 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11530

Research and Analysis on Cracking of High-Strength Fastener Flange Outer Rings

Lin Cheng Yingjie Sun Ning Zhang

Jiyuan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Jiyuan, Henan, 459000, China

Abstract

High-strength structural fasteners are widely used in aviation, energy, and rail transportation sectors, with industry standards for fastener forming quality, dimensional accuracy, and processing stability continuously being elevated. Although China's high-strength fastener industry has experienced steady growth, premium products still exhibit significant shortcomings in raw material purity, heat treatment uniformity, surface treatment, and comprehensive quality control throughout the production process. During the manufacturing of Grade 10.9 cold heading fasteners from annealed drawn ML40Cr steel at a facility, nearly all flange sections developed dense oblique X-shaped cross-cracks. Comparative analysis of chemical composition, macroscopic fracture surfaces, and metallographic structures confirmed that the root cause was carbon-induced pearlitic structure formation with spherical chains on the steel surface; this microstructure exhibits poor plasticity and cold deformation performance, leading to substantial deformation in the cold heading zone and subsequent stress concentration that ultimately resulted in batch-wide cross-cracking defects.

Keywords

high-strength fasteners; flange cracking; carbonization

高强度紧固件法兰外圈开裂研究分析

程琳 孙莹杰 张宁

济源钢铁（集团）有限公司，中国 · 河南 济源 459000

摘 要

航空、能源、轨道交通领域广泛使用高强度结构连接件，行业对紧固件成形质量、尺寸精度及加工稳定性标准持续提升。国内高强度紧固件产业规模稳步扩张，但高端产品在原料纯净度、热处理均匀性、表面处理及全流程质控方面仍存在明显不足。某厂采用退火拉拔 ML40Cr 钢生产 10.9 级冷镦紧固件时，工件法兰部位近乎全部出现密集斜向 X 形交叉裂纹。通过化学成分、宏观断口与金相组织对比检测分析，证实法兰开裂根源为钢材表层增碳形成球链状珠光体；该组织塑性与冷变形性能较差，冷镦镦粗区域变形量大，应力集中后最终引发批量交叉开裂缺陷。

关键词

高强度紧固件；法兰开裂；增碳

1 理化检验

1.1 概况

ML40Cr 盘条作为常规 10.9 级螺栓标准件原材料，广泛应用于汽车领域。一批 Φ10mm 的 ML40Cr 热轧盘条制作束杆类六角法兰螺栓时，在法兰处出现密集的斜向开裂现象，比例接近于 100%。螺栓制造工艺流程：酸洗 - 磷化皂化 - 拉拔 Φ8.0mm- 退火 - 拉拔 - 冷镦六角头及法兰（控制工艺参数：硬度 ≤HRB82、球化等级 ≥4 级）。

1.2 宏观分析

共送检 4 个六角法兰螺栓样品，螺栓样品法兰直径为 Φ16.47mm，杆部阶梯直径分别为 Φ7.88mm、Φ7.05mm，如图 1-a 所示。送检螺栓样品法兰圆周外圆面存在多条呈 45° 角斜向分布的裂纹，裂纹呈“X”字型交叉 [1]，经过热酸蚀后，样品法兰处裂纹对应六角面及杆部均无裂纹等缺陷，如图 1-b 所示。

1.3 化学检验

依据 GB/T4336《碳素钢和中低合金钢多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法（常规法）》采用 QSN750 直读光谱仪对螺栓样品进行化学成分检测，检测结果如表 1 所示，从分析结果可知螺栓的化学成分符合 GB/T6478《冷镦和冷挤压用钢》对产品的标准要求。

1.4 金相组织检验

垂直螺栓法兰裂纹处横向制备试样进行金相分析，样品整个法兰圆周外圆面存在多条裂纹均呈撕裂状，裂纹处均无氧化及异常非金属夹杂缺陷，使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀

【作者简介】程琳（1993–），女，中国河南济源人，助理工程师，从事金属材料热处理及金相检验研究。

后观察，裂纹两侧无脱碳，样品外圈裂纹处组织与心部组织明显不同，样品边部球化体密集且呈条链状分布，样品基体组织为点状球化体 + 少量球化体 + 铁素体，基体组织根据 JB ／ T 5074-2007《低、中碳钢球化体评级》评定为 5 级，如图 2- 图 5 所示。

1.5 正火试验

取螺栓样品正火后（860℃保温 10min 后空冷）观察组织，样品表层存在近乎于共析钢的珠光体 + 微量铁素体，基体组织为亚共析钢组织珠光体 + 铁素体，由此可见表层存在明显增碳现象，如图 6 所示。



图 1 委托样品螺栓及法兰裂纹处宏观形貌

表 1 委托样化学成分分析结果（%）

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr
实测值	0.387	0.173	0.695	0.0163	0.0046	0.99
标准值	0.38~0.43	0.10~0.30	0.60~0.90	≤0.025	≤0.025	0.90~1.20



图 2 螺栓法兰处裂纹微观形貌 50X（拼图）



图 3 螺栓法兰处裂纹组织形貌 50X（拼图）

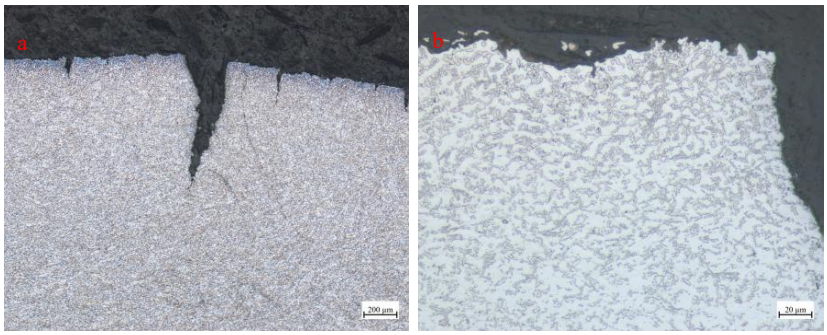


图 4 样品裂纹处组织形貌（a–50X、b–500X）

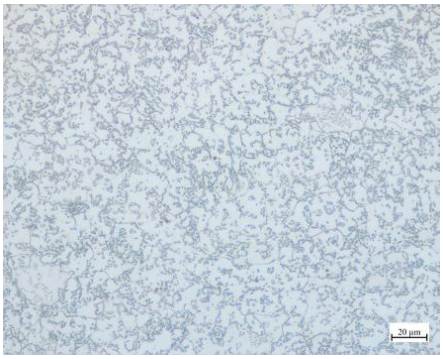


图 5 样品基体组织形貌 500X

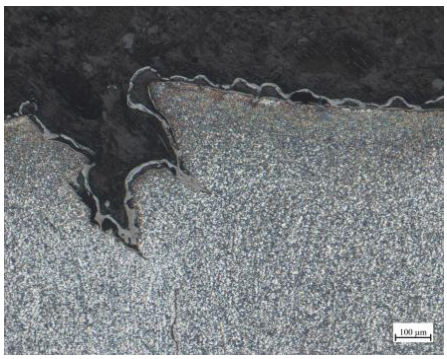


图 6 样品正火后表面组织形貌 100X

1.6 微区成分分析

使用 JXA-ISP100 电子探针对样品表层组织区域与基体组织区域进行微区成分分析，分析结果如表 2 所示。

表 2 样品表层组织区域与基体组织 C 成分分析结果（%）

编号	表层组织区	基体
螺栓样品	0.68	0.39

2 分析与讨论

样品化学成分符合 GB/T 6478《冷镦和冷挤压用钢》的要求，并且从裂纹分布及形貌观察，其应该与原材料的表面缺陷无直接关系，通过热酸蚀检验，也未在冷镦件六角面及杆部发现裂纹缺陷，进一步验证法兰处的“X”字型交叉裂纹与材料表面缺陷无关，因此推测其可能与材料的组织、夹杂等皮下纯净度有关。

通过金相分析，在裂纹附近未发现氧化现象与非金属夹杂一类的冶金缺陷，从而排除夹杂物引起的开裂问题。通过对法兰处组织分析发现，样品外圈裂纹处组织与心部组织明显不同，经正火试验后观察外圈组织为珠光体 + 微量铁素体，为显著的增碳现象；而对于法兰而言，珠光体组织塑性较低、冷变形能力差，在冷镦变形时，极易产生冷镦应力开裂 [2]。

由工艺可知，螺栓样品采用的拉拔材盘条经过退火，故法兰圆周出现增碳开裂主要发生在热处理环节，当热处理炉密封不严，空气或富碳气氛进入炉内或者保护气氛控制不当，加热温度偏高或保温周期过度延长时，会对已脱碳的样品表面进行复碳时使表面碳含量过高 [3]。对于中碳结构钢，正常碳含量为 0.35%~0.45%，若表层碳含量超过 0.6%，会形成含量较高的珠光体。此条件下，样品表面硬度有所提升，塑性、韧性指标降低，直接提升了冷镦过程中工件应力开裂的几率。故螺栓法兰外圆表面开裂为样品表面增碳引起的应力开裂。

3 建议及措施

为避免材料在退火工艺发生再次增碳现象，可加装在线碳势分析仪，实现碳势自动闭环控制，精准控制炉内碳势；根据材料牌号设定合理碳势区间，避免碳势长期偏高。优化热处理工艺曲线，缩短保温时间，在保证组织与性能合格前提下，合理缩短高温保温时间，减少碳渗入时间窗口，采用阶梯升温、分段保温，避免长时间在高温区停留。

参考文献

[1] 柯炜,崔贵博,李建开,等. 含硼冷镦钢10B33冷镦开裂原因分析[J].金属制品,2024,50(03):48-51+55.

[2] 王小忠,朱文凯,安鹏达,等. ML40Cr冷镦螺栓法兰外圈表面开裂原因分析[J].四川冶金,2022,44(02):44-47.

[3] 李为龙,袁桥军,周国子.冷镦螺母横裂纹成因分析[J].金属材料与冶金工程,2021,49(6):3-7.