热处理工艺优化对提升汽车横拉杆臂内在质量的研究

潘星屹，范围，刘晓艺，李明辉，李克鲁，冯超，齐羿

中国重型汽车集团有限公司　山东济南　250000

摘要：对汽车横拉杆臂的热处理工艺优化，主要提高淬火温度至860℃以上，并对网带式热处理连续线的淬火冷却系统进行改进，重点提升淬火油在冷却系统中的淬火冷却性能，通过介质冷却特性、显微组织、硬度及拉伸性能等试验，结合XRD分析，研究淬火工艺优化对汽车横拉杆臂内在质量提升的影响和效果。经研究，改进后，淬火油在实际生产中的淬火冷却性能得到明显提升，淬火冷却过程也更加均匀稳定；调质后的横拉杆臂回火组织等级由4~5级提高到3级，淬火硬度值提高约3.5%，回火硬度值提高约2.9%，抗拉强度值提高约6.2%，最终产品的不合格比例降低5%，证明淬火工艺优化对提高和改善汽车横拉杆臂的内在组织和性能效果显著。

关键词：热处理工艺；横拉杆臂；内在质量

横拉杆臂安装在汽车横拉杆端部，是汽车转向系统中的重要组成部分，作为汽车结构保安件，横拉杆臂在工作过程中受力情况复杂，因此，其使用安全性要求非常严格。横拉杆臂属于长轴线带落差型锻件，为了获得良好的性能和质量，行业内常选用优质合金钢作为其制造材料，常采用锻造与热处理的组合工艺模式进行批量生产。其中，热处理作为关键生产工艺之一，对横拉杆臂获得高性能、高质量起到重要的作用[1]。常采用调质工艺，即淬火及高温回火[2]，其中淬火作为核心工艺步骤之一，合理的工艺设计和冷却系统布局，是保证横拉杆臂不仅可以得到良好的显微组织和拉伸性能，而且可以有效避免淬火开裂和组织畸变、提升产品内在质量、降低不合格率的重要因素[3]。

国内某知名重型货车制造商的多种型号汽车横拉杆臂的选材用42CrMo钢（见图1），作为优质中碳合金钢，其可满足汽车横拉杆臂的选材性能需求，并采用热模锻－调质－探伤－机加工的工艺模式进行量产制造。在实际生产过程中发现，调质后的汽车横拉杆臂出现显微组织等级低、拉伸强度值低、回火硬度值无法满足工艺要求等质量问题。经初步分析，主要判断为淬火冷却过程不均匀、不稳定，导致产品质量不佳。因此，本文主要通过介质冷却特性、显微组织、硬度及拉伸性能等试验，结合XRD衍射图谱分析，研究淬火工艺的优化对汽车横拉杆臂组织与性能的影响，从而寻求提升产品内在质量、降低不合格品比例的热处理技术路线。



图1　横拉杆臂毛坯

试验材料与方法

1.试验材料

采用42CrMo钢、ϕ60mm圆钢料，化学成分见表1。

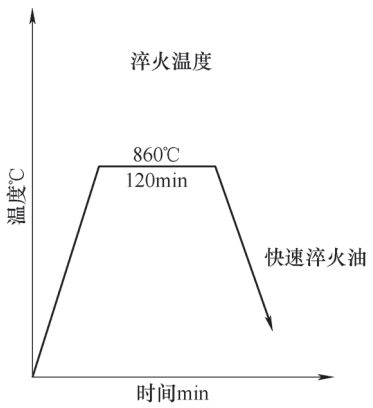
表1　42CrMo圆钢料主要化学成分　（质量分数：%）

化学成分	C	Si	Mn	Cr	Mo
B/T3077—2015	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.90~1.20	0.15~0.25
检测值	0.42	0.25	0.69	1.12	0.21

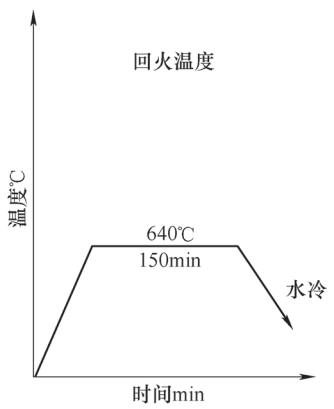
2.试验方法

选用网带式热处理连续炉生产线，自动化程度高、控温精准，可完整记录生产工艺过程，主要包括淬火炉、冷却系统、回火炉及回火冷却系统，设计热处理产能约1 t/h，其中额定淬火炉功率380 kW、回火炉额定功率460 kW。42CrMo作为亚共析钢，在加热和保温过程中需考虑合金元素对奥氏体形成过程的延缓影响。随着合金元素的溶解和再分配，部分合金元素会与碳形成较稳定的碳化物，从而延缓溶入奥氏体，同时考虑扩散激活能的提高、自身不易均匀化等诸多因素，淬火温度需要适当提高，从而充分发挥合金化作用，因此，淬火温度选择应在AC_3+（30~50）℃，以保证铁素体能够全部转变为奥氏体，获得全部细晶粒，淬火后得到理想的马氏体组织。

因此，综合考虑到工艺指标要求（调质后显微组织1~4级，抗拉强度R_m=880~1030N/mm^2，淬火布氏硬度压痕直径2.5~2.8mm，回火布氏硬度压痕直径3.49~3.75mm）并结合实际生产资源，横拉杆臂的调质工艺为：淬火温度860℃，淬火120min（包括加热和保温时间），回火温度640℃，回火150min（包括加热和保温时间），选用快速淬火油作为淬火介质，热处理工艺路线如图2所示。



a）淬火温度



b）回火温度

图2　42CrMo钢在860℃淬火、640℃回火条件下热处理工艺路线

对于热处理工艺优化，主要包括淬火温度提高和淬火冷却系统改进。其中：

1）淬火温度由840℃提高到860℃。适当地提高淬火温度，在奥氏体晶粒长大不明显的情况下，由于碳化物溶解加速，奥氏体中的含碳量及合金元素量得到增加，淬火后的硬度得到提升，回火过程中析出弥散细小的碳化物，这种组织有利于提高横拉杆臂的拉伸性能和回火稳定性，从而提升产品内在质量。

2）对于冷却系统改进，经分析，系统外循环管路为ϕ100 mm，连接板式换热器，管路长、弯角多、淬火介质流动慢且与外界热交换能力不足；淬火池内死角多，淬火介质流动时出现紊流和淤堵；淬火搅拌主要依靠液面下方喷射管路系统，安装位置距离工件入淬位置较远，搅拌能力不足。制定改进方案如下：优化外循环管路，尺寸由ϕ100 mm 增大到ϕ125mm，

减少管路折弯，改进外循环泵为IHG125-160B，增大输送功率；外循环换热器改进为螺旋散热器，型号为KLS1.6-50-1.0/1200-14-D，板间距较大，可达14 mm，保证油污淤泥和细小氧化皮等有效通过，减少堵塞，换热器板散热面积可达50m^2；改进淬火池内循环管路，将经外循环冷却后的淬火介质能够直接达到工件淬火有效区域，减少紊流和淤堵；搅拌系统改进为双叶片涡流搅拌机构，型号AB5.5型，桨叶层数2层，功率5.5kW，搅拌器外径400mm，转数533r/min，搅拌方式由原来的两侧横向喷射改进为垂直方向（工件上方一定距离）搅拌，有效提高淬火池内的内循环流速和淬火搅拌能力。

（1）冷却特性试验　采用KHR-A型便携式冷却介质性能检测仪，其主要技术参数为：温度测量范围0~1200℃；冷速测量范围0~2000℃/s；测量温度精度±1℃；最大冷速±5%；最大冷速所在温度±5%；电源电压220V；采样速度最大1000次/s；修正系数0.5~1.5；加热电炉功率1200 W。测温采用NiCr-NiSi铠装热电偶，参考标准JB/T 7951—2004《测定工业淬火油冷却性能的镍合金探头实验方法》，设定修正系数1.205、工艺优化后淬火温度设定为860℃，获得冷却能力曲线图。

（2）硬度试验　采用HBE-1型液压布氏快打硬度计进行硬度检测，选用直径10mm硬质合金钢球压头，载荷控制在35 000N，加载控制试验力保持时间3s，压痕中心至试件边缘的距离应不小于压痕直径的2.5倍，两压痕中心相邻距离应不小于压痕直径的4倍。每个试样检测3个硬度值，取平均值。

（3）显微组织观察和XRD分析　采用GX40型显微镜观察显微组织。显微试样的制备：GB4250C龙门卧式带锯床取样、磨样、抛光、浸蚀、酒精棉球清洗、吹风机烘干及组织观察。用显微镜采集系统观察至清晰的组织（500×）并照相分析。浸蚀剂：体积分数为5%的硝酸酒精；浸蚀时间15~25s。

XRD分析采用德国布鲁克公司的D8 Advance型X射线衍射仪，配有多导管加准直管的光路系统和LynxEye一维列阵探测器，采用Co靶Kα辐射，电压35kV，电流40mA。XRD分析采用耦合扫描模式。

（4）拉伸性能试验　拉伸性能试验在WDW-300e微机控制电子式万能试验机上进行，试样尺寸根据GB/T228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》制备，试样检测抗拉强度R_m。

试验与结果分析

1.冷却特性分析

淬火冷却时长设定60 s，淬火油温度控制在50℃，共分为两组。第一组为淬火工艺优化前（以下简称改进前）的冷却性能曲线，淬火起始温度按照原工艺设定为840℃。第二组为淬火工艺优化后（以下简称改进后）的冷却性能曲线，淬火起始温度设定为860℃，如图3所示。

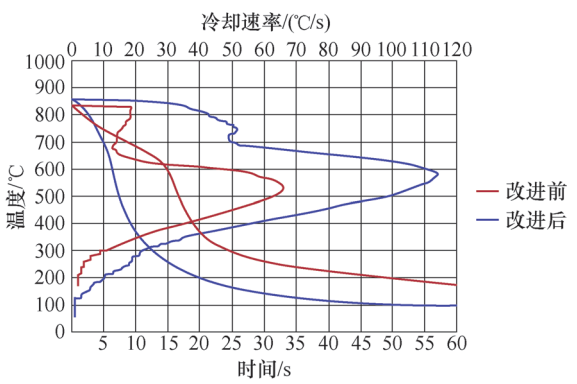


图3　改进前后的淬火油冷却曲线对比

冷却系统容积约26.4m³，改进前，使用LS1206B型旋桨式流速仪测定，当内外循环系完全开启状态时淬火油流速在0.3～0.5m/s。改进后，相同客观条件下淬火油流速在0.6～0.9m/s。改进后冷却系统内的淬火油流动速度明显加快，说明冷却系统的淬火冷却能力得到提升，为工件获得更好的淬火质量提供了保障。

图3中，改进前的淬火油冷却曲线表示为红色，改进后的淬火油冷却曲线表示为蓝色。每组试验均得到两条曲线，左侧线为冷却温度变化曲线、右侧线为冷速变化曲线，两条曲线的组合能够直观准确地反馈出不同冷却阶段的冷却能力变化。最佳的淬火冷却模式是短蒸汽膜时间、高沸腾阶段冷却速率、缓对流阶段冷却速率[4]。冷却温度变化曲线应表现为开始短时平缓，随后斜率激增，进入快速下降，最后进入曲线渐缓直至趋于稳定平行；而冷却速度变化曲线也随之呈现速度由慢逐渐增快直至达到峰值冷却速度（即最大冷却速度）后，逐渐减慢至0℃/s。也就是说，冷却温度变化曲线表现越靠左、冷却速度变化曲线表现越靠

右，证明淬火介质的冷却能力越强。经改进前和改进后的冷却曲线对比，无论冷却温度变化曲线还是最大冷速变化曲线，改进后的淬火油冷却能力均优于改进前，说明改进对于提升淬火油冷却能力的表现效果显著。

2.硬度分析

硬度试验包括淬火硬度检测和回火硬度检测，共分为两组，每组包括淬火后状态试样20件、回火后状态试样20件。第一组为改进前淬火硬度及回火硬度的压痕直径数据，第二组为改进后淬火硬度及回火硬度的压痕直径数据（见图4、图5及表2）。

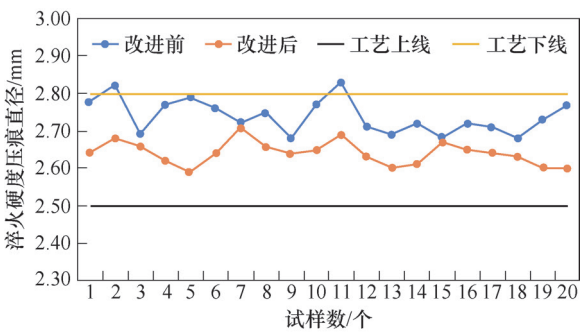


图4　改进前后的淬火硬度压痕直径分布

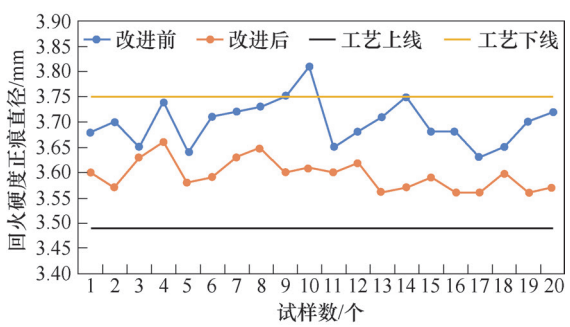


图5　改进前后的回火硬度压痕直径分布

1）对淬火硬度压痕直径数据分析，改进后的均值和中位数值均小于改进前数值，说明改进后的淬火硬度水平整体得到提升；同时，改进后的标准差更小，说明淬火硬度离散和波动变小，淬火质量更均匀，淬火过程更稳定。

2）对回火硬度压痕直径数据分析，改进后的均值和中位数均小于改进前数值，标准差同样更小，说明在相同回火条件下，由于淬火质量得到提升，调质后的回火质量也随之得到改善，回火硬度整体分布由原处于工艺下线区间甚至部分超出工艺要求，优化至均处于工艺中上线区间分布。根据原始数据，改进前试样的淬火硬度工艺合格率90%、回火硬度工艺合格率95%；改进后试样的淬火及回火硬度工艺合格率均达到100%，同时，淬火硬度值提高约3.5%、回火硬度值提高约2.9%，产品质量提升明显。

3.显微组织观察和XRD分析

（1）显微组织观察　分为淬火显微组织和回火显微组织。

1）淬火显微组织，淬火后距离试样边部10 mm处淬火组织形貌如图6所示，分别为改进前和改进后的显微镜500 × 下的显微组织。以足够快的冷却速度使奥氏体过冷到低温范围内的一定温度以下将转变为马氏体，一般中高碳钢马氏体相变时没有出现碳的扩散，42CrMo钢淬火后应具有条状马氏体和片层状马氏体的混合组织。

经分析，改进前和改进后的汽车横拉杆臂淬火后均可得到条状马氏体和块状马氏体的混合组织，其中改进后的马氏体含量明显高于改进前的马氏体含量，说明改进后的淬火冷却能力更强，有利于获得过冷度更大的奥氏体；快速冷却至马氏体转变温度区线，特别在钢的鼻部温度区间冷速较快，有效避免过冷奥氏

表2　42CrMo钢的淬火及回火硬度压痕直径数据　（单位：mm）

淬火硬度压痕直径					回火硬度压痕直径				
分组	试样数	均值	标准差	中位数	分组	试验数	均值	标准差	中位数
改进前	20	2.736 8	0.046 9	2.720 0	改进前	20	3.703 2	0.011 9	3.700 0
改进后	20	2.642 6	0.031 6	2.640 0	改进后	20	3.596 8	0.007 1	3.600 0

体的分解，因此，得到的淬火组织马氏体含量更高，更有利于高温回火后得到理想状态的回火索氏体组织和回火硬度值。



a）改进前

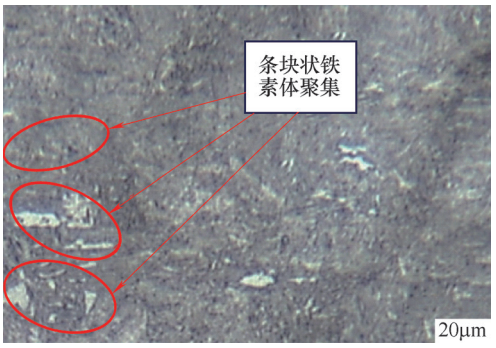


b）改进后

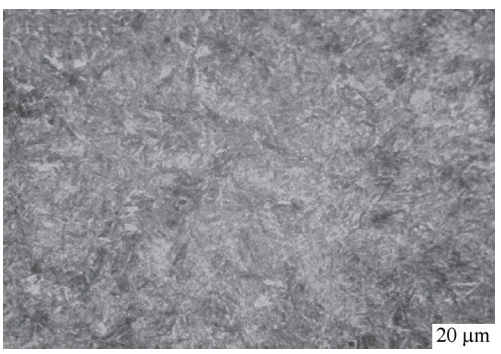
图6　42CrMo钢的淬火显微组织

2）回火显微组织，回火后距离试样边部10mm处回火组织形貌如图7所示，分别为改进前和改进后的显微镜500×下的显微组织。经分析，改进前的试样回火显微组织中存在较多块条状铁素体且部分聚集，说明淬火冷却过程不均匀一致，淬火质量不佳，导致较多条块状铁素体存在，根据GB/T 13320—2007《钢质模锻件显微组织评级图及评定方法》判断，显微4~5级；改进后的试样回火显微组织中球状渗碳体更均匀细化，铁素体含量更低，整体均匀性更好，判断显微组织3级。通过改进，横拉杆臂在淬火冷却过程中奥氏体化程度更高，有效避免残留奥氏体以及异常组织的产生，淬火质量水平更好，在相同640℃高温回火后，得到的回火索氏体组织更均匀、细密，显微组织等级更高，产品内在质量得到明显提升。

（2）回火XRD分析　X射线衍射（XRD）是进行物相分析的常用手段，其原理决定了主要用于物相的定性鉴别[5]。共分为两组，每组抽取1件试样进行回火XRD分析，如图8所示，分别为改进前和改进后的X射

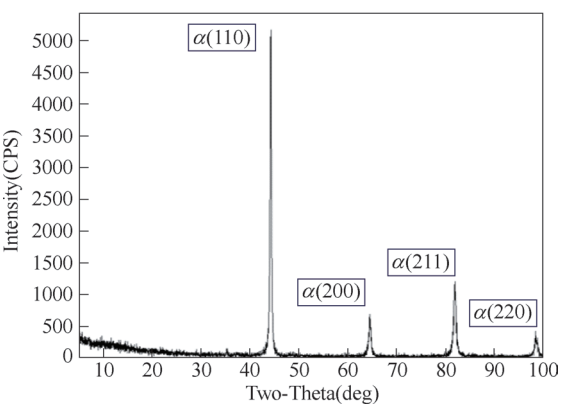


a）改进前

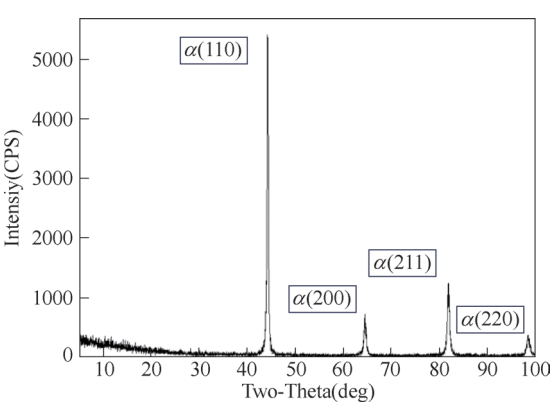


b）改进后

图7　42CrMo钢的回火显微组织



a）改进前



b）改进后

图8　42CrMo钢的回火X射线衍射图谱

线衍射图谱。

经分析，改进前和改进后对的X射线衍射图谱中显示全部为铁素体峰，没有碳化物峰。改造前和改造后的试样经过油淬冷却及高温回火后得到的显微组织主要为回火索氏体，无明显其他异常组织存在。由于回火索氏体中碳化物含量较少，XRD衍射峰并没有表示出来，也印证了显微组织观察的准确性。

4.拉伸性能分析

共分为两组，每组抽取2件试样进行拉伸性能试验。第一组为改进前抗拉强度数据，第二组为改进后抗拉强度数据，见表3。

表3　42CrMo钢的拉伸性能试验数据

分组	试样数	抗拉强度R_m/(N/mm^2)
改进前	2	913/927
改进后	2	983/971

抗拉强度是材料经由均匀塑性变形向局部集中塑性变形过渡时的临界值，简化理解为试样在静拉伸条件下的最大承载能力[6]。抗拉强度即表征材料的最大均匀塑性变形抗力，相对来讲，在一定合理区间内，抗拉强度值增大，则表示材料塑变抗力变大，其使用安全性得到提高。

经分析，改进前和改进后的试样得到的抗拉强度值虽然均能符合工艺要求，但改进前的抗拉强度值处于工艺要求中下线区间，而改进后的抗拉强度值明显提高，平均提高约6.2%，说明通过改进，横拉杆臂的力学性能指标得到了显著改善，产品内在质量更佳，其使用的安全性和可靠性更好。

结语

改进后，淬火油在实际生产中的淬火冷却性能得到明显提升，横拉杆臂的淬火冷却过程也更均匀稳定；改进后，各项重要产品性能指标均得到极大改善和提升，其中：回火显微组织等级由4~5级提高到3级，淬火硬度值提高约3.5%，回火硬度值提高约2.9%，抗拉强度值提高约6.2%；改进后，横拉杆臂最终产品不合格比例降低约5%，证明热处理工艺优化对提升汽车横拉杆臂的内在质量效果显著。

参考文献：

[1] 闫君杰，王强. 汽车用新型低合金高强度钢及其热处理工艺研究[J]. 热加工工艺，2018，47（12）：165-168.

[2] 李冠楠，商志强，李红俊. 调质工艺对汽车大梁钢700L组织性能的影响[J]. 中国冶金，2022，32（4）：41-46，53.

[3] 王广川. 大型锻件淬火开裂及控制[D]. 山东：山东大学，2021.

[4] 董成通，吴博雅，冯思远，等. 冷却介质对40Cr钢汽车前轴淬火过程组织演变及畸变行为的影响[J]. 材料热处理学报，2022，43（9）：12-130.

[5] V.P. Gulyaev，P.P. Petrov，Ksenia V. Stepanova. Changes in the characteristics of the profiles of X-Ray diffraction lines of structural steels in the elastic stress field [J]. Materials Science Forum，2020，5952：992-997.

[6] 樊伟，冯运莉，王宇辰，等. Fe-0.4C-10Mn-4Al系TRIP钢的显微组织与拉伸性能分析[J]. 热加工工艺，2022，51（18）：63-67.

“新时代 新汽车”丨2024北京车展圆满闭幕

以“新时代 新汽车”为主题的2024（第十八届）北京国际汽车展览会（简称“2024北京车展”）于2024年5月4日在北京中国国际展览中心顺义馆圆满闭幕，展会总面积22万m^2。十天期间，中国国际展览中心顺义馆和朝阳馆共吸引观众89.2万人次到场参观。

随着汽车产业变革的加剧，中国新能源及智能网联汽车的发展势不可挡，中国汽车市场存有充分的消费动能，多重因素的加持让2024北京车展呈现出新时代特有的新活力。

2024北京车展吸引了国内外知名汽车品牌携全新产品高规格参展。传统车企根深厚重，新生品牌光彩照人，本届展会参展品牌齐全，继续保持全球领先。展会展出全球首发车117台（其中跨国公司全球首发车30台），概念车41台，新能源车型278个。