

20CrMoH钢齿轮渗碳淬火组织粗大的原因分析及预防措施

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: 对20CrMoH钢齿轮经渗碳淬火、回火后粗大组织进行了综合分析, 从预防原材料成分偏析严重、奥氏体晶粒粗大、控制齿轮锻造温度, 以及优化渗碳淬火工艺等多方面提出了改进措施。通过控制原材料带状偏析2.5级以内、奥氏体晶粒度5级以上, 锻造温度950~1080℃, 增加等温正火, 以及采取≤920℃渗碳淬火工艺, 从而有效地消除了齿轮渗碳淬火、回火后的粗大组织。

关键词: 20CrMoH钢; 齿轮渗碳淬火; 组织粗大; 原因分析; 预防措施

Analysis and preventive measures for the coarse microstructure of 20CrMoH steel gears after carburizing and quenching

WANG Longbang^{1, 2}, ZHANG Cuili²

1. Hebei Henggong Precision Equipment Co., Ltd., Handan 056700, Hebei, China

2. Qingdao Samsung Precision Forging Gear Co., Ltd., Qingdao 266300, Shandong, China

Abstract: This article comprehensively analyzes the coarse microstructure in 20CrMoH steel gears after carburizing, quenching, and tempering, improvement measures have been proposed from multiple aspects, including preventing severe segregation of raw material components, coarsening austenite grains, controlling gear forging temperature, and optimizing carburizing and quenching processes. By controlling the strip segregation of raw materials within 2.5 levels, austenite grain size above 5 levels, forging temperature between 950~1080℃, adding isothermal normalizing process, and carburizing below 920℃, the coarse structure of gears after carburizing, quenching, and tempering is effectively eliminated.

Keywords: 20CrMoH steel; gear carburizing and quenching; coarse microstructure; cause analysis; preventive measure

1 序言

齿轮作为车辆、机械动力传动系统中的核心零件, 要求其在服役过程中不仅表面具有高强度、高硬度、高耐磨性和抗疲劳强度, 而且心部应具有良好的韧性和足够的机械强度^[1]。20CrMoH钢制造齿

轮广泛应用于汽车、农业机械和工程机械等领域, 20CrMoH钢齿轮经渗碳淬火、回火后表层及心部经常出现粗大组织, 不仅容易对有效硬化层深度的测定引起误判, 还会使淬火组织应力加大, 弱化组织晶间结合力, 易于裂纹源的萌生^[2]。尤其是次表层

粗大组织会严重降低齿轮的强度、增大脆性，极易造成硬化层脱落、崩齿等早期失效。为此，对不同区域粗大组织的形态和产生机理进行了分析，并提出了预防措施。

2 齿轮组织粗大的形态及成因

第一类粗大组织：从轮齿表面至心部整体分布粗大组织，渗碳层表面针状粗大马氏体可达7级，心部呈粗大板条马氏体。此类粗大组织主要是因渗碳温度过高、保温时间太长而造成的。

第二类粗大组织：从齿轮表面至心部整体不均匀分布的粗大组织，细马氏体针与粗马氏体针混合存在，局部粗大马氏体达7级以上，轮齿试样腐蚀后目测局部明显呈现粗亮斑点。此类粗大组织主要是因原材料成分偏析、带状分布明显而造成的^[2]。

第三类粗大组织：齿轮渗碳层内为细马氏体针，可达3级以内，但次表层及心部为不均匀分布的粗大板条马氏体组织。此类粗大组织主要是因齿轮锻造工艺控制不当而产生的，且渗碳淬火后未能改善。

3 工艺改进验证

针对20CrMoH钢齿轮渗碳淬火、回火后存在的粗大组织进行工艺改进试验，以期改善和消除粗大组织。

采用国内某钢厂 $\phi 50\text{mm}$ 热轧圆钢锻造渐开线锥齿轮进行验证，始锻温度为 $950\sim 970^\circ\text{C}$ 、终锻温度为 $820\sim 840^\circ\text{C}$ ，锻后机械加工，采用多用炉渗碳淬火， 930°C 强渗+ 910°C 扩散，降温至 830°C 淬火， 180°C 回火后抽检2件，整体出现粗大组织，目视试样腐蚀面呈粗亮的灰白相间斑点（见图1），此为异常粗大组织的表征，明显存在材料偏析或原始



图1 轮齿试样腐蚀面

晶粒粗大等缺陷，经锻造、渗碳淬火后加剧了粗大晶粒的偏聚长大，轮齿心部呈粗大板条马氏体（见图2）；渗碳层内针状马氏体6~7级，试样退火后晶粒度3~4级，综合判断，产生粗大组织并非单一的原因。以下从原材料基体状态、锻造工艺、渗碳淬火工艺方面逐一进行分析验证。

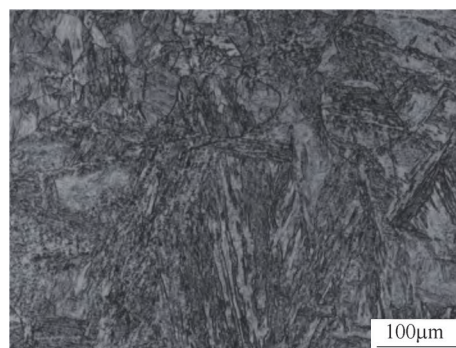


图2 轮齿心部粗大组织

3.1 原材料验证

复检上述原材料带状偏析3.5级（见图3），对此采取等温正火工艺（见图4）。等温正火促进了合金元素的扩散，使带状偏析改善至2.5级以内，且无连续贯穿视场的铁素体带（见图5），奥氏体晶粒度

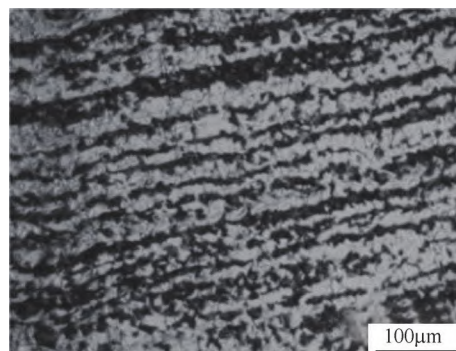


图3 原材料带状组织（100×）

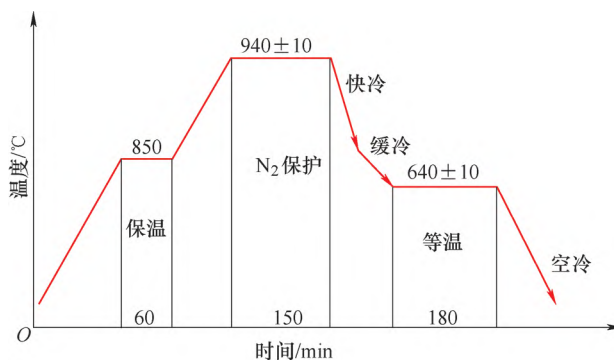


图4 等温正火工艺曲线

达6级。取等温正火后的料坯按原工艺锻造、机械加工、渗碳淬火和回火，切齿检测整个轮齿截面，已无粗亮的灰白相间斑点，说明粗大组织明显得到改善，显微镜下观察渗碳层内针状马氏体6级，心部仍存在局部粗大组织（见图6），但与未经等温正火的

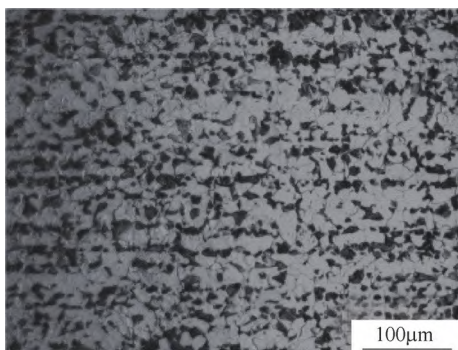


图5 等温正火后的带状组织（100×）

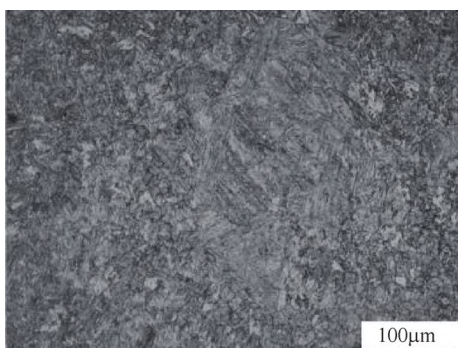


图6 渗碳淬火后心部粗大组织（100×）

坯料相比，组织已得到细化。由此可见，等温正火对带状偏析和晶粒粗大起到了很大的改善作用，但整体淬火组织还较粗，需进一步验证改进。

3.2 锻造工艺验证

前期采用始锻温度950~970℃、终锻温度820~840℃锻造，不利于奥氏体晶粒均匀化。依据《钢材热处理手册》，低合金钢锻造可分3个温度区间^[3]：第一区间 $\geq 1100^{\circ}\text{C}$ ，可得到均匀的奥氏体化晶粒，且能促进元素偏析扩散，但不利于晶粒细化；第二区间为950~1100℃，可促使奥氏体晶粒细化；第三区间为850~950℃，此区间终锻很可能处于两相区，不仅易出现奥氏体晶粒不均匀，还会产生铁素体带状偏析。对此提高始锻温度至1050℃、终锻温度至920~950℃进行验证，按原工艺渗碳淬火、回火，切齿检测轮齿截面内再无粗大组织，渗碳层内针状马氏体、残留奥氏体4~5级，齿心部均匀分布板条状马氏体，基本满足了齿轮渗碳淬火要求。

3.3 渗碳工艺验证

为进一步细化渗碳淬火、回火组织，对渗碳工艺优化验证。校验炉温差为+15℃，即实际渗碳温度945℃、淬火温度845℃；更换新热电偶后，采用标准热电偶校准炉温差为+1℃。根据校验结果降低渗碳温度至920℃，淬火温度830℃，适当延长渗碳周期后再渗碳淬火，调整前后的实际渗碳淬火、回火工艺如图7所示；回火后抽取2件检测，整体金相

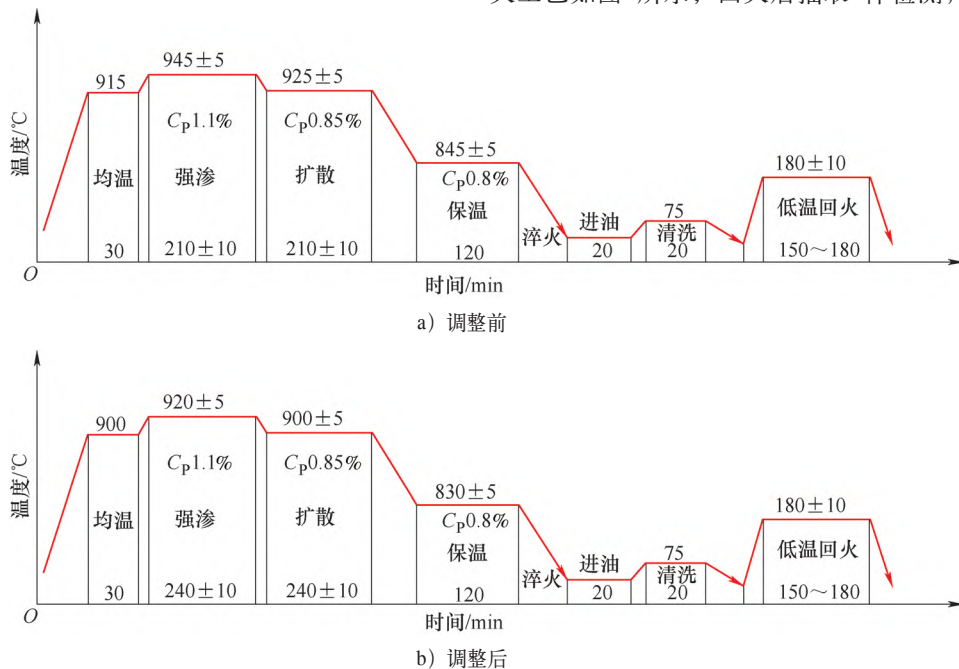


图7 调整前后热处理工艺曲线对比

组织进一步细化，渗碳层内针状马氏体、残留奥氏体2~3级，齿心部均匀分布细板条马氏体，达到了改善粗大组织目的，如图8、图9所示。

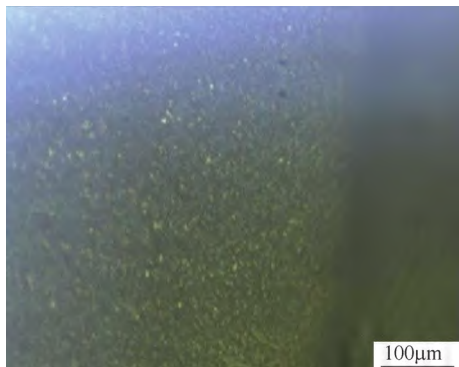


图8 改善后的表层细针马氏体 (400×)

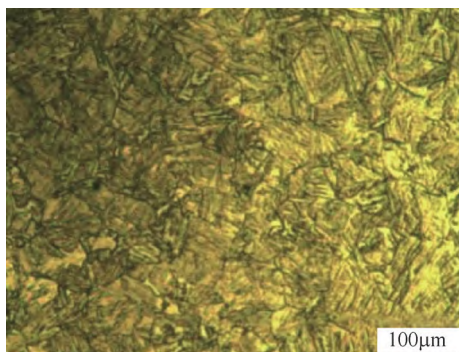


图9 改善后的心部板条马氏体 (400×)

4 齿轮粗大组织原因分析及改善措施

根据20CrMoH钢失效齿轮粗大组织的特征，结合工艺验证结果分析，从控制钢材成分偏析严重、原始晶粒粗大、锻造温度不合理，以及渗碳温度不当入手，提出改善措施。

4.1 原材料成分偏析严重

原材料成分偏析严重，合金元素在高温扩散时更易聚集、偏聚，产生富集效应呈带状分布，且具有遗传特性，经普通正火、渗碳淬火极难改善。另外，晶粒粗大也是造成齿轮渗碳淬火、回火后组织粗大的一个因素。因此，进厂原材料必须检验化学成分、显微组织等，从源头杜绝成分严重偏析、晶粒粗大、混晶的材料流入生产环节。

4.2 锻造温度不当

锻造温度不当会产生粗大组织。参考相关金属材料手册，结合同类钢材锻造经验，20CrMoH钢始锻温度 $>1160^{\circ}\text{C}$ 时易产生过热组织，奥氏体晶粒急

剧长大，此粗大晶粒经后续渗碳淬火、回火难以改善^[1]。另外，锻造温度 $<900^{\circ}\text{C}$ 时，终锻很可能处于两相区，即在 A_{c3} 和 A_1 区间继续锻造，铁素体从奥氏体中析出，产生铁素体带状偏析，渗碳淬火后形成局部粗大组织，因为齿轮在高碳势气氛中形成了弥散分布的合金碳化物，增加过冷奥氏体的形核点，所以使渗碳层内的组织细化，而次表层内C浓度较低，无法起到改善混晶组织及锻造偏析的作用，淬火、回火后形成不均匀的粗大组织^[2]。对此应控制始锻温度 $1030\sim 1080^{\circ}\text{C}$ 、终锻温度 $920\sim 950^{\circ}\text{C}$ ，不但可预防锻造过热组织，而且可避免锻造偏析。

4.3 齿轮锻后等温正火

齿轮锻后采用等温正火既能改善碳和合金元素的偏析、增加碳化物的弥散分布^[4]，而且能改善因锻造控温不当产生的粗大晶粒和锻造偏析。等温正火使粗大奥氏体晶粒溶解、重新成核并促进碳化物的弥散分布，细化了珠光体基体晶粒、均匀组织，为后期渗碳、淬火回火提供组织和性能保障，对预防齿轮渗碳淬火变形十分必要^[5]。

4.4 渗碳温度过高

渗碳温度过高会促使奥氏体晶粒长大，造成齿轮渗碳淬火整体组织粗大。经验证，控制20CrMoH钢在 $900\sim 920^{\circ}\text{C}$ 强渗+扩散，可避免奥氏体晶粒整体长大，确保硬化层马氏体、残留奥氏体在3级以内。该渗碳工艺已在河北恒工精密装备股份有限公司长时间应用，获得了良好的实效。改进渗碳工艺关键在于严格执行批准后的热处理工艺，定期检测炉内气氛，包括定碳、炉温均匀性及气体流量测定等。

5 结束语

为彻底改善20CrMoH钢齿轮渗碳淬火、回火后的粗大组织，保证齿轮内在质量和使用寿命，建议从以下几方面来预防解决。

(1) 严把原材料关 原材料入厂复检化学成分、显微组织指标，检测合格方可投料。保证原材料无严重偏析及晶粒粗大、混晶。

(2) 严控锻造过程 根据材料的特性和晶粒长大趋势，制定合理的始锻温度和终锻温度，防止因锻造温度控制不当而产生过热组织及锻造偏析。

(3) 锻后等温正火 为防止因原材料遗留偏析、晶粒粗大和锻造不当而产生的二次混晶及带状 (下转第83页)

图11所示为1200℃有涂层试样XRD曲线。从图11可看出,1200℃有涂层试样中有更高的高价铁的衍射峰,三价Fe峰强度相对1100℃有涂层样本含量更高,二价Fe峰强度更低,相对含量下降,被氧化得更充分。结合金相图片分析,1200℃条件下涂层在基体表面溶解,渗入了氧化铁皮层,保护层不够致密,未能较好地完成防氧化的目标。推测涂层的溶解是高温下涂层效果下降的原因。

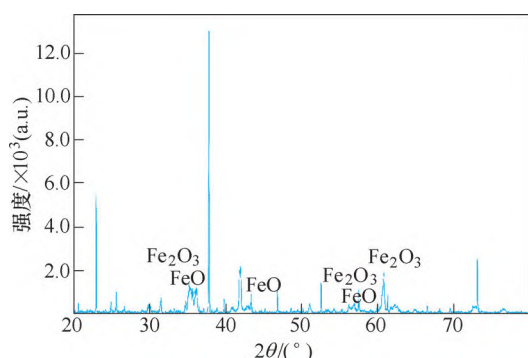


图11 1200℃有涂层试样XRD曲线

6 结束语

1) 由时间烧损曲线可知,随着保温时间的延长,氧化铁皮的致密性受损。无涂层试样表面氧化铁皮产生破碎隆起现象,氧化进程加速。有涂层试样中,涂层能够将氧化铁皮与基体黏结束缚在一起,强化了氧化铁皮的结构,防止隆起破碎的产生,形成致密保护膜。

(上接第77页)

偏析遗传至最终热处理,锻后渗碳淬火之前增加等温正火处理,可细化基体晶粒,为后期渗碳淬火、回火处理提供组织和性能保障。

(4) 优化渗碳工艺 降低强渗、扩散温度,控制渗碳气氛稳定准确,保证热工仪表、加热装置及冷却系统的可靠性,能进一步细化奥氏体晶粒,可确保渗碳淬火后马氏体、残留奥氏体在3级以内。

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, 2008.

2) 金相显示,在1200℃涂层失效的样品中,涂层渗透进氧化铁皮的内部,形成离子通道效应,连接了氧化铁皮内外,影响了氧化铁皮的致密性。1100℃的氧化铁皮涂层与氧化铁皮界限分明,具有良好的致密性。

3) 经XRD分析,1200℃涂层失效样品的中高价位Fe所占比例高于1100℃未失效样品,涂层失效导致防氧化效果明显下降。1100℃条件下有涂层和无涂层的样品对比显示,有涂层样品中Fe价态更低,证明涂层抑制了氧化过程,对三价Fe的产生起到了抑制作用,具有良好的防氧化效果。

参考文献:

- [1] 魏连启,叶树峰,孙卫华,等. 动态过程钢坯高温防氧化技术[J]. 电镀与涂饰, 2008(3): 53-55.
- [2] 王鹤尧,张贵杰,陈晨,等. 磷酸盐涂层对钢坯温度场及防氧化性的影响[J]. 金属加工(热加工), 2023(4): 85-90.
- [3] 甘伟,刘涛,焦建朋,等. 防脱碳涂层在U75V重轨钢生产中的开发与应用[J]. 轧钢, 2023, 40(2): 78-85.
- [4] 袁清. 低碳含Si钢高温氧化行为及网格状Fe₂SiO₄/FeO形成机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [5] 严立新,梁亮,曹光明,等. 含Cr低碳钢的高温氧化行为研究[J]. 轧钢, 2021, 38(1): 14-19.

MW 20240726

- [2] 金林奎,王春亮,赵建国. 齿轮渗碳淬火组织粗大原因分析及工艺改进[J]. 理化检验-物理分册, 2015, 51(4): 259-262, 266.
- [3] 朱学仪. 钢材热处理手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [4] 刘翔. 热处理工艺对20CrMnTi齿轮组织与性能的影响[J]. 科技资讯, 2010(17): 252, 254.
- [5] 左彪,李卫民. 22CrMoH钢齿轮渗碳淬火回火后组织粗大的工艺改进[J]. 江苏科技信息, 2019(1): 58-62.

MW 20240722