

# 人工时效和涂装对A356铝合金车轮性能的影响

代颖辉, 陈玫新, 储秀欣

(保定市立中车轮制造有限公司, 河北保定 071000)

**摘要:** 为了研究热处理人工时效温度在满足产品各项性能要求的前提下能否降低, 采用金属型重力铸造试棒及硬度块, 经540 °C、6 h固溶处理后, 进行不同温度、时间的人工时效处理, 然后在涂装之前和之后进行了力学性能测试, 总结出时效处理工艺的变化规律和涂装工艺的影响。在此基础上, 将温度和时间按照125 °C、3 h, 135 °C、3 h, 145 °C、3 h对车轮的外轮缘、内轮缘、轮辐取试棒和轮心取硬度块进行人工时效处理, 在涂装之前和之后进行了力学性能测试和晶粒度分析。试验结果表明: 与现有人工时效工艺155 °C、3 h相比, 130 °C、3 h完全可以满足产品的各项性能要求, 节约了能源和降低了成本。

**关键词:** 车轮; A356; 热处理; 人工时效; 力学性能; 涂装

**中图分类号:** TG292      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4977 (2014) 08-0775-06

## Influence of Artificial Aging and Painting on the Performance of A356 Aluminium Alloy Wheel

DAI Ying-hui, CHEN Jiu-xin, CHU Xiu-xin

(Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., Baoding 071000, Hebei, China)

**Abstract:** Whether artificial aging temperature of heat treatment can be reduced on the condition of all kinds of product performance meeting requirements was studied through using test bars and hardness blocks of gravity die casting, performing artificial aging treatment under different temperature and time after the solution heat treatment at 540 °C for 6 h. The mechanical properties were tested before and after painting, and the variation rules of aging treatment process and the effect of painting process were summarized. On the basis of the above, after sampling test bars from the outer flange, inner flange, spoke and taking hardness blocks from the wheel hub, the artificial aging treatment was carried out. The temperature and time will be according to the process parameters of 125 °C for 3 h, 135 °C for 3 h; 145 °C for 3 h. The mechanical properties were tested and the grain size was analyzed before and after the painting. The test results show that compared with the current artificial aging process which is 155 °C, 3 h, it can fully meet all kinds of product performance requirements for 130 °C, 3 h, saving the energy and cost.

**Key words:** wheel; A356; heat treatment; artificial aging; mechanical property; painting

铝合金车轮具有质量轻、散热性好、外观多样、安全等优点广泛用于轿车。它是汽车的重要安全件, 各个主机厂对其都有严格的质量要求, 制造工厂必须严格按照主机厂的标准要求生产, 确保其可靠、安全。这就需制造厂家具有稳定的制造工艺和有效的过程控制。在实际制造生产试验时, 各个生产厂家因热处理时效温度较高, 没有考虑到涂装烘烤的影响而造成能源的浪费。所以有必要对时效处理和涂装前后的力学性能进行研究。根据GB/T 25745—2010中指出时效处理的温度和保温时间可根据铸件的化学成分、铸造方法、铸件壁厚和力学性能要求等因素调整。本文所讨论的正是铝合金车轮制造过程中重要的热处理人工时效工艺和涂装对产品性能的影响。

试验首先进行试棒及硬度块试验, 所采用的工艺流程为: 熔炼→重力铸造→T6热处理(固溶处理+人工时效处理)→机加工→涂装(底粉+色亮漆); 然后进行车轮试验, 所采用的工艺流程为: 熔炼→低压铸造→T6热处理(固溶处理+人工时效处理)→机加工→涂装(底粉+色亮漆)。

## 1 试验方案

### 1.1 试棒及硬度块试验方案

采用金属型重力铸造试棒及硬度块, 将试棒和硬度块分为两组并编号。第一组和第二组全部进行540 °C、6 h固溶处理, 之后使用电热恒温干燥箱, 其温度范围是10~300 °C, 分别进行1~5 h即1、2、3、

收稿日期: 2014-01-04收到初稿, 2014-06-23收到修订稿。

作者简介: 代颖辉 (1973-), 男, 工程师, 主要从事汽车铝合金车轮的研发与制造。电话: 0312-5997634, E-mail: daiyinghui@lzwheel.com

4、5 h，温度75℃~225℃的人工时效处理。考虑到现有时效温度是按155℃±3℃控制，所以155℃±3℃左右两侧的温度按照间隔10℃验证，其余按照间隔20℃验证，将温度划分为：75、95、115、125、135、145、155、165、175、185、205、225℃。然后将第二组进行实际涂装工艺模拟车轮的实际工艺：涂装底粉线温度为190℃，时间45 min；漆线温度为155℃，时间45

min。分别对两组即涂装前和涂装后的力学试棒按照GB/T 228.1—2010进行力学性能测试、硬度样块按照GB/T 231.1—2002进行硬度测试，记录数据进行统计。在涂装前和涂装后每种时间和温度下做3根试棒的力学性能并取平均值，所以试棒总数量共计最少360根，为了保证试棒足够用，铸造50根备用，共计410根。试验方案见表1。

表1 试棒和硬度块涂装前试验方案 (试验编号)

Table 1 Test program of test bars and hardness blocks before painting

时间/h	温度/℃											
	75	95	115	125	135	145	155	165	175	185	205	225
1	751	951	1 151	1 251	1 351	1 451	1 551	1 651	1 751	1 851	2 051	2 251
2	752	952	1 152	1 252	1 352	1 452	1 552	1 652	1 752	1 852	2 052	2 252
3	753	953	1 153	1 253	1 353	1 453	1 553	1 653	1 753	1 853	2 053	2 253
4	754	954	1 154	1 254	1 354	1 454	1 554	1 654	1 754	1 854	2 054	2 254
5	755	955	1 155	1 255	1 355	1 455	1 555	1 655	1 755	1 855	2 055	2 255

注：本表为涂装前的试验编号，涂装后的试验编号是在本对应编号后面加P。

### 1.2 车轮试验方案

采用实际生产的15X6J车轮验证，铸造方式为低压铸造，同一工艺连续铸造；经540℃、6 h固溶处理后分别进行125℃±3℃、135℃±3℃、145℃±3℃、155℃±3℃，3 h±5 min的人工时效处理，在涂装之前和之后对车轮的外轮缘、内轮缘、轮辐取试棒及晶粒度块和轮心取硬度块，进行力学性能测试和晶粒度分析。并且验证实际车轮与试棒之间力学性能是否存在差异和涂装前后的晶粒度是否发生变化，同时验证在这四种温度下人工时效处理的车轮经涂装后是否满足强度要求。

试验分为4组，每组分别采用125℃±3℃、3 h±5 min，135℃±3℃、3 h±5 min，145℃±3℃、3 h±5 min，155℃±3℃、3 h±5 min的人工时效处理，铸造工序采用同一工艺每组连续生产10只，每组分别在铸件轮中心减重窝内打印标识1、2、3、4。之后每组取2只车轮，涂装之前和之后在固定方位取外轮缘、内轮缘、轮辐各4根试棒做力学测试并取平均值以及各取1块金相块用于晶粒度分析，在车轮轮心取硬度块各1块做硬度测试。每组取涂装后的2只车轮做冲击试验，取1只车轮做弯曲疲劳试验。试验方案见表2。

表2 车轮试验方案

Table 2 Test program of wheels

组别	人工时效		铸件数量/只	打印标识		试棒取样		硬度块		冲击试验数量	弯曲疲劳试验数量
	温度/℃	时间/h		内容	位置	数量	位置	数量	位置		
第1组	125	3	10	1	中心减重窝	4	内、外轮缘，轮辐	1	轮心	每组各2只	每组各1只
第2组	135	3		2							
第3组	145	3		3							
第4组	155	3		4							

## 2 试验结果及分析

如图1-图4是拉伸试棒力学性能随时效温度、时间的变化的趋势图 (虚线为涂装前、实线为涂装后)。由图1-图4可以看出：伸长率在涂装前和涂装后随着温度的升高和时间的增加总体呈下降趋势，并且同一时效工艺下，涂装后比涂装前试棒的伸长率也是下降的。在温度小于115℃时，涂装前后的伸长率变化较大。随着温度的升高和时间的延长，伸长率在涂装前和涂装后的差值变小。抗拉强度、屈服强度、硬度在涂装前和涂装后随着温度的升高和时间的增加的变化是先升高，然后稍微降低，之后继续升高，总体呈升高趋势。温度低时，涂装前的抗拉强度、屈服强度和硬度

与涂装后的相比差值较大，温度高时，涂装前的抗拉强度、屈服强度和硬度与涂装后的相比差值较小。

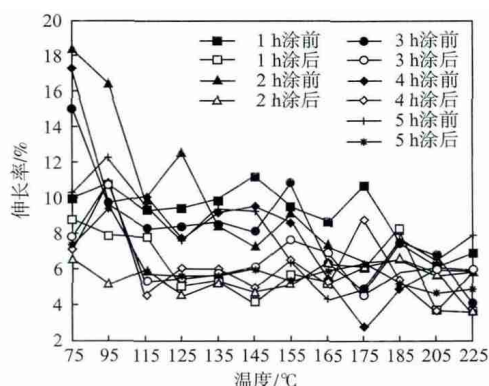


图1 试棒的伸长率

Fig. 1 The test bars' elongation

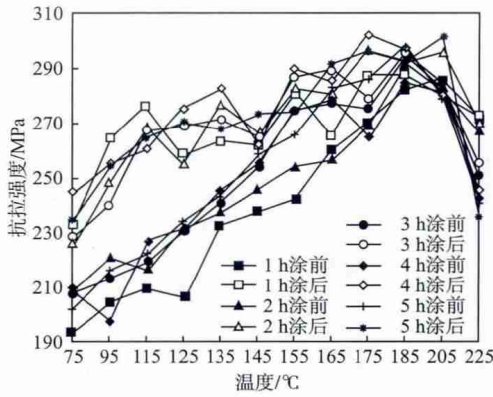


图2 试棒的抗拉强度

Fig. 2 The test bars' tensile strength

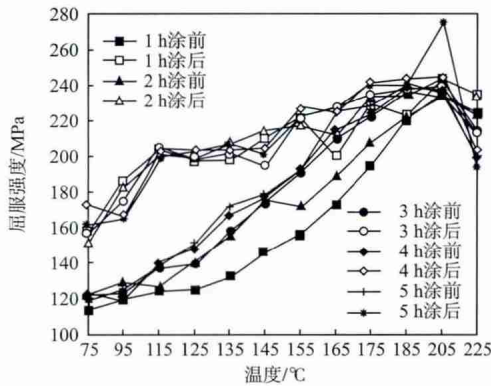


图3 试棒的屈服强度

Fig. 3 The test bars' yield strength

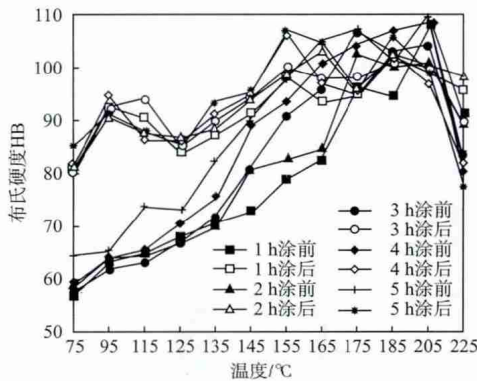
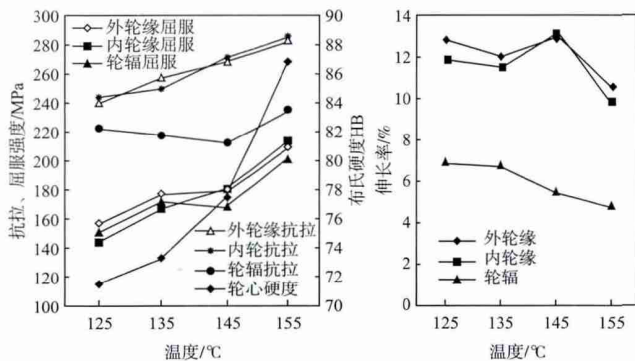


图4 试棒的硬度

Fig. 4 The test bars' brinell hardness

在95 °C、3 h时试棒的抗拉强度、屈服强度、伸长



(a) 涂装前力学性能

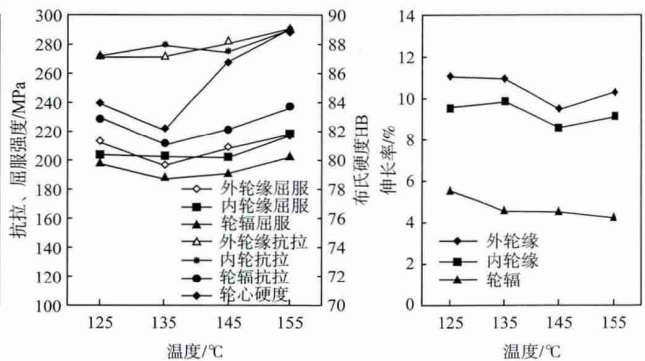
率和硬度出现一个较好值。即涂装前为：抗拉强度 213.13 MPa、屈服强度 123.56 MPa、伸长率9.8%和硬度 HB 61.85。涂装后达到：抗拉强度240.07 MPa、屈服强度 175.79 MPa、伸长率10.85%和硬度 HB 92.47。涂装后抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度都具有较高值。但其涂装前硬度低，加工后表面刀纹紊乱、粘刀，这对机械加工的加工工艺提出了较高要求，因此暂不考虑此工艺方案。

在115 °C、3 h时，硬度在HB 63，试棒加工表面刀纹紊乱、粘刀。在125 °C、3 h时试棒的力学性能：即涂装前为：抗拉强度 230.23 MPa、屈服强度 139.83 MPa、伸长率8.46%和硬度 HB 66.98，涂装后达到：抗拉强度 268.75 MPa、屈服强度 199.9 MPa、伸长率 5.54%和硬度 HB 84.95，可以满足产品的力学性能要求。考虑到能耗及现有时效时间为3 h，因此选择人工时效热处理工艺为：125 °C、3 h，135 °C、3 h，145 °C、3 h，155 °C、3 h工艺试验。

试棒在225 °C时抗拉强度、屈服强度和硬度呈大幅下降趋势，伸长率变化趋势不是很明显。

图5是涂装前后车轮各部位的力学性能趋势图。由图5可以看出，车轮的外轮缘、内轮缘、轮辐，在涂装前和涂装后的抗拉强度、屈服强度、硬度随着温度的升高总体呈升高趋势；车轮的外轮缘、内轮缘、轮辐，在涂装前和涂装后的伸长率随着温度的升高总体呈下降趋势；和试棒的变化规律相同。试棒和车轮的力学性能差别较大，这是因试棒和车轮的铸造、冷却工艺不同造成的，特别是轮辐部分差别明显。轮辐部分在低压铸造时是较晚冷却的部分，组织粗大，轮辐各部分组织间差别也较大，造成了力学性能降低；另外，车轮轮辐部分粗大、较厚，热处理时的淬透性较差，冷却速度慢，这也导致了与车轮较薄的轮缘部分力学性能差别较大。

图6-图9是涂装前后车轮各部位的力学性能的对比如。由图6-图9可以看出，与涂装前相比，涂装后实际车轮的抗拉强度、屈服强度和硬度都是增加的，伸长率



(b) 涂装后力学性能

图5 涂装前、后车轮的力学性能趋势图

Fig. 5 Tendency charts of mechanical properties after and before wheel painted



是降低的。而轮辐部分的伸长率较低，这主要是由于轮辐部分晶粒粗大、不均，导致其性能较低。随着温度的

升高各项性能涂装后与涂装前相比变化幅度较小。

图10是125、135、145、155 °C，3 h时的车轮涂装

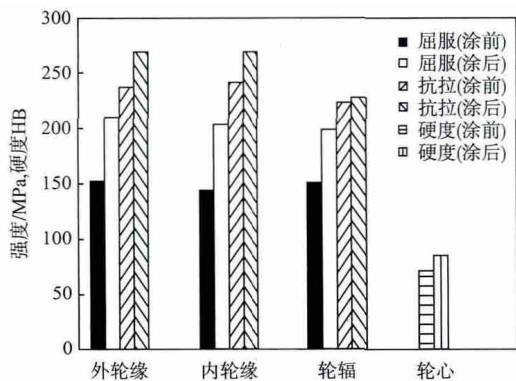


图6 125 °C、3 h时车轮涂装前后力学性能对比图

Fig. 6 Comparison charts of mechanical properties before and after wheel painted at 125 °C , 3 h

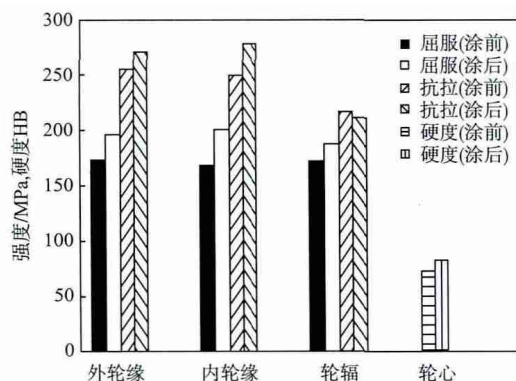
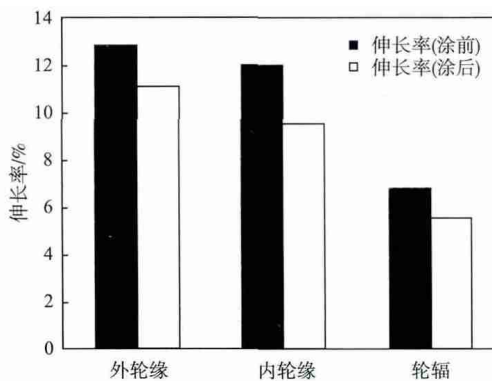


图7 135 °C、3 h时车轮涂装前后力学性能对比图

Fig. 7 Comparison charts of mechanical properties before and after wheel painted at 135 °C , 3 h

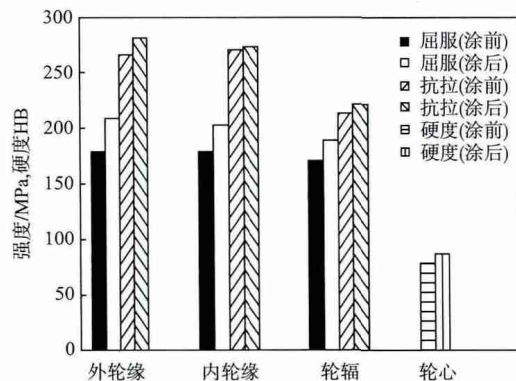
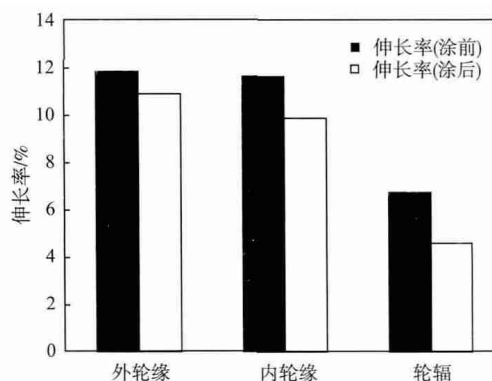


图8 145 °C、3 h时车轮涂装前后力学性能对比图

Fig. 8 Comparison charts of mechanical properties before and after wheel painted at 145 °C , 3 h

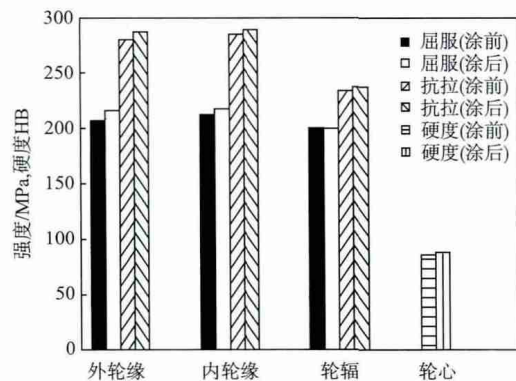
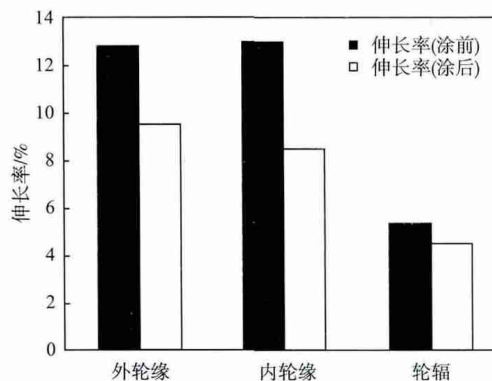
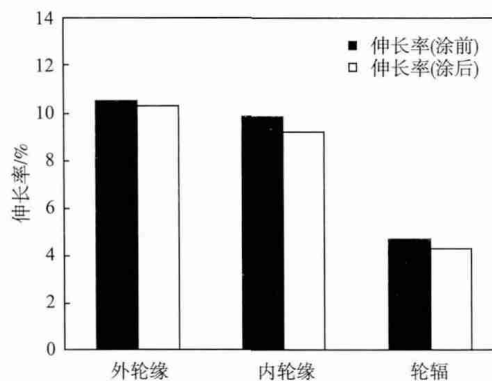


图9 155 °C、3 h时车轮涂装前后力学性能对比图

Fig. 9 Comparison charts of mechanical properties before and after wheel painted at 155 °C , 3 h



后力学性能对比图。由图10可看出：随着温度的升高各项性能涂装后与涂装前相比变化幅度较小。

图11、图12是车轮在135℃、3h涂装前后的金相图片，车轮在125℃、3h，135℃、3h，145℃、3h时效处理时的外轮缘、内轮缘、轮辐分别取样进行晶粒度分析。结果表明，在不同的时效工艺下，涂装前与涂装后车轮各部位的金相大小差别不大，晶粒度在5.0~6.5之间。轮辐部位的晶粒明显大于外轮缘和内轮缘，内、外轮缘基本相同。

热处理强化的A356合金，时效过程中经过4个阶段：G.P1→G.P2→β'→β (Mg<sub>2</sub>Si) [1]。

(1) 形成G.P1区。固溶体点阵内原子重新组合，出现溶质原子的富集区，伴随着点阵畸变程度增大，

提高合金的力学性能，降低合金的导电性。

(2) 形成G.P2区。合金元素的原子以一定比例进行偏聚形成G.P2区，为形成亚稳相做准备，合金的强度进一步提高。

(3) 形成亚稳相，即β'相。亚稳相也称为过度相，该相与基体呈共格联系，大量的G.P2区和少量的亚稳相相结合，使合金得到最高的强度。

(4) 形成第二相质点和第二相质点的聚集。亚稳相转变为稳定相β，即Mg<sub>2</sub>Si相，细小的质点分布在晶粒内部，较粗大的质点分布在晶界，还相继发生第二相质点的聚集，点阵畸变剧烈地减弱，显著地降低合金的强度，提高合金的塑性。

上述几个阶段不是截然分开的，有时是同时进行

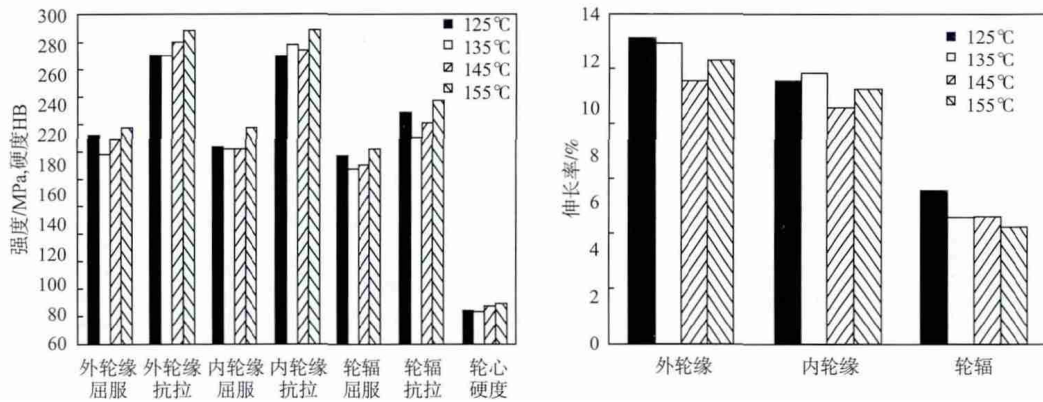
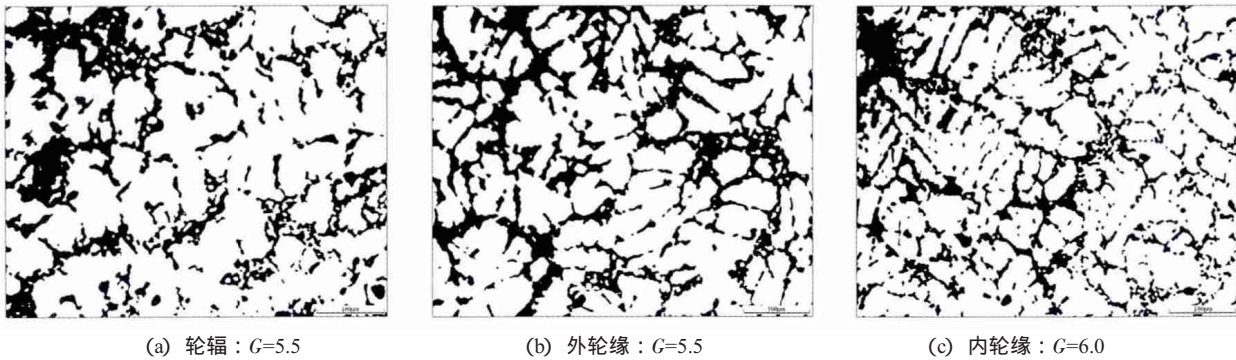


图10 125、135、145、155℃，3h时的车轮涂装后力学性能对比图

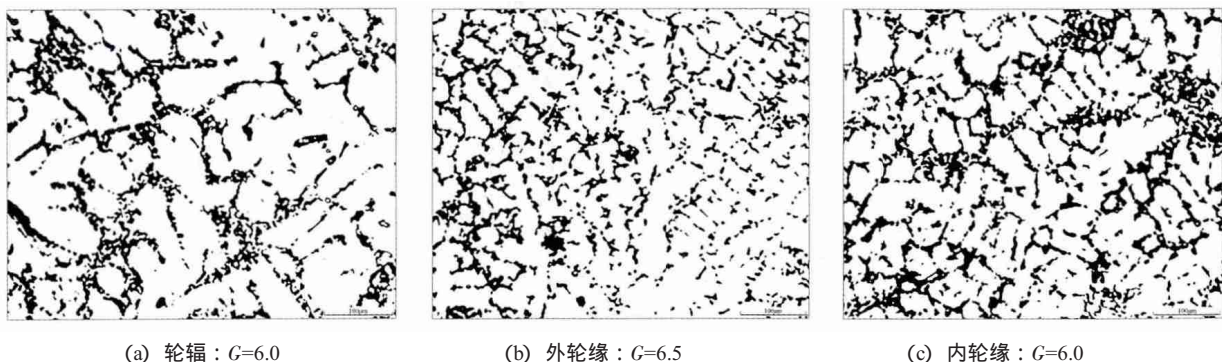
Fig. 10 Comparison charts of mechanical properties after wheel painted at 125 °C , 135 °C , 145 °C , 155 °C , 3 h



(a) 轮辐：G=5.5 (b) 外轮缘：G=5.5 (c) 内轮缘：G=6.0

图11 135℃、3h涂装前晶粒度

Fig. 11 The grain size before painted at 135 °C , 3 h



(a) 轮辐：G=6.0 (b) 外轮缘：G=6.5 (c) 内轮缘：G=6.0

图12 135℃、3h涂装后晶粒度

Fig. 12 The grain size after painted at 135 °C , 3 h



的, 低温时效第一、二阶段进行的程度要大些, 高温时效, 第三、四阶段进行得强烈些。时效的保温时间对合金的性能同样有很大影响。铝合金在较高的温度下短期保温或在较低的温度下长期保温都可以得到要求的强度。

当人工时效温度较低保温时间较短时, 析出相以G.P区为主, G.P区与基体完全共格, 本身对合金的强化作用不大。但G.P区能为 $\beta'$ 相提供异质形核, 随着温度的升高或保温时间的延长, 开始析出强化相 $\beta'$ ,  $\beta'$ 相与基体保持半共格, 使得晶格发生严重畸变, 从而强化合金。继续保温, 则半共格的 $\beta'$ 相会向与基体完全失去共格的稳定相 $\beta$ 过渡, 即由亚稳相转变为稳定相, 即 $Mg_2Si$ 相, 致使晶格错配度降低, 晶格畸变程度减弱, 从而强化作用降低, 合金的性能呈下降的趋势。王群等研究认为<sup>[2]</sup>, A356合金中影响力学性能的主要因素是Si相和 $Mg_2Si$ 相。热处理后共晶硅相越细小圆整、分布越均匀, 则抗拉强度和伸长率越高。A356合金中还有一种比较重要的相亦即 $Mg_2Si$ 强化相, 其在铸造后合金固溶处理过程中溶于基体, 随后通过时效处理形成细小、弥散分布的 $Mg_2Si$ , 对合金进行弥散强化。时效处理时, Mg、Si从固溶体中析出、偏聚、形成硬化区, 合金强度上升, 塑性下降。试棒、硬度块及车轮在涂装前随着时效温度的提高和保温时间的增加, 使析出的 $Mg_2Si$ 增加, 经涂装烘烤后相当于发生了两次短时的人工时效处理, 析出更多的 $Mg_2Si$ , 从而力学性能发生变化。

试棒在225℃时强度和硬度大幅下降, 伸长率变化趋势不是很明显, 分析认为发生了过时效, 由于温度过高, 使 $Mg_2Si$ 聚集长大而变的粗大所导致。

陈旷等研究了涂装对合金力学性能的影响认为<sup>[3]</sup>, 涂装烘烤工艺能够在一定程度上提高合金的强度, 但对合金的伸长率没有太大影响。其研究中没有明确指出人工时效的温度和时间, 本文所做的试验中当人工时效的温度逐渐升高时, 涂装前后力学性能差异也逐渐减小。刘宏磊研究了T4热处理工艺的探索认为<sup>[4]</sup>, 车轮经T4热处理再经涂装烘烤工艺满足客户要求, 车轮经涂装烘烤后, 抗拉强度、屈服强度和硬度有明显的提高, 伸长率有明显的降低。刘宏磊研究了多次人工时效对车轮的影响认为<sup>[5]</sup>, 经过多次人工时效车轮的屈服强度、抗拉强度、硬度有不同程度的提高, 伸长率有不同程度的下降。

采用以上四种时效处理工艺的产品涂装后冲击、弯曲疲劳试验均符合要求。实际生产车轮时, 人工时

效的温度是有波动的, 通过以上验证, 车轮在125℃和135℃各项性能都符合要求, 故温度可按照130℃, 时间按照3h。这样既降低了热处理成本, 也充分利用了涂装烘烤的能源。

### 3 结论

(1) A356铝合金试棒, 在涂装前和涂装后, 伸长率随温度的升高和时间的增加总体呈现下降趋势, 并且同一时效工艺条件下, 涂装后比涂装前是下降的; 在涂装前和涂装后, 抗拉强度、屈服强度和硬度随着温度的升高和时间的增加的变化是先升高, 然后稍微降低, 之后继续升高, 总体呈升高趋势, 温度较低时涂装后比涂装前是升高的, 随着温度的升高和时间的延长, 试棒的力学性能在涂装前和涂装后的差值变小。

(2) A356铝合金车轮人工时效工艺在125、135、145、155℃, 3h时的外轮缘、内轮缘、轮辐, 在涂装前和涂装后, 抗拉强度、屈服强度、硬度随着温度的升高总体呈升高趋势, 涂装后比涂装前是升高的。在涂装前和涂装后, 伸长率随着温度的升高总体呈下降趋势, 涂装后比涂装前是下降的。在涂装前和涂装后, 随着温度的升高力学性能的差值越来越小。在此四种时效工艺下, 涂装后可以满足产品的各项性能要求。

(3) A356合金时效处理时, Mg、Si从固溶体中析出、偏聚、形成硬化区, 合金强度上升, 塑性下降。试棒及车轮在涂装前随着时效温度的提高和保温时间的增加, 使析出的 $Mg_2Si$ 增加, 经涂装烘烤后相当于发生了两次短时的人工时效处理, 析出更多的 $Mg_2Si$ , 从而抗拉强度、屈服强度、硬度上升, 伸长率下降。

(4) 与现有热处理人工时效工艺155℃、3h相比, 130℃、3h可以满足产品的各项要求, 节约了能源和降低了成本。

#### 参考文献:

- [1] 赵玉涛. 铝合金车轮制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 106-107.
- [2] 王群, 李建国, 叶志胜, 等. 汽车铝合金轮毂辐条力学性能的统计学分析及预测[J]. 铸造, 2009 (9): 894-898.
- [3] 陈旷, 关绍康, 胡保健, 等. 铸造铝合金轮毂T6热处理工艺的优化研究[J]. 热处理加工工艺, 2006 (6): 30-32.
- [4] 刘宏磊, 许斌, 姬绍川. 低压铸造铝合金轮毂T4热处理工艺探索[J]. 铸造技术, 2010 (10): 1311-1313.
- [5] 刘宏磊, 梁勇, 刘志峰, 等. 多次人工时效对低压铸造A356.2铝合金轮毂力学性能的影响[J]. 铸造, 2008 (10): 1085-1087.

(编辑: 曲学良, qxl@foundryworld.com)