DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.017

等温淬火工艺一些实例的探讨

王定祥[1],孙　平[2],李朝霞[3]
(1.青岛机械研究所,山东 青岛 266033;2.青岛华焜耐磨钢有限公司,山东 青岛 266404;3.焦作固德联合机械制造有限公司,河南 焦作 454150)

摘　要:探讨了3种热处理工艺:淬火回火,分级等温淬火,盐浴等温淬火。分别阐述了其工艺实现方法,从化学成分控制,热处理工艺,微观组织和力学性能进行了讨论和对比,论证了其在相关应用领域的良好效果。

关键词:ADI;等温淬火;分级等温淬火;奥铁体
中图分类号:TG156　　文献标识码:A　　文章编号:1000-8365(2021)05-0397-05

Discussion on Some Examples of Austempering Process

WANG Dingxiang[1], SUN Ping[2], LI Zhaoxia[3]
(1. Qingdao Machinery Research Institute, Qingdao 266033, China; 2. Qingdao Hukun Wear-resistant Steel Co., Ltd., Qingdao 266404, China; 3. Jiaozuo Gude Joint Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jiaozuo, Jiaozuo 454150, China)

Abstract: Three heat treatments were described including quenching and tempering, stepped austempering and salt bath austempering. The processes and results of the three treatments methods were discussed, analyzed and compared from composition, microstructures and properties. Results show these methods have good applications in related industry fields.

Key words: austempered ductile ron; isothermal quenching; grade isothermal quenching; austenite

我国耐磨材料领域发展很快,特别是等温淬火、分级淬火、以及分级等温淬火工艺方面,在很多领域不仅工艺、设备、甚至对原来的定义以及术语都有一定的突破,在学术上面百家争鸣,呈现一派欣欣向荣的局面。现举3个实例探索之。

1　球磨机衬板中合金钢ZG42Cr2Si2MnMoRe分级等温淬火工艺

ϕ4.50 M×15.11 M球磨机一仓阶梯衬板尺寸见图1,一仓阶梯衬板在ϕ4.5 M×15.11 M球磨机内安装位置见图2。这是大型球磨机,内径有一层半楼房高,只有在对衬板进行耐磨性试验时笔者才得以入内检查衬板与编号。身后是分开一仓和二仓的隔仓板。

1.1　中合金钢衬板的化学成分

中合金钢衬板的化学成分见表1。

1.2　中合金钢淬火回火工艺与分级等温淬火工艺的对比

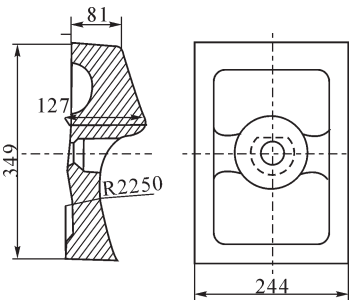

图1　一仓阶梯衬板尺寸
Fig.1　Dimensions of the first storehouse ladder liner

图2　一仓阶梯衬板在ϕ4.5 M×15.11 M球磨机内安装位置
Fig.2　Installation position of the first warehouse ladder liner in a ϕ4.5 M×15.11 M ball mill

表1 化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of steel

C	Cr	Mn	Si	Mo	Re	S	P
0.38~0.48	1.8~2.2	0.8~1.1	1.5~1.8	0.3~0.5	0.08~0.10	≤0.035	≤0.035

淬火回火工艺曲线见图3,分级等温淬火工艺曲线见图4,热处理工艺,金相组织与力学性能见表2。

收稿日期:2021-03-02
作者简介:王定祥(1936—),湖南长沙人,教授级高工.从事耐磨材料研究、应用及开发工作.电话:13625325443,Email:wangdx2561@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

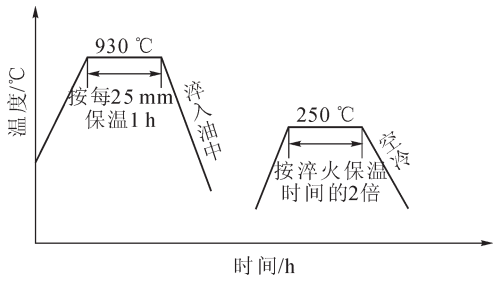

图 3 淬火工艺曲线图

Fig.3 Quenching and tempering process curve

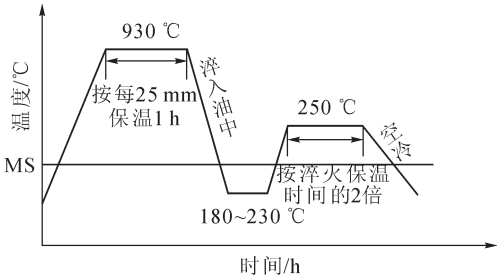

图 4 分级等温淬火处理曲线

Fig.4 Stepped austempering process

表2 热处理工艺与力学性能 金相组织的关系

Tab.2 Relationship between heat treatment process and mechanical properties and metallographic structure

热处理工艺	力学性能		金相组织
	HRC	冲击吸收能量 (KU_2)/J	
淬火回火	56	22	回火马氏体
分级等温淬火	54	66	下贝氏体+回火马氏体

淬火回火工艺图 3，高温电阻炉加热，930 ℃保温，按厚度系数每 25 mm 保温 1 h，保温终了淬入油槽中。淬火介质为 L-AN32 机械油、工件在油中冷至室温温度。随后工件进入回火电阻炉中回火，回火温度为 250 ℃。回火时间不小于淬火保温时间的 2 倍。保温终了出炉空冷。

分级等温淬火工艺图 4，淬火加热保温设备，保温时间计算与淬火回火工艺相同，淬火油槽与淬火用油也相同。工件在 930 ℃保温终了淬入室温油中，冷却至 180~230 ℃，在油中停留时间按工件厚度系数 7 mm 停留 1 min 计算，用远红外测温仪实测，便可确定工件准确的在油中停留时间。随后进入等温炉进行等温，等温炉即回火电阻炉，等温时间亦是回火保温时间，等温温度亦是回火温度。

1.3 应用

ZG42Cr2Si2MnMoRe 钢是球磨机衬板钢，在水泥厂球磨机中广泛应用，其耐磨性与使用寿命达到与超过日本同类产品水平。ZG42Cr2Si2MnMoRe 钢通过热处理工艺的改变，采用分级等温淬火工艺，其力学性能达到硬度≥50 HRC，冲击吸收能量 (KU_2)≥50 J，为行业界俗称力学性能双 50。力学性能的提高使该材质也适用于湿法磨衬板、半自磨衬板等工况。

1.4 讨论

ZG42Cr2Si2MnMoRe 钢采用原来整套的淬火回火以及淬火油槽设备，采用分级等温淬火工艺，淬入油中冷至 Ms 点温度以下确定的温度范围，保持一定的时间，实现部分马氏体转变，然后进入等温炉中等温，获得其余部分转变为下贝氏体，最终获得下贝氏体+回火马氏体的金相组织，力学性能硬度 HRC 值相近，而冲击吸收功（KU_2）（无缺口冲击试样）为淬火回火工艺的 3 倍，的确取得了很好的效果。扩大了该钢种的应用范围。

2 球墨铸铁混凝土泵弯管的等温淬火

混凝土泵是用压力，将混凝土搅拌料通过管道输送到工作面的一套装置，目前世界上最长的混凝土泵车输送管道超过 100 m。管道由直管和弯管组成，弯管是易损件，弯管比直管要求更高的耐磨性及强韧性。混凝土泵弯管如图 5。

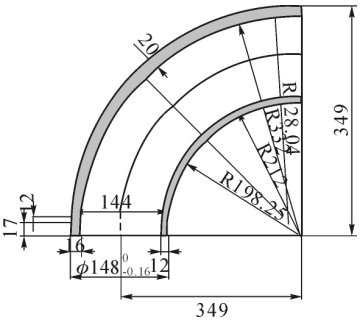

图 5 混凝土泵弯管

Fig.5 Elbow of concrete pump

焦作固德联合机械制造有限公司研制了等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管[2]，耐磨性远远高于铸钢、高锰钢类弯管。制定了等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的企业标准，等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的牌号及力学性能见表 3，等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的化学成分见表 4，等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的显微组织及质量要求见规定。

2.1 牌号和力学性能

等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的牌号和力学性能见表 3。

表 3 等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的牌号及力学性能

Tab.3 grade and mechanical properties of isothermal quenched ductile cast iron concrete pump elbow

牌号	抗拉强度 Rm/MPa (≥)	屈服强度 $Rp_{0.2}$/MPa (≥)	伸长率 A(%)(≥)	冲击韧度 α_k/(J/cm²) (≥)	洛氏硬度 HRC(≥)
QTD1600-2	1 600	1 300	2	70	47

注：1.砼泵弯管铸件的壁厚为 5 ～25 mm。

2.冲击试验采用无缺口冲击试样。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2　化学成分

等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的化学成分见表4。

2.3　显微组织

等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的显微组织：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/mm²；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。

2.4　品质要求

等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的品质要求：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16 MPa耐水压试验，保证使用过程不出现开裂现象。

2.5　等温淬火工艺曲线

混凝土泵弯管装框入炉，通入保护气氛加热保温终了在15 s内进入硝盐槽，等温完毕空冷至温水中清洗后验收，等温淬火工艺曲线见图6。

等温淬火加热设备为自制保护气氛双室电阻炉，移动垂直下降机构将工件淬入硝盐槽等温。硝酸盐配比为55%$NaNO_3$+45%KNO_3，使用温度为230～550 ℃。盐槽底部有管道喷水装置以控制等温温度。工件淬入硝盐槽等温完毕出浴到温水池清洗，温水也有硝盐回收装置，回收循环利用。

表4 等温淬火球墨铸铁混凝土泵弯管的化学成分 w(%)

Tab.4 Chemical Composition of Isothermal Quenched Ductile Iron Concrete Pump Elbow

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。

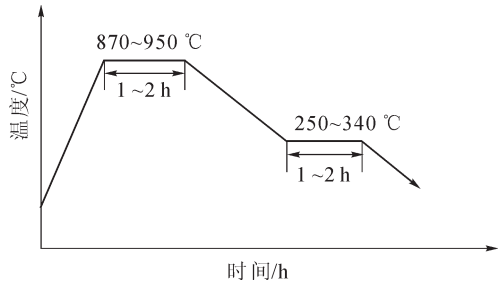

图6 等温淬火工艺曲线图

Fig.6 Austempering process curve

2.6　产品应用效果

等温淬火球墨铸铁QTD1600-2混凝土泵弯管系国内外首创独家生产，该产品化学成分、力学性能、生产设备、等温淬火工艺及检测手段先进而完善。该产品耐磨性好，抗冲击性强，对比市场上的产品的材质，如高锰钢、高铬铸铁-低碳钢双层复合、45Mn55Mn双层淬硬、高铬铸铁-高碳钢双层复合以及碳化钨涂层的使用寿命长，性价比好，具有广阔的发展空间及宏大的市场前景。

2.7　讨论

国标GB/T24733-2009等温淬火球墨铸铁共7个牌号，该企业按国标规定命名的牌号QTD1600-2是国标中没有的，是目前等温淬火球墨铸铁的最高牌号，是对国标牌号的发展与升级。该企业用保护气氛炉及硝盐设备进行球墨铸铁等温淬火将牌号提升了一个高度，将产品的金相组织与力学性能发展到极致。从此实例可能肯定球墨铸铁等温淬火是一个传统而先进的工艺，将永远发扬光大。

3　挖掘机球墨铸铁铲斗衬套的等温淬火

青岛华焜耐磨钢有限公司主打产品之一就是挖掘机铲斗衬套和销轴。挖掘机铲斗连接处需要镶入衬套，销轴穿入衬套，驱使斗体旋转挖掘物料。衬套保护斗体不被磨损，衬套与销轴相对转动，形成一对摆动磨损副，所以衬套与销轴都需要用耐磨材料制作，必须成为“耐用品”，而不应该是用普通钢简易制造的“消耗品”，因此要求衬套、销轴都必须强韧耐磨。衬套见图7及图8，销轴见图9及图10。

图7 衬套图

Fig.7 Bushes

图8 衬套

Fig.8 Bushes

市场上的衬套销轴材质通常是45#钢。45#钢衬套、销轴通过表面淬火热处理工艺，仅仅表面层硬度高，工作寿命短，频繁更换。研制的等温淬火球墨

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

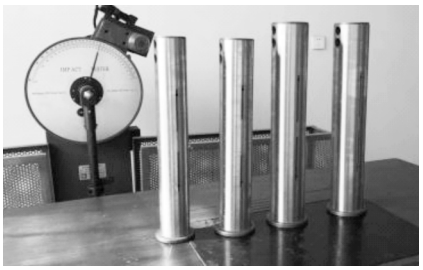

图 9 销轴图
Fig.9 Pins

图 10 销轴
Fig.10 Pins

铸铁衬套、销轴，旨在取代 45# 钢轴套产品。目前国内外市场上尚没有等温淬火球墨铸铁衬套、销轴，在中国铸造协会专家的指导下，经过长时间生产研发，通过力学性能检测、耐磨性能检测、金相组织分析，ADI 设计选用 QTD1050-6 牌号综合指标均优于表面淬火的 45# 钢。衬套销轴需要润滑。选用 QTD1050-6，借助球状石墨天然的润滑剂功能，在衬套销轴摩擦副之间，形成自润滑能力，降低磨损，延长了工件寿命。

3.1 轴套的化学成分

轴套的化学成分见表 5。

3.2 轴套的力学性能

轴套的力学性能见表 6。

3.3 轴套的金相组织等

轴套的金相组织等见表 7。

3.4 轴套的熔炼、球化、孕育及铸造工艺

中频感应电炉吹氩熔炼，炉料为优质钢下脚料与高纯增碳剂等原材料。用喂丝机加入稀土镁硅铁合金球化剂及高效瞬时孕育剂，使球化等级、球墨圆整度、均匀度，都稳定于标准，配合特有的离心铸造工艺，晶粒组织细化，无缩孔缩松。最后通过深度机加工，达到精度光洁度，成为耐磨的机械配件。

3.5 衬套等温淬火工艺

青岛华焜耐磨钢有限公司没有保护气氛炉与硝盐槽设备，采用现有高温台车炉等设备，进行“淬油等温淬火工艺”试制。淬油等温淬火就是将工件加热至奥氏体化，淬入油中，以大于临界冷却速度至 MS 点以下某一温度，待其尚未发生马氏体转变之前，进入等温炉中进行等温转变，获得奥铁体组织。淬火槽中的油可以是 L-AN32 机械油，也可以采用专用等温淬火油。等温炉采用带风扇的回火电阻炉，衬套淬油等温淬火工艺曲线如图 11。

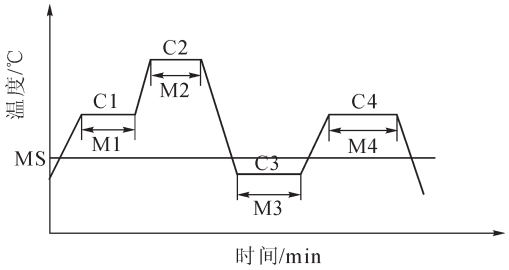

图 11 衬套的油淬+等温淬火工艺
Fig.11 Austempering process (short oil quenching plus furnace holding) of bushs

3.6 工艺参数、力学性能及金相组织

衬套淬油等温淬火工艺参数、力学性能及金相组织见表 8。

3.7 金相组织照片

件号 1 奥铁体+球状石墨见图 12，球化率见图 13。件号 2 奥铁体+球状石墨见图 14，球化率见图15。

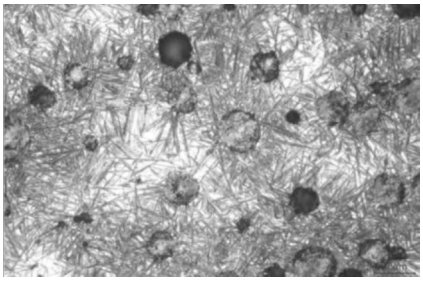

图 12 奥铁体+石墨球
Fig.12 Ausferrite + Spheric graphite

从图 11，表 8 可见，件号 1 的淬油等温淬火工艺，升温至 680 ℃保温 30 min 再升至 950 ℃保温

表 5 轴套的化学成分 w(%)
Tab.5 Chemical composition of bushing

C	Si	Mn	S	P	RE	Mg	Mo	Cu	Ni
3.5~3.9	2.5~2.7	0.2~0.4	≤0.03	≤0.05	≤0.035	≤0.04	0.2	0.4~0.6	0.2

表6 轴套的力学性能
Tab.6 Mechanical properties of bushing

QTD1050-6	抗拉强度 Rm/MPa	屈服强度 $Rp_{0.2}$/MPa	伸长率 A(%)	冲击吸收能量 KU_2/J	硬度 (HRC)
实测	1 247	1 028	5	≥20	≥42

表7 金相组织
Tab.7 Metallographic structure

牌号	球化等级	石墨大小	金相组织
QTD1050-6	2~3 级	6~8 级	富碳奥氏体 + 针状铁素体(奥铁体)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

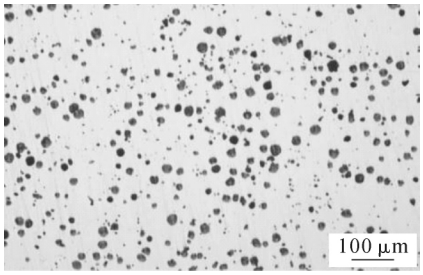

图 13 球化率优良
Fig.13 Good nodularity

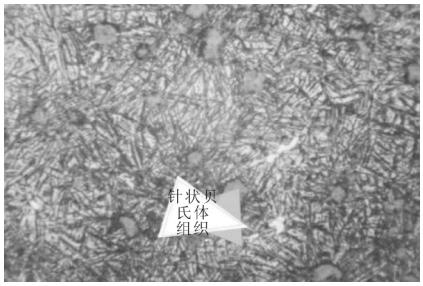

图 14 奥铁体+石墨球
Fig.14 Ausferrite + Spheric graphite

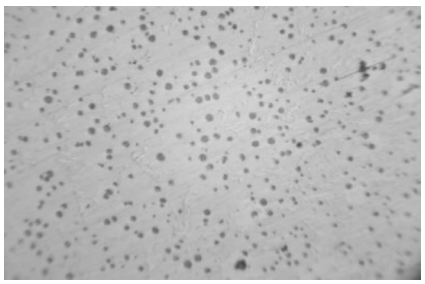

图 15 球化率优良
Fig.15 Good nodularity

120 min，衬套出炉后淬入 100 ℃的淬火油槽中，衬套降至 250 ℃出油进入 240 ℃等温炉（即回火电阻炉）等温 120 min 空冷，获得力学性能为HRC42~51，冲击吸收能量 KU_2 为 24~46 J，金相组织为奥铁体+球化石墨。力学性能与金相组织达到衬套销轴产品技术要求。

按淬油等温淬火的 ADI 衬套与 45# 钢表面淬火的衬套对比，使用寿命提高 4~5 倍。

3.8 讨论

淬油的等温淬火工艺的控制要点在于油温以及工件在油中停留时间，工件以大于临界冷却速度通过临界点温度到 Ms 点以下区域，而不让它产生珠光体型组织转变，在到达 Ms 点以下温度停留时间的长短是关键。当还未产生马氏体转变时即进入等温炉等温，使之实现奥铁体转变。从表 8 件号 5 可知，如果工件冷至 Ms 点以下至油温 100 ℃，到全部转变成马氏体，最后的组织是马氏体+球状石墨。如果工件在油中停留一段时间产生部分马氏体，出油后到等温炉中等温，则其余奥氏体转变成奥铁体，金相组织是奥铁体+马氏体+球状石墨。在 Ms 点以下工件的温度与停留时间长短是马氏体转变有无与量的多少的关键。淬油等温淬火的设备简单，对于无需采用保护气氛防止脱碳及氧化的工件很适用，操作方便，产品性价比高，是一种价廉物美的等温淬火工艺，在耐磨材料产业领域有广阔的推广应用前景。

表 8 衬套淬油等温淬火工艺参数、力学性能及金相组织
Tab.8 Isothermal quenching process parameters, mechanical properties and metallographic structure of liner quenching oil

件号	温度 /℃				时间 /min 分				力学性能		金相组织
	C1	C2	C3	C4	M1	M2	M3	M4	HRC	冲击吸收能量 KU^2/J	
1	680	950	100	240	30	120	衬套在油中冷至 250 进入等温炉	90	42-51	24-46	奥铁体+球状石墨
2	680	950	100	250	30	120	衬套在油中冷至 260 进入等温炉	90	42	20-35	奥铁体+球状石墨
3	680	950	100	280	30	120	衬套在油中冷至 260 进入等温炉	90	45	12-25	奥铁体+球状石墨
4	680	950	100	320	30	120	衬套在油中冷至 280 进入等温炉	90	38	14-20	奥铁体+球状石墨
5	680	950	100	240	30	120	衬套在油中冷至 100 进入等温炉	90	60	8-15	马氏体+球状石墨

注：C1-C5 保温温度，M1-M4 保温时间。

4 结语

综上一个分级等温淬火工艺两个等温淬火工艺实例，说明在产品的实际应用上是成功的。该类淬火工艺在我国正在飞速发展，特别是在耐磨材料领域取得突破性进展，为我国耐磨材料引领世界一流迈进一大步。

参考文献：

[1] 王定祥. 我国第一个球磨机衬板材料发明专利 [C]∥2014 全国优质耐磨材料铸造技术与生产暨先进工艺创新研讨会论文集. 桂林：中国机械和装备业技术培训中心，2014，4.

[2] 李朝霞，李国平，王定祥. ADI 砼泵弯管QTD1600-2 的研制和创新[J]. 铸造技术，2020(3):303-307.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net