合理均匀，耐磨程度有了相应的提高。管口法兰台阶处增加圆角过渡，减小了应力集中。

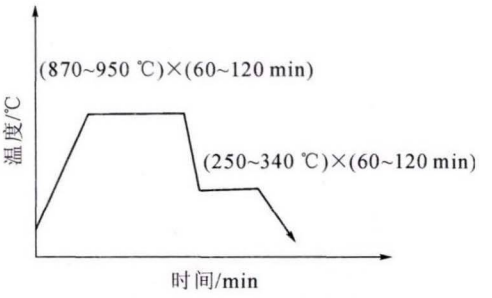

图 3 等温淬火工艺曲线

Fig.3 Curve of isothermal quenching process

制造工艺采用垂直分型铁型覆砂铸造工艺之后，实现了无冒口铸造，砼泵弯管的致密性，尺寸精度，光洁度及表面质量有极大的提高，取消了机械加工工艺，开创了同行业非加工砼泵弯管的使用先例，降低了产品生产成本，增加了产品竞争优势，实现了加工工艺的创新。

5 等温淬火设备

唐山某公司曾从美国引进 2 条 ADI 等温淬火热处理生产线[8]，该生产线包括天然气发生炉装置，保护气氛炉，防止保护气外泄及隔断炉外空气进入装置，等温硝盐槽及其冷却系统，等温硝盐槽控温在±3 ℃。等温淬火工艺流程及控制管理都是 UBQPC 系统自动化控制。年产量 1 万 t。这是国际先进水平的短流程等温淬火热处理生产线。

公司针对原来旧炉不足，以及新产品的质量要

求，设计制作对开式垂直下降等温淬火炉，这是一种等温淬火系统(实用新型专利：证书号第 5306564 号)。由 2 台保护气氛箱式炉以及等温淬火硝盐槽组成，2 台保护气氛箱式炉炉门相对，2 台炉子之间是进出炉移动平台，在移动平台下方设置硝盐槽、由电脑控制系统实现机械自动启闭炉门，工件框进、出炉、工件框下降进入硝盐槽等温淬火运行机构。硝盐槽硝酸盐配比为 55%$NaNO_3$+45%KNO_3，使用温度为 230～550 ℃。硝盐槽等温温差±5 ℃。等温淬火后砼泵弯管表面粘有硝酸盐，在温水清洗池中清洗掉。清洗池中的硝酸盐浓度上升至饱和无法再清洗，研制了“一种等温淬火清洗硝盐水回收方法及装置”(发明专利证书第 2589140 号)将硝盐回收后循环利用，保护了环境。初步满足大批量生产需求。对开式垂直下降等温淬火炉，见图 4，等温淬火炉内部结构，见图 5，等温淬火炉工件框出炉，见图 6，等温淬火炉的硝盐槽，见图 7。

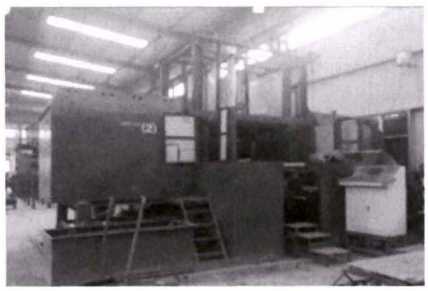

图 4 等温淬火炉图
Fig.4 Isothermal quenching furnace

图 5 等温淬火炉内部结构
Fig.5 Internal structure of isothermal quenching furnace

图 6 等温淬火炉工件出炉图
Fig.6 Work-piece out of isothermal quenching furnace

图 7 等温淬火炉硝盐槽
Fig.7 Salt bath for isothermal quenching furnace

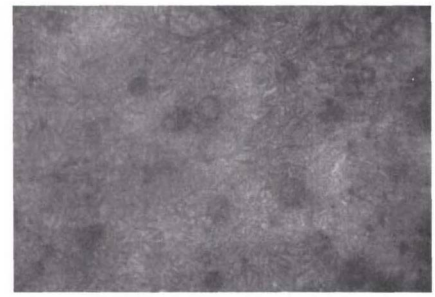

图 8 QTD1600-2 的显微组织 ×500
Fig.8 Microstructure of QTD1600-2

6 ADI 砼泵弯管的金相组织和力学性能

砼泵弯管的显微组织为球化 1 级～2 级的石墨球+奥铁体（由针状铁素体与富碳奥氏体组成），见图 8。批量生产实测 ADI 砼泵弯管的力学性能，见表 6。

砼泵弯管无缩孔、缩松、夹渣、裂纹等铸造缺陷。弯管 100%通过 18MPa 耐水压试验。

7 ADI 砼泵弯管 QTD1600-2 与其他材料砼泵弯管的性价比对比，见表 7

ADI 砼泵弯管与几种砼泵弯管对比使用寿命以及性价比均好，具有广阔的市场发展前景，ADI 比高铬铸铁与低碳钢或者高锰钢双层复合使用寿命高，这是由于 ADI 最终显微组织是奥铁体+球状石墨，比高铬铸铁显微组织马氏体+碳化物耐磨；ADI 的抗拉强度、冲击韧度比高铬铸铁高，而高铬铸铁硬度比 ADI 高，耐磨性从力学性能方面不单一决定于硬度，

表6 批量生产实测ADI砼泵弯管的力学性能
Tab.6 Mechanical properties of concrete pump elbow measured by mass production of ADI

牌号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)	硬度(HRC)	冲击韧度 /(J/cm²)
QTD1600-2	1 623~1 670	1 300~1 360	2.4~4.0	47.3~50.8	75~95

表7 ADI砼泵弯管与其他材料砼泵弯管性价比对照表
Tab.7 Comparison of ADI concrete pump elbow and other materials concrete pump elbow

砼泵弯管材质	力学性能	使用寿命（输送混凝土量 /m³）	参考价格	性价比排序
ADI	R_m≥1 600 MPa α_k≥70 J/cm² HRC≥47	5 万～7 万	220 元 / 件，15 000 元 /t	1
高铬铸铁-低碳钢双层复合	高铬层 HRC58～62	5 万～6 万	350 元 / 件，26 200 元 /t	2
45Mn·55Mn 双层淬硬	内层 HRC58～62，淬火深度：2.5 mm	3 万～5 万	22 500 元 /t	3
高铬铸铁-高锰钢双层复合	高铬层：58～62 HRC	5 万～6 万	26 200 元 /t	2
无缝钢管内覆碳化钨涂层	涂层：60 HRC 耐磨层 2 mm	5 万～6 万		4
高锰钢	R_m≥685 MPa α_k≥118 J/cm² HRC≥20	1.5～2.0 万	10 000 元 /t	6
铸钢	R_m≥570 MPa α_k≥245 J/cm² HRC≥22	1.5～2.0 万	9 000 元 /t	5

而是其综合性能。无缝钢管加碳化钨耐磨涂层使用寿命与高铬铸铁与基体材料双层结合差不多。他们的工艺制造过程复杂，所以价格较贵，性价比不占优势，45Mn·55Mn 的显微组织是马氏体，它的碳化物没有高铬铸铁显微组织的碳化物多，虽然硬度很高，冲击韧度是不高的，他们的使用寿命不如高铬铸铁加基体材料双层复合的。ADI 的使用寿命是高锰钢、铸钢的 3 倍以上，而比同体积的高锰钢，铸钢的重量轻 10%，致使输送管线的总重量减轻，管线负荷轻了，安全性高了。

8 结语

（1）ADI QTD1600-2 砼泵弯管以优良的耐磨性制造成功。公司在原来生产 ADI 铸件的基础上，对 ADI 制造砼泵弯管探索，在国内外无先例的情况下，试制出 ADI QTD1600-2，经过用户与高铬铸铁 - 基体钢双层复合，无缝钢管内涂碳化钨以及 45Mn·55Mn 双层淬硬的砼泵弯管现场使用对比之后显现具有不开裂、使用寿命长与性价比高的优势受到市场欢迎。公司将新材料 QTD1600-2 应用到砼泵弯管系列领域的创新和研制取得了成功。

（2）ADI QTD1600-2 砼泵弯管实现大批量生产。对原有 ADI 生产工艺进行了创新改造，从熔炼工艺、铸造工艺、等温淬火工艺、等温淬火热处理设备以及检验标准与手段都有重大改进与升级，并获发明专利 2 项、实用新型专利 8 项，大批量生产获得成功。

（3）ADI 砼泵弯管 QTD1600-2 牌号的企业标准高于国家标准及国际标准。在国标 GB/T24733-2009 等温淬火球墨铸铁件及国际标准 ISO17804:2005 2 个标准的基础上对于制作砼泵弯管进行了具体化及提升创新，总结与制定了焦作固德联合机械制造有限公司企业标准：Q/JZGD01-2016 “等温淬火球墨铸铁（ADI）砼泵弯管”。该企业标准对牌号、化学成分、力学性能、微观组织、几何尺寸及公差、耐磨实验以及试样制作及检验方法进行了全面规定，具有完整性及可操作性。该企业标准高于国家标准及国际标准。

（4）企业历经 5 年的创新研制，已经生产 38 种型号规格的 ADI QTD1600-2 砼泵弯管，现在砼泵弯管具备大批量生产规模。

（5）企业生产 ADI QTD1600-2 砼泵弯管为国内外首创、独创，迄今为止文献检索未见国内外报道有用 ADI 制造砼泵弯管的。

综上所述，ADI QTD1600-2 砼泵弯管已经研制成功并大批量投产，产品的化学成分、力学性能、生产工艺、生产设备以及检测手段简便、比较完善而先进。对比其他材料的砼泵弯管使用寿命长、成本低、性价比高。该产品具有广阔的发展空间及宏大的市场前景！

参考文献：

[1] Dodd J .High strength, high ductility ductile irons [J].Modern Casting.1978(68)5:60-66.

[2] Gundlach R B, Janowak J F. Development of a ductile iron for commercial austempering [J] AFS Trans,1983,94:377-383.

[3] Harding R A, Gilbert G N J.Why the properties so ductile irons should interest engineers[J] .BR .Foundrym.1986,79;489-496.

[4] Schmidt I,Schuchert A. Unlubricated wear of austempered ductile cast iron[J] .1987,78:871-875.

[5] GB/T24733-2009. 等温淬火球墨铸铁件[S].

[6] 等温淬火球墨铸铁（ADI）标准在产业中的应用 // 中国耐磨铸件[C]. 合肥：中国铸造协会耐磨铸件分会. 2013：83-96.

[7] 王定祥：ADI 及 CADI 耐磨铸件短流程等温淬火热处理生产线 - 参观迁西奥迪爱机械铸造有限公司 // 2016 年中国耐磨材料技术与市场发展及抗磨损技术应用交流会[C]. 厦门，国家电力业抗磨工程研究发展中心. 2016:1-6.