

连接底开裂原因分析及改进措施

石燕, 杨有才, 褚小菲, 李恩省, 王翠英, 刘振威, 史林

豫西工业集团河南北方红阳机电有限公司 河南南阳 474678

摘要: 对失效连接底金相组织、化学成分、裂纹形态等进行理化检测, 分析连接底裂纹产生的原因。结果表明: 连接底裂纹为淬火裂纹; 连接底中心圆柱部与底部过渡弧 R 角半径较小是主要原因, 致使淬火过程中应力集中导致开裂; 原材料中心部位组织疏松和冷却速度较快, 进一步促进裂纹萌生; 通过增大 R 角、调整热处理工艺来降低淬火应力, 从而避免连接底淬火开裂的产生。

关键词: 连接底; 淬火裂纹; 应力集中; 热处理工艺

Reason analysis of joint bottom cracking and improvement measures

SHI Yan, YANG Youcai, CHU Xiaofei, LI Ensheng, WANG Cuiying, LIU Zhenwei, SHI Lin

Henan North Hongyang Mechanical and Electrical Co., Ltd., Western Henan Industrial Group, Nanyang 474678, Henan, China

Abstract: Metallographic, chemical composition, crack morphology and other physical and chemical tests were carried out to analyze the causes of cracks in the failed joint bottom. The results show that the joint bottom cracks are quenched cracks; The main reason is the small angle radius of the transition arc R between the center cylinder of the joint bottom and the bottom, which leads to the stress concentration during the quenching process leading to cracking; The central part of the raw material is loose and cooled quickly, which further promotes crack initiation; By increase the R angle, adjust the heat treatment process and control the raw material quality, can reduce the quenching stress to avoid the joint bottom quenching cracking.

Keywords: joint bottom; quenching crack; stress concentration; heat treatment process

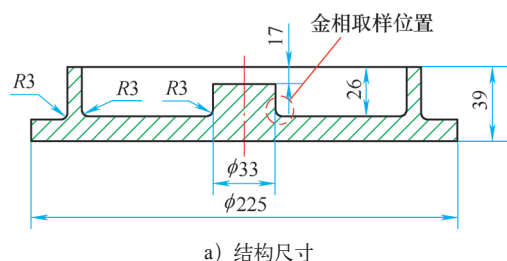
1 序言

35CrMnSiA是低合金超高强度调质结构钢, 热处理后具有良好的综合力学性能、高强度、足够的韧性^[1, 2], 被广泛应用于制造高负荷、高强度、高速的各种重要零件^[3]。连接底是生产中用于建构设备的支撑, 并在此基础上安装轴类零件及轴上零件, 其材料性能和工件内在质量的好坏直接关系到设备安全可靠性和使用寿命。一旦连接底热处理开裂, 将导致批量报废而失效, 造成较大的经济损失。因此, 研究连接底开裂原因, 提出防止连接底

产生淬火裂纹的措施, 对于提高连接底质量具有重要意义。

连接底材料为35CrMnSiA超高强度钢, 结构和实体零件如图1所示。工艺流程为棒料→粗加工→半精加工→淬火→回火→硬度检测→精加工→最终质量检验。技术要求: 屈服强度 $\geq 1100\text{MPa}$ 、断后伸长率 $\geq 8\%$ 。热处理工艺: 淬火用密封箱式多用炉, 淬火加热温度 880°C , 保温时间 85min , 淬火冷却介质采用快速淬火油ISOMAX 100, 初始温度 $\leq 50^{\circ}\text{C}$, 淬火冷却设置快速搅拌 10min +慢速搅拌

10min；回火采用氮气保护气氛回火炉，回火温度485℃，保温时间3.5h，油冷2min；连接底淬火冷却到回火应<2h。调质处理后硬度检测时发现连接底中心圆柱部存在宏观裂纹。



a) 结构尺寸



b) 实体零件

图1 连接底结构和实体零件

2 试验过程与结果

2.1 宏观观察

连接底中心圆柱部存在一条裂纹，其起源于中心圆柱部与底部R角过渡弧部位，沿中心圆柱部外圆面轴向延伸后继续沿圆柱部端面延伸约5mm，裂纹深且长，形态较刚直，如图2所示。



a) 中心圆柱部侧面



b) 中心圆柱部正面

图2 裂纹宏观形貌

2.2 显微组织

在连接底中心圆柱部与底部R角过渡弧部位截取横向试样（见图1），磨制抛光后用4%硝酸酒精浸蚀，随后用ZEISS Scope.A1金相显微镜观察裂纹浸蚀前后的微观形貌，可以发现：由连接底圆柱部与底部过渡部位向试样内部延伸一条裂纹，深度8.4mm，如图3所示；主裂纹两侧有细小次生裂纹，如图4所示；裂纹附近未发现脱碳、氧化现象，如图5a~c所示；裂纹尾部尖细、弯曲，有断续状小尾巴，如图5c所示；裂纹附近显微组织为回火屈氏体，未发现氧化、过烧等其他热处理缺陷，如图5d所示。



图3 裂纹全貌

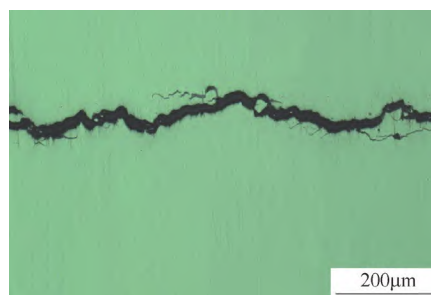


图4 主裂纹两侧次生裂纹

2.3 非金属夹杂物

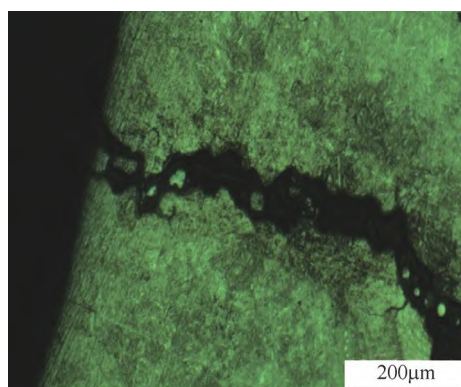
对连接底进行非金属夹杂物检测，裂纹附近的非金属夹杂物级别为A1.0、B0.5、C1.0、D0.5，裂纹内部及其周围无异常夹杂，符合GB/T 3077—2015《合金结构钢》要求，说明该批连接底使用原材料洁净度高，冶金质量较佳。

2.4 化学成分

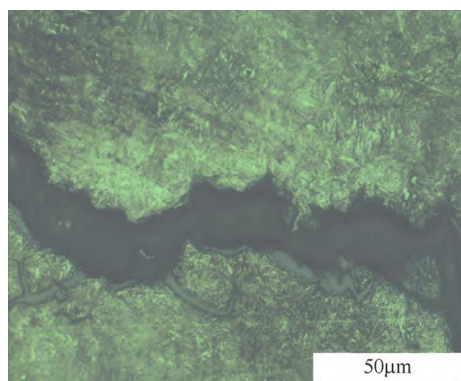
在连接底裂纹部位截取试样，去除表面氧化层并磨平抛光试样表面后，采用直读光谱仪进行化学成分分析，结果见表1，该材料符合GB/T 3077—2015《合金结构钢》要求。

表1 连接底裂纹部位化学成分（质量分数）（%）

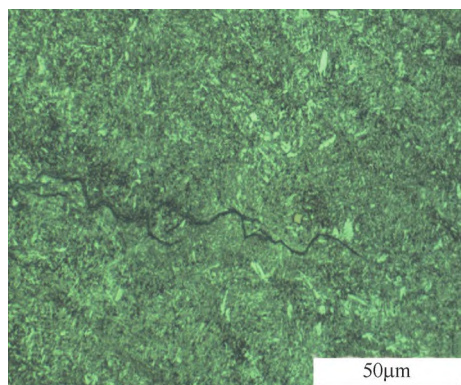
元素	C	Si	Mn	S	P	Cr
检测值	0.38	1.29	0.90	<0.020	<0.020	1.27
标准值	0.32~0.39	1.10~1.40	0.80~1.10	≤0.020	≤0.020	1.10~1.40



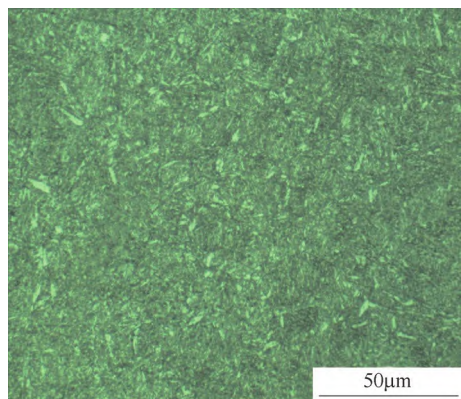
a) 裂纹起始形貌



b) 裂纹中间形貌



c) 裂纹尾部形貌



d) 裂纹附近金相组织

图5 连接底裂纹金相组织

2.5 低倍组织

在失效连接底内槽底面部位（见图1），截取横向试样进行低倍酸蚀试验，按照GB/T 226—2015《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》进行组织评定，结果为一般疏松1.5级，中心疏松2级，未发现其他低倍组织缺陷，低倍组织符合工艺要求。试样中心部位存在一条较短的弯曲裂纹，是由于连接底中心圆柱部向底部延伸的裂纹残留，如图6所示。



图6 低倍组织

2.6 力学性能

加工制取尺寸为 $\phi 16\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的随炉试样与连接底工件一同热处理，连接底力学性能见表2。从表2可看出，力学性能符合技术要求。

表2 连接底力学性能

项目	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	断后伸长率 A (%)
技术要求	≥ 1100	≥ 8
1 [#] 试样	1185	14.0
2 [#] 试样	1167	14.5

3 分析与讨论

1) 该连接底材质为35CrMnSiA钢，属于中碳低合金超高强度钢，钢中的Cr、Mn等合金元素增加了奥氏体的稳定性，导致其C曲线（奥氏体等温转变图）右移，并使其 M_s 点降低，显著提高其淬透性；钢中合金元素的固溶强化显著，因为Cr、Si等对连接底热加工后的晶粒具有显著强化作用，所以热处理后连接底强度、韧性等综合力学性能较好^[4]。正常条件下，淬火、高温回火后不应该出现开裂现象。

2) 连接底裂纹目视可见，裂纹起源于中心圆柱部与底部 R 角过渡弧部位，沿中心圆柱部外圆面轴向延伸后，继续沿圆柱部端面延伸，裂纹深而长且较刚直；金相观察发现，裂纹附近无明显脱碳、氧

化现象,裂纹两侧有次生裂纹,裂纹尾部尖细、弯曲,有断续状小尾巴;裂纹内部存在氧化物,是工件淬火过程中产生裂纹时,裂纹内部的金属表面暴露在空气中,与氧气发生化学反应而形成的;金相组织为回火屈氏体,无过热、过烧等现象;微观特征与淬火裂纹特征完全吻合,因此该连接底裂纹属淬火裂纹^[5-9]。

3) 淬火裂纹主要是由应力引起的,通常与以下因素有关:①原材料存在冶金缺陷。②淬火工艺不合理。③淬火应力较大。该连接底的化学成分、力学性能、低倍组织、非金属夹杂物均符合工艺要求,因此连接底裂纹与原材料无关。连接底金相组织为均匀回火屈氏体,为正常热处理组织,未见明显的过热组织,连接底裂纹主要为沿晶开裂,连接底的力学性能也符合工艺要求,因此连接底裂纹与淬火工艺无关,因此连接底淬火裂纹产生的原因应与其淬火应力有关。

4) 零件表面的缺口、尖角、棱角和截面急剧变化的部位均会在淬火后造成较大的应力集中,是发生淬火开裂的危险部位^[9],而连接底开裂正好发生在截面急变处,截面尺寸变化较大,必然引起应力集中,该连接底是整体入油淬火,由于连接底截面尺寸不同,使其急变处马氏体相变的不同时性增强,组织应力比周围部位大,胀缩比周围部位明显^[4],极易诱发淬火裂纹。而采用快速淬火油冷却速度较大,会促进裂纹的产生。而实际测量中心圆柱部与底部R角过渡弧为R3mm,中心圆柱部与底部R角过渡弧较小是产生淬火裂纹的主要原因,同时冷却速度不当促进了裂纹的产生。

4 改进措施

1) 淬火时加强搅拌,保证构件冷却均匀,降低构件应力。

2) 采取合适的结构设计,通过增大中心圆柱部R角过渡弧截面尺寸至R6mm,来降低尖角效应,减少应力集中的产生。

3) 控制好淬火冷却速度和温度梯度,使组织转变温和,降低热应力和组织应力的产生。

随后,增加10件连接底对改进措施进行试验验证,热处理后未发现开裂现象,改进后的连接底力学性能仍满足技术要求,见表3。

表3 改进后连接底力学性能

项目	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	断后伸长率 A (%)
技术要求	≥ 1100	≥ 8
3#试样	1178	14.5
4#试样	1182	14.5

5 结束语

1) 连接底裂纹属淬火裂纹。中心圆柱部R角过渡弧截面尺寸较小产生的应力集中是产生淬火裂纹的主要原因。

2) 连接底淬火裂纹产生的原因与原材料质量、淬火热处理工艺等因素无直接关系。

3) 在满足技术要求的前提下,通过优化淬火工艺参数,如降低淬火、回火加热温度,减少淬火保温时间,以及调整淬火油,可避免因应力集中而导致的淬火开裂。

4) 采取合理的结构设计,工件各部分的截面要均匀,减少截面尺寸的急剧变化,可降低尖角效应,减少应力集中的产生。

参考文献:

- [1] 周成,叶其斌,田勇,等.超高强度结构钢的研究及发展[J].材料热处理学报,2021,42(1):14-23.
- [2] 郑维铎.提高35CrMnSiA产品冲击韧性的热处理工艺研究[J].热处理技术与装备,2017,38(3):54-57.
- [3] 王春净,许永春,赵常振.某型飞机35CrMnSiA紧固螺钉断裂失效分析[J].空军工程大学学报,2022,23(5):108-111.
- [4] 卓露,卢连军,秦文韬,等.某型弹体裂纹分析[J].兵器材料科学与工程,2023,46(2):131-136.
- [5] 孙盛玉,戴雅康.热处理裂纹分析图谱[M].大连:大连出版社,2002.
- [6] 李玉海,蔡红,秦会常,等.失效分析150例[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [7] 张栋,钟培道,陶春虎,等.失效分析[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [8] 陈步超,宋翊,刘海明,等.42CrMo钢长轴感应淬火裂纹原因分析[J].金属加工(热加工),2024(1):76-81.
- [9] 丁慧麟,金荣芳.金属构件缺陷、失效分析与实例[M].北京:化学工业出版社,2020.

MW 20240511