

# 基于表面缺陷分析的汽车弹簧回火工艺优化与断裂预防措施

刘富源

天津中车车辆装备有限公司 天津 300000

**摘要:** 本文基于表面缺陷分析,对汽车弹簧热处理工艺的优化与断裂预防进行了深入研究。通过分析弹簧表面缺陷的成因,提出了一系列针对性的优化措施,旨在提高弹簧的质量和可靠性,降低断裂风险。文章首先概述了弹簧失效的主要原因,然后详细讨论了热处理工艺的优化方法和断裂预防措施,最后总结了研究的重要性和实践意义。

**关键词:** 汽车弹簧;表面缺陷;热处理工艺;断裂预防

## 引言

汽车弹簧作为汽车悬挂系统的重要组成部分,其性能直接影响到车辆的行驶安全和舒适性。然而,在实际使用过程中,弹簧断裂事故时有发生,严重影响了车辆的安全性和可靠性。因此,对汽车弹簧的热处理工艺进行优化,预防断裂事故的发生,具有重要的现实意义。

### 1 弹簧钢丝表面缺陷分析

弹簧表面缺陷是导致其失效的主要原因之一。这些缺陷可能来源于多个方面。常见的表面缺陷包括:(1) 裂纹:主要是由于材料制作进程中的不当操作引起的,如轧制过程中的划伤或材料本身的划伤等。裂纹通常沿拉拔方向延伸,深度从几毫米到超过1毫米不等。裂纹会严重影响弹簧的承载能力和使用寿命。(2) 凹坑与气泡:凹坑通常是由于附着在钢丝表面的杂质或氧化皮在轧制过程中脱落形成的。气泡则可能是原材料中的气孔在轧制过程中被挤压到表面形成的。凹坑和气泡都会降低弹簧的表面质量,影响其机械性能和耐久性。(3) 夹杂与氧化皮:夹杂可能是由于原材料中的非金属夹杂物在轧制过程中被带入弹簧表面。氧化皮则是由于原材料在存放或运输过程中氧化形成的。夹杂和氧化皮都会影响弹簧的表面光洁度和机械性能,可能导致应力集中和早期失效<sup>[1]</sup>。

## 2 汽车弹簧回火工艺的优化

### 2.1 选择合适的回火温度

在汽车弹簧的制造过程中,回火温度的选择至关重要。中温回火是汽车弹簧制造中常用的热处理方法,其温度范围通常在400°C左右。这一特定的温度区间是经过精心选择的,以确保弹簧能获得理想的机械性能。中温回火的主要目的是在保持弹簧硬度的同时,提高其屈服强度、弹性极限和韧性。回火后的弹簧硬度一般控制在

HRC35-50之间。在这个硬度下,弹簧既能够承受较大的工作载荷,又具有一定的抗冲击能力,不易发生断裂或变形。然而,回火温度需要精确控制。如果温度过低往往会牺牲塑性,塑性的降低意味着弹簧在受到冲击或过载时更容易发生断裂,从而增加使用中的安全风险。

### 2.2 控制回火时间

首先,回火时间应足够长,以确保弹簧的形状达到稳定状态。弹簧在回火过程中,其内部的金属组织会发生变化,应力会逐渐释放,形状也会有所调整。一般来说,经过15-30分钟的回火处理后,弹簧的外圈尺寸会逐渐缩小并稳定在一个固定的水平上。此外,控制回火时间还可以有效避免弹簧出现过热或未完全回火的情况。如果回火时间过短,弹簧可能未能完全释放内部应力,导致其在使用过程中容易发生形变或断裂。相反,如果回火时间过长,虽然可以确保弹簧的完全回火,但可能会降低生产效率并增加成本。同时,需要特别强调的是,应避免以提高温度来缩短回火时间的方式对弹簧进行回火处理。这种做法虽然看似提高了生产效率,但实际上可能会对回火效果产生不良影响。因为高温快速回火可能导致弹簧内部组织转变不均匀,进而影响其性能的稳定性。

### 2.3 采用先进的回火技术

在汽车弹簧制造领域,感应加热回火技术具有独特优势。其原理是利用高频电磁感应使钢丝表面产生涡流,从而使其迅速加热到所需的回火温度。与传统的铅浴回火相比,感应加热回火不仅速度更快、效率更高,而且具有显著的环保优势。由于无需使用铅液,因此避免了铅污染和相关的环保问题。此外,感应加热回火通过高频电磁感应加热,钢丝内部的晶粒得到了细化,这有助于提升材料的力学性能。同时,该技术还能有效抑

制脱碳现象,保护钢丝表面不受氧化。在实际应用中,由于加热过程快速且均匀,减少了操作过程中的不确定性和风险。同时,该技术还具备较高的能源利用效率,符合当前节能减排的环保要求<sup>[2]</sup>。

#### 2.4 注意回火过程中的细节问题

一是硬度与疲劳性能:随回火温度的升高,硬度会稍微上升后下降。疲劳性能最好的温度通常略低于硬度最大的温度。因此,在设定回火温度时,需要综合考虑硬度和疲劳性能的需求。二是缩径问题:碳钢弹簧在回火时外径会缩小,因此在卷簧时应预留一定的尺寸,以避免回火后尺寸不符合要求。三是回火色与均匀性:回火色与温度和钢丝表面的残留物有关。颜色不均匀可能与温度分布或炉膛内的气流有关。为确保颜色均匀,需要管理好炉子及装料方式。详见图1。



图1 汽车弹簧示例图

### 3 汽车弹簧断裂预防措施

#### 3.1 表面强化技术

在汽车弹簧的制造和使用过程中,预防断裂是至关重要的。为此,各种表面强化技术被广泛应用,其中喷丸技术是一种通过高速喷射弹丸来强化金属表面的方法。在喷丸过程中,高速弹丸撞击弹簧表面,使其产生塑性变形,从而在表面层形成残余压应力。这种压应力能够有效地抵消部分外部拉应力,从而提高弹簧的抗疲劳性能。此外,喷丸还能细化表面晶粒,改善表面质量,进一步提高弹簧的耐用性<sup>[3]</sup>。在实际应用中,可以根据弹簧的具体使用环境和性能要求来选择合适的表面强化技术。例如,对于需要承受高频振动和冲击的弹簧,可以采用喷丸技术来提高其抗疲劳性能。

#### 3.2 无损检测技术

在汽车弹簧的质量控制中,无损检测技术发挥着至关重要的作用。其中,超声波检测和磁粉探伤是两种常用的无损检测方法。超声波检测是利用超声波在材料中

传播时遇到缺陷会发生反射、折射等特性的原理,来检测材料内部是否存在缺陷<sup>[4]</sup>。具体操作时,将超声波探头置于弹簧表面,通过发射超声波并接收其反射波来判断弹簧内部是否存在缺陷。超声波检测不仅可以发现弹簧内部的缺陷,还能对缺陷进行定位和定量评估。通过分析反射波的幅度、时间和形状等参数,可以判断缺陷的大小、位置和性质。磁粉探伤是另一种有效的无损检测方法。它利用磁场感应原理来检测材料表面的裂纹等缺陷。在检测过程中,首先在弹簧表面施加磁场,然后撒上磁粉。如果弹簧表面存在裂纹等缺陷,磁粉会在缺陷处形成堆积,从而显示出缺陷的位置和形状。

#### 3.3 结构设计优化

在提升汽车弹簧性能与耐久性的过程中,结构设计优化是至关重要的一环。特别是针对汽车悬架弹簧,其常见的形式为圆柱螺旋压缩弹簧。通过精细的结构设计优化,可以有效减少应力集中,提高弹簧的承载能力和使用寿命<sup>[5]</sup>。

##### 3.3.1 有限元分析在弹簧设计中的应用

(1) 有限元分析步骤如下:

前处理:建立弹簧的三维模型(图2),并定义其材料属性,如弹性模量、泊松比等。然后,施加边界条件和载荷,以模拟实际工况。

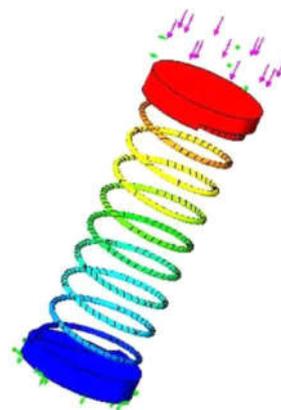


图2 弹簧的三维模型示例图

网格划分:将弹簧模型划分为有限个小单元,单元的质量和数量直接影响计算精度和效率。需要确保网格的细密程度足够,以准确捕捉应力集中的区域。具体可以参考下表:

表1 FEA软件求解代数方程组

参数	数值
单元类型	四面体
单元数量	10000
网格密度	高

求解：利用FEA软件求解代数方程组，得到弹簧的应力、应变和变形等结果。这些结果将以图形和表格的形式呈现，便于后续分析和评估。

后处理：对计算结果进行深入分析和评估，识别应力集中区域，并根据分析结果进行结构优化设计。

表2 有限元分析结果示例

工况编号	载荷 (N)	最大应力 (MPa)	应力集中位置 (具体线圈编号)	变形量 (mm)	刚度变化率 (%)
1	5000	420	弹簧两端及第3、4圈	2.5	-0.5
2	7500	630	弹簧两端及第2、3圈	3.8	-1.0
3	10000	850	弹簧两端、第2圈及部分相邻线圈	5.0	-1.5

通过上表可以看出，随着载荷的增加，弹簧的最大应力逐渐增大，并且应力集中主要发生在弹簧两端以及某些特定的线圈位置。

### 3.3.2 弹簧结构优化设计的计算校核

#### (1) 刚度计算公式

圆柱螺旋压缩弹簧的刚度 (K) 可以通过以下公式计算：

$$K = Gd^4/8D^3n$$

其中，G为剪切模量（表示材料抵抗剪切变形的能力），d为弹簧丝直径，D为弹簧中径（即弹簧的平均半径），n为有效圈数（即参与工作的弹簧圈数）。根据设计要求和材料属性，可以选择合适的G、d、D和n值，代入公式计算得到弹簧的刚度。

#### (2) 负荷校核

根据设计载荷要求，通过有限元分析得到的弹簧最大应力应小于材料的许用应力。例如，若材料许用应力为1000MPa，则设计时应确保在任何工况下弹簧的最大应力不超过该值。

具体校核步骤如下：根据有限元分析结果，获取弹簧在不同工况下的最大应力值。将最大应力值与材料的许用应力进行比较。如果最大应力值小于许用应力，则设计满足要求；否则，需要对弹簧结构进行优化或重新选择材料<sup>[6]</sup>。

### 3.3.3 结构设计优化措施

基于有限元分析结果和弹簧设计的计算公式与数值校核，可以对弹簧结构进行以下优化：一是优化截面形状：通过改变弹簧丝截面形状（如矩形截面代替圆形

截面），提高弹簧的承载能力和抗疲劳性能。二是调整线径和中径：适当增加线径或减小中径，可以提高弹簧的刚度，但需注意避免过大的应力集中。三是增加过渡圆角：在弹簧两端增加过渡圆角，可以有效减少应力集中，提高弹簧的耐久性。四是优化圈数：根据实际需要调整有效圈数，平衡刚度与重量之间的关系。

### 结语

本文通过对汽车弹簧表面缺陷的分析，提出了热处理工艺的优化方案和断裂预防措施。通过严格控制加热温度和保温时间、优化淬火介质和冷却方式等措施来优化热处理工艺；通过加强原材料质量控制、完善制造工艺以及定期维护和检查设备等措施来预防断裂事故的发生。这些措施的实施可以有效提高汽车弹簧的质量和可靠性，降低断裂风险，为汽车行业的安全发展提供保障。

### 参考文献

- [1] 高瑞. 汽车钢板弹簧热处理工艺分析[J]. 东方企业文化, 2013, (14): 189.
- [2] 高阳, 蓝庆生, 孟辉, 等. 汽车弹簧材料及热处理技术浅析[J]. 金属加工(热加工), 2023, (03): 88-91.
- [3] 李琳琳, 高帅, 慕松. 某重型汽车钢板弹簧断裂原因[J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58(11): 43-45.
- [4] 薛喜才, 邵白明. 汽车悬架弹簧断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(01): 66-69.
- [5] 闫彧, 纪帅帅, 侯姗姗, 等. 奥氏体不锈钢弹簧的无损检测方法分析[J]. 无损探伤, 2022, 46(03): 5-9.
- [6] 陈朝, 王靖, 孙鹏. 某型动车组钢簧磁粉探伤线性缺陷分析[J]. 内燃机与配件, 2020, (04): 44-45.