

【工程与技术】

轮毂喷淋装置设计与淬火过程数值模拟

郭瑞超^{1,2}, 毕嘉成^{1,2}, 梁丹丹^{1,2}, 高晓波³

(1. 山东航空学院 航空工程学院, 山东 滨州 256603;

2. 山东航空学院 山东省航空材料与器件工程技术研究中心, 山东 滨州 256603;

3. 滨州渤海活塞有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要:针对轮毂采用池浴淬火方式易造成轮毂残余应力大、增加生产成本的问题,提出可使轮毂表面同时全面均匀接触淬火液的喷淋式新型淬火方法。首先利用 AutoCAD 三维建模软件进行轮毂喷淋装置设计,随后基于 ABAQUS 有限元分析软件,采用顺序热-力耦合方法,以 6061 铝合金轮毂为分析对象,结合材料的换热系数、热物与力学性能参数,分别求解轮毂在喷淋淬火、池浴淬火状态下的温度场及应力场分布。模拟结果显示,轮毂喷淋淬火时的温度场分布均匀性要好于池浴淬火时的温度场分布均匀性,在喷淋淬火后轮毂各部位的残余应力数值小于池浴淬火后残余应力数值。

关键词:轮毂;喷淋淬火;池浴淬火;数值模拟;残余应力

中图分类号: TG 166 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.issn.2097-4973.2024.03.006

为适应节能、环保的汽车技术发展新趋势,通过减少汽车自重来降低油耗、减少 CO₂ 及有害气体排放已成为汽车工程界的主攻方向之一^[1]。铝合金材料因其低密度、高强度、高韧性等优点,已成为汽车轻量化的优选材料之一^[2]。轻量化轮毂是汽车轻量化的重要环节,目前轮毂广泛采用铝合金材料,如 A356^[3]与 6061^[4]。为提高轮毂的力学性能以满足设计要求,铝合金材料必须经过热处理工艺,主要包括固溶、淬火与时效工序^[5]。其中淬火工序是获得过饱和固溶体并在随后时效工序中析出沉淀强化相的重要环节,现有的轮毂淬火工序主要是池浴淬火,即将固溶完毕的轮毂浸没至淬火介质中完成淬火过程。然而池浴淬火方式易造成轮毂残余应力大,增加了轮毂加工余量,造成轮毂制造成本高、耗能大^[6]。诸多学者针对轮毂淬火过程进行了研究分析。赵旺初等^[7]对 A356 铝合金轮毂池浴淬火过程进行了有限元分析,结果表明,池浴淬火方式下不同部位的降温速率不同,易形成较大残余应力。宋金升等^[8]基于计算流体力学方法,对 6061 锻造铝合金轮毂淬火过程进行了数值模拟,结果显示,入水阶段轮毂的降温速率与水冷阶段轮毂降温速率存在较大差异。白帮伟等^[9]指出,轮毂不同部位冷却速率不同是产生较大残余应力,使轮毂发生翘曲变形的主要原因。综上所述,轮毂现阶段采用的池浴淬火方式容易使各部位冷却速率相差较大而产生较大残余应力。为减少轮毂毛坯热处理变形的影响,工厂现有的增大毛坯加工余量的方式并没有从本质上改变热处理变形问题,且易造成生产上材料和人工的浪费,增加了生产成本。因此,寻求轮毂淬火

收稿日期:2024-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52205332);山东省自然科学基金项目(ZR2020QE146);山东省高等学校“青创团队计划”(2023KJ275);山东航空学院博士学位人员及具有硕士学位的高级职称人员科研启动费项目(2018Y21)

第一作者简介:郭瑞超(1989—),男,山东泰安人,副教授,博士,主要从事铝合金塑性成形工艺研究。

E-mail: ytgrc@163.com

过程中的均匀化传热尤为重要。而喷淋淬火作为一种先进的可控快冷技术,改善了传统浸入式淬火容易造成材料不均匀冷却状态和应力分布^[10-11],为改善因接触淬火液时间不同而造成的轮毂残余应力较大问题提供了一种新思路。本文首先利用 AutoCAD 三维建模软件建立轮毂喷淋淬火装置,随后基于 ABAQUS 有限元分析软件,利用热传导分析功能,分别求解轮毂在喷淋淬火和传统池浴淬火两种不同淬火方式下材料的温度场分布。在此基础上,结合材料的力学性能参数,进行顺序热-力耦合模拟,获取并分析轮毂淬火的应力场分布规律,揭示形成机理,以便为轻量化轮毂喷淋淬火工艺制定提供理论依据。

1 轮毂喷淋淬火装置主要部件设计

典型轮毂结构主要包括轮缘、轮辐、轮辋、轮心、法兰等。本文选取某铝合金轮毂作为研究对象,其材料为 6061 铝合金。喷淋淬火装置主要是在辊底式淬火炉中^[11]进行,其在上下两侧布置了若干喷嘴,对辊道上的待淬火部件进行双面喷淋淬火,可以实现对内外轮辋以及上下轮辐的同步均匀淬火热处理,其整体设计如图 1 所示。固溶完毕的轮毂按照轮辐在下、开口向上的布置方式进入输送辊道,轮毂行进至该输送辊道中部时,输送辊道停止工作。电机带动传动盘转动,输出杆通过输入杆带动阻挡柱转动,使阻挡块升起对轮毂进行限位。在辊底式淬火炉上、下腔体分别布置喷嘴纵向位移调节机构,该机构由伺服电机、减速器、联轴器传递至相互啮合的齿轮-齿条副,齿轮-齿条副的转动带动与之配合的喷嘴完成纵向位移调节。喷嘴为在圆周方向互为 120°的三喷嘴以向下/上垂直喷淋方式完成对轮辋内、外圈以及轮辐上、下表面的完整喷淋。充分考虑不同直径轮毂喷淋情况,在底部布置对中调节机构,通过电机、减速器、联轴器带动齿轮-齿条移动,使与之配合的滑座在滑轨中精确移动,实现上、下喷嘴机构沿横向精确微调。为保证换产时不同直径的轮毂上、下环形三喷嘴能够完全覆盖轮辋内外圈表面,设置喷嘴沿径向的调节机构,该机构通过螺纹副及平面连杆机构配合,螺纹副的拧转带动连杆及其固连的喷嘴在径向方向的移动。

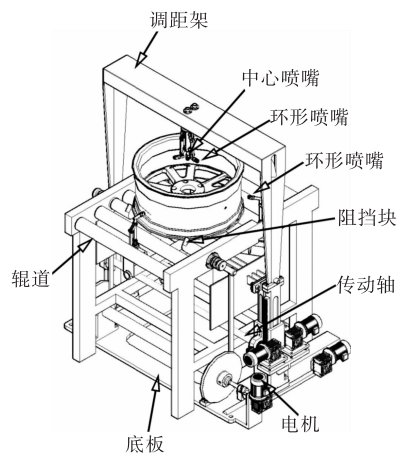


图 1 轮毂喷淋淬火装置整体设计图

2 轮毂淬火残余应力数值模拟

2.1 轮毂尺寸及材料参数

本文主要分析池浴淬火与喷淋淬火温度传递以及残余应力分布的不同,所以使用简化后的轮毂进行对比以提高仿真质量,避免因轮辐过于复杂导致网格划分不均,从而导致结果错误等问题。将材料视为各向同性且均匀连续介质,应用 Mises 各向同性屈服准则,约束零件中心部位的节点,以避免刚体运动。轮毂简化模型如图 2 所示。

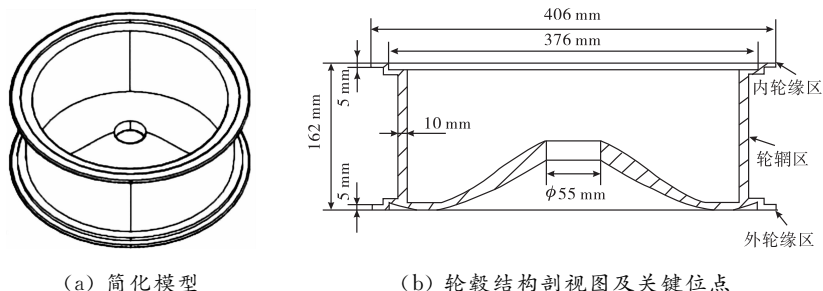


图 2 简化模型与轮毂结构剖视图及关键位点

6061 铝合金热物性能^[12]:热导率为 $180 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$,密度为 $2780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比热容为 $896 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$,

热膨胀系数为 $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 弹性模量为 40 GPa, 泊松比为 0.35。6061 铝合金在 24 $^\circ\text{C}$ 、100 $^\circ\text{C}$ 、150 $^\circ\text{C}$ 、200 $^\circ\text{C}$ 、260 $^\circ\text{C}$ 、316 $^\circ\text{C}$ 和 371 $^\circ\text{C}$ 下的屈服强度分别为 276 MPa、262 MPa、214 MPa、105 MPa、34 MPa、19 MPa 和 12 MPa^[12]。

2.2 温度场模拟结果与分析

运用 ABAQUS 有限元分析软件并采用顺序耦合法进行模拟计算, 首先建立热传递模型求解温度场, 为提高热传递模拟精度, 采用 20 结点二次传热六面体单元 (DC3D20)。淬火时淬火介质 (水) 与轮毂表面对流换热, 相互作用模块选择热传递, 初始温度场设为 500 $^\circ\text{C}$, 淬火介质温度设为 20 $^\circ\text{C}$ 。设置材料的密度、比热、导热率和换热系数, 材料与水的换热系数如表 1 所示。

表 1 材料与水的换热系数^[13-14]

温度/ $^\circ\text{C}$	喷淋换热系数 $/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	池浴换热系数 $/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	温度/ $^\circ\text{C}$	喷淋换热系数 $/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	池浴换热系数 $/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
90	37.00	1.50	340	5.93	24.90
150	35.60	3.92	370	3.97	20.30
210	20.90	7.92	430	1.47	13.90
270	11.70	20.90	460	0.63	11.60

采用 20 $^\circ\text{C}$ 水作为介质的喷淋淬火温度场模拟。基于淬火过程阶段划分情况, 1 s、3 s、10 s 及淬火结束时的温度场云图如图 3 所示。

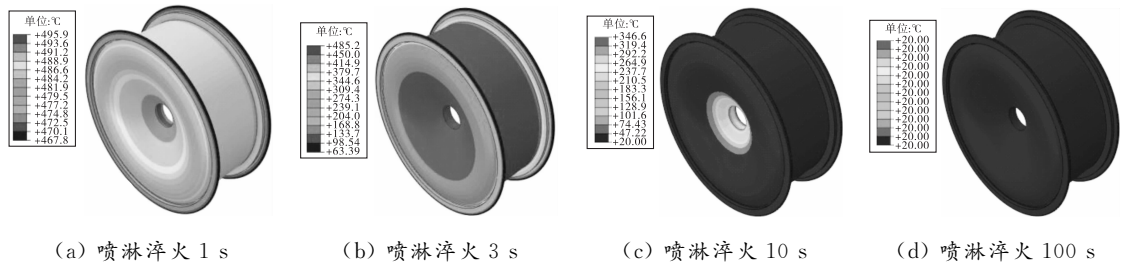


图 3 喷淋淬火时不同时刻温度场分布云图

由图 3(a)可知, 淬火 1 s 时, 轮毂温度分布基本一致, 此时轮毂轮缘处温度最低 (约 468 $^\circ\text{C}$)、轮毂轮心部位温度最高 (约 496 $^\circ\text{C}$)。这是因为工件处于蒸汽膜冷却阶段, 淬火介质接触工件表面受热发生汽化并立即在其表面形成一层蒸汽膜, 这层蒸汽膜的导热率很低。随着淬火的继续, 淬火 3 s 时, 温度在轮毂轮缘处依然最低 (约 63 $^\circ\text{C}$), 而在轮心处温度稍有减小 (约 482 $^\circ\text{C}$) (图 3(b))。轮缘结构简单, 厚度较薄, 降温较快。淬火 10 s 时, 工件淬火进入沸腾冷却阶段, 此时工件与淬火介质直接接触, 温度迅速下降, 除轮心处温度在 130 $^\circ\text{C}$ 左右, 其余部分皆降温至 30 $^\circ\text{C}$ 左右 (图 3(c))。最终在淬火 100 s 时, 轮毂温度分布与淬火介质温度相一致 (图 3(d))。

选取轮毂高度方向上, 内轮缘区、轮辋区、外轮缘区 (图 2(a)) 的 3 个特征点, 做出 3 个特征点的温度随时间变化曲线 (图 4)。由图 4 可知, 轮毂 3 个特征点温度呈现线性降低趋势, 于开始后 7 s 完成淬火。在喷淋淬火阶段, 3 个特征点温度降低的趋势相似, 都呈现出“缓慢-迅速-缓慢”的特征。位于内轮缘区的特征点降温非常迅速, 降温集中在 2~3 s。轮辋区和外轮缘区降温速度接近, 轮辋区降温稍快一些, 这是由于轮缘厚度较轮辋更大一

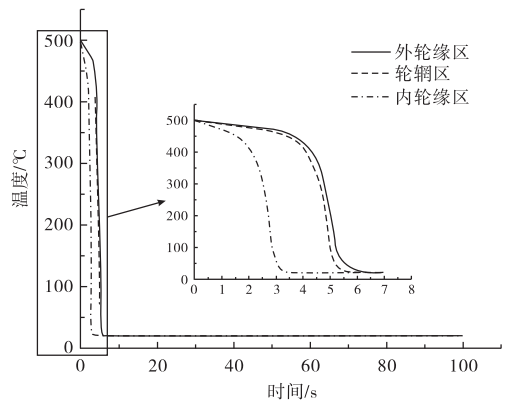


图 4 喷淋淬火不同特征点处的降温曲线图

些。二者快速降温时间区间集中在 4~5 s。

池浴淬火时的温度场模拟除接触条件与喷淋淬火不同之外,其他模拟步骤皆相同。池浴淬火时设置两个换热接触条件,第一个接触条件为淬火介质和轮毂之间的换热,换热系数随温度变化;第二个接触条件为轮毂在空气中的散热,设置换热系数为 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。假设池浴淬火时轮毂的入水过程为轮辐面先进入水中,随着时间的推移,轮毂逐渐全部进入水中。基于淬火过程阶段划分情况,1 s、3 s、10 s 及淬火结束时的温度场云图如图 5 所示。

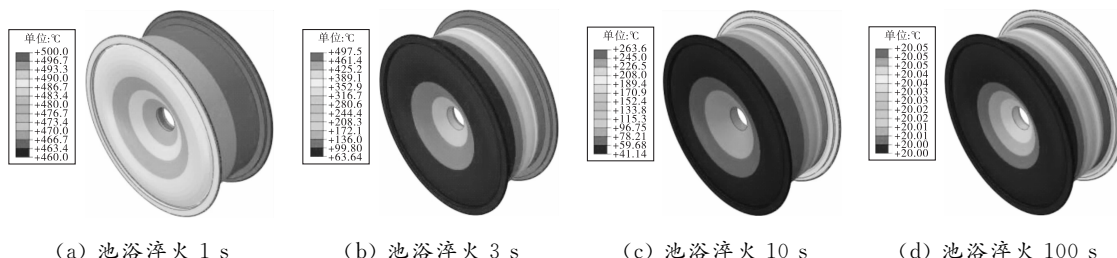


图 5 池浴淬火时不同时刻温度场分布云图

由图 5(a)可知,淬火 1 s 时,由于轮毂未全部进入淬火液中,所以轮辐处温度稍有降低,外轮缘区温度降低最快(约 $460 \text{ }^\circ\text{C}$),其余入水部分温度均匀(约 $468 \text{ }^\circ\text{C}$),而未入水的轮辐区温度几乎没有变化(约 $498 \text{ }^\circ\text{C}$)。淬火 3 s 时,温度在轮毂外轮缘区迅速降温(约 $63 \text{ }^\circ\text{C}$),而轮心处也迅速降温(约 $200 \text{ }^\circ\text{C}$) (图 5(b))。淬火 10 s 时,轮毂最早入水部分温度迅速降低(约 $65 \text{ }^\circ\text{C}$),而外轮缘区已经降温至 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右(图 5(c)),最后入水的部分温度在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。最终在淬火 100 s 时,轮毂温度分布与淬火介质温度相一致(图 5(d))。轮毂内轮缘区、轮辐区、外轮缘区的 3 个特征点冷却曲线(图 6)。由图 6 可知,轮毂 3 个特征点温度呈现降低趋势,于开始后 45 s 完成淬火。在池浴淬火阶段,外轮缘区和轮辐区温度变化趋势相似,而内轮缘区由于未入水,特征点处的温度在前期一直保持较高。不同于喷淋淬火的是,在池浴淬火时外轮缘区降温速度较轮辐区要快,这是接触淬火介质的先后时间不同导致的。外轮缘区的降温集中在 1 s 左右,而轮辐区的降温集中在 2 s 左右,位于内轮缘区的特征点降温集中在 6 s 左右。

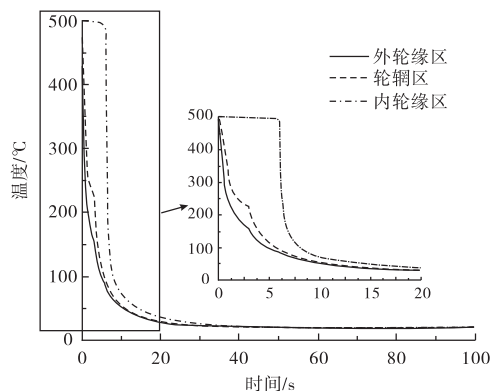
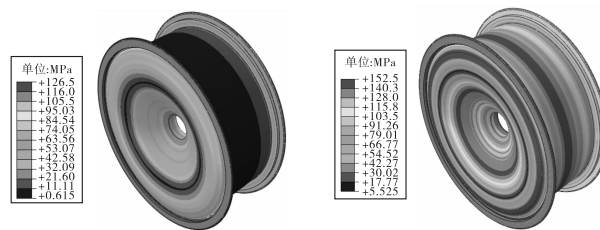


图 6 池浴淬火不同特征点处的降温曲线图

2.3 应力场模拟结果与分析

轮毂喷淋淬火与池浴淬火时残余应力分布模拟结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,经喷淋淬火后的轮毂各部分残余应力分布特征明显,轮辐部分残余应力分布范围为 $11 \sim 53 \text{ MPa}$,其内表面靠近轮心处最大,为 53 MPa 。轮辐区应力分布非常均匀,大部分为 $0.6 \sim 11 \text{ MPa}$ 。外轮缘区残余应力非常大,为 126 MPa 。由图 7(b)可知,池浴淬火后的轮毂各部分应力分布差异较大,这与池浴淬火时轮毂表面无法同时接触到淬火液有关。轮辐中心处以及边缘残余应力较中间部分小,分布范围为 $5.5 \sim 152.5 \text{ MPa}$,其边缘部位最小,为 5.5 MPa 。轮辐区残余应力大致呈环状对称分布,分布范围为 $5.5 \sim 103.5 \text{ MPa}$,其中间部位最小,为 5.5 MPa 。外轮缘区残余应力非常大,为 152 MPa 。



(a) 喷淋淬火时的残余应力 (b) 池浴淬火时的残余应力

图 7 轮毂面内残余应力分布

轮辐中心处以及边缘残余应力较中间部分小,分布范围为 $5.5 \sim 152.5 \text{ MPa}$,其边缘部位最小,为 5.5 MPa 。轮辐区残余应力大致呈环状对称分布,分布范围为 $5.5 \sim 103.5 \text{ MPa}$,其中间部位最小,为 5.5 MPa 。外轮缘区残余应力非常大,为 152 MPa 。

为进一步研究轮辐、轮辋残余应力演化,选取轮辐底部由中心部位沿径向向外至轮辐边缘路径和轮辋区由外轮缘区一侧沿轴向至内轮缘区一侧路径,分别做出喷淋淬火与池浴淬火截面特征点残余应力随路径演变曲线,如图8所示。由图8可知,两种淬火方式下轮辋区残余应力基本呈对称分布。采用喷淋淬火的轮辋区由外轮缘区一侧沿轴向至内轮缘区一侧路径产生的残余应力大多分布在0.5~15 MPa;在轮辐底部由轮辐中心到轮辐边缘路径产生的残余应力整体呈先上升、后下降的趋势,在接近边缘处局部呈上升趋势,大多分布在30~55 MPa(图8(a))。采用池浴淬火的轮辋区由外轮缘区一侧沿轴向至内轮缘区一侧路径产生的残余应力大多分布在24~80 MPa;在轮辐底部由轮辐中心到轮辐边缘路径产生的残余应力与喷淋淬火的残余应力分布相似,但最高残余应力数值为喷淋淬火最高数值的2倍,池浴淬火产生的残余应力大多分布在70~140 MPa(图8(b))。相比于传统池浴淬火,采用喷淋淬火方法可以有效降低残余应力,并且在轮辐底部和轮辋区,截面残余应力分布更加均匀、数值更小。这将有效改善由于残余应力分布不均及残余应力过大而造成的轮毂变形问题,提升淬火过程成品率。

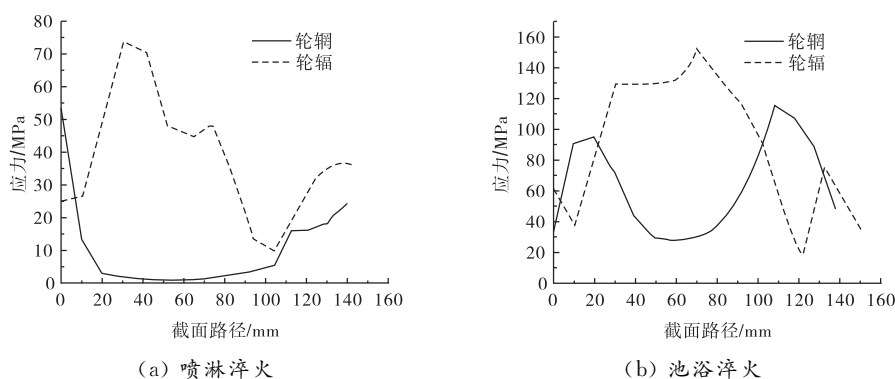


图8 轮辐、轮辋截面特征点残余应力随路径演变曲线

3 结论

针对传统的池浴淬火方式容易造成残余应力过大致使淬火成品率低、增加生产成本的问题,提出喷淋式淬火方法,并通过有限元数值模拟分析得到如下结论。(1) 轮毂喷淋淬火时,淬火不均匀主要分布在轮辐区,其中靠近内轮缘区一侧冷却最快,轮心区域冷却最慢,淬火时间约为7 s;池浴淬火时,受入水方向的影响,淬火不均匀主要分布在轮辋区,其中靠近外轮缘区一侧冷却最快,其他部分冷却较慢,淬火时间约为45 s。(2) 对比两种淬火方式下轮毂的残余应力分布情况发现,轮辋区的残余应力皆呈环状对称分布,其中喷淋淬火下轮毂的残余应力较池浴淬火下的残余应力分布更加均匀,内、外轮缘区的残余应力数值皆较高,二者为同一数量级,数值接近。两种淬火方式下轮辋区的残余应力分布差异较大,从残余应力数值上看,喷淋淬火较池浴淬火低一个数量级。(3) 不同淬火方式的效果出现较大差别,模型能对轮毂淬火过程的温度场和应力场进行较为准确的模拟计算,对轮毂淬火工艺的制定有重要的价值和指导意义。

参考文献:

- [1] ZHANG W, XU J. Advanced lightweight materials for automobiles: a review[J]. Materials & design, 2022, 221: 110994.
- [2] 侯世忠. 汽车用铝合金的研究与应用[J]. 铝加工, 2019, 251(6): 8-13.
- [3] 周振, 卢德宏, 李贞明, 等. 低压铸造铝合金轮毂的研究现状[J]. 中国铸造装备与技术, 2022(2): 58-64.
- [4] 丁向群, 何国求, 陈成澍, 等. 6000系汽车车用铝合金的研究应用进展[J]. 材料科学与工程学报, 2005(2): 302-305.
- [5] 韩云, 刘维洲, 张旭东, 等. 固溶和时效处理对6061铝合金轮毂力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 228-231.

- [6] 池慧,燕猛,项鹏飞,等. 轻质铝合金轮毂分级淬火形性调控策略[J]. 中国机械工程,2023(10):1214-1219.
- [7] 赵旺初,徐新成,张亚龙,等. 铝合金汽车轮毂淬火过程温度场有限元分析[J]. 热加工工艺,2015,44(6):155-158.
- [8] 宋金升,张文良,李贤君,等. 锻造铝合金轮毂动态淬火过程的数值模拟[J]. 金属热处理,2019,44(10):213-218.
- [9] 白帮伟,武汉琦,吴群虎,等. 轮毂热处理变形行为探究[J]. 铸造,2016,65(10):990-994.
- [10] 张新明,邓运来,张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报,2015(3):257-271.
- [11] 邓运来,张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报,2019,29(9):2115-2141.
- [12] WANG M J, YANG G, HUANG C Q, et al. Simulation of temperature and stress in 6061 aluminum alloy during online quenching process[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2014, 24(7): 2168-2173.
- [13] 赵小莲,张珂星,刘东,等. 7050 铝合金超厚板喷淋淬火的数值模拟分析[J]. 热加工工艺,2021,50(14):135-138.
- [14] 杨夏炜. 铝合金大型复杂构件热处理过程的多场耦合模型与变形预报[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

Design of Wheel Hub Spray Device and Numerical Simulation of Quenching Process

GUO Ruichao^{1,2}, BI Jiacheng^{1,2}, LIANG Dandan^{1,2}, GAO Xiaobo³,

(1. School of Aeronautical Engineering, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256603, China;

2. Shandong Engineering Research Center of Aeronautical Materials and Devices, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256603, China;

3. Binzhou Bohai Piston Co. Ltd., Binzhou 256600, China)

Abstract: Heat treatment is an important process in the wheel manufacturing process. The pool bath quenching method widely used at present is easy to cause large residual stress in the wheel hub and increase the production cost. In order to solve the problem of quenching method, a new spray quenching method is put forward, which can make the surface of the wheel uniformly contact the quenching liquid at the same time, starting from the problem that the residual stress is too large due to the different time of the traditional pool quenching method. Firstly, the wheel hub spray device is designed with AutoCAD 3D modeling software. Then, based on ABAQUS finite element analysis software, the temperature field and stress field distribution of the 6061 aluminum alloy wheel under spray quenching and pool bath quenching are solved by using the sequential heat-force coupling method and combining the heat transfer coefficient, thermal matter and mechanical property parameters of the material. The results of finite element numerical simulation show that the distribution uniformity of the temperature field during hub spray quenching is better than that during pool quenching, and the residual stress value of each part of the hub after spray quenching is smaller than that after pool quenching.

Keywords: hub; spray quenching; bath quenching; numerical simulation; residual stress

(责任编辑:王新亮)

引用格式 郭瑞超,毕嘉成,梁丹丹,等. 轮毂喷淋装置设计与淬火过程数值模拟[J]. 山东航空学院学报,2024,41(3):47-52.
GUO R C, BI J C, LIANG D D, et al. Design of wheel hub spray device and numerical simulation of quenching process[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2024, 41(3): 47-52.