

## 输电铁塔用 SWRCH15A 钢螺栓冷镦断头原因分析及改进工艺

李永超<sup>1,2</sup> 吴剑飞<sup>1,2</sup> 王欣<sup>1,2</sup> 翟国豪<sup>1,2</sup> 王晶<sup>1,2</sup>

(1 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术创新中心, 邢台 054027)

**摘要** 采用化学成分分析、金相检验、硬度分析、断口形貌分析和氧氮含量检测等方法, 分析了 SWRCH15A 钢螺栓断头的原由。结果表明, 合格螺栓 T[O] 和 [N] 分别为 0.002 0% ~ 0.002 1% 和 0.006 2% ~ 0.006 4%, 而断头螺栓 T[O] 达 0.006 3% ~ 0.006 4%, [N] 为 0.010 3% ~ 0.010 8%, 导致材料在冷变形过程中塑性降低, 螺栓头部 HRB 硬度值超过 100, 易在应力集中的头部和杆部过渡区断裂, 是螺栓断头的主要原因。通过控制精炼渣 (FeO + MnO) ≤ 1.0%, 防止钢水吸氧氮和二次氧化, 待浇时间由原来的 15 ~ 20 min 降至 5 ~ 10 min, 加砂方式由人工投掷改为导管罐装加砂、加强包底清理等措施, 钢包自动开浇率由原来的 85.7% 提高至 98.9%, 未再出现类似质量问题。

**关键词** 输电铁塔用 SWRCH15A 钢 螺栓断头 微观组织 预防

## Cause Analysis on Bolt Cold-Heading Breakage of SWRCH15A Steel for Transmission Tower and Improvement Process

Li Yongchao<sup>1,2</sup>, Wu Jianfei<sup>1,2</sup>, Wang Xin<sup>1,2</sup>, Zhai Guohao<sup>1,2</sup> and Wang Jing<sup>1,2</sup>

(1 Technical Center Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027;

2 Hebei Engineering Technology Innovation Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

**Abstract** The reasons for SWRCH15A steel bolt breakage are analyzed by chemical composition analysis, macroscopic examination, hardness analysis, fracture morphology analysis and oxygen and nitrogen content detection. The results show that qualified bolt T[O] and [N] are respectively 0.002 0% ~ 0.002 1% and 0.006 2% ~ 0.006 4%, but the breakage bolt T[O] and [N] are respectively up to 0.006 3% ~ 0.006 4% and 0.010 3% ~ 0.010 8% that leads to a decrease in the plasticity of the material during cold deformation, the HRB hardness value of bolt head is more than 100, it is easy to break in the stress-concentrated head and shank transition area and is the main reason for the bolt break. With controlling refining end slag (FeO + MnO) ≤ 1.0%, avoiding liquid absorbing oxygen and nitrogen and secondary oxidizing, reducing the casting waiting time from 15 ~ 20 min to 5 ~ 10 min, changing the way of adding sand from manual throwing to tube canning sand adding and strengthening the cleaning of the bottom of ladle, the automatic pouring rate of ladle has been raised from 85.7% to 98.9%, and no similar quality problems have occurred again.

**Material Index** Transmission Tower SWRCH15A Steel, Bolt Breakage, Microstructure, Precaution

输电铁塔是国家电网输电线路的重要组成部分,起着连接架空导线输送电能的作用。随着电力行业的快速发展,输电铁塔数量较快增加<sup>[1-2]</sup>。由于工作环境恶劣,为保证输电铁塔安全,对输电铁塔用螺栓质量要求非常严格<sup>[3]</sup>。近期某下游紧固件使用客户反馈生产的某批输电铁塔用螺栓,敲头试验过程中频繁出现断头现象,不合格率达 80%,断裂位置发生在螺杆与头部的过渡区,如图 1 所示。螺栓原材料为 SWRCH15A 钢,其生产流程为铁水 + 废钢 → 50 t 转炉 → 50 t LF → 4 机 4 流小方坯连铸 (160 mm × 160 mm) → 钢坯检验 → 步进梁式加热炉加热 → 高压水除鳞 → 控轧控冷 → Φ16 mm 盘条。螺栓加工工艺流程为: Φ16 mm 盘条 → 冷拉至 Φ14.19 mm → 冷镦 → 搓丝 → 去应力退火 (550 °C + 保温 2 h) → 螺栓敲头试验 → 热镀锌。敲头试验是将成品螺栓放

于带有斜面和内孔的试验装置中(见图 2),经敲击

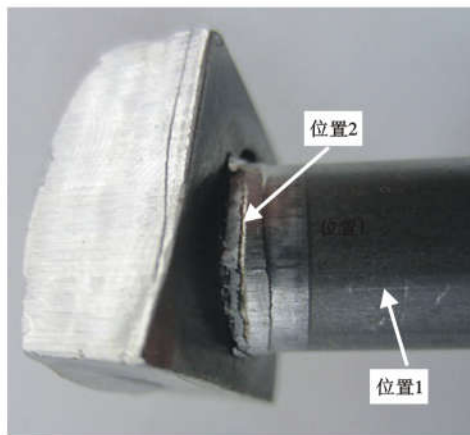


图 1 断头螺栓实物图

Fig. 1 Photo of head broken bolt

直至螺栓头部与斜面贴合。

为寻找该批次螺栓断头的原因,本试验从化学成分、断口形貌、金相组织、硬度、氧氮含量等方面对正常螺栓和断头螺栓进行了对比分析,并从中找到预防和改进措施。

## 1 试验方法

对断头螺栓进行取样分析,取样位置分别为螺栓杆部(图 1 位置 1)和螺栓头部断口附近(图 1 位置 2)。对上述位置 1、位置 2 处分别进行金相组织、化学成分、硬度及氧氮含量的检测分析。同时,对螺栓断口进行宏观形貌和微观形貌观察,通过检测结果分析螺栓断头的原因。

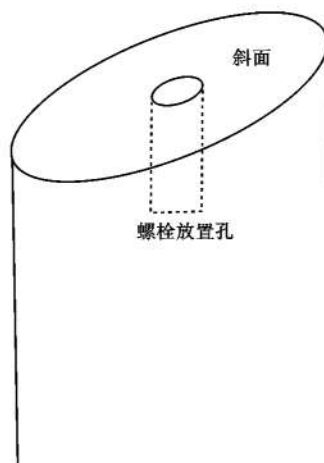


图 2 敲头试验装置

Fig. 2 Head tapping test device

表 1 头部断裂处和螺杆的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of head breakage area and holt body/%

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Al	Cu	Ni
JIS3507-1 标准	0.13 ~ 0.18	≤0.10	0.30 ~ 0.60	≤0.035	≤0.030	≤0.20	≥0.02	≤0.20	≤0.20
螺栓头部断裂处	0.14	0.05	0.42	0.005	0.013	0.04	0.036	0.01	0.01
未断裂螺杆处	0.14	0.04	0.43	0.004	0.014	0.04	0.035	0.01	0.01

## 2 结果及讨论

### 2.1 化学成分分析

分别对螺栓的未断裂螺杆处(图 1 位置 1)和断口附近(图 1 位置 2)进行了化学成分分析,并与 JIS3507-12005《冷镦用碳素钢-第一部分:盘条》中 SWRCH15A 钢规定的化学成分进行对比,检测结果见表 1。由表 1 可见,螺栓化学成分符合 JIS3507-12005 中 SWRCH15A 钢化学成分要求。由此可见,材质化学成分不是造成螺栓断裂的原因。

### 2.2 断口形貌

图 3(a)为螺栓断口的宏观形貌,从宏观形貌看,断口大致可分为 2 个区域,A 区呈平滑状,无明显裂纹,B 区呈剪切唇状。从宏观形貌可以看出,螺栓断裂的起源位置为螺杆和头部的过渡区,此位置通常是应力集中区域。敲头试验过程中,此区域在敲击力作用下,过渡区受到一个较大的向上拉应力。当此拉应力超过材料承受能力时将导致螺栓断头。图 3(b)为螺栓断口的微观形貌,从图 3(b)中可以看出,断口有大量的韧窝,韧窝虽有一定的深度,但相对比较浅,属于韧性断裂。在韧窝内未发现外来

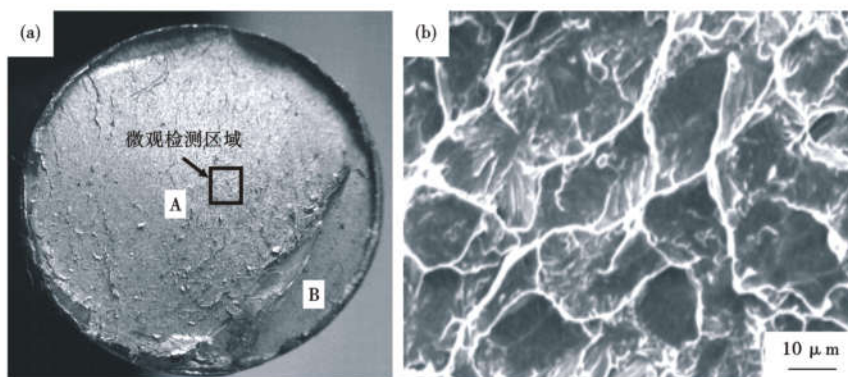


图 3 断口宏观(a)和微观(b)形貌

Fig. 3 Fracture macrograph (a) and micrograph (b) morphology

夹渣及大尺寸非金属夹杂物。

### 2.3 金相组织分析

对未断裂的螺杆处取样进行镶嵌、打磨、抛光和 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后在光学显微镜下进行观察。从图 4 中可以看出,螺栓杆部的金相组织为典型的铁素体 + 少量珠光体,符合 SWRCH15A 钢的组织状态,未发现明显异常。

### 2.4 硬度分析

客户要求成品螺栓的 HRB 硬度值控制在 85 ~ 100,因此对螺栓杆部和头部的硬度进行了测量,结果见图 5。从图 5 中可以看出,断头螺栓和合格螺栓杆部 HRB 硬度值在 86 ~ 92,合格螺栓的头部 HRB 硬度值在 97 ~ 99,均符合硬度要求。但断头螺

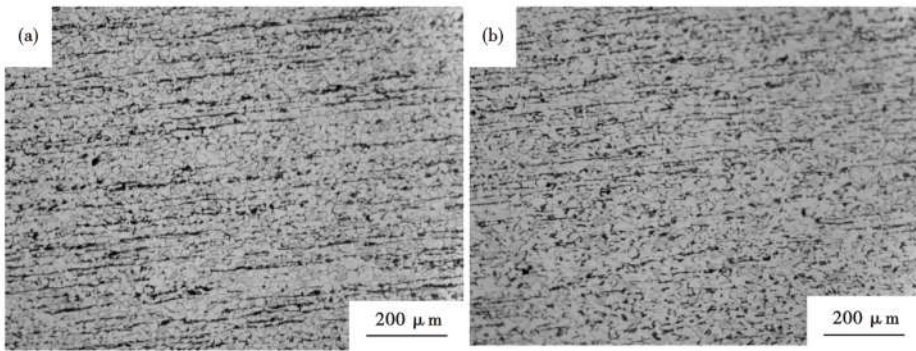


图 4 螺栓杆部心部(a)和边部(b)的组织

Fig. 4 Microstructure of center (a) and edge (b) of bolt rod body

属于正常水平。而问题螺栓的全氧 T.O 高达 0.006 3% ~ 0.006 4%, [N] 更是高达 0.010 3% ~ 0.010 8%, 属于明显异常情况。研究表明<sup>[4]</sup>, 氧氮含量偏高会恶化钢水洁净度, 非金属夹杂数量增多, 破坏钢基体的连续性, 恶化钢的塑性; 另一方面, [N] 偏高会造成材料加工硬化趋势增大, 塑性降低, 脆化倾向增强, 使钢在冷加

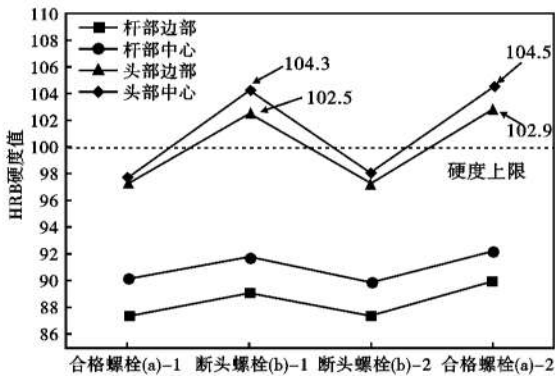


图 5 合格螺栓(a)和断头螺栓(b)硬度对比

Fig. 5 Contrast of hardness between qualified bolt (a) and breakage bolt (b)

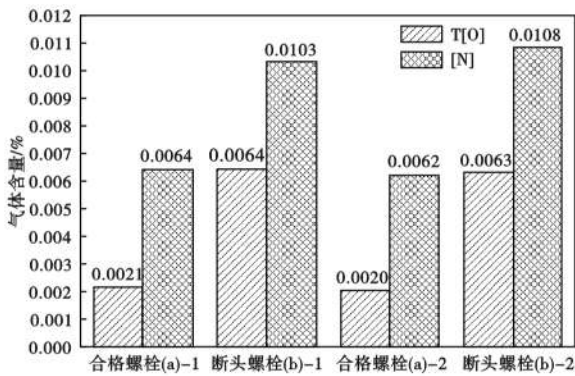


图 6 合格螺栓(a)和断头螺栓(b)氧氮含量对比

Fig. 6 Comparison of oxygen and nitrogen content in bolts between qualified bolt (a) and breakage bolt (b)

栓的头部 HRB 硬度值  $\geq 100$ , 已经超出了硬度要求。由于头部硬度高, 塑性低, 螺栓在外力作用下易在头部与杆部的过渡区开裂。

### 2.5 氧氮含量分析

从图 6 可以看出, 合格螺栓的 T[O] 在 0.002 0% ~ 0.002 1%, [N] 在 0.006 2% ~ 0.006 4%,

表 2 精炼炉渣目标成分和碱度控制

Table 2 Target composition and basicity control of refining slag

项目	成分/%					碱度(R)
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	(FeO + MnO)	
要求	45 ~ 55	25 ~ 35	$\leq 10$	5 ~ 8	$\leq 1.0$	$\geq 3$
试验钢	50.12	29.47	3.56	6.2	0.62	14.1

工变形过程中强度、硬度增加, 变形延展困难, 在冷变形时易发生开裂<sup>[5]</sup>。由于断头螺栓的氧氮含量较高, 导致加工过程螺栓头部硬度超标、材料塑性降低, 大大增加了敲头试验中螺栓头部与杆部过渡区的断裂风险。因此, 氧氮含量异常偏高是导致螺栓断头的主要原因。

## 3 过程追溯与改进工艺

### 3.1 过程追溯

转炉生产 SWRCH15A 钢的终点碳控制在 0.08% ~ 0.12%, 控制终点溶解氧含量  $\leq 300 \times 10^{-6}$ , 氧气补吹次数控制在  $\leq 1$ , 避免钢水过氧化。出钢过程全部加入铝块预脱氧, 再依次加入高碳锰铁、低氮增碳剂和石灰; 出钢后加入石灰和精炼渣进行顶渣改制。

LF 精炼过程加入电石、铝粒和石灰造白渣, 控制精炼后渣碱度  $\geq 3$  (见表 2), 保证白渣精炼时间  $\geq 15$  min, 控制精炼终渣 (FeO + MnO)  $\leq 1.0\%$ ; 为防止钢水吸氧氮, 精炼过程保持炉内微正压, 底吹气量保证液面不裸露, 避免钢水吸气。

浇注过程钢包长水口采用保护套管 + 氩封, 中间包加覆盖剂和吹氩保护, 采用整体式浸入式水口, 控制 Al 损  $\leq 0.000 4\%$ , 防止钢水二次氧化。

经生产过程追溯, 发现断头螺栓对应的炉次在生产过程中无法自动开浇, 被迫进行烧氧开浇, 钢水

二次氧化严重,导致钢水氧氮含量偏高。

### 3.2 改进工艺

为避免此类情况发生,重点从以下三方面采取了改进工艺:

(1)合理控制生产节奏,降低待钢时间。大量研究和实践表明<sup>[6-7]</sup>,钢水待浇时间越长,引流砂的烧结层越厚,强度越大,造成钢水的静压力不能使其破碎。因此。将待浇时间由原来的 15 ~ 20 min 降低至 5 ~ 10 min。

(2)优化引流砂加入方式。取消人工投掷的方式加引流砂,采用导管罐装加引流砂,确保灌砂准确和水口填充饱满。

(3)加强包底清理。对于浇注完毕的空钢包,翻渣后,必须在热修作业时将包底残留的余钢、余渣清理干净,避免在高温作用下,余钢或余渣变成液体,逐步渗入引流砂中。使引流砂漂浮于渣层,烧结层增厚,烧结强度变大,影响自动开浇。

工艺改进后,钢包自动开浇率由原来的 85.7% 提高到 98.9%,未再出现类似质量问题。

### 4 结论

(1)断头螺栓化学成分符合 JIS3507-1 标准要求,金相组织正常,杆部硬度满足客户要求,但螺栓头部硬度超标。

(2)螺栓断头的主要原因为螺栓氧氮含量异常

偏高,造成材料在冷变形过程中硬度增加,塑性恶化,在敲头试验中易导致螺栓头部与杆部的过渡区断裂。

(3)通过将待浇时间由原来的 15 ~ 20 min 降至 5 ~ 10 min、加砂方式由人工投掷改为导管罐装加砂、加强包底清理等措施,钢包自动开浇率由原来的 85.7% 提高至 98.9%,未再出现类似质量问题。

河北省科技计划项目资助(NO.205676134H)

### 参考文献

[1]刘 栓,周开河,方云辉,等.石墨烯重防腐涂层在国网输电铁塔防护的应用研究[J].中国材料进展,2017,36(6):442-447.

[2]常建伟,徐德录,张 磊,等.输电铁塔用钢及其焊接技术[J].热加工工艺,2011,40(15):148-151.

[3]常建伟,李凤辉,徐德录,等.输电铁塔用角钢韧脆转变温度评价方法研究[J].热加工工艺,2015,44(10):63-68.

[4]马军红,丁 辉,朴占龙,等.氧氮含量与显微夹杂含量变化对炼钢生产的影响[J].铸造技术,2017,38(3):674-676.

[5]李江华,赵征宇,杨 辉,等.不同氮含量低碳钢的拉伸应变时效行为[J].物理测试,2018,36(1):12-15.

[6]吕凯辉.三安炼钢厂提高钢包自动开浇率的生产实践[J].浙江冶金,2015(4):43-46.

[7]陈永金,陆志坚,杨剑洪.提高 160 t 钢包自开率的工艺实践[J].柳钢科技,2011(2):16-19.

李永超(1985-),男,硕士(2012 北京科技大学),工程师,2009 年河北理工大学(本科)毕业,中低碳冷镦钢的研发及质量控制。E-mail:liyongchao1220@163.com

收稿日期:2020-07-21

=====

**质量是企业的生命**

**今天的质量是明天的市场**

**质量与人人有关**