改善55钢零件高频感应淬火金相组织的措施

王龙榜[1,2]，张翠丽[2]

1.河北恒工精密装备股份有限公司　河北邯郸　056700
2.青岛三星精锻齿轮有限公司　山东青岛　266300

摘要：通过分析55钢制造减速器零件的高频感应淬火组织，并分别对零件的基体组织、感应加热功率、加热时间及淬火液浓度等影响淬火组织的各种因素进行试验验证，最后提出了改善55钢感应淬火金相组织的有效措施。

关键词：55钢；带状偏析；高频感应淬火；淬火液浓度；回火

Measures to improve the metallographic structure of 55 steel parts by high-frequency induction quenchin

WANG Longbang[1,2], ZHANG Cuili[2]

1. Hebei Henggong Precision Equipment Co., Ltd., Handan 056700, Hebei, China
2. Qingdao Sanxing Precision Forging Gear Co., Ltd., Qingdao 266300, Shandong, China

Abstract: This article analyzes the high-frequency induction quenching microstructure of 55 steel shafts, and verifies various factors that affect the quenching microstructure, such as the matrix structure of the shaft, induction heating power, heating time, quenching liquid concentration, etc. Finally, effective measures to improve the metallographic structure of55 steel induction quenching are proposed.

Keywords: 55 steel; banded segregation; high frequency induction quenching; quenching solution concentration; tempering

1　序言

感应加热已广泛应用于轴类、齿轮、齿轮轴、凸轮及法兰等工件的表面淬火，感应淬火不但提高了零件表层的耐磨性和抗疲劳性，而且保持了心部的韧性。感应淬火的主要特点是快速加热，其应用了电磁感应、趋肤效应原理。交变电流通过感应器（导体）在零件表面产生感应电流，并在零件内形成回路（即涡流），此涡流由表向里实现迅速加热。同时采用淬火液冷却，既满足了低淬透性钢零件的淬火，又能防止零件淬火开裂。

以往热处理企业更多关注感应淬火后的硬化层深和表面硬度，而对淬硬层内的金相组织则未给予重视。近年来，随着市场标准提升和客户对产品热处理综合性能要求的提高，仅关注感应淬火后表层硬度和淬硬层已不能满足对产品的性能指标要求，保证金相组织则成为主要控制项目。本文通过对55钢制造减速器零件高频感应淬火的试验、生产，分析了影响感应淬火金相组织的因素，并对如何保证感应淬火组织提出了改善建议。

2　55钢零件感应淬火组织及其影响因素

55钢零件高频感应淬火的正常组织应为细马氏体组织，按JB/T 9204—2008《钢件感应淬火金相检验》规定，满足3～6级要求，且过渡层深度小于有

效硬化层的1/4则为理想的淬火，如此将会获得较大的残余应力，提升产品的疲劳寿命。但实际生产中，经常出现淬硬层内马氏体粗细不均，托氏体、贝氏体混合存在，非马氏体组织占比较大（过渡区占比），甚至在淬硬层内出现明暗相间的高碳马氏体和低碳马氏体混合组织等现象，以上组织缺陷将会恶化感应淬火工件的整体性能，降低零件的服役寿命。

55钢零件感应淬火后出现异常组织的影响因素主要有：基体组织带状偏析、铁素体呈网状，以及高频功率低、加热温度低、淬火冷却能力不足等[1]。

3　影响55钢零件感应淬火组织的因素

现以55钢减速器零件高频感应淬火为例，分析其各种因素对感应淬火组织的影响。选用减速器行星架零件，硬化层要求2.3～2.7mm（550HV1），表面硬度60～64HRC，金相组织按JB/T 9204—2008规定，满足4～6级。选用设备：IGBT感应加热电源、立式数控淬火机床；选用浓度10%的PAG淬火液。

1）工艺试验参数：频率23kHz，功率136kW，加热时间4.2s，淬火液浓度10%，150℃回火2h[2]。淬火2件，经切割检测，有效硬化层和表层硬度偏低，整体淬硬层区域内马氏体不均匀，按JB/T 9204—2008评级为7级，且淬硬区域存在明显的组织明暗纹，表层处即出现托氏体、贝氏体组织，如图1所示。过渡区域占硬化层深度的59%左右。按GB/T 34474.1—2017《钢中带状组织的评定第 1 部分：标准评级图法》要求，从原材料入手分析，经复检，带状偏析达3.5级（见图2），且铁素体呈网状分布。

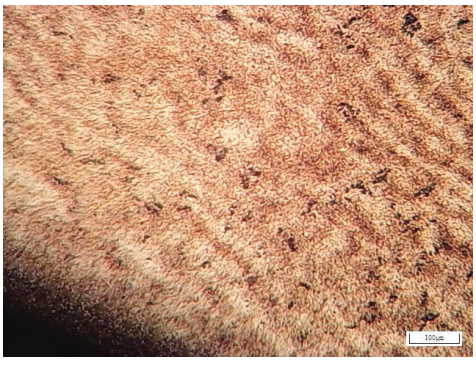

图1　马氏体＋托氏体明暗区严重（100×）

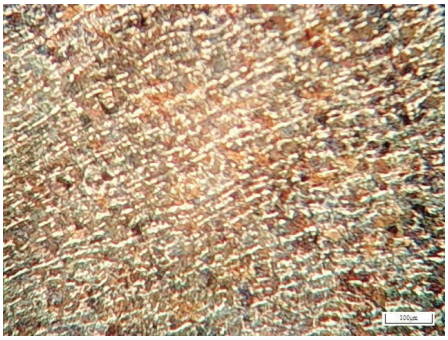

图2　基体组织带状3.5级（100×）

2）针对钢材基体带状组织偏析严重、铁素体网状问题，采用等温正火处理，正火后复检带状偏析在2级以内（见图3），且铁素体均匀分布，无网状，晶粒度达7级。采用上述工艺参数再次进行高频感应淬火，并经150℃×2h回火后检测，硬度未变化，硬化层深为2.07mm，增加0.14mm，马氏体组织均匀性改善明显[3]，距表面0.4mm以下出现轻微明暗区域，表层托氏体数量减少，如图4所示。另外，过渡区域占硬化层深度由59%降为50%。

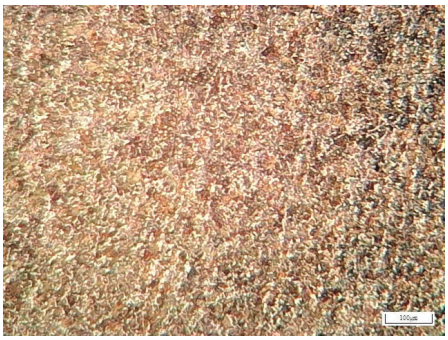

图3　等温正火后带状偏析2级（100×）

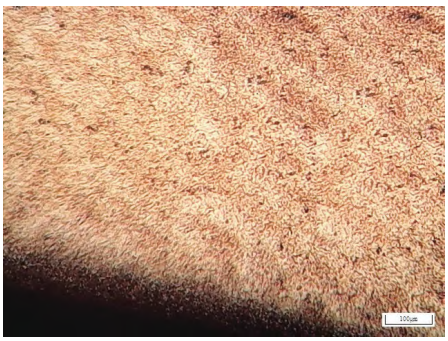

图4　马氏体＋托氏体组织明暗区轻微（100×）

根据此次试验结果分析，经等温正火后基体带状组织和晶粒度明显改善，高频感应淬火后马氏体组织的均匀性同样得到改善，同时降低了托氏体、贝氏体含量及过渡区的深度。

3）为进一步验证其他影响因素，全部采用等温正火后的零件分3组试验，分别采取不同的加热功率和加热时间，来调整加热电流和加热效率，改善透热深度和奥氏体化的均匀性，与此同时，各组分别采用不同的淬火液浓度，改变冷却速度后获得了最佳淬火效果，试验参数及检测结果见表1。

表1　分组试验参数及检测结果

组别	样件	加热功率/kW	加热时间/s	淬火时间/s	频率/kHz	淬火液浓度（%）	检测结果			
							淬硬层/mm	表层下0.2mm处硬度HRC	金相组织	淬火痕迹/mm
第一组	1#	140	4.2	20	23.1～23.5	10	2.16	59.2～59.6	马氏体+托氏体6～7级，马氏体不均匀，表面0.4mm出现托氏体、贝氏体，明暗纹严重	3.25
	2#	148	5.0	20	23.1～23.5		2.28	59.5～60.0	马氏体6级，表面0.6mm出现托氏体，马氏体不均匀，明暗轻微重	3.34
第二组	3#	140	4.2	20	23.1～23.5	7	2.27	60.2～60.6	马氏体5～6级，表面0.3mm出现托氏体，马氏体不均匀，明暗纹严重	3.25
	4#	148	5.0	20	23.1～23.5		2.54	60.5～60.8	马氏体4～5级（表层3级），表面1.7mm出现托氏体，马氏体均匀，无明暗纹	3.32
第三组	5#	140	4.2	20	23.1～23.5	4	2.36	61.5～62.0	马氏体5～6级，表面1.2mm出现托氏体，马氏体不均匀，轻度明暗纹	3.24
	6#	144	5.2	20	23.1～23.5		2.68	61.8～62.2	马氏体5～6级，表面2.1mm出现托氏体，马氏体均匀，无明暗纹	3.28

经上述分组验证，低功率、短时间加热时不利于温度的提高，奥氏体化均匀性差，淬火后出现马氏体组织不均，托氏体、贝氏体组织明显，如1#、3#、5#样件采用低功率、短时间加热，感应电流较小，结合趋肤效应和透热式加热原理，透热总深度较浅，且淬火后有效硬化层相对浅，过渡区域占淬硬层比例仍较高，1#、3#、5#样件依次占50.5%、43.1%、37.2%。

2#、4#、6#样件淬火分别提高功率、延长加热时间后，透热总深度明显加深、组织明暗纹逐渐减轻，尤其4#、6#样件经150℃回火后，整个有效硬化层区域内不再有任何组织明暗纹；另外，淬火温度升高后，过渡区占有效硬化层深比例明显降低，依次为46.5%、30.7%、22.3%，淬火后马氏体均匀性也得到改善，但4#样件因功率较高，致使表层马氏体较粗（0.4mm内达3级）；考虑细化表层马氏体，6#样件适当降低功率，延长加热时间至5.2s，淬火后马氏体细化，评级为5～6级，过渡区所占淬硬层比例进一步优化，为22.3%。样件金相组织检测结果如图5～图8所示。

图5　1#样件表层马氏体6～7级，组织明暗纹严重（100×）

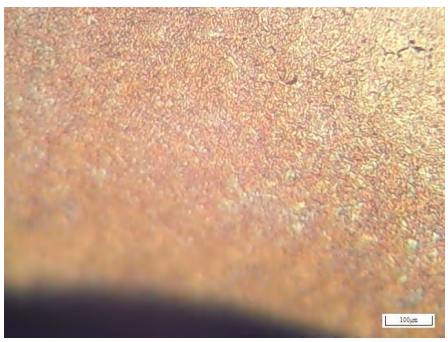

图6　2#样件距表面0.8mm处出现托氏体、贝氏体（100×）

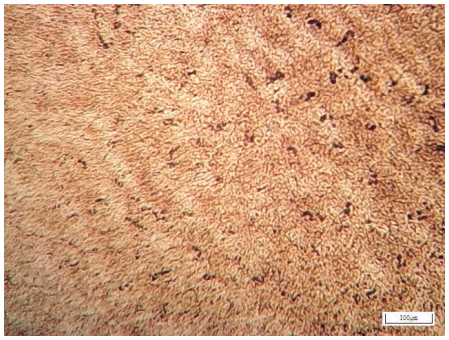

图7　3#样件马氏体不均匀，距表面0.3mm处出现托氏体（400×）

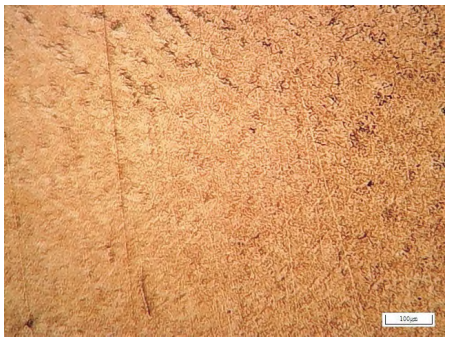

图8　4#样件马氏体5级，距表面1.7mm处出现托氏体、贝氏体（400×）

另外，对比3组淬火液浓度对淬火质量的影响，第三组4%的淬火液可获得最优的硬化层比例、较高的淬火硬度，以及均匀的细马氏体组织。对比分析5#、6#样件，马氏体组织均匀性高，托氏体、贝氏体比例降低，依次在表面以下1.2mm、2.1mm处出现，如图9、图10所示。

综上分析，针对55钢制造的减速器零件的高频感应淬火，采用6#样件工艺淬火可获得表面硬度高且均匀的细小马氏体组织，以及占比低于25%的过渡区，不但保证了工件的耐磨性和强度，而且提高了工件的疲劳强度，延长了零件的综合寿命。批量

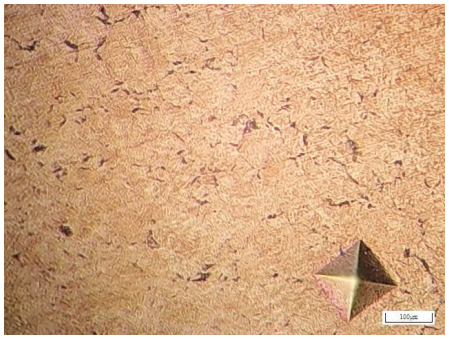

图9　5#样件距表面 1.2mm处出现托氏体、贝氏体（400×）

图10　6#样件距表面2.1mm处出现托氏体、贝氏体（400×）

生产从预防开裂、减小淬火应力考虑，适当提高淬火液浓度，按4.5%～5.5%控制，获得了良好的淬火效果。

4　改善55钢零件高频感应淬火组织的措施

经对55钢减速器零件高频感应淬火的反复验证，分析了影响55钢感应淬火组织的主要因素。针对55钢零件的表面感应淬火，为获得均匀细小马氏体组织和良好的综合使用性能，现提出以下改善措施。

1）改善钢材的基体组织：感应淬火前对材料毛坯进行等温正火处理（心部要求强度较大的零件还需增加调质处理），均匀原始组织，细化晶粒，控制带状偏析在2级以内。

2）合理选择加热功率：根据工件的有效尺寸和感应器结构选取较高的加热功率，以增大感应电流，加快加热传导效率，促使表层奥氏体化均匀程度，促进淬火组织的均匀性。但若功率升高太大时，则会在工件表层出现奥氏体晶粒瞬间长大的趋势，淬火后马氏体针易粗大，此种情况应避免。

3）适当延长加热时间：根据有效硬化层和硬度要求，选择与功率相匹配的加热时间，适当延长加热时间，增大透热总深度，促进合金元素的高温扩散，增强奥氏体的均匀化，改善淬火后组织。

4）增强淬火冷却能力：通过降低淬火液浓度，增大喷冷流量，提高淬火后表层硬度和有效硬化层深度，同时可延缓淬火后托氏体、贝氏体组织的出现，降低过渡区占淬火总深度的比例。根据批量试验，采用4.5%～5.5%PAG淬火液，淬火硬度能达到64.8HRC以上，提高至160℃回火，硬度保持在61HRC以上，淬火硬化层内马氏体组织所占比例78%左右，距表表面2.1mm处开始出现少量托氏

（下转第128页）

4）中频感应加热调质工艺设计合理。中频感应淬火采取提温降速的手段，使合金元素更加充分溶入奥氏体基体，为性能的提升创造条件。通过对淬火系统的合理优化改进，提高冷却强度，在保证工件不开裂的情况下，采用比较剧烈的冷却方式，使性能取样位置处能够获得超过90%以上的回火索氏体组织及少量的下贝氏体组织，材料的综合力学性能，特别是冲击性能得以显著提高。

7 结束语

1）通过化学成分内控，添加适量的微量元素，可以满足高性能钻铤对力学性能的要求。

2）通过冶炼过程控制，提高钢液纯净度，并经过合适的锻造方式，高性能钻铤的非金属夹杂物满足技术要求。

3）锻后采用正火、回火，正火冷却方式采用风冷，中频感应加热调质采用提温降速并加强冷却的工艺，可以满足高性能钻铤的金相组织及力学性能要求。

4）高性能钻铤各项指标满足设计要求，说明试制方案是可行的，可以满足批量生产要求。

参考文献：

[1] 李慧芳，萧振荣，沈济万. 合金钢及热处理工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，1985.

[2] 崔崑. 钢的成分、组织与性能（第1分册：合金钢基础）[M]. 2版. 北京：科学出版社，2019.

[3] 赵振业. 合金钢设计[M]. 北京：国防工业出版社，1999.

[4] 李伟，李桂变. 冶炼工艺对AISI4145H钻铤用钢冲击功影响[J]. 机械工程与自动化，2007，143（4）：84-86.

[5] 美国金属学会手册编委会. 美国金属学会热处理手册（C卷）：感应加热与热处理 [M]. 邵周俊，闫满刚，顾剑锋，等译. 北京：机械工业出版社，2022.

[6] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册（第1卷）：工艺基础[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

[7] 王运迪. 淬火介质[M]. 上海：上海科学技术出版社，1981.

[8] 胡光立，谢希文. 钢的热处理原理和工艺[M]. 西安：西北工业大学出版社，1996.

MW 20240510

（上接第121页）

体、贝氏体组织、且占比低于25%。

5）发挥回火改善作用：在确保淬火硬度和硬化层的基础上，提高回火温度有利于均匀组织，稳定淬火形变。

5 结束语

1）55钢经等温正火后改善带状偏析，均匀基体组织，能促进加热过程合金元素的扩散，改善淬火后马氏体组织的均匀性，减少淬火后组织明暗区域。

2）提高加热功率，能增大感应加热电流和透热效率，提高加热温度，促进奥氏体均匀化，增加淬硬区域内的马氏体含量，降低贝氏体、托氏体出现的深度。

3）降低冷却液浓度，通过增强淬火冷却能力来提高表面硬度和有效硬化层的比例，减少贝氏体、托氏体组织。建议采取4.5%～5.5%的PAG淬火液，可更好地满足60～64HRC 硬度要求和马氏体4～6级的组织要求。

4）提高回火温度，采用160℃回火，在确保硬度61HRC前提下可降低脆性，改善淬火组织，消除淬火应力，稳定零件尺寸。

参考文献：

[1] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册（第1卷）：工艺基础[M]. 4版. 北京：机械工业出版社，2022.

[2] 张红英，黄发平. 感应加热工艺参数对45钢淬火组织的影响[J]. 金属加工（热加工），2013（21）：37-38.

[3] 吕海洋，苏恩格，王运雷，等. 回火温度对45钢淬火显微组织及硬度的影响[J]. 广州化工，2017，45（22）：67-69，101.

MW 20240618