

30CrMnSiNi2A钢螺栓螺纹感应回火工艺研究

张金卓, 王大宏, 王鹏, 王铮, 孙小琪, 王占鸿, 晁耀杰

大连长丰实业总公司 辽宁大连 116038

摘要: 通过对30CrMnSiNi2A钢螺栓的感应回火处理要求进行分析, 提出螺栓螺纹感应回火方案, 对比分析不同感应加热方式对螺栓回火区、热影响区硬度的分布, 确定最佳的30CrMnSiNi2A钢螺栓螺纹感应回火工艺, 使螺栓的感应回火技术指标满足要求, 最终通过重复性试验验证, 进行硬度、金相检测, 完成对30CrMnSiNi2A钢螺栓螺纹感应回火工艺的研究。

关键词: 感应回火; 感应频率; 趋肤效应; 感应加热设备

Research on induction tempering technology for 30CrMnSiNi2A steel bolt thread

ZHANG Jinzhuo, WANG Dahong, WANG Peng, WANG Zheng, SUN Xiaoqi, WANG Zhanhong, CHAO Yaojie

Dalian Changfeng Industrial Corporation, Dalian 116038, Liaoning, China

Abstract: Based on the analysis of the requirements of induction tempering heat treatment of 30CrMnSiNi2A bolts, the induction tempering scheme of bolt thread is proposed, and the distribution of hardness in the annealing zone and heat-affected zone of bolts by different induction heating methods is compared and analyzed. The optimal induction tempering process for 30CrMnSiNi2A steel bolts is determined so that the induction tempering technical indicators of the bolts meet the requirements. Finally, the hardness and metallography of the 30CrMnSiNi2A steel bolt thread were tested by repeated experiments.

Keywords: induction tempering; induction frequency; skin effect; induction heating equipment

1 序言

感应热处理技术因具有节能、环保和高效等诸多优点, 在现代制造业中得到了广泛应用, 特别是汽车工业, 主要用于曲轴、凸轮轴及轴销等零件的感应淬火, 提高摩擦件的表面硬度, 增加耐磨性, 而零件的感应回火在行业中应用较少, 主要应用于航空领域, 取代原始的盐浴回火技术。本文中涉及的螺栓就是感应回火替代盐浴回火的典型案例, 通

过对螺栓螺纹进行局部回火, 以降低螺纹部位的硬度、脆性, 提高其塑性。

2 螺栓的基本情况

螺栓的结构及感应回火要求如图1所示。

螺栓材料为30CrMnSiNi2A钢, 通过机械加工成形, 经过预备热处理: 淬火温度 $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$, 回火温度 $200 \sim 230^\circ\text{C}$, 热处理后的抗拉强度 $R_m = (1670 \pm 100) \text{ MPa}$, 硬度为 $47 \sim 51\text{HRC}$ 。

基金项目: 辽宁省应用基础研究项目(2023JH2/101300211); 大连市优秀青年科技人才项目(2023RY014)。

第一作者: 张金卓, 工程师, 本科, 主要从事航空材料热处理工艺研究及弹簧制造工作, E-mail: zhutou_zhang@sina.com。

通信作者: 王大宏, 高级工程师, 研究生, 主要研究方向为航空材料热处理工艺、工艺过程质量控制及零件失效分析,

E-mail: wangyuqi427@163.com。

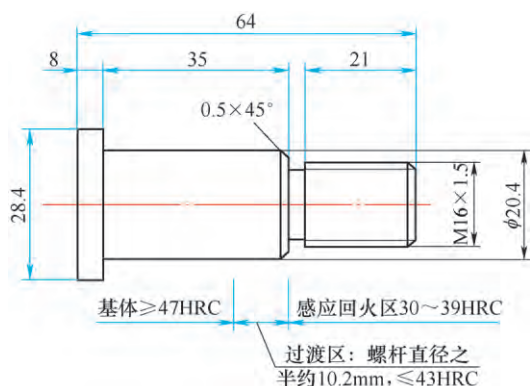


图1 螺栓结构及感应回火要求

工艺要求对螺栓螺纹部分进行感应回火处理，具体要求如下。

- 1) 回火区硬度30~39HRC。
- 2) 过渡区深度不大于螺杆直径之半（约10.2mm）。

加工难点如下。

- 1) 螺栓在感应加热过程中加热温度过高会出现二次淬火现象。
- 2) 螺杆与螺纹之间存在直径差，尤其是退刀槽根部与螺杆之间直径差更大，造成加热困难。

3 试验设备

3.1 感应热处理设备

由于感应加热的趋肤效应，不同的感应频率达到不同的电流透入深度，感应频率越高，透入深度越浅，根据零件的加工要求，回火区加热深度为4~6mm，故选择了中频感应加热设备。

3.2 硬度检测

采用华银洛氏硬度计HR-150A对试样进行硬度检测。检测前，采用线切割方式沿螺栓的纵向切取样件，并对检测面用600目砂纸进行打磨处理，选取螺纹端头为起点，按图2所示位置取点检测。

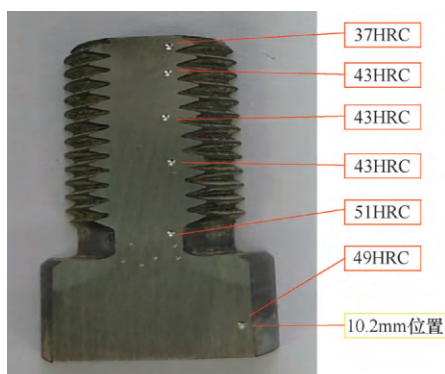


图2 硬度检测点

3.3 金相检测

为进一步验证感应回火效果，采用日本奥林巴斯生产的倒置式金相显微镜观察试样回火区不同位置的金相组织（见图3）。试样经过600目、1200目砂纸打磨处理和机械抛光后，用5%的硝酸酒精溶液进行腐蚀（时间为5s），分别观察螺纹牙顶、牙边、牙底和牙轴中间等4个点。

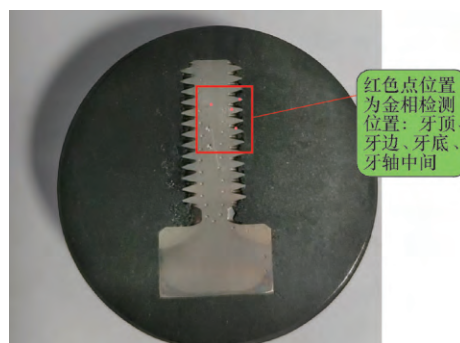


图3 金相组织观察点

4 螺栓感应回火试验分析

螺栓感应回火加热时，将其夹持在自动感应机床上，以一定的转速旋转，在螺杆处进行预热，随后螺栓由上向下匀速移动，使感应线圈扫过螺栓的螺纹部位，实现螺纹的感应加热回火。

4.1 感应线圈设计

1) 方案一：单圈圆形感应器。

采用 $\phi 6\text{mm}$ 铜管，弯制成内径26.5mm的单圈圆形感应线圈，线圈与螺纹牙顶之间的间隙为5.25mm。

2) 方案二：整体加热感应器。

采用6mm×6mm的方形铜管，弯制成上端内径23mm、下端内径28mm的整体加热感应器（见图4），保证螺纹牙顶、螺杆外圆与感应器之间的间隙在4mm左右，开始加热时能够保证螺杆与螺纹同时加热且感应加热的温度一致。

3) 方案三：菱形感应器。

采用6mm×6mm的方形铜管，将感应线圈加工成上端内径24mm、下端内径20mm的菱形感应器（见图5），用来改变感应器磁场，达到指向性加热螺栓退刀槽根部的效果，感应器与螺纹牙顶之间的间隙2mm。

4) 方案四：双圈圆形感应器。

采用 $\phi 6\text{mm}$ 铜管，弯制成内径为35mm的双圈

圆形感应线圈（见图6），感应器与螺纹之间间隙9.5mm，并在感应器下方设计冷水喷淋口，可以对螺栓指定部位以下进行冷却。



图4 整体感应器



图5 菱形感应器



图6 双线圈感应器

4.2 感应回火试验
采用不同的感应器依次对螺栓进行感应回火，试验参数及硬度检测结果见表1。

表1 螺栓感应回火试验结果

试验 编号	输出频率 /kHz	输出功率 /kW	加热时间/s		加热移动 速度 /（mm/min）	预冷 时间 /s	冷却 时间 /s	感应器 类型	螺栓转速 /（r/min）	退刀槽 根部硬 度HRC	螺纹根部 硬度HRC	过渡区 10.2mm 位置硬度 HRC
1	60.22	6.7	1.4	—	300	6	4	单圈圆形 感应器	180	49	35~39	48
2	60.22	6.7	2	—	300	6	6	单圈圆形 感应器	180	39	35~38	40
3	54.42	6.27	12 （脖颈）	3.5 （螺牙顶端）	500	20	5	整体加热 感应器	180	36	35~37	40
4	54.42	6.27	12.5 （脖颈）	3.2 （螺牙顶端）	500	20	5	整体加热 感应器	180	39	37~38	42
5	62.89	3.99	7 （脖颈）	3 （螺牙顶端）	500	17	7	菱形 感应器	180	51	37~43	49
6	62.89	3.99	13 （脖颈）	3.8 （螺牙顶端）	500	17	7	菱形 感应器	180	39	36~49	44
7	20.94	5.57	3.5 （脖颈）	—	—	3	—	双圈 感应器	100	40	36~38	47
			1.5 （脖颈）	—	—	3	—					
			1.5 （螺牙移动）	2 （螺牙顶端）	500	20	8					
			1.7 （螺牙移动）	2 （螺牙顶端）	600	23	8					
8	20.94	5.57	4.5 （脖颈）	—	—	4	—	双圈 感应器	100	39	35~39	47
			2 （脖颈）	—	—	3	—					
			1.7 （脖颈）	—	—	3	8					
			1 （螺牙移动）	2 （螺牙顶端）	600	23	8					
9	23.12	4.66	4.0 （脖颈）	—	—	4	—	双圈 感应器	100	38	35~39	48
			2 （脖颈）	—	—	3	—					
			1.5 （脖颈）	—	—	3	—					
			1 （螺牙移动）	2 （螺牙顶端）	550	23	8					

(续)

试验 编号	输出频率 /kHz	输出功率 /kW	加热时间/s		加热移动 速度 / (mm/min)	预冷 时间 /s	冷却 时间 /s	感应器 类型	螺栓转速 / (r/min)	退刀槽 根部硬 度HRC	螺纹根部 硬度HRC	过渡区 10.2mm 位置硬度 HRC
10 (反复加 热2次)	23.12	4.66	4.5 (脖颈)	—	—	4	—	双圈 感应器	100	38	35~38.5	47
			2 (脖颈)	—	—	3	—					
			1.7 (脖颈)	—	—	3	—					
			1 (螺牙移动)	2 (螺牙顶端)	550	23	8					
11 (反复加 热3次)	23.12	4.66	4.5 (脖颈)	—	—	4	—	双圈 感应器	100	36	35~37	47
			2 (脖颈)	—	—	3	—					
			1.7 (脖颈)	—	—	3	—					
			1 (螺牙移动)	2 (螺牙顶端)	550	23	8					

4.3 试验结果分析

1) 从试验1、试验2可看出,采用单圈圆形感应器大频率加热,可以使螺纹部位达到回火效果,且随着预热时间的增加,退刀槽根部硬度 $\leq 39\text{HRC}$ 时,热影响区的范围已经超出技术要求。

2) 从试验3、试验4可看出,采用整体加热感应器大频率加热,螺纹部位能达到回火效果,但热影响区范围也超出技术要求,而且在试验4中出现了退刀槽根部硬度增高的现象,说明零件加热温度过高,出现了二次淬火现象。

3) 从试验5、试验6可看出,采用菱形感应器大频率加热,在螺栓的退刀槽及螺纹部位均出现了硬度过高的现象,说明菱形感应器在加热时,加热效率过高,出现了明显的二次淬火现象。

4) 从试验7、试验8可看出,采用双圈感应器小频率加热,考虑到双线圈感应加热效率高,采用了阶梯式预热,通过热传导使退刀槽根部达到回火效果,退刀槽根部硬度满足要求。同时在螺杆8mm位置进行了冷水喷淋保护,使热影响区范围得到了有效控制。

5) 从试验9~试验11可看出,在试验7、试验8的基础上适当调高输出频率,使零件表面的加热效率提高,阶梯式加热时间略微增加,会使传导至退刀槽根部的回火温度有所增加,从而得到更好的回火效果。众所周知,零件对回火次数一般不作要求,因此在试验10、试验11中增加了回火次数,随着回火次数的增加,螺栓各部位的硬度更加均匀,尤其是螺栓退刀槽根部回火效果更佳,且随着回火

次数的增加,回火区的硬度值趋于36~37HRC之间,更加均匀稳定。因此试验11的感应回火方法对满足螺栓技术要求效果最佳。

6) 从整体试验过程可看出,在螺牙顶端的加热时间为2~3s时,对螺纹回火影响小,可以不作为重要因素考虑。

最终确定感应回火工艺如下。

1) 感应器为双圈感应器,感应器线圈采用 $\phi 6\text{mm}$ 铜管弯制,线圈内径35mm,与工件螺纹加热面距离9.5mm。

2) 输出频率为23kHz,输出功率为4.66kW。

3) 预热时间: 4.5s + 2s + 1.7s (阶梯式加热)。

4) 螺纹部分加热: 移动速度550mm/min,螺纹底部预热1s,顶部加热2s。

5) 过程重复3次。

5 试验验证

按照最终感应回火工艺对3件试件进行感应回火,随机抽取任1件试样进行硬度、金相检测,试样各部位金相组织如图7所示。

经检测,回火区硬度在33~36.5HRC,过渡区6.5mm处硬度47HRC。

从图7可看出,螺纹处金相组织相对均匀,组织形态为回火索氏体状,是典型的回火组织。

经试样验证,按照最终的感应回火工艺处理的试样,回火区硬度满足30~39HRC要求,过渡区长度6.5mm,小于螺杆直径之半,工艺方法验证合格。

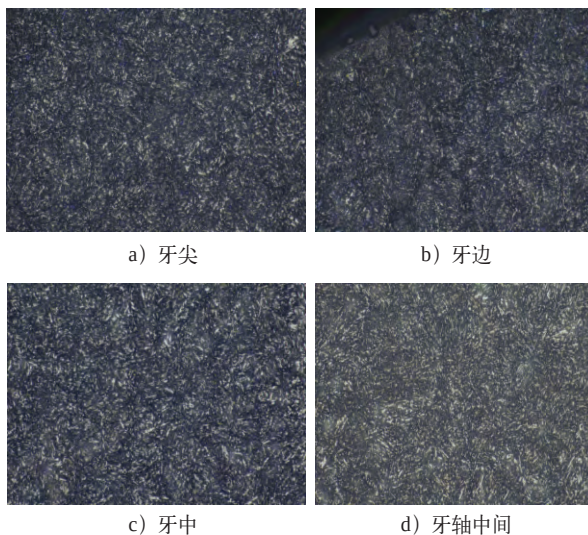


图7 试样各部位金相组织

6 结束语

在实际生产中，感应加热线圈与零件的匹配很重要。试验数据表明，感应加热温度过高或过低均会导致产品硬度高于技术指标要求的情况，因此需选择加热效率较低的方式生产。产品距离感应器较远可降低感应加热时在产品表面的趋肤效应，感应

温度较容易控制，故设计采用感应线圈离产品直径距离远的感应器。数次试验调整确定：感应线圈内径35mm，产品直径16mm，产品居中间，距感应器9.5mm距离为最佳。

在制定感应回火工艺时，需重视感应设备功率及频率选择对工件回火硬度的影响。采用较低频率，降低预设功率，使用双圈感应器回火，可有效解决感应加热升温太快、处理时间过短的问题。采用此方式回火硬度若在上限，则可采用重复回火的技术措施，使产品回火位置硬度全部在36~37HRC之间，由于有水冷保护，所以热影响过渡区可控制在8mm范围内。

参考文献：

- [1] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册航空制造工程手册（热处理）[M]. 2版. 北京：航空工业出版社，2010.
- [2] 李炯辉，林德成. 金属材料金相图谱（上册）[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

MW 20240407

（上接第93页）

- [3] 安浩然，王睿，康燕，等. 含氮马氏体不锈钢的腐蚀行为研究进展[J]. 钢铁研究学报，2023，35（6）：635-650.
- [4] 刘正东，程世长，包汉生，等. 高铬马氏体不锈钢中 δ 铁素体形成及影响[J]. 材料热处理学报，2010（11）：61-67.
- [5] WANG P, LU S P, XIAO N M, et al. Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr-4Ni martensitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 527（13）：3210-3216.
- [6] 李照国，王珂，纪显彬，等. 回火温度对00Cr13Ni5Mo超级马氏体不锈钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2021（5）：95-97.
- [7] 张迎春. 回火温度对00Cr13Ni4马氏体不锈钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2013（11）：95-97.
- [8] ZOU D N, HAN Y, ZHANG W, et al. Influence of tempering process on mechanical properties of 00Cr13Ni4Mo super martensitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010（8）：50-54.
- [9] 马小平，王立军，王园园，等. 氮对马氏体不锈钢00Cr13Ni4Mo组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报，2012，33（4）：78-84.
- [10] 郑善举，杨卯生，张启富，等. 氮元素对马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报，2017（1）：100-105.
- [11] MA Y ZH, QIN B, CHEN X, et al. Influence of nitrogen-alloying on the tempering properties of the martensitic stainless steel 00Cr13Ni4Mo[J]. Research Institute, 2010，4（1）：56-59.
- [12] 孙永庆，刘振宝，王长军，等. N含量对00Cr16Ni5Mo马氏体不锈钢力学性能和组织的影响[J]. 金属热处理，2019（3）：69-74.
- [13] 钟远标，何小芳，李金象. Cu、Ni对钢水质量和钢材性能的影响[J]. 南方钢铁，1999（10）：9-13.

MW 20240105