频率因素在预防齿圈中频感应淬火开裂的作用

黄星，陈亮，张京，陈金龙
中车戚墅堰机车车辆工艺研究有限公司　江苏常州　213011

摘要：风电内齿圈的感应淬火裂纹有众多的影响因素，主要有热参数：包括加热温度、加热时间及加热速度；电参数：包括频率、表面功率及电流。而感应淬火的验证试验需要通过多次的工艺验证，如何在尽量少的工艺试验下，尽快找到优化的工艺参数以及降低齿圈感应开裂的方法，缩短试验时间和节约成本，是热处理工程师的重要工作。通过单一参数的调整来论证频率因素在预防中频感应淬火开裂中作用。

关键词：内齿圈；开裂；参数；频率

1　序言

风电作为应用最广泛和发展最快的新能源发电技术，已在全球范围内实现大规模开发应用。2019年，全国风电新增并网装机2574万kW，风电装机占全部发电装机的10.4%，风电发电量4057亿kW·h，首次突破4000亿kW·h，占全部发电量的5.5%，风电已成为部分国家新增电力供应的重要组成部分。随着全球发展可再生能源的共识不断增强，风电在未来能源电力系统中将发挥更加重要的作用。

增速齿轮箱作为风力发电装置中的一个重要部件，其内齿圈是齿轮箱行星级传动机构的重要零件。为了保证长寿命设计的使用要求，针对内齿圈的生产制造工艺，目前大功率风电增速箱已基本不再使用以单纯调质作为最终热处理，齿圈的表面强化工艺主要采用中频感应淬火、渗氮，也有少数厂家使用渗碳淬火工艺作为表面强化的手段。其中，中频感应淬火具有周期短、效率高、无脱碳、变形小、生产成本低，以及容易实现自动化作业的特点[1]。尤其是对于更高功率的增速箱，齿圈模数在16以上，由于渗氮工艺的渗氮层深偏浅，因此渗氮工艺显得不再合适，而渗碳对于更大模数的齿圈则意味着更大的热处理变形，以及更大的轮齿磨削量[2]。对于大模数齿圈的表面强化而言，中频感应淬火相对于渗氮和渗碳淬火技术有更大的优势。但是，感应淬火也有自身的技术缺陷，主要是感应热处理存在热影响区和容易产生淬火开裂的问题。热影响区的问题主要靠材料的淬透性、淬火冷却介质加以改善，淬火裂纹则需要进行一系列的参数组合优化来解决。影响感应淬火有众多因素，整体来说，工艺参数分为热参数（包括加热温度、加热时间、加热速度）和电参数（包括频率、表面功率、电流）。本文通过工艺参数组合试验，阐述频率因素在预防齿圈中频感应淬火开裂中的作用。

2　试验材料及方法

2.1　产品材料及关键参数

某型风电齿圈材料为42CrMo4钢，模数17，齿数96，螺旋角8°，感应淬火层深3.2~4.2mm，采用单齿感应淬火，经过感应淬火解剖后，检测节圆部位淬火层深为3.4mm，表面硬度为56HRC。生产工艺路线为：辗环锻造→粗车→调质→铣齿→感应淬火→精加工→磨齿。感应淬火工艺参数见表1。

表1　感应淬火参数

功率/kW	频率/kHz	间隙/mm	移动速度/mm·s^{-1}
56	9.6	1.3	260

由于淬硬层较深，在感应淬火后容易产生裂纹（见图1箭头处），且裂纹分布在齿顶处。从裂纹的形貌可看出，开口较大，无法在后续加工中去除，只能报废处理，带来了很大的经济损失。为了解决该问题，同时考虑到淬硬层深符合技术要求，因此对感应器没有重新设计，仅对电参数进行了组合优化试验。

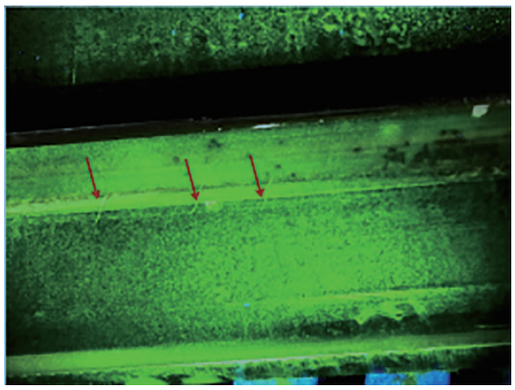

图1　感应淬火齿顶开裂形貌

2.2　试验方法

（1）重新测定淬火机床精度　由于淬火机床的精度可能影响感应器和齿圈齿面的间隙，淬火机床的精度如果不能保证，会直接造成有的区域感应器和齿圈的间隙过小，从而导致感应淬火的加热温度过高，淬火应力过大，最终造成淬火裂纹。经过对超过全齿高范围内的淬火机床垂直度、圆度、平面度进行了检测，结果表明，淬火机床垂直度在0.09mm、圆度在0.12mm、平面度在0.06mm，对淬火机床的精度而言，其精度在可控范围内，因此不是造成齿顶裂纹的原因。

（2）排查原材料及锻造过程　对生产原材料的钢厂冶炼方式以及进厂的复验报告进行排查，从化学成分、夹杂物等级、锻造工艺方面等可能对产生淬火裂纹的影响因素进行分析，均未发现异常情况。

（3）感应淬火工艺试验　由于淬火机床精度、原材料、锻造均未发现异常，因此从感应淬火参数方面进行优化更具有可行性。对感应淬火参数而言，主要有热参数和电参数，影响加热的因素有加热功率、扫描移动速度和感应器与齿圈的间隙；而电参数则是通过合理的调整频率、电流、电压来获得希望的淬硬层深和硬度值。

要避免淬火开裂，必须对感应淬火的参数进行调整，降低可能产生裂纹的倾向。很明显，功率、移动速度、间隙、频率等都可以对感应淬火的淬硬层深、硬度、开裂造成一定影响。为了验证各个工艺参数的影响，我们进行了以下工艺参数调整的优化试验，具体调整方案的参数对比见表2。试验的齿数为50个齿，感应淬火后进行了190℃×5h回火。

表2　试验感应淬火参数

序号	功率/kW	频率/kHz	间隙/mm	移动速度/mm·s^{-1}	方案
1	56	9.6	1.3	260	原方案
2	48	9.6	1.3	260	降功率
3	56	9.6	1.5	260	增间隙
4	56	9.6	1.3	300	增速度
5	56	8.0	1.3	300	降频率

3　结果与讨论

3.1　试验结果

感应淬火、回火后，经过解剖检测、磁粉检测的结果对比见表3。

表3　试验感应淬火检测结果

方案	节圆淬硬层深/mm	裂纹情况	方案评判
原方案	3.42	齿顶开放裂纹	不可靠
降功率	3.12	齿顶开放裂纹	不可靠
增间隙	3.08	无裂纹	不可靠
增速度	3.25	齿顶开放裂纹	不可靠
降频率	3.60	无裂纹	可行

为了验证降低频率方案的可靠性，对5个齿圈（每个齿圈96个齿）进行了淬火工艺试验，并进行了190℃×5h回火，冷却后经过磁粉检测，齿顶、齿面均无裂纹。在试验完5个齿圈后，进行了20个齿圈的感应淬火，对每件齿圈都在淬火、回火后进行了磁粉检测，证明了通过降低频率且保持其他工艺参数不变的情况下，可以解决齿圈齿顶开裂问题。

3.2　结果讨论

1）从检测结果来看，降低功率同样会使淬硬层深降低，这是因为降低功率会直接降低淬火温度，而淬火温度的下降，会影响到齿圈的淬硬深度，使淬硬层深不符合技术要求，同时产生齿顶裂纹，因此降低功率方案不可行。

2）感应器和齿圈间隙的关系是：间隙大，层深浅，硬度低，淬火开裂的倾向低；反之，则容易开裂。为了减少开裂风险，可以增加感应器和齿面的间隙，但从检测结果来看，节圆的淬硬层深更浅了，虽然无裂纹，但不符合技术要求。

3）增加淬火机床的移动速度，相当于降低淬火温度，可以降低开裂倾向，但加快移动速度，理论上会使淬火温度下降，淬硬层深下降。从试验结果

来看，淬硬层深下降不多，在技术要求的下限，工艺的可靠性不够。另外，在磁粉检测后，仍然存在开放性的淬火裂纹，因此增加淬火机床移动速度的方案也不可取。

4）降低淬火频率，由9.6kHz降到8.0kHz，从检测结果看，淬硬层深由原先的3.4mm增加到3.6mm，且齿圈表面没有裂纹产生。从试验结果来看，该技术方案可行，在随后经5个齿圈小批量试生产、20个齿圈中批量试生产中也得到了验证，该方案确实可行，既增加了感应淬火淬硬层深，同时又避免了齿圈裂纹的产生。

众所周知，感应淬火是利用交流电流通过感应器，在感应器和零件之间产生感应电流并形成封闭回路即形成涡流。涡流有四种特性，分别是集肤效应、邻近效应、环流效应及尖角效应[1]。根据集肤效应和邻近效应，电流的频率越高，集肤效应越显著，也就是感应淬火的淬硬层深越小，热量会集中在齿轮表面，同时集肤效应和邻近效应会在感应加热过程中产生叠加效应，会使感应加热的热量集中在工件表面。当热量过于集中在表面时，工件表面的温度要比心部高，由于表面的冷却效果比心部更好，因此感应淬火中在表面易产生裂纹，尤其是在倒角、齿根过渡圆弧处，或存在齿面铣刀痕、铣齿多肉等情况，对感应淬火产生裂纹有很强的敏感性。因此，为了降低集中在表面的热量，降低电流频率是一个较好的选项。但是，如何找到合适的频率，是值得探讨的。如果频率过高，则容易产生严重的集肤效应，热量集中于工件表面，容易产生裂纹；如果频率过低，则会影响到表面的硬度。

确定一个合适的频率，一般可以按照下式进行计算：

$$\Delta_{热} \approx 500/\sqrt{f}$$

式中 $\Delta_{热}$——电流的热透深度（mm）；

f——电流频率（Hz）。

但是，按照该经验公式计算出的是热透深度，而热透深度和感应淬火淬硬层深的关系，需要结合材料的淬透性、感应淬火机床的淬火冷却介质的冷却特性来确定。一般的经验是，淬硬层深介于透热深度的 0.25~0.6mm之间比较好，按照工艺层深满足最低层深3.2mm计算，频率按照0.25透热系数计算时，对应的频率是12.8kHz，按照0.6透热系数计算时，对应的频率是5.3kHz。但频率按照这个范围的选择比较宽，因此需要结合现场经验并进行工艺的试验验证。本次工艺试验是在原有频率9.6kHz的基础上降到8.0kHz，如果进行过大的修正，容易出现表面硬度不够的情况，则试验会产生失败的风险。在进行工艺参数的组合优化时，除了理论上的计算，同时还需要结合以往的工艺数据，进行工艺参数的调整，并且要尽量有针对性地进行单一参数的调整。如果一次试验，进行了两个以上参数调整，一旦工艺试验结果不符合要求，容易导致分析的误判，尤其是大型齿圈需要经过感应器设计、制作、试验、线切割、试样制样及检测环节，工序众多，往往试验周期需要10天左右，试验的成本巨大。因此，理论计算、理论分析要与实际积累的经验相结合，以确保试验成功的概率。

综上所述，对于感应淬火出现表面裂纹的情况，影响的因素主要有功率、间隙、频率及淬火冷却介质等，在其他指标如淬硬层深、表面硬度符合技术条件的情况下，可以优先考虑降低电流频率，这样对表面硬度、淬硬层深的影响较小，可以有效地减小感应淬火中固有的集肤效应、邻近效应、环流效应及尖角效应产生裂纹的可能性。

4 结束语

齿圈感应淬火的热处理指标由多重因素制约和影响，如果出现感应淬火开裂现象，需要综合分析和判定。感应淬火工艺参数中的功率、频率、间隙、速度对裂纹的产生均有一定影响，但单纯从减少淬火开裂而言，在集肤效应、邻近效应、环流效应及尖角效应的固有特性影响下，频率因素对减少淬火裂纹有更明显的作用。

参考文献：

[1] 郝广发，苏泽民，施斌. 热处理工技师培训教材[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

[2] 袁强，刘臻. 感应淬火技术在风电增速齿轮箱内齿圈上的应用[J]. 热处理，2012（13）：44-45.

MW 20210126