

SWRCH22A钢自攻螺钉断裂失效分析与工艺改进

马志敖, 杨青, 王小琴, 李政

重庆赛力斯新能源汽车设计院有限公司 重庆 401331

摘要: 针对SWRCH22A钢自攻螺钉使用过程中发生断裂的原因进行探究, 对断裂螺钉进行了化学成分分析、含氢量检测、硬度测试及金相分析。结果表明: 断裂失效样品化学成分符合标准要求, 含氢量满足设计要求, 表面与心部硬度满足技术指标, 但渗碳层深度超出了规定值。通过对失效样品断口形貌深入分析, 局部断口形貌呈沿晶脆性断裂特征, 与热处理工艺参数不当有关。优化改进了螺钉渗碳工艺并装车使用, 试验效果良好。

关键词: SWRCH22A钢; 自攻螺钉; 失效分析; 渗碳层; 沿晶断裂; 热处理工艺

Failure analysis and technological improvement of SWRCH22A steel self-tapping screw

MA Zhiao, YANG Qing, WANG Xiaoqin, LI Zheng

Chongqing SERES New Energy Vehicle Design Institute Co., Ltd., Chongqing 401331, China

Abstract: The cause of fracture of SWRCH22A steel self-tapping screw sample during use was explored. Chemical composition analysis, hydrogen content detection, hardness test and metallographic analysis were carried out on the broken screw. The results showed that the chemical composition of the sample met the standard requirements, the hydrogen content met the design requirements, and the surface and core hardness met the technical indicators. But the depth of the carburizing layer exceeds the specified value. Through the in-depth analysis of the fracture morphology of the sample, the local fracture morphology is characterized by intergranular brittle fracture, which is related to improper heat treatment parameters. The screw carburizing process was optimized and improved, and the experiment results were good.

Keywords: SWRCH22A steel; self-tapping screw; failure analysis; carburized layer; intergranular fracture; heat treatment process

1 序言

随着现代工业技术的飞速发展, 螺钉作为基础而关键的连接元件, 在机械设备、建筑工程及航空航天等诸多领域中广泛应用。然而, 螺钉断裂现象时有发生, 不仅影响设备正常运行, 严重时甚至可能引发安全事故, 对人类生活和生产带来巨大威胁^[1]。近年

来, 螺钉断裂问题引起了国内外学者的广泛关注, 成为工程力学、材料科学及机械设计等领域的重要研究课题。

螺钉断裂的发生, 涉及到材料性质、设计参数、制造工艺、服役环境及负载条件等多种复杂因素的交互作用^[2]。其中, 应力集中、疲劳损伤及腐

蚀环境加速老化等问题是导致螺钉断裂的主要原因^[3, 4]。此外, 不当的操作方式或维护保养不足也可能诱发螺钉提前失效^[5]。深入理解并精确预测螺钉断裂的机理, 对于提高螺钉的可靠性和延长其使用寿命具有至关重要的意义。

目前, 尽管在螺钉断裂预防及控制方面已取得一定的研究成果, 但面对日益复杂的使用环境和更高的性能需求, 如何从设计源头减少断裂风险, 优化螺钉选材及表面处理工艺, 制定科学合理的检测维护策略, 仍是亟待解决的关键问题^[6, 7]。本研究结合理论分析与试验验证, 系统地探讨螺钉断裂的各种影响因素及其内在关系, 旨在为螺钉的设计、制造和应用提供更为全面且深入的理论依据和技术指导。

2 试验材料与工艺

试验材料选用SWRCH22A钢(JIS标准)制造的十字槽盘头自攻螺钉样品, 规格为Q2712995(ST2.9×9.5)。螺钉的制造工艺为: 线材→粗拔→退火→酸洗磷化→精拔→冷镦→夹尾→搓丝→清洗→高温渗碳→淬火→低温回火→电镀。两组样品经总装装配后在样车进行路试过程中出现了异响, 随后拆解发现, 螺钉样品发生断裂问题。在本研究中, 对两组样品进行了详细的断裂分析。

3 检测结果

3.1 宏观观察

根据观察, 两组样品表面均未出现磕碰和磨损痕迹, 镀层完好, 表明螺钉断裂前并未受到撞击、磕碰等异常情况; 两颗样品断裂位置基本一致, 均在距螺钉头部两螺牙位置从螺纹根部发生断裂, 表明螺钉断裂形式相同; 断裂处无明显的缩颈现象, 表明断裂并非由于材料的局部塑性变形所致; 断面呈现出浅灰色, 可能是由于断裂过程中产生的氧化作用导致颜色变化; 此外, 断面上还存在磨损和污染痕迹, 可能与样品在使用过程中的环境因素有关。为了深入了解断裂情况, 采用Stemi 508型体视显微镜对样品进行了观察。图1所示为样品断裂位置, 图2所示为样品断面。图3、图4所示分别为1[#]、2[#]样品断裂外观形貌, 进一步揭示断面的微观结构。

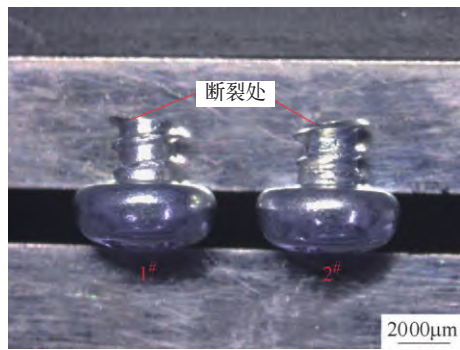


图1 样品断裂位置 (6.3×)

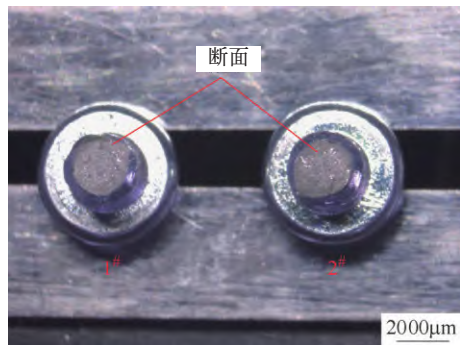


图2 样品断面 (6.3×)

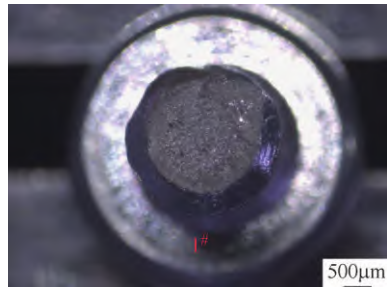


图3 1[#]样品断裂外观形貌 (16×)

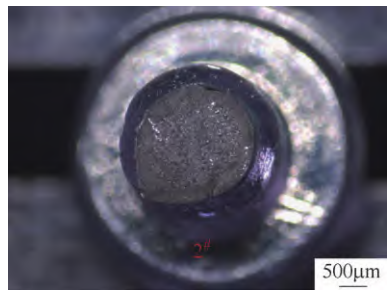


图4 2[#]样品断裂外观形貌 (16×)

3.2 断口分析

由于1[#]与2[#]样品断裂形式一致, 因此仅在1[#]样品断口附近取样进行观察。采用EVO18型扫描电子显微镜(SEM)观察, 发现断口呈现两种主要的断裂模式。

其一, 断口的局部区域(靠近表面)显示出冰

糖状的特征，这是典型的沿晶断裂模式。这种断裂模式通常与晶界上的缺陷或杂质有关，通常表现为裂纹沿晶界扩展，形成连续的断裂面。图5、图6所示为这种断裂模式的典型外观。

其二，在断口的另一部分（靠近心部），观察到了韧窝断裂。这是一种韧性断裂模式，表明材料在断裂前经历了塑性变形，如图7、图8所示。韧窝

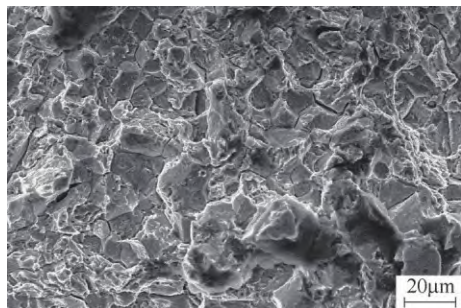


图5 沿晶断口形貌 (1500×)

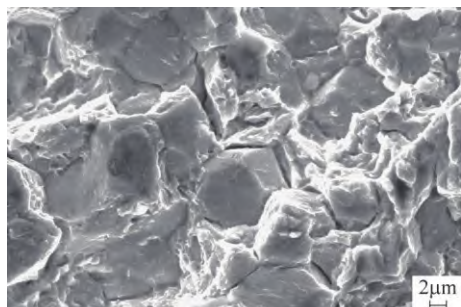


图6 沿晶断口形貌 (5000×)

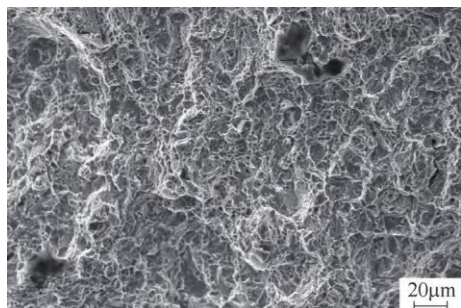


图7 韧窝断口形貌 (1000×)

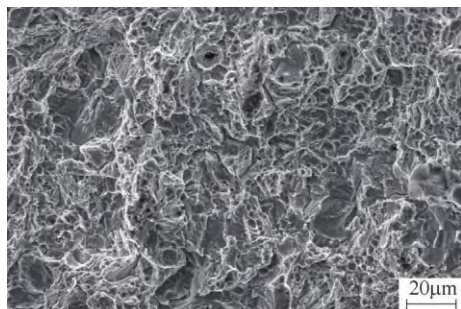


图8 韧窝断口形貌 (1500×)

的存在表明材料具有一定的韧性，能够在断裂前吸收能量。

3.3 金相分析

依据GB/T 25744—2010《钢件渗碳淬火回火金相检验》进行显微组织评定：样品表面组织为隐晶回火马氏体，如图9所示；随着碳浓度不断降低，从渗碳层到基体组织变化是细针状回火马氏体逐渐减少，板条回火马氏体逐渐增多，心部基体组织为：板条回火马氏体+少量游离铁素体，如图10所示。样品金相组织符合该热处理工艺下组织的要求，使材料不但具有较高的强度和硬度，同时也具有良好的塑性和韧性^[8]。

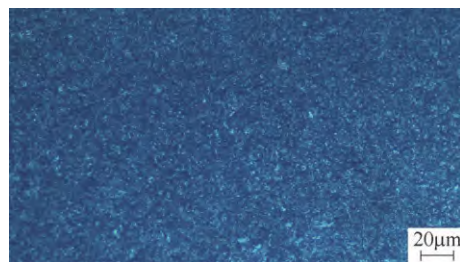


图9 表面组织 (500×)

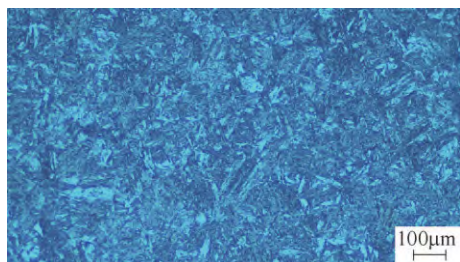


图10 心部组织 (500×)

3.4 硬度测试

依据GB/T 9450—2005《钢件渗碳淬火硬化层深的测定与校核》，采用FALCON 507全自动显微维氏硬度计对样品从表面到心部硬度梯度进行检测，结果见表1。样品硬度满足技术要求，表明样品经过渗碳处理后，表面硬度得到了显著提高，心部

表1 硬度检测结果

测试项目	技术要求	实测值 I	实测值 II	实测值 III	平均值
表面硬度HV	≥450	563	561	565	563
心部硬度HV	270~390	361	362	360	361
渗碳层深度/mm	0.05~0.18	0.35			

硬度也达到了预期范围，但渗碳层深度超过技术要求，会导致材料的脆性增大，这可能降低工件的抗冲击性能和使用寿命，同时也可能影响工件的表面质量和力学性能。

3.5 氢含量检测

依据GB/T 223.82—2018《钢铁 氢含量的测定 惰性气体熔融-热导或红外法》，采用ELEMENTRAC ONH分析仪对两颗断裂螺钉残余部分进行氢含量检测，结果见表2。两颗螺钉氢含量均符合设计要求。氢会影响钢中的金属晶体结构，导致钢材脆性增加，容易发生裂纹、断裂等破坏^[9]，因此控制钢材特别是紧固件中的氢含量非常重要，可大大减少氢对材料的损害，降低材料的氢脆性，确保材料品质优良。

表2 含氢量检测结果（质量分数）（%）

设计要求	1#样品实测值	2#样品实测值
≤0.0002	0.00010	0.00009

3.6 化学成分分析

依据GB/T 20125—2006《低合金钢 多元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》，利用BLUE-FMS36S0P电感耦合等离子体原子发射光谱仪对多元素含量进行测定；根据GB/T 20123—2006《钢铁 总碳硫含量的测定 高频感应炉燃烧后红外吸收法（常规方法）》，采用HCS-801A高频红外线碳硫分析仪对样品的总碳硫含量进行测定，检测结果见表3。样品的化学成分满足技术要求，考虑到螺钉经过渗碳热处理，C含量仅作为参考。

表3 SWRCH22A钢螺钉化学成分分析结果（质量分数）（%）

元素	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al
标准值	0.18~0.23	≤0.020	≤0.020	≤0.10	0.70~1.00	≤0.20	≤0.20	≤0.30	≥0.020
实测值	0.518	0.0034	0.0183	0.0165	0.781	0.0293	0.0077	0.0386	0.0533

4 分析与讨论

本研究针对规格为Q2712995（ST2.9×9.5）的SWRCH22A钢自攻螺钉样品进行了全面的性能测试和失效分析。

1）样品金相组织符合该热处理工艺下组织要求，样品具备优良的综合性能。

2）样品氢含量在设计要求范围内，大大降低了氢脆敏感性，提高了螺钉安全使用性能。

3）样品化学成分满足技术要求，考虑到其经过渗碳处理，C含量仅作参考，但其他元素含量均在适宜范围内，确保了材料的基本性能。

4）在力学性能方面，样品表面硬度和心部硬度均达到预设的技术要求，但渗碳层深度超过了规定要求，可能对螺钉的整体力学性能和使用寿命产生不利影响。

5）通过断口扫描分析，断口呈现沿晶脆性断裂特征，沿晶断裂具有突发性和不可预测性，材料在断裂前没有明显的塑性变形，往往难以发现预警

信号^[10]。这种沿晶断裂特性强烈指向了螺钉样品热处理工艺可能存在不足，需深入考察热处理工艺参数，包括硬度梯度及金相组织是否合理优化。

5 改进措施及效果

本研究中，螺钉样品渗碳层超出了规定要求，渗碳层过深会增加淬火应力及脆性，降低材料韧性^[11]，而渗碳层过深通常是由于渗碳温度偏高或时间过长导致的。为验证是否为渗碳层过深导致螺钉力学性能下降，对螺钉的热处理工艺进行改进，适当降低了渗碳温度并提高了网带炉的运行速度，精确控制渗碳时间。对改进热处理工艺后生产的螺钉取2颗样品进行硬度测试和渗碳层深度检测，结果见表4。从表4可看出，样品表面和心部硬度均满足技术要求，渗碳层深度也在规定要求之内，使材料具备了更加优异的综合性能。

随机抽取6颗该批热处理工艺改进后的螺钉装配到样车上再次进行道路试验，截至目前所有螺钉均在正常服役中，未再发生类似断裂失效。

表4 硬度测试结果

样品编号	测试项目	技术要求	实测值 I	实测值 II	实测值 III	平均值
1	表面硬度HV	≥ 450	505	505	504	505
	心部硬度HV	270~390	346	345	343	345
	渗碳层深度/mm	0.05~0.18	0.12			
2	表面硬度HV	≥ 450	501	503	504	503
	心部硬度HV	270~390	342	344	344	343
	渗碳层深度/mm	0.05~0.18	0.11			

6 结束语

综合各项试验数据和分析结果,该SWRCH22A钢螺钉样品断裂的主要原因是:在外力作用下,由于渗碳层深度过深,增加了材料内应力及脆性,降低了塑性和韧性,导致材料整体力学性能未能有效抵抗外力冲击,最终发生了沿晶脆性断裂。通过改善螺钉的热处理工艺,控制渗碳层深度和均匀性,可有效提高螺钉的表面硬度和耐磨性,也能提高螺钉的强度和韧性,改善疲劳性能,使螺钉在承受重负载或冲击时不易断裂或变形,保持更好的稳定性和可靠性,从而显著提高螺钉的使用寿命。

参考文献:

- [1] 冶金工业部钢铁研究院,等.合金钢断口分析金相图谱[M].北京:科学出版社,1979.
- [2] 王荣.失效机理分析与对称[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [3] 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.
- [4] 刘国强,王小海,张鹏,等.20Cr2Ni4A齿轮钢天然气渗碳工艺研究[J].铸造,2021,70(5):540-546.
- [5] 陈旭,孟文华,顾静青,等.SWRCH15A钢螺钉断裂原因分析[J].理化检验(物理分册),2016,52

(7):507-509.

- [6] 刘红兰,李祖鑫.常见自攻螺钉断裂的原因[J].理化检验(物理分册),2009,45(6):387-388.
- [7] 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.
- [8] 刘玉,吴玉程.钢的渗碳层组织与断裂形貌分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),1997(4):74-78.
- [9] 黄斌,朱洪武,杨忠,等.渗碳温度对22Si2MnCrNi2MoA钢渗碳层的影响[J].材料热处理学报,2013(7):136-141.
- [10] 王玉玲,王俊.30CrMnSiA螺栓失效分析[J].机械工程材料,2008,21(5):71-73.
- [11] 王婷,轩喜瑜,成智会.发电机用紧固件螺钉断裂分析[J].金属加工(热加工),2023(1):62-64.

MW 20240720