

# 不锈钢拉杆断裂失效分析

孙润祥

北京福田戴姆勒汽车有限公司 北京 101400

**摘要:** 某试制车型的不锈钢拉杆, 在装配完成静置24h后发生了断裂失效, 断裂位置在不锈钢拉杆的焊接接头处。通过宏观观察、扫描电镜分析、化学成分分析、金相与硬度检测等方法对不锈钢拉杆的失效原因进行了分析。结果表明: 不锈钢拉杆的失效模式为氢脆断裂, 拉杆材料中碳含量过高、焊接过程中在焊缝与热影响区出现马氏体组织, 是导致氢脆断裂的根本原因。

**关键词:** 奥氏体不锈钢; 氢脆; 马氏体; 焊接

## Failure analysis on fracture of stainless steel tie rod

SUN Runxiang

Beijing Foton Daimler Automotive Co., Ltd., Beijing 101400, China

**Abstract:** The stainless - steel tie rod of a trial - produced vehicle model fractured after being left stationary for 24 hours after assembly. The fracture occurred at the welded joint of the stainless - steel tie rod. The failure causes of the stainless - steel tie rod were analyzed through methods such as macroscopic observation, scanning electron microscopy analysis, chemical composition analysis, metallographic and hardness testing. The results show that the failure mode of the stainless - steel tie rod is hydrogen - induced cracking. The excessively high carbon content in the tie rod material and the appearance of martensite structure in the weld and heat - affected zone during the welding process are the root causes of the hydrogen - induced cracking.

**Keywords:** austenitic stainless steel; hydrogen embrittlement; martensite; welding

### 1 序言

氢脆是指由于氢的作用而导致金属材料在低于屈服强度的静载荷下发生脆性断裂<sup>[1]</sup>, 不少氢脆断裂发生于装配24h后<sup>[2-4]</sup>。关于氢脆的机理主要有氢压理论、弱键理论、氢降低表面能理论、氢化物致低应力断裂理论, 以及氢促进局部塑性变形理论, 目前还无法用一种理论来解释所有的氢脆开裂现象<sup>[5]</sup>。奥氏体不锈钢因其具有良好的焊接性、塑性、耐腐蚀性和耐高温性能, 在工业中的用途极为广泛<sup>[6]</sup>。

不锈钢拉杆在整车中与后处理紧固带相连接, 用于固定汽车的后处理系统。某试制车型的不锈钢

拉杆在装配完成静置24h后发生了断裂失效, 断裂位置在不锈钢拉杆的焊接接头处。不锈钢拉杆的材料为06Cr19Ni10钢, 焊接方法为熔化极氩弧焊。焊接材料为与母材成分相近的308奥氏体不锈钢焊丝, 焊缝冷却方式为空冷, 无焊后热处理。为查找失效原因, 对断裂不锈钢拉杆进行了试验与分析。

### 2 试验过程与结果

#### 2.1 宏观观察

断裂不锈钢拉杆如图1所示, 断裂部位在拉杆细长侧靠近焊缝根部的位置。焊缝根部区域由于截面

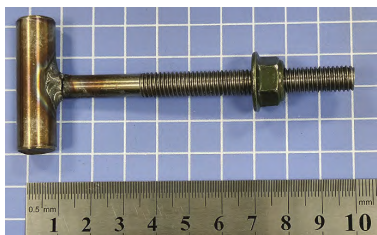


图1 断裂不锈钢拉杆

的形状变化，因此在受力后容易产生应力集中现象。

不锈钢拉杆的断口宏观形貌如图2所示。从图2可看出，断口上存在放射状条纹，且收敛于A、B、C三个区域，此三个区域为断裂源区<sup>[7]</sup>。D区宏观形貌呈细小的颗粒状，E区断口形貌比较粗糙。在E区下方有一剪切唇区，为最后瞬断形成区域。

## 2.2 扫描电镜分析

使用日立FlexSEM1000II型扫描电子显微镜对

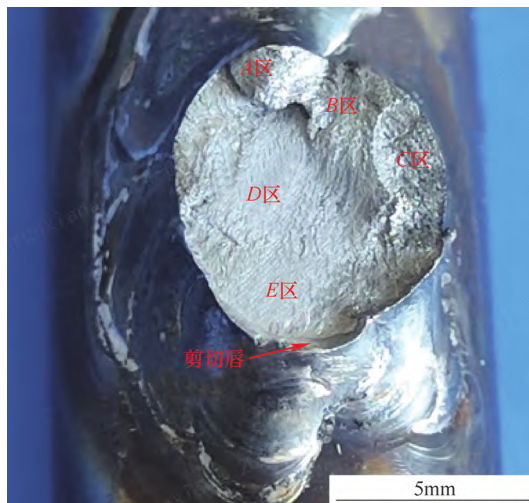
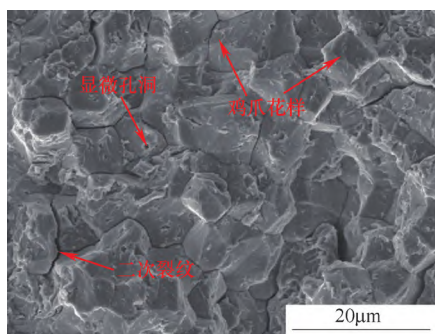
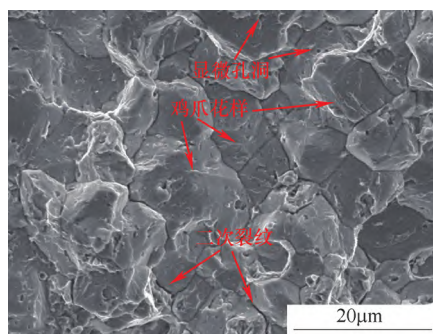


图2 断口宏观形貌

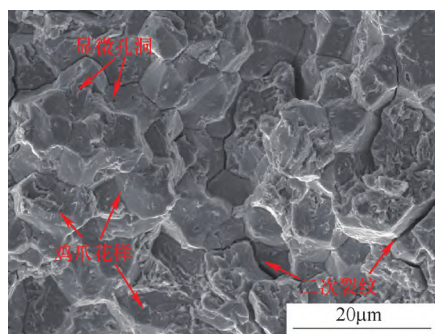
不锈钢拉杆的断口微观形貌进行分析，断口的电镜微观形貌如图3所示。



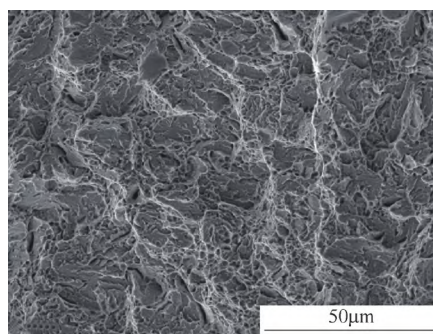
a) A区



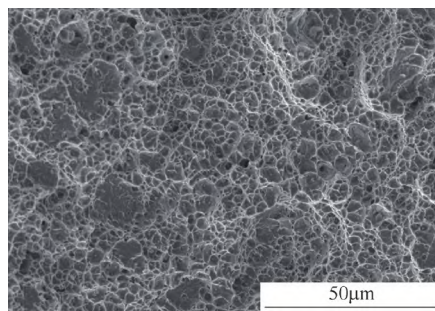
b) B区



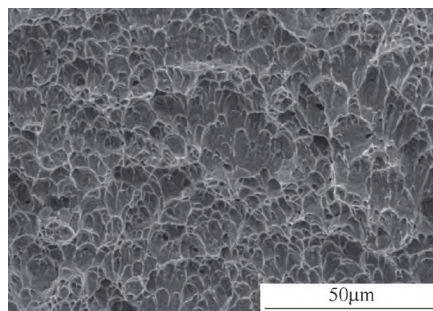
c) C区



d) D区



e) E区



f) 剪切唇区

图3 断口电镜微观形貌

断裂源A、B、C三个区域的微观断口形貌均为冰糖状的沿晶形貌，晶界上有鸡爪花样<sup>[8]</sup>及显微孔洞，晶间有二次裂纹，断口呈典型的氢脆断裂形貌特征（分别见图3a~c）。

D区的微观形貌为准解理+韧窝的混合形貌，E区微观形貌主要为等轴韧窝，剪切唇区微观形貌为拉长的韧窝（分别见图3d~f）。

表1 不锈钢拉杆化学成分（质量分数）

(%)

| 元素  | C     | Si    | Mn    | P      | S      | Cr          | Ni         |
|-----|-------|-------|-------|--------|--------|-------------|------------|
| 实测值 | 0.16  | 0.41  | 1.07  | 0.035  | 0.009  | 16.21       | 7.01       |
| 要求值 | ≤0.08 | ≤1.00 | ≤2.00 | ≤0.045 | ≤0.030 | 18.00~20.00 | 8.00~11.00 |

## 2.4 金相分析

在不锈钢拉杆的断裂源区（见图2C区）取样，使用蔡司Axio vert Al型金相显微镜进行显微金相组织检测，结果分别如图4a~d所示。

熔合区金相组织左侧为热影响区，右侧为焊缝（见图4a）；焊缝区金相组织为柱状奥氏体+马氏体+碳化物（见图4b）；热影响区金相组织为板条马氏体（见图4c）；母材区金相组织为奥氏体（见图4d）。焊缝及热影响区未发现明显粗晶、夹杂等

## 2.3 化学成分分析

不锈钢拉杆的材料为06Cr19Ni10钢，在拉杆上靠近断口处取样，使用岛津PDA-8000型直读光谱仪进行化学成分分析，结果见表1。从表1可知，不锈钢拉杆的化学成分不符合GB/T 1220—2007《不锈钢棒》对06Cr19Ni10钢的成分要求<sup>[9]</sup>。拉杆材料中C含量过高，Cr、Ni含量偏低。

缺陷。

由金相分析结果可知，在不锈钢拉杆的焊接过程中，焊接接头的焊缝区与热影响区产生了马氏体组织。

## 2.5 硬度检测

使用特视检测技术（上海）有限公司THVS-1M-AXY型显微维氏硬度计对不锈钢拉杆的焊接接头区域进行硬度检测。焊缝区的硬度为475HV1、热影响区硬度为507HV1、母材区硬度为282HV1。

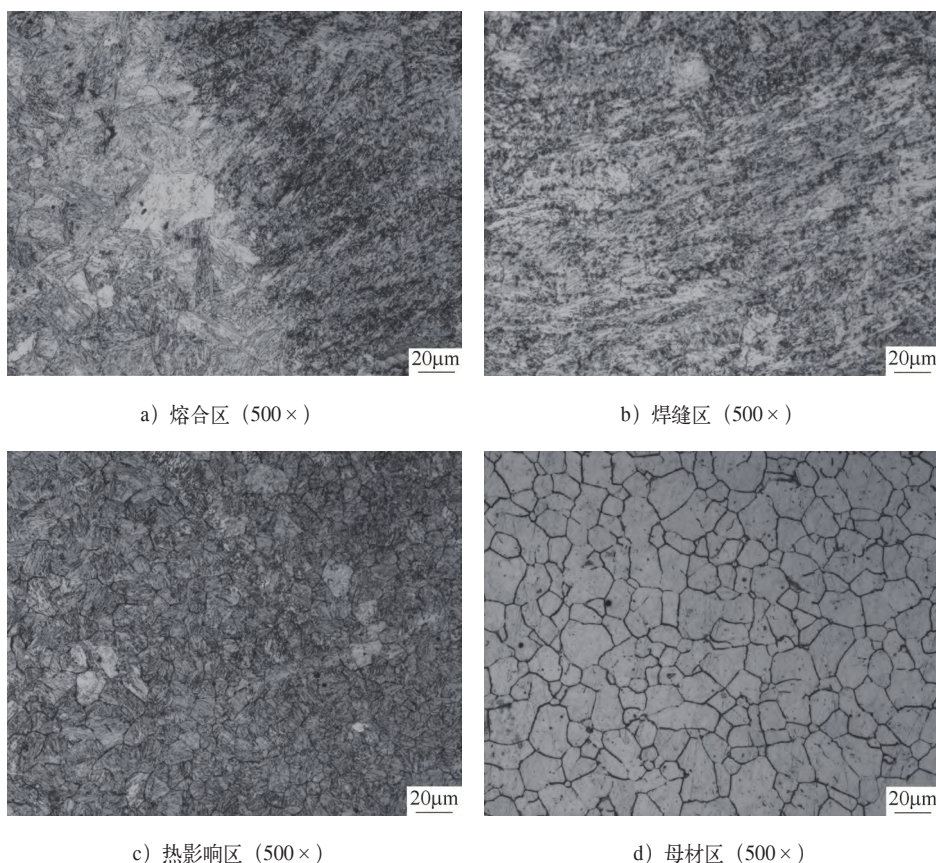


图4 金相组织

有研究表明,当钢件的硬度高于390HV时,氢脆敏感性将显著增加<sup>[10]</sup>。由于不锈钢拉杆焊接接头的焊缝区与热影响区硬度远高于390HV,因此其氢脆敏感性极高。

### 3 综合分析

氢脆断裂必须具备的三个基本条件为:材料的敏感性、氢原子和拉应力。其中,材料的敏感性是氢脆发生的基本条件与根本原因,应力与氢是诱发因素<sup>[10]</sup>。不同金相组织的氢脆敏感性是不同的,在各种显微组织中,马氏体的氢脆敏感性最大<sup>[11]</sup>。

由扫描电镜分析结果可知,不锈钢拉杆的断裂源区呈沿晶开裂特征,且存在鸡爪纹、二次裂纹与显微孔洞等氢致开裂的形貌特征,其失效模式为氢脆断裂。

奥氏体不锈钢的碳含量非常低,焊接性能较好,在焊接过程中一般不会产生淬火硬化<sup>[12]</sup>。该断裂奥氏体不锈钢拉杆的化学成分不符合06Cr19Ni10钢的标准要求,其碳含量高达0.16%,而Cr、Ni含量均低于标准要求,导致焊接过程中在焊缝区与热影响区形成了高硬度的马氏体组织。马氏体相变增加了不锈钢拉杆的氢脆敏感性,使材料的抗氢脆性能变差<sup>[13]</sup>。

金属材料在焊接过程中,局部区域的温度非常高。高温下焊件周围环境中的水分子会被分解成氢原子<sup>[14]</sup>,焊接原材料中的水和其他含氢物质也会分解产生氢原子,这些氢原子会溶解进入焊缝内部<sup>[15]</sup>。

不锈钢拉杆在装配后主要承受拉伸载荷,焊缝根部为应力集中区,在拉应力的作用下,焊接过程中渗入焊缝的氢原子会向应力集中部位扩散、富集<sup>[16]</sup>,在焊缝及热影响区的马氏体组织区域逐渐形成氢脆裂纹,当裂纹扩展到一定程度后即发生了瞬时脆性断裂。

### 4 结束语

不锈钢拉杆的失效模式为氢脆断裂,产生氢脆的根本原因是不锈钢中碳含量过高、焊接过程中出现了马氏体组织。高硬度的马氏体组织氢脆敏感性极大,不锈钢拉杆在装配后承受拉应力,焊接过程中进入焊缝的氢原子会向焊缝根部的应力集中处扩散、富集,在马氏体组织区域逐渐形成氢脆裂纹,

经过一段时间后发生了延迟断裂。

### 参考文献:

- [1] 孙智,任耀剑,隋艳伟.失效分析:基础与应用[M]. 2版.北京:机械工业出版社,2017:126-129.
- [2] 崔喆珉,王园园,刘海波,等.压铆螺钉断裂失效分析[J].金属制品,2016,42(4):55-57.
- [3] 代利强,李增,杨宝成,等.紧固件氢脆分析与研究[J].农业装备与车辆工程,2019,57(S1):137-139.
- [4] 左新浪,谈艺干,刘子莲,等.SWRCH22A钢自攻螺钉断裂原因分析[J].理化检验(物理分册),2017,53(9):687-689.
- [5] 褚武扬,乔利杰.氢脆和应力腐蚀:基础部分[M].北京:科学技术出版社,2013:290.
- [6] 刘艳锋,刘小民,王法云,等.动车机组用304不锈钢螺栓断裂原因[J].理化检验(物理分册),2023,59(12):37-39.
- [7] 崔约贤,王长利.金属断口分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998:21-23.
- [8] 钟群鹏,赵子华.断口学[M].北京:高等教育出版社,2006:212-217.
- [9] 全国钢标准化技术委员会.不锈钢棒:GB/T 1220—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [10] 全国紧固件标准化技术委员会.钢制紧固件氢脆基本原理:GB/Z 41117—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [11] 刘德林,胡小春,何玉怀,等.从失效案例探讨钢制紧固件的氢脆问题[J].材料工程,2011(10):78-83.
- [12] 张其枢.不锈钢焊接技术[M].北京:机械工业出版社,2015:90-91.
- [13] 周池楼,何默涵,郭晋,等.高压氢环境奥氏体不锈钢焊件氢脆研究进展[J].化工进展,2022,41(2):519-536.
- [14] 张慧云.不同组织状态304奥氏体不锈钢的氢脆行为[D].太原:太原理工大学,2023.
- [15] 孔祥峰,邹妍,张婧,等.焊缝金属中扩散氢的形成及控制研究进展[J].钢铁,2015,50(10):77-84.
- [16] 弓雪原,董红军.扭杆弹簧断裂失效分析[J].金属加工(热加工),2022(3):72-74.