

DOI: 10.11973/jxgccl201608024

起重机钢丝绳断裂失效分析

巴发海, 薛宇

(上海材料研究所, 上海 200437)

摘要: 通过宏观检验、化学成分分析、力学性能检测、断口分析、金相检验等方法对某起重机钢丝绳断裂的原因进行了分析。结果表明: 钢丝绳为韧性断裂, 在使用过程中钢丝绳承受剧烈的挤压和摩擦, 导致钢丝损伤, 同时产生高温引起相变硬化, 部分受损钢丝横截面积减小, 承载能力降低, 继而发生断裂, 最终导致钢丝绳整体过载断裂。

关键词: 钢丝绳; 断裂; 失效分析; 摩擦磨损

中图分类号: TG142.41

文献标志码: B

文章编号: 1000-3738(2016)08-0103-04

Failure Analysis of Crane Wire Rope Fracture

BA Fa-hai, XUE Yu

(Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: The fracture failure of the crane wire rope was analyzed by the methods of macroscopic examination, chemical composition analysis, mechanical property test, fracture analysis, metallographic examination and so on. The results show that the fracture of the wire rope was ductile. The wire rope sustained a serious extrusion and friction during use, leading to the wire damage and transformation hardening by the produced high temperature. The damage and transformation hardening caused the decrease of cross sectional area and reduced the bearing power of the wire, resulting in the wire broken and the wire rope overload fracture.

Key words: steel wire rope; fracture; failure analysis; friction and wear

0 引言

某公司在仓库进行圆钢发货时, 起重机用的新钢丝绳突然发生断裂, 造成严重的伤害事故。该起重机钢丝绳规格为 $6 \times 37 + \text{NF}$, 采用 70 钢制造, 表面未经镀锌处理。钢丝绳使用时间约为 2 h, 使用次数 3 次, 每次吊运 14 支尺寸为 $\phi 6 \text{ cm} \times 7.2 \text{ m}$ 的圆钢, 总质量为 9.27 t; 吊运过程中, 一根钢丝绳在中间部位突然发生断裂。为了查明断裂原因, 作者对该钢丝绳进行了失效分析。

1 理化检验及结果

1.1 宏观形貌

由图 1 可知, 钢丝绳断裂后两端口(A 端和 B 端)的断裂形貌不同, A 端断口的钢丝已散开, 绳股

呈蓬松状, 断口上可见较严重的损伤痕迹, 一些钢丝断口呈明显的蓝色, 并黏连在一起; B 端断口稍显整齐, 仍然可见损伤痕迹, 部分断丝呈现蓝色高温特征; 断口附近钢丝的机械损伤严重, 未完全断裂钢丝绳上存在严重的摩擦磨损痕迹, 表面出现多处拉丝、毛刺、断丝、严重磨损、股间松弛等现象。

将钢丝绳捆扎后用线切割加工方式切断, 在 LEICA S8AP0 型体视显微镜下观察 B 端断口的宏观形貌。由图 2 可以看出, B 端断口处的钢丝失圆, 变形、摩擦切削痕迹明显, 钢丝断裂方式主要为缩颈断裂(比例超过 70%), 部分为剪切断裂; 断口附近钢丝摩擦损伤也较为严重, 剪切、机械损伤占比大于 15%, 断口发蓝的钢丝占比大于 10%。

1.2 化学成分

在断裂钢丝绳的断裂、未断裂部位和未使用新钢丝绳上分别取样, 利用 CS901B 型红外碳硫仪和 ARL4460 型光电直读光谱仪进行化学成分分析, 结果见表 1。由表 1 可知, 断裂钢丝绳不同部位的化

收稿日期: 2015-04-06; 修订日期: 2016-06-22

基金项目: 上海市科委自然科学基金资助项目(12ZR1409700)

作者简介: 巴发海(1966—), 男, 河南登封人, 教授级高工, 博士。

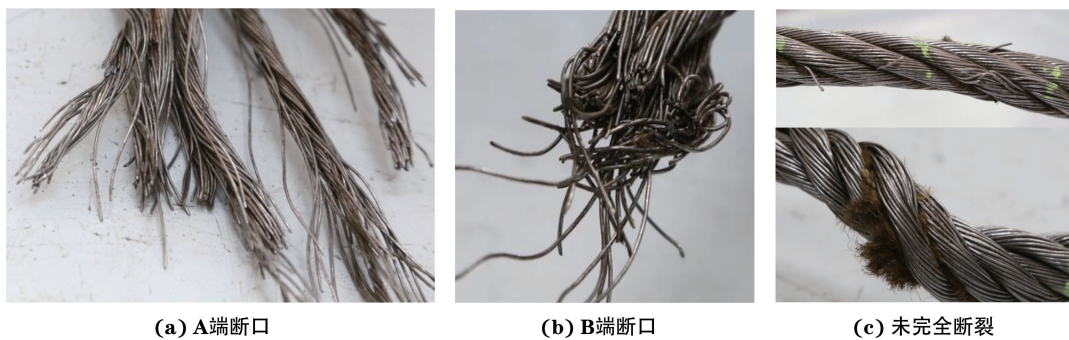


图1 断裂钢丝绳的宏观形貌

Fig.1 Macromorphology of broken wire rope: (a-b) A and B end of fracture and (c) unbroken part

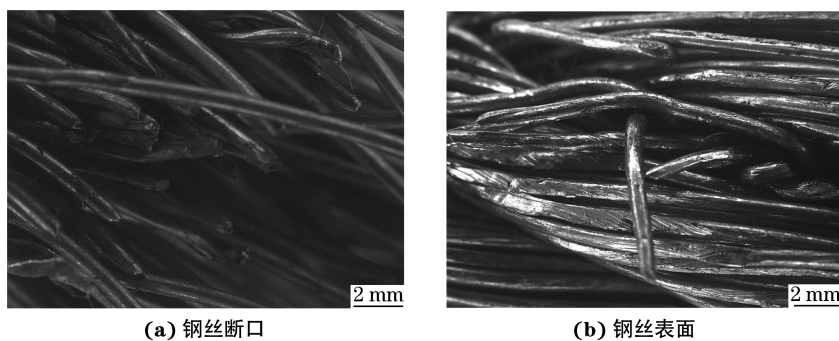


图2 断裂钢丝绳B端断口的宏观形貌

Fig.2 Fracture macro-morphology at B end of broken wire rope: (a) fracture of wires and (b) surface of wires

表1 新钢丝绳和断裂钢丝绳不同部位的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of new wire rope and of different parts of broken wire rope (mass) %

试样	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
新钢丝绳	0.70	0.21	0.57	0.019	0.008	0.019	0.004	0.017
断裂钢丝绳断裂部位	0.71	0.21	0.58	0.017	0.008	0.013	0.003	0.012
断裂钢丝绳未断裂部位	0.69	0.21	0.57	0.014	0.006	0.013	0.003	0.014

学成分与新钢丝绳的保持一致,都符合 GB/T 699—1999《优质碳素结构钢》中的相关规定。

1.3 质量与性能

将同批新钢丝绳按照 GB/T 20118—2006 进行逐项测试,并按照其要求进行判定。经检验,该钢丝绳的直径、不圆度、捻距、不松散性、表面质量、中心钢丝直径、钢丝直径等性能均符合 GB/T 20118—2006 的技术要求。

将新钢丝绳拆开,选取其中一股共 36 根钢丝分别进行试验。根据 GB/T 228—2010,使用 EMT2203-B 型电子式拉力试验机进行拉伸试验;根据 GB/T 238—2013,使用 XWJ-6 型线材弯折试验机测得钢丝绳的反复弯曲次数;根据 GB/T 239—2012,使用 XND-3 型电子式线材扭转试验机测试钢丝绳的扭转次数。由表 2 可知,钢丝绳的抗拉强度、反复弯曲次数、扭转次数、破断拉力均满足技术指标要求。

表2 新钢丝绳力学性能检测结果及技术指标

Tab.2 Test results and technical indexes of mechanical properties of new wire rope

项目	抗拉强度/ MPa	反复弯曲 次数/次	扭转次数/ 次	破断拉力/ kN
检测值	1 752~2 049	18~25	32~51	168(断 2 股)
标准指标	≥1 620	≥12	≥24	≥151

1.4 断口 SEM 形貌

截取断裂钢丝绳未完全断裂部位的断裂钢丝,利用 QUANTA400FEG 型扫描电子显微镜(SEM)观察断裂钢丝断口形貌。由图 3 可知,断裂钢丝有两种断口形貌,一种呈杯锥状,为颈缩断口,另一种的破断面与钢丝绳轴线成 45°夹角,断口较为平直,为剪切断口;两种断口处均有较为明显的磨损痕迹,且均存在明显的韧窝。

取断裂钢丝绳断口处的钢丝,在 QUANTA400 FEG 型扫描电子显微镜上观察钢丝断口形貌。由

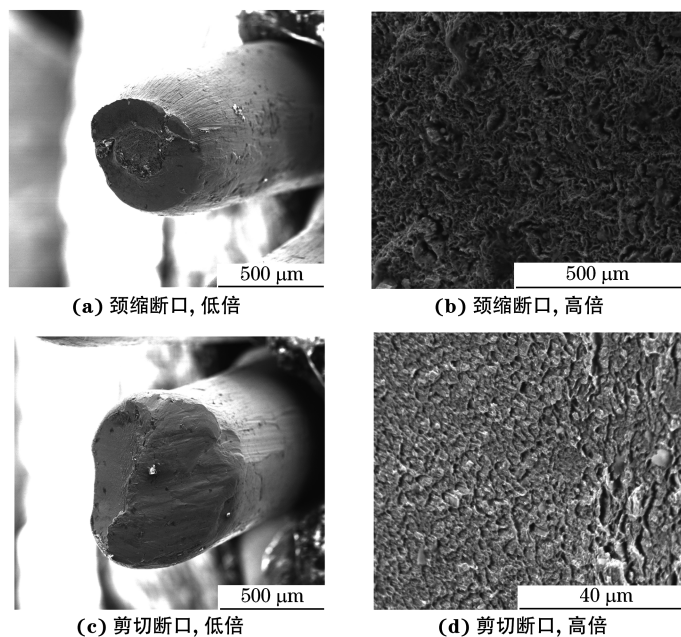


图3 断裂钢丝绳未完全断裂部位钢丝的断口形貌

Fig.3 Fracture morphology of wires at incomplete broken part of the broken wire rope:

(a—b) neck fracture at low and high magnification and (c—d) shear fracture at low and high magnification

钢丝剪切断口和颈缩断口均有明显韧窝。

由图4可知,选取钢丝绳断口处损伤较为严重的钢丝,在QUANTA400FEG型扫描电子显微镜

上观察钢丝损伤断口处形貌。由图5可知,钢丝有严重的机械磨损和摩擦损伤痕迹,其失圆严重,挤压变形明显,断口附近有烧灼痕迹。

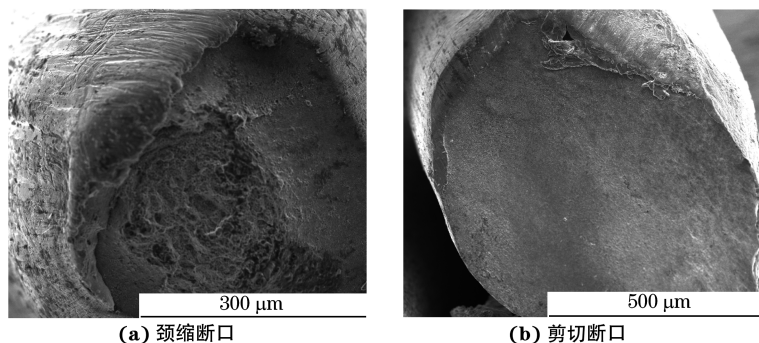


图4 断裂钢丝绳断口处钢丝的断口形貌

Fig.4 Fracture morphology of wires at fracture of the broken wire rope: (a) neck fracture and (b) shear fracture

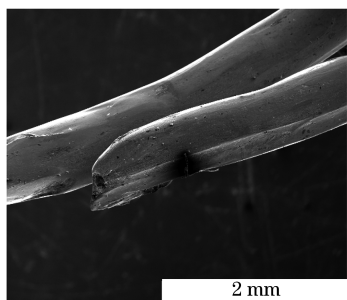


图5 断裂钢丝绳断口处钢丝损伤形貌

Fig.5 Wire damage topography at fracture of the broken wire rope

1.5 显微组织

在钢丝绳的钢丝断口处截取金相试样,经镶

样、磨抛、腐蚀后,在LEICA DMI5000M型光学显微镜下观察显微组织。由图6可见,钢丝断口发蓝处有一白亮层生成,其上有裂纹,白亮层为马氏体;白亮马氏体层与灰白色纤维状索氏体+极少铁素体基体之间有较为明显的分界;颈缩断口处无明显新相生成,剪切断口处无组织变化,断口较为平直,有极少裂纹,个别断口附近表面有轻微损伤;纯损伤钢丝表面磨损严重,横截面积减小,部分钢丝损伤表面可见较多裂纹,钢丝因严重损伤变形导致粗细不均。

1.6 显微硬度

在断裂钢丝绳的断口发蓝部位、未断裂部位和

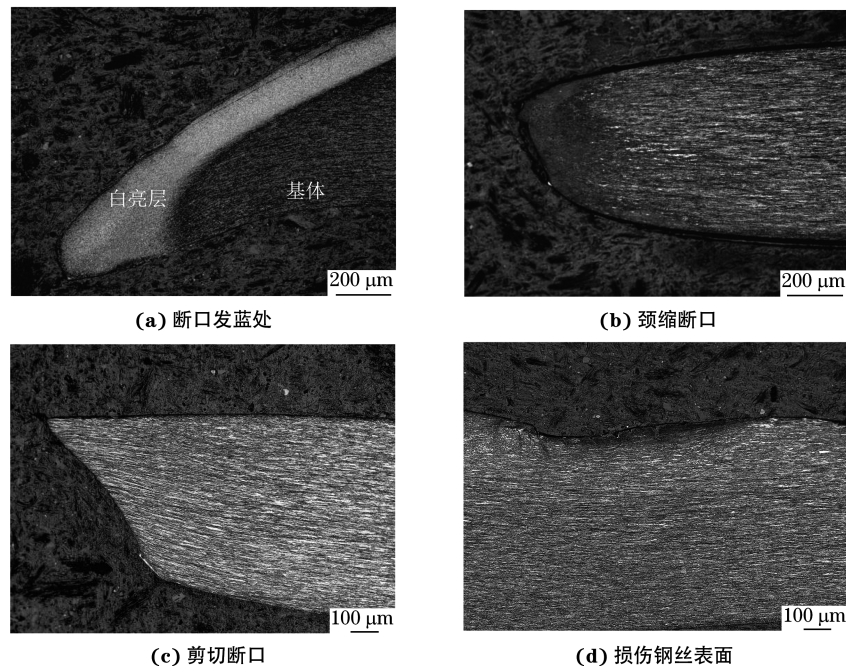


图6 断裂钢丝绳断口处钢丝的显微组织

Fig.6 Microstructures of wires at fracture of the broken wire rope: (a) blue spot at wire fracture; (b) neck fracture; (c) shear fracture and (d) pure damaged wire surface

新绳上分别截取金相试样,采用FM800型显微硬度计测显微硬度,载荷9.8 N,结果见表3。由表3可以看出,断裂钢丝绳基体、未断裂钢丝绳和新钢丝绳的硬度保持一致,但是断口发蓝区的硬度明显增大,说明发蓝区的显微组织发生了变化。

表3 新钢丝绳和断裂钢丝绳不同部位的显微硬度

Tab.3 Micro hardness of different parts of new and broken wire rope

试样	硬度测试值/HV(HRC)
新钢丝绳	495(49.0), 490(48.5), 494(48.5)
未断裂钢丝绳	490(48.5), 487(48.0), 492(48.5)
断裂钢丝绳基体	490(48.5), 493(48.5), 492(48.5)
断裂钢丝绳发蓝区	871(66.0), 864(66.0), 879(66.5)

2 断裂原因分析

断裂钢丝绳的化学成分、力学性能、尺寸精度等均满足技术指标要求。钢丝绳断口宏观上呈松散状,绳芯外露;断口主要为呈“杯锥状”的颈缩断口(比例大于70%)、破断面与钢丝轴线成45°角的剪切断口、部分损伤断口(比例大于15%),部分断裂钢丝绳断口发蓝(比例大于10%),以上均证明过载和损伤是断裂的主要原因^[1-5]。

钢丝断口均存在韧窝,部分断口上有少量解理

和二次裂纹,显示出断口的断裂性质为韧性断裂,同时有轻微的氢脆倾向,但从断口缩颈、剪切、损伤以及整绳破断的测试结果分析,断裂过程中氢脆影响并不明显;钢丝绳基体显微组织为灰白色纤维状索氏体+极少量铁素体,发蓝部位有亮白色马氏体生成,与基体索氏体之间有较为明显界面,可见在服役时因严重磨损和挤压摩擦产生的高温导致断口钢丝发生了淬火^[2]。断口发蓝区较高的显微硬度和其金相分析均显示该处有脆性马氏体生成,当钢丝绳弯曲时,这层薄而脆的马氏体相很容易断裂形成裂纹,使用过程中裂纹扩展使钢丝发生断裂。

钢丝绳服役时的实际载荷为91 kN,而其实际最小破断拉力为168 kN,根据GB/T 1672—2009的要求,起重用钢丝绳的安全系数为5,考虑到插编吊索,安全系数应选5/0.75。而要吊起9.27 t的钢材,钢丝绳的最小破断拉力应为 $9.27 \times 5 / 0.75 / 4 \times 9.80665 = 151.5$ kN,其值小于钢丝绳实际最小破断拉力。可见,在现场使用条件下,该钢丝绳力学性能满足要求,但这并未考虑到因加速度和冲击而受到的动载荷以及钢丝损伤对性能的影响。由于钢丝绳在工作时运动速度的不均匀,在启动和停止时的加速和减速,会使钢丝绳受到较大加速度,导致实际工作载荷比静载荷大,因此,钢丝绳的安全系数偏低。

(下转第110页)

0.48 mm,距表面 0.1 mm 处的显微硬度高于技术指标要求。断裂螺纹段裂纹源处及其部分区域渗碳不均匀,存在非马氏体组织,齿面处显微组织为针状马氏体+残余奥氏体,心部显微组织为板条状马氏体+少量铁素体,符合 10B21 冷锻钢盘条淬火+低温回火热处理后的组织特征;裂纹起源于螺纹齿根处,裂纹源处可见沿晶断裂特征,沿晶晶面上有明显“鸡爪状”氢致开裂形貌,裂纹扩展区及最后瞬断区主要呈韧窝和二次裂纹特征。

该断裂轴成品组装锁紧时力矩 60~70 N·m,到市场时再以较小载荷 45 N·m 锁紧时有个别断裂,有明显的静载荷作用下的延迟开裂特征,且具有氢脆开裂特征。氢脆在工程上指氢致延迟性脆性断裂,即当零件在负载工作时,如果零件内部存在氢损伤,则可能发生没有任何预兆的延迟性破坏。氢脆常常表现为批量性,即一旦同批材料中某一零件发生氢脆,其它同批或者同种工艺的零部件都有发生氢脆的可能。断裂轴的碳含量偏标准上限,表面渗碳处理提高了其硬度,相应的强度也得到了提高,而强度越高,对氢敏感性也就越大。根据氢的来源,氢脆可分为两大类^[1-2]:一类为内部氢脆,它是由于金属材料在熔炼、锻造、焊接、电镀、酸洗过程中吸入了过量的氢气而造成的;另一类为环境氢脆,是指金属在负载的同时从环境中吸入氢而引起脆化,它是在拉应力和含氢气氛或其他含氢介质的联合作用下引起的一种脆性断裂。影响氢致开裂的两个主要因素分别为临界氢浓度和临界应力,在外力作用下,氢沿应力梯度方向逐渐迁移、聚集,并容易在缺陷处(晶界、夹杂物与基体的界

面处等)富集,引起裂纹尖端区域脆化,同时该区域氢浓度降低,随后在外力的持续作用下,在脆性区域附近形成一定塑性开裂区,在氢浓度和应力梯度的影响下,上述过程反复进行,最终导致具有沿晶及局部范围韧窝特征的断口形貌。在该断裂轴前期表面黑磷处理工艺中,硫酸酸洗是氢的主要来源;剖面组织应力(如马氏体组织、渗碳件渗层与基体组织间的应力等)、淬火应力以及应力集中(螺纹根部、尺寸过渡处等)均是零件发生氢致开裂的应力源^[3]。淬火后在 10B21 钢轴螺纹处应力集中效应明显,促进了氢的富集,随后在静载荷的作用下,氢易向位错、晶界、夹杂与基体的界面及气孔等缺陷处聚集;在外齿根部、微裂纹尖端等应力集中的区域,氢在局部应力场交互作用下形成局部高浓度偏聚,由原子变为分子,产生巨大的体积膨胀效应,导致发生了氢脆。

3 结 论

10B21 钢螺纹轴的硬度高于技术指标要求,在螺纹段预紧力、齿根应力以及渗碳及酸洗过程中引入的氢的协同作用下,该轴螺纹段发生了氢致延迟脆性断裂。

参考文献:

- [1] 王斌.某导弹位标器用弹簧垫圈失效分析[J].理化检验-物理分册,2005,41(7):361-362.
- [2] 鄢国强.材料质量检测与分析技术[M].北京:中国计量出版社,2005.
- [3] 张斌,陈小工,胡四军.汽车零部件氢致断裂的分析及预防[J].理化检验-物理分册,2010,46(4):271-273.

(上接第 106 页)

3 结 论

(1) 钢丝绳在使用中存在强烈的挤压摩擦损伤和相变硬化,导致部分受损钢丝横截面积减小,承载能力降低,继而发生过载导致钢丝断裂,最终导致钢丝绳整体过载断裂。

(2) 建议在使用钢丝绳时,应严格按照钢丝绳操作规范执行操作任务;新钢丝绳要在低速、中载条件下运行一段时间,使新钢丝绳适应使用状态后,再逐步提高钢丝绳运行速度和加大提升载荷;使用过程中应及时检查,发现超出标准规定数量的断丝或

严重磨损时,应及时更换钢丝绳。

参考文献:

- [1] 张德英,单联敏.钢丝绳使用中断丝原因分析[J].金属制品,1999,25(3):7-9.
- [2] 肖永清.起重钢丝绳的失效分析与安全使用[J].金属制品,2010,36(6):63-67.
- [3] 王新华,江爱华,高海生,等.通用桥式起重机钢丝绳断裂失效分析[J].理化检验-物理分册,2012,48(4):269-273.
- [4] 汪浩.提升钢丝绳的损坏原因及防护措施[J].煤矿机械,2008,29(1):141-144.
- [5] 王强.起重机用钢丝绳的损伤形式及防治措施[J].港口装卸,2007(1):13-17.