汽车控制臂多材料高精控温补偿加热方法研究

朱晓波，朱文峰

同济大学机械与能源工程学院　上海　200000

摘要：汽车转向控制臂是连接转向节和副车架的关键零部件，其球铰链关节的扭矩是影响汽车行驶安全性和舒适性的关键特性。球铰链关节球销的材料为40Cr，球座的材料为POM，臂体的材料为铝、锻钢或者铸铁，每种材料的导热性不同。为了使球铰链关节得到合适的球铰链工作扭矩，需要通过加热使球座发生“蠕变”变形。因此，加热温度的控制在控制臂的制造过程中就显得尤为重要。从感应加热工艺出发，研究了感应加热参数随环境温度变化进行补偿的温度控制方法。通过试验验证，环境温度在-10～40℃变化时，使加热目标温度的波动范围保持在±3℃以内，提高了感应加热温度的稳定性，保证了产品的扭矩特性。此方法极大地提高了加热的效率和温度准确性。

关键词：控制臂；球铰链；蠕变；感应加热；温度补偿；温度控制

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2025.z1.015

控制臂是汽车悬架系统内的重要零部件，而球铰链关节是控制臂上的关键运动副。汽车底盘控制臂工作原理：汽车控制臂是连接车轮和副车架的一个导向机构，对于独立悬架，左右车轮不是用整体式车桥相连接，每侧车轮可单独上下运动[1]。根据导向机构结构不同的特点，控制臂可以分为上控制臂、下承载控制臂和下拉伸控制臂，如图1所示[2]。

球铰链的扭矩直接影响汽车运动的安全性和舒适性。球铰链的旋转扭矩过小，将导致控制臂早期磨损、悬架异响等结果；旋转力矩过大将导致相连运动部件承受过大载荷，导致连接件结构损坏、转向角度和目标值偏移、异响等事故。

因此，为了得到合适的球铰链扭矩，加热温度的控制至关重要：温度过低将无法使球座发生蠕变变形，导致球销运动无法达到合适的扭矩；温度过高，则将会使球座熔化，失去球座承受载荷的功能。因此，传统的烘箱加热方案固然可靠，但是其加热时间长，能源效率非常低。因此，高频感应加热技术的开发对于提高球铰链加热的效率提升至关重要。

以某T型车的上控制臂为例，球铰链结构：控制臂上的球铰链由三部分组成，分别为球销、球座和壳体，如下图2所示[3]。球销的材料为40Cr，球座的材料为聚甲醛，臂体的材料为球磨铸铁。球铰链的关键特性指标是球销的旋转和摆动的力矩，对于这款产品旋转和摆动力矩要求为0.5～3.5N·m[4]。

为了达到其力矩要求，需要在球销装配完成后对

图1　汽车控制臂在汽车底盘上位置

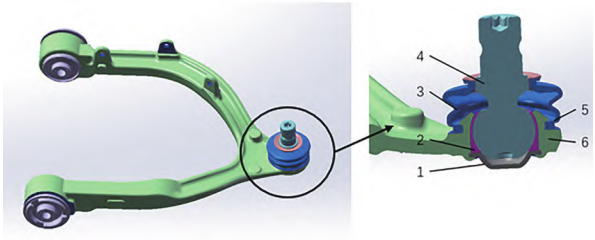

图2　上控制臂总成

1—底盖　2—球座　3—防尘罩　4—球销　5—卡圈　6—臂体

整个球铰链进行加热，消除装配过程中的内应力。传统的加热工艺为烘箱加热，即将需要加热的零件放入烘箱内，设定所需的温度和保温时间，通过电热丝进行加热。由于臂体和球销都是金属材料，所以可以使用高频电磁感应加热的方式对球销和铰链分别进行加热，从而使整个铰链关节受热，实现内应力的去除，达到使用要求的扭矩的目的[5]。

为了实现通过电磁感应加热的精准控制产品温度，并对环境温度的补偿的目标，本文以某T型车的U形上控制臂的为研究对象，设计了一套自动温度补偿系统，包括整体方案、硬件及结构、主要机械硬件单元和控制系统。在不同温度下，对零件感应加热后的温度进行验证，能够实现感应加热的温度控制与补偿，满足实际大批量生产中对加热温度精确、加热速度快及能源效率高的要求。

由于环境温度的不同，被加热工件的初始温度不同，使用相同感应加热功率无法满足被加热物体的最终温度一致性，故对感应加热的温度补偿方法展开研究。工厂车间内，夏天的环境温度在35℃左右，冬天的环境温度为 ，一年之中的环境温度最大差异为30℃左右。对于产品的目标温度需要控制在±5℃内，环境温度的巨大波动将给感应加热的目标温度带来巨大影响。

因此，结合工程理论，利用温度试验方法，建立感应加热功率对环境温度的补偿模型，进行感应加热的温度补偿的研究对于产品力矩特性的稳定有着关键作用。

试验设计方案

本试验方案基于某T型车的U形上控制臂关节的加热工艺，加热的目标温度为120～140℃，根据实际的力矩情况选定所需要的加热温度。为了满足精确、快速、高效且稳定的加热要求，试验的总体方案如下：分别使用不同的功率对零件进行加热，通过分析加热功率和目标温度之间的数学关系，得到在相同环境温度下，目标温度随加热功率的变化关系。由于环境温度会存在差异，在测试时的环境温度需要被记录，并作为温度差异的比较基准，在此基础之上进行功率补偿。

在这个试验中，选择使用K型热电偶进行测温。K型热电偶是由两根不同的金属线组成，通常由镍铬合金作为正极，镍铝合金作为负极，K型热电偶具有灵敏度高、线性度好、稳定性好的特点，能够直接测量0～1300℃的各种温度[6]。

热电偶通过碰焊机焊接在球销上，另外一侧连接测温仪，形成一个闭合回路，热电偶在受到温度影响后两根导线直接会产生热电势差，测温仪通过测量其电压差计算得到温度。碰焊机（见图3）使用是MESSI TL-WELD（S），将热电偶焊接到被测工件上（见图

图3　热电偶碰焊机

4和图5）。测温仪选用的是HOKI LR8431-30（见图6），对球销和臂体的温度进行测量。加热机构及电磁感应加热及控制系统如图7所示。

图4　焊完热电偶的球销

图5　焊完热电偶的臂体

图6　测温仪

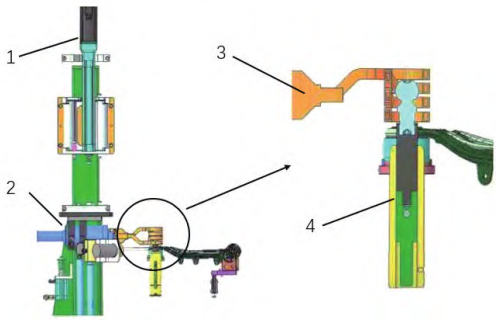

图7 球销感应加热系统

1—线圈上下运动伺服电动机　2—变压器

3—加热线圈　4—球销顶升机构

试验数据

1.加热线圈高度的选定

由于感应线圈的位置直接影响加热的效果，为了达到较好的温度一致性，在球头的顶部、赤道和底部三个位置分别焊接三个热电偶，用以测量三个点的温度，如图8所示。本试验的要求为：在加热完成10s后，这三个测温点的温差需要在5℃以内。在相同加热时间和加热功率的工况下，通过调整线圈高度，使三个点的温度达到要求。在本次试验中，选用的加热时间为7s，加热功率为5%，加热电源的额定功率为40kW，测得数据见表1。

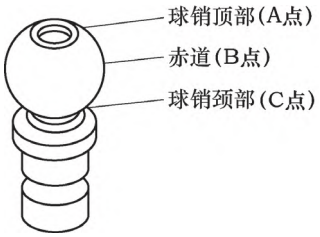

图8　球销三个测温点

表1　不同线圈高度时三个点温度测量结果

伺服位置/mm	A点温度/℃	B点温度/℃	C点温度/℃	温度差/℃
70	154.3	150.5	148.1	6.2
75	150.3	151.8	152.7	2.4
85	148.9	152.3	155.4	6.5

根据测温数据所得，线圈在伺服位置70mm和85mm的位置时，球头上的三个点的温度差均会超过5℃；在75mm的时候，三个点的温度一致性最好，于是选定加热线圈的高度为75mm。

2.加热温度的测定

球头三个点的温度存在一定差异，且球销和球座的装配是在加热完成10s之后完成，于是选择加热完成10s后的球销中间位置的温度作为温度研究的对象。通过图9所示烘箱或者冰箱将球销加热或冷却至一定温度，实现对不同环境温度的模拟，从而测定温度数据，测得数据见表2。

图9　加热烘箱

表2　球销中间位置温度测量结果

序号	起始温度/℃	加热完成后10s的温度/℃	温度差Δ_t/℃	加热功率P/kW
1	15.1	94.2	79.1	3
2	23.0	116.4	93.4	3.5
3	31.0	133.8	102.8	3.8
4	18.6	126.7	108.1	4
5	21.6	135.3	113.7	4.2
6	28.3	149.9	121.6	4.5
7	33.2	169.3	136.1	5

3.加热补偿模型的建立

根据以上数据进行线性拟合，得到温度差-加热功率的关系曲线，如图10所示。

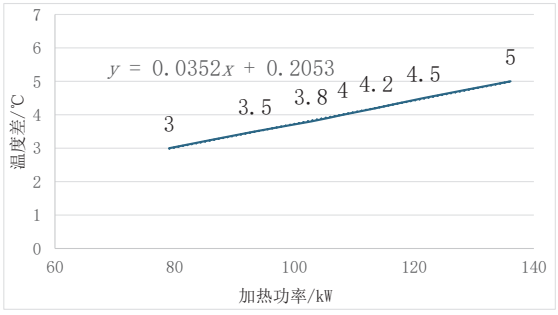

图10　温度差-加热功率关系曲线

根据线性拟合结果，得到公式

$$P=0.0352\Delta_t+0.2053 \quad (1)$$

取0.0352为当前产品的功率因子k；由温度传感器测得的当前实时温度为t；在温度测试的序列内，取球销的起始温度为t_0；加热功率作为其基础功率为P_0；目标温度为T。

通过推导和计算可以得到功率随环境温度的变化公式为

$$P=P_0+k\ (t_0-t) \quad (2)$$

带入功率因子得到实际功率P

$$P=P_0+0.0352\ (t_0-t) \quad (3)$$

目标温度T

$$T=t+\ (P-0.2053)\ /0.0352 \quad (4)$$

P_0和t_0为设定值，在测试数据内选定合适的目标温度，即加热完成10s后的温度作为目标温度。P_0为在测试时加热使用的功率，t_0是在测试时的环境温度。温度传感器将采集到环境温度t发送给PLC，PLC可根据公式自动计算得出实际需要的功率P，然后把功率信号发送给电源控制器，电源控制器根据获得到的信号，进行功率输出，对零件进行加热，实现了通过功率自动补偿环境温度的差异，准确控制了目标温度，如图11所示。

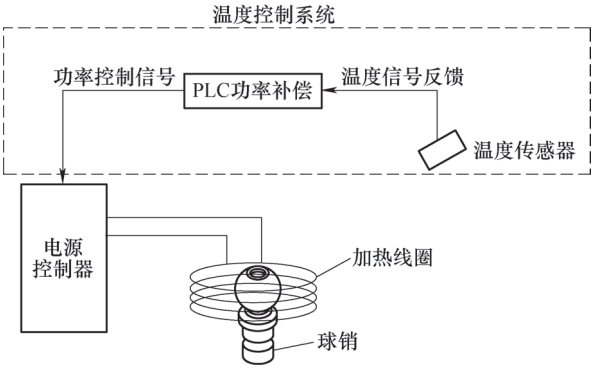

图11　温度补偿控制模型

4.温度验证

使用不同的初始温度进行正常加热和补偿加热对比，数据见表3，温度曲线如图12所示。

在不同的初始温度下，使用因子补偿加热后，加热后温度趋于稳定。

结语

在控制臂的铰链关节处涉及多种材料，为了能够使POM发生稳定的蠕变变形，必须保证关节处温度的

表3　不同初始温度下进行补偿加热测量结果

（单位：℃）

编号	初始温度	加热后温度	加热补偿后温度
1	15	130	141
2	18	135	142
3	16	132	140
4	14	130	141
5	15	131	140
6	24	139	141
7	26	140	140
8	25	140	141
9	25	140	141
10	24	140	142
11	35	150	141
12	34	150	140
13	33	149	141
14	35	150	140
15	36	150	141

稳定性。根据试验所得数据，建立了温度补偿的数学模型，提出了对于在同一位置包含多种材料且不规则

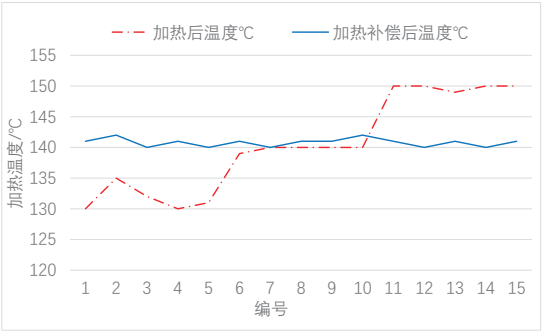

图12　不同初始温度下进行补偿加热后温度曲线

形状在不同环境温度下的加热功率补偿方法，实现了对环境温度的自动补偿，使最终的加热温度后的温度波动范围缩小在±3℃以内，将此加热方法应用到实际生产中，大大提高了产品生产效率。

参考文献：

[1] 马梅艳. 轿车控制臂总成的开发设计方法研究[D]. 上海：上海交通大学，2008.

[2] 王玉洁，于义长，易斌.基于架构开发的汽车悬架控制臂优化设计[J]. 汽车工程师，2020（10）：27-31.

[3] 王惠奇. 悬架球铰链优化设计[J]. 现代零部件，2014（3）：76-78.

[4] 冯翠云. 控制臂球销总成装配力学数值模拟及结构改进[J]. 机械工程师，2023（10）：1-3.

[5] 鲍雨梅. 汽车球铰的力学性能分析[J]. 浙江工业大学学报，2019，46（6）：619-624.

[6] 陈清清. K型热电偶高温特性的研究[D]. 浙江:中国计量大学，2021.

汽车工艺师 2025年 第1–2期 广告目次 Advertisement Catalogue

单位名称	查询编号	位置
汽车工艺师		封面
金粉商城	8000	封二
《汽车工艺师》杂志订阅	0001	封三
公益广告	8000	封底
SMALLEY钢圈有限公司	8086	1
中国机床工具工业协会	5198	2