DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.013

燃气热处理炉在接触网用铝硅铸件热处理中的应用及工艺研究

周本建
(中铁建电气化局集团 轨道交通器材有限公司,江苏 常州 213179)

摘　要:介绍了燃气热处理设备在接触网用铝硅铸件中的应用,针对大型燃气热处理生产线,通过工艺验证和特殊过程确认过程,探索了一种热处理过程生产控制方法。采用正交试验方法研究了接触网用铝硅铸件燃气热处理工艺,确定出最佳热处理工艺参数为 535 ℃×11 h+165 ℃×5 h。在此工艺条件下生产,铝硅铸件表现出良好的力学性能。并且,通过工艺验证和特殊过程确认过程也能提高工艺技术员的技能素养。

关键词:接触网;铝硅铸件;热处理工艺;工艺验证

中图分类号: TG156　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)10-0887-04

Application of Gas Heat Treatment Production Line in Aluminum-Si Castings for Catenary

ZHOU Benjian
(China Railway Construction and Electrification Bureau Group Rail Transit Equipment Co., Ltd., Changzhou 213179, China)

Abstract: The application of gas heat treatment equipment in aluminum-silicon alloy castings for catenary was analyzed, and explores a production control method of heat treatment process for large gas heat treatment production line through process verification and special process confirmation. The gas heat treatment process of aluminum-silicon alloy casting for catenary was studied by orthogonal test. The results show that the optimal heat treatment parameters are 535 ℃×11 h+165 ℃×5 h. Under these conditions, the Al-Si alloy castings show good mechanical properties.

Key words: catenary; aluminum silicon casting; heat treatment process; process validation

随着高铁技术的不断进步,也对接触网零部件的质量提出了更高的要求,而热处理是改善铝硅铸件性能最直接的技术之一,为满足产品热处理需要,各种各样的高性能的热处理设备在不断更新换代中。当公司引进一条热处理生产线,工艺技术员如何在最短的时间内,摸索出合适的热处理工艺,将它运用到实际生产当中,生产出合格的产品,对技术员的技术素养提出了新的挑战,并且,对热处理过程进行工艺验证和特殊过程确认,在实际生产管理中也是不可或缺的过程。

1　热处理设备分析

相比较传统的电阻炉,使用天然气加热的热处理炉在能耗成本、温升时间和控温精度等方面具有优势,同时天然气是国家倡导使用的新型能源。

通过核算电加热和燃气加热这两种加热方式的热处理设备生产能耗成本,核算结果表明,电加热能耗成本约为天然气的 2 倍,具体计算详见表 1 电加热与天然气加热能耗对比分析表。

表1 电加热与天然气加热能耗对比分析表
Tab.1 Comparison and analysis table of energy consumption between electric heating and natural gas heating

项目	电加热	天然气加热
固熔炉额定功率	300 kW/ 台	300 kW/ 台
固熔炉数量	2 台	2 台
时效炉额定功率	150 kW/ 台	150 kW/ 台
时效炉数量	1 台	1 台
平均输出率	50%	50%
每小时能耗	375 kWh	54.2 m^3/h
能源单价	0.9 元 / kWh	3.25 元 /m^3
24 h 能耗成本	8 100 元 /24 h	4 228 元 /24 h
年度能耗成本(按 270 days 核算)	218 万元 / 年	114 万元 / 年
能耗成本对比	电加热能耗 / 天然气能耗:218/114=1.91	

本台燃气热处理设备采用的是一种脉冲燃烧控温技术,PLC 控温系统可根据热处理过程中温度需

收稿日期:2021-06-29

作者简介:周本建(1971—),湖南常德人,高级工程师,硕士.主要从事接触网零部件的开发与设计方面的工作.
电话:13915029339,Email:xunby2010@163.com

求，调节空气和天然气管路上的电子阀，来控制空气和天然气的混合比例，保证在整个热处理过程中，大火和小火都是在最佳的燃烧比例下工作。同时，在炉膛左右两侧方向分别布置3根热电偶，通过热电偶采集炉内实际温度，经过PLC控温系统程序计算，控制大火和小火的持续时间，既满足了节能降耗的需求，也保证热处理温度要求。

2 热处理过程生产控制方法

针对新引进的热处理生产线，轨道交通器材有限公司组织技术人员主要从炉温均匀性检测、设备参数符合性确认、产品质量鉴定3个方面，对这条热处理生产进行了工艺验证和过程确认。

2.1 炉温均匀性检测

按照GB/T 30824-2014《燃气热处理炉温度均匀性测试方法》中相关规定，新添置的热处理炉首次应用于生产时，需要对热处理炉进行炉温均匀性检测，根据炉膛尺寸，采用9点测温法，在炉体有效加热区间内接9根传感器，外接多通道温度记录仪，设定温度为535 ℃，每隔10 min记录一次温度，将所测得数值填写在表2燃气热处理生产线时效炉温度均匀性测量记录表中。

经过空载和带载情况测量统计，炉温均匀性可达到工艺技术要求的±5 ℃内，同时控温系统的控温精度能达到±1 ℃。

2.2 设备工艺参数符合性确认

设备参数符合性确认包括保温温度和保温时间两个方面的参数符合性确认，为保证此项内容顺利完成，我公司特设计了燃气热处理生产线保温温度和保温时间工艺参数符合性确认表，如表3和表4所示，保温温度参数符合性确认采用外接检测设备进行测试，通过测炉内9点温度求平均数，所得数值与工控机监视表进行对比；炉保温时间参数符合性确认，采用拍照计时的方式进行记录，即，在保温开始时刻、结束时刻分别拍照记录时间，所得时间差值与工控机时间表进行对比，将在此过程中测得数值记录在表3和表4中，最后进行数据分析整理。

通过设备工艺参数符合性确认，此燃气热处理

表2 燃气热处理生产线温度均匀性测量记录表

Tab.2 Temperature uniformity measurement record table of gas heat treatment production line

时间	不同位置温度传感器真实温度/℃								
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
时间点1	530	536	534	531	530	535	532	531	531
时间点2	530	536	534	531	530	535	532	531	532
时间点3	531	536	534	531	530	535	532	531	532
时间点4	531	536	534	531	530	535	532	531	533
时间点5	531	536	533	531	530	535	532	531	533
时间点6	531	536	533	531	530	535	532	531	533
时间点7	531	535	533	531	530	534	531	531	532
时间点8	530	534	531	530	530	534	530	530	532
时间点9	531	534	532	531	530	534	531	531	532
平均值	530.6	535.4	533.1	530.8	530	534.6	531.5	530.8	532.2
偏差	-4.4	+0.4	-1.9	-4.2	-5	-0.4	-3.5	-4.2	-2.8

表3 燃气热处理生产线保温温度工艺参数符合性确认表

Tab.3 Conformity confirmation form of insulation temperature process parameters of gas heat treatment production line

时间点	不同位置测量设备显示数值/℃										不同位置工控机仪表显示数值/℃					
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	平均值	监视表1	误差≤±5 ℃	监视表2	误差≤±5 ℃	监视表3	误差≤±5 ℃
1	530	536	534	531	530	535	532	531	532	532.33	537	+4.67	536	+3.67	535	+2.67
2	530	534	532	530	529	534	531	530	532	531.33	536	+4.67	536	+4.67	535	+3.67
3	530	534	531	530	529	534	531	530	532	531.22	536	+4.78	536	+4.78	536	+4.78
4	530	534	531	530	529	534	530	530	532	531.11	536	+4.89	536	+4.89	535	+3.89
5	529	534	531	530	529	534	530	530	532	531.00	536	+5.00	536	+5.00	535	+4.00
6	531	536	533	531	530	535	532	531	533	532.44	536	+3.56	536	+3.56	535	+2.56
7	530	534	532	531	530	534	531	531	532	531.66	536	+4.34	536	+4.34	535	+3.44
8	530	534	532	531	529	534	531	530	532	531.44	536	+4.56	536	+4.56	535	+3.56
9	531	535	533	531	530	535	531	531	533	532.22	536	+3.78	536	+3.78	535	+2.78

表 4 燃气热处理生产线保温时间工艺参数符合性确认表

Tab.4 Conformity confirmation form of holding time process parameters of gas heat treatment production line

测试时间点	保温时间工艺要求	工控机显示数值			测量设备显示数值			符合性对比(≤±3 min)
		保温开始时刻	保温结束时刻	时间差	保温开始时刻	保温结束时刻	时间差	
1	390 min	14:24	20:54	390	14:25	20:55	390	0

生产线温度仪表和时间仪表显示数值和校核设备显示数值基本一致,满足生产工艺要求。

3 接触用铝硅铸件热处理工艺研究

3.1 铝硅铸件技术参数

铝硅铸件选用德国牌号 ZAlSi7Mg0.6 铝合金,ZAlSi7Mg0.6 合金属于 Al-Si 系亚共晶合金,是在 ZAlSi7Mg0.3 合金基础上增加镁元素的含量发展起来的 Al-Si-Mg 系高强度铸造铝合金,具有很高的强度、好的韧性和很好的流动性、气密性和抗热裂性,其实测化学成分如表 5 所示。

表5 ZAlSi7Mg0.6铝合金实测化学成分 w(%)

Tab.5 Measured chemical composition of ZAlSi7Mg0.6 aluminum alloy

Si	Mg	Ti	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
6.94	0.58	0.14	0.12	<0.01	0.012	0.012	其余

3.2 热处理正交试验

通过分析固溶温度、固溶时间、时效温度、时效时间对 ZAlSi7Mg0.6 铝合金性能的影响,确定其最佳热处理工艺参数,结合相关文献,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验方法进行试验,其正交试验因素水平如表 6 所示,正交试验结果见表 7。通过极差分析得到各个影响因素的极差,极差值越大,则该因素对试验结果的影响程度越大,根据公式(1)计算出极差 R,计算结果如表 8 所示。

$$R\text{-}\max(ki)\text{-}\min(ki) \tag{1}$$

由极差分析结果可知,各因素对抗拉强度的影响顺序为:时效温度>固溶温度>时效时间>固溶时间;断后伸长率的影响顺序为:时效温度>固溶时间>固溶温度>时效时间,硬度的影响顺序为:时效温度>时效时间>固溶时间>固溶温度。因此,对于抗拉强度,最佳热处理工艺组合为 $A_3B_1C_3D_2$;对于断后伸长率,最佳热处理工艺组合为 $A_2B_3C_1D_2$;对于硬度,最佳热处理工艺组合为 $A_2B_1C_2D_3$。接触网零部件是在高负荷的工作环境中工作,对零件的耐磨性有严格的要求,但零件硬度高,零件在工作中易发生脆性断裂,影响行车安全,因此,在保证零件足够的硬度条件下,确定合理的热处理工艺参数,则优化后的工艺参数为 $A_2B_2C_2D_3$,即 535 ℃×11 h+165 ℃×5 h。

表6 热处理工艺的$L_9(3^4)$正交试验表

Tab.6 $L_9(3^4)$ orthogonal test table of heat treatment process

试验号	A 固溶温度/℃	B 固溶时间/h	C 时效温度/℃	D 时效时间/h
1	1(520)	1(8)	1(145)	1(3)
2	1	2(11)	2(165)	2(4)
3	1	3(13)	3(185)	3(5)
4	2(535)	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3(550)	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表 7 ZAlSi7Mg0.6 铝合金正交热处理试验结果

Tab.7 Orthogonal heat treatment test results of ZAlSi7Mg0.6 aluminum alloy

试验号	热处理参数	σ_b/MPa(均值)	δ/%(均值)	HB(均值)
1	$A_1B_1C_1D_1$	286.00	3.19	108.63
2	$A_1B_2C_2D_2$	310.75	1.94	116.75
3	$A_1B_3C_3D_3$	323.62	1.69	112.88
4	$A_2B_1C_2D_3$	339.25	2.50	122.37
5	$A_2B_2C_3D_1$	345.75	1.44	120.00
6	$A_2B_3C_1D_2$	305.25	5.45	106.25
7	$A_3B_1C_3D_2$	351.12	1.50	107.75
8	$A_3B_2C_1D_3$	315.62	5.06	108.62
9	$A_3B_3C_2D_1$	336.25	3.12	116.62

表 8 正交试验的极差分析

Tab.8 Range analysis of orthogonal test

性能指标	参数	固溶温度/℃	固溶时间/h	时效温度/℃	时效时间/h
σ_b	Ⅰ	306.79	325.49	302.29	322.67
	Ⅱ	330.08	324.04	328.75	322.37
	Ⅲ	334.33	321.71	340.16	326.16
	R1	27.54	3.78	37.87	3.79
δ	Ⅰ	2.27	2.40	4.57	2.58
	Ⅱ	3.13	2.81	2.52	2.96
	Ⅲ	3.23	3.42	1.54	3.08
	R2	0.96	1.02	3.03	0.50
HB	Ⅰ	112.75	112.92	107.83	115.08
	Ⅱ	116.21	115.12	118.58	110.08
	Ⅲ	110.99	111.92	113.54	114.62
	R3	1.76	3.2	10.75	5

3.3 生产验证及分析

从同批次生产的铸件中随机抽取试样,在 $A_2B_2C_2D_3$ 热处理工艺参数下进行热处理,经测试试样的抗拉强度均值为 339.92 MPa,断后伸长率均值

为3.35%,硬度均值为106.36 HBW,测试结果表明,产品力学性能满足生产技术要求,抽检产品按拉伸强度排列如图1所示。热处理过后的金相组织如图2所示,在整个组织中,共晶硅边角圆滑,但不聚集长大,未发生过烧过热现象。

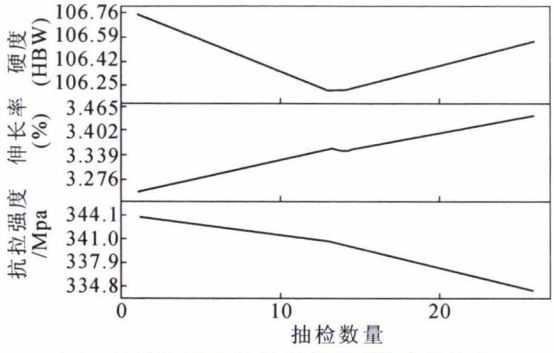

图1 抽检铸件按拉伸强度排列的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of randomly selected castings arranged according to strength

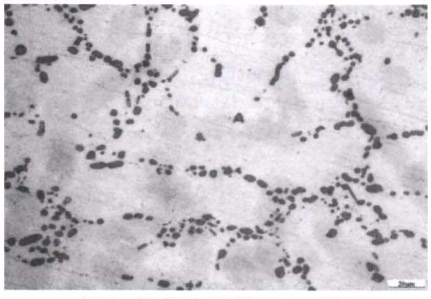

图2 铸件金相组织 ×200

Fig.2 Metallographic structure of castings

4 结论

(1)该热处理生产线使用天然气加热,能耗成本低,温升时间快,极大地降低了生产成本。同时,整套生产线利用PLC控温系统,实现烧嘴火焰大小的调控,控温精度高,炉温均匀性在±5℃以内,热处理的铝硅铸件性能优良,能满足生产技术要求。在生产过程中通过工艺验证和特殊过程确认,使工艺技术员的职业技能素养得到极大的提升,对以后的生产和质量管控具有实际的指导性意义。

(2)批量生产实践证明,接触网用铝硅铸件最佳热处理工艺为535 ℃×11 h+165 ℃×5 h,随机抽取的测试试样,抗拉强度均值为339.92 MPa,断后延伸率均值为3.35%,硬度均值为106.36 HBW,满足生产技术要求。

参考文献:

[1] 李伟.热处理特殊过程确认[J].新技术新工艺,2010(4):58-61.

[2] 王博,冯志远,刘剑.燃气台车在芯棒热处理中的应用[J].工业炉,2012(3):20-22.

[3] 刘剑,殷恺.大型燃气热处理炉炉温均匀性的测试方法[J].工业炉,2012,9(5):20-22.

[4] 唐鹏,刘裔源,赵艳君.Si含量和热处理制度对铸造Al-Si合金组织和性能的影响[J].金属热处理,2020(8):76-81.

[5] 李文巧,袁海波,马溶.高强韧铝硅合金变速箱中间板压铸件热处理工艺研究[J].铸造,2019(12):1382-1386.

[6] 何晓军,何智勇,刘洋.铸造铝合金ZL114A的热处理工艺[J].宇航材料工艺,2013(3):92-94.

技术资料邮购

《特种铸造生产实用手册》

特种铸造涉及的工艺门类较多，本书紧跟当前铸造行业的发展和生产应用实际，全面介绍了各类型特种铸造的生产技术经验和数据，包括熔模精密铸造、壳型铸造、金属型铸造、铁型覆砂铸造、陶瓷型铸造、离心铸造技术及设备、挤压铸造及半固态成形技术、反重力铸造技术、连续铸造技术及装备、增材制造技术及3D打印在新型工业发展的应用等10部分内容。

特快专递邮购价：179元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-88491681