



真空脱气连铸 G20CrNi2Mo 钢的冶金质量与 接触疲劳寿命分析

王春阳^{1,2}, 尹青³, 俞峰^{1,2}, 刘吉刚³, 华刘开³, 曹文全^{1,2}

(1 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081; 2 先进特殊钢全国重点实验室, 北京 100081;

3 江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214429)

摘要: G20CrNi2Mo 钢经渗碳和淬回火热处理后具有表面高硬度、高耐磨及心部高韧性的特性, 常应用于铁路货车轴承等高载荷、高冲击、高耐磨工况, 对材料的冶金质量与接触疲劳寿命提出了极高的要求。本研究针对真空脱气+连铸工艺生产的 $\phi 60$ mm 的 G20CrNi2Mo 钢棒, 开展冶金质量评价与接触疲劳寿命分析。结果表明, 真空脱气连铸 G20CrNi2Mo 钢的成分控制合理, C、Cr、Ni、Mo 等关键元素的统计均匀度均高于 97%, 保证了组织与硬度的一致性; 钢中 $w[\text{O}]$ 为 0.000 6%, Al 系夹杂物 $> 5 \mu\text{m}$ 的比例小于 10%; 钢材的一般疏松、中心疏松及锭型偏析均为 0.5 级, 未发现其他低倍缺陷。非金属夹杂物级别和低倍组织均符合 GB/T 3203—2016 高级优质钢的合格级别。钢材渗碳热处理后形成了合理的硬度梯度与硬化层, 淬透性良好。冶金质量的控制优良使得钢材获得超高接触疲劳寿命与稳定性。采用威布尔分布处理钢材接触疲劳试验的数据得到, 真空脱气连铸钢的额定疲劳寿命 L_{10} 为 7.97×10^7 次, 中值寿命 L_{50} 为 1.33×10^8 次, 斜率参数 b 为 3.67。

关键词: 真空脱气连铸; G20CrNi2Mo 钢; 冶金质量; 接触疲劳寿命

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260081

中图分类号: TG142.1

Analysis of Metallurgical Quality and Contact Fatigue Life of Vacuum-Degassed Continuously Cast G20CrNi2Mo Steel

Wang Chunyang^{1,2}, Yin Qing³, Yu Feng^{1,2}, Liu Jigang³, Hua Liukai³, Cao Wenquan^{1,2}

(1 Research Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;

2 State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Beijing 100081, China;

3 Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429, China)

Abstract: G20CrNi2Mo steel exhibits high surface hardness, excellent wear resistance and superior core toughness after carburizing, quenching and tempering. It is widely used for railway freight car bearings, large rolling mill components and other parts serving under heavy load, severe impact and intense abrasive wear conditions, which impose extremely stringent requirements on the metallurgical quality and contact fatigue life of the material. This study conducts the metallurgical quality evaluation and contact fatigue life analysis on $\phi 60$ mm G20CrNi2Mo steel bars produced via vacuum degassing combined with continuous casting. The results show that the vacuum-degassed continuously cast G20CrNi2Mo steel exhibits reasonable composition control, with statistical uniformity exceeding 97% for key elements such as C, Cr, Ni, and Mo, ensuring consistency in microstructure and hardness. The oxygen content in the steel is 0.000 6%, and the proportion of Al-based inclusions larger than $5 \mu\text{m}$ is less than 10%. The general porosity, center porosity, and ingot-type segregation are all rated as grade 0.5, with no other macrostructure defects observed. Both the non-metallic inclusion ratings and the macrostructure meet the qualification requirements for high-quality premium steel specified in GB/T 3203—2016. After carburizing heat treatment, the steel develops a proper hardness gradient and hardened layer, demonstrating good hardenability. The excellent metallurgical quality control enables the steel to achieve ultra-high contact fatigue life and stability. The contact fatigue life test data were analyzed using the Weibull distribution, the rated fatigue life L_{10} of the steel is 7.97×10^7 cycles, the median life L_{50} is 1.33×10^8 cycles, and the slope parameter b is 3.67.

Key Words: Vacuum-Degassed Continuously Cast; G20CrNi2Mo Steel; Metallurgical Quality; Contact Fatigue Life

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3710102)

作者简介: 王春阳(1997—), 女, 博士, 工程师; E-mail: 17801055109@163.com; 收稿日期: 2026-06-04

通信作者: 曹文全(1969—), 男, 博士, 正高级工程师; E-mail: caowenquan@nercast.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

G20CrNi2Mo 钢是一种常用的合金渗碳轴承钢,采用渗碳处理配合合适的热处理工艺,形成了“外强内韧”的特性,即表面具有较高的硬度和良好的耐磨性,而心部具有良好的韧性,能够承受强烈的冲击载荷,使其在复杂的工况下具有高可靠性和长寿命^[1-2]。常应用于高载、高冲击、磨损严重的工作场景,如铁路货车轴承、大型轧机部件等^[3]。因此,其性能与可靠性对冶金质量和使用寿命等的要求极其严格,提高钢锭成分均匀性和洁净度是重点^[4-7]。

滚动接触疲劳是最接近轴承服役状态的疲劳测试方式,在服役过程内外圈滚道受到较大的循环载荷应力易产生微变形,这些变形优先在组织结构的不连续处(如基体-夹杂物、基体-碳化物等软-硬相的界面交界处)产生,由此产生裂纹,形成剥落坑,导致试样疲劳失效^[8]。对于轴承钢,影响疲劳性能的主要因素为夹杂物、基体组织、碳化物等。Monnot 等^[8]提出随着钢中氧含量降低,夹杂物数量减少,轴承的使用寿命提高。张伟成等^[9]探究了夹杂物种类对轴承钢滚动接触疲劳损伤的影响,结果表明:10 次循环下硬性夹杂物如 Al_2O_3 夹杂物引发的疲劳损伤值达到 0.04, MnS 类易变形夹杂物小于 0.03;夹杂物弹性模量与基体差异越大,界面应力集中越强,疲劳损伤显著升高,而泊松比影响较小。复合夹杂物表现出“损伤传递”机制,整体疲劳损伤水平高于单一软夹杂物。杨红兵等^[1]对低碳高合金轴承钢进行不同时间的渗碳处理,较长时间渗碳处理后的轴承钢渗碳层中碳化物含量多、尺寸细,碳化物倾向于椭圆状,滚动接触疲劳寿命更高。

本研究以采用真空脱气+连铸工艺生产的 $\phi 60$ mm 的 G20CrNi2Mo 钢棒为研究对象,评价其冶金质量水平,包括化学成分、夹杂物、低倍组织、淬透性。采用轴承套圈进行接触疲劳试验,分析冶金质量对接触疲劳寿命的影响^[10]。钢材的冶炼流程

为 100 t 转炉→100 t 精炼炉→100 t 真空脱气炉→大方坯连铸 390 mm×510 mm→轧制,套圈生产工艺为下料→加热→镦粗→冲孔→辗扩→退火→机加工→渗碳热处理→磨削。

1 冶金质量

1.1 化学成分分析

1.1.1 冶炼成分检测

G20CrNi2Mo 钢执行渗碳轴承钢标准 GB/T 3203—2016,其化学成分要求见表 1^[11]。由表 1 可知,钢材的化学元素含量均在标准范围内,其中, C、Mn 按标准下限控制, Si、Cr、Ni、Mo、Al 按标准中下限控制, $w[O]$ 控制在 0.000 6%, 小于标准规定的 0.001 5%, 整体残余元素处于较低水平, 冶炼成分的标准控制有利于后期产品性能提升。

1.1.2 元素偏析程度

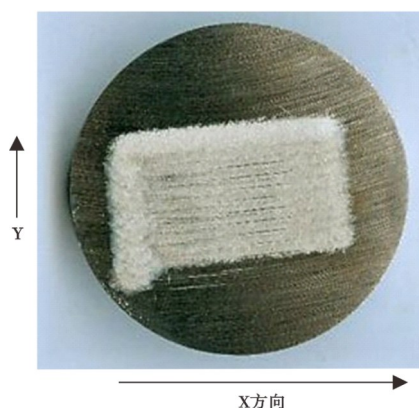
为进一步分析 G20CrNi2Mo 钢热轧棒材成分分布的均匀程度,对 $\phi 60$ mm 钢棒的横截面进行金属原位分析^[12-14],测定样品表面不同位置原始状态下的化学成分及含量。金属原位分析系统为钢研纳克检测技术有限公司制造, OPA:200。样品扫描速度为 1 mm/sec,测定元素包括: C、Si、Mn、P、S、Cr、Mo、Ni、Al,扫描面积为 36 mm(X)×16 mm(Y),扫描位置如图 1 所示。

各元素成分三维分布图如图 2 所示。基于金属原位分析结果,计算各元素不同含量的统计分布,如图 3 所示。

汇总各元素的平均含量、最大偏析度、统计均匀度及统计偏析度,见表 2。表中元素的偏析度=某局部位置的元素含量/该元素在整个分析区域的平均含量,偏析度>1 时,该位置元素正偏析;偏析度=1 时,完全均匀;偏析度<1 时,该位置元素负偏析。统计均匀度=落在元素含量允许偏差范围内的数据点/总数据点数,表示分析区域内元素成分合格点数

表 1 G20CrNi2Mo 钢的化学元素含量及标准范围(质量分数)
Table 1 Chemical composition and standard ranges of G20CrNi2Mo steel

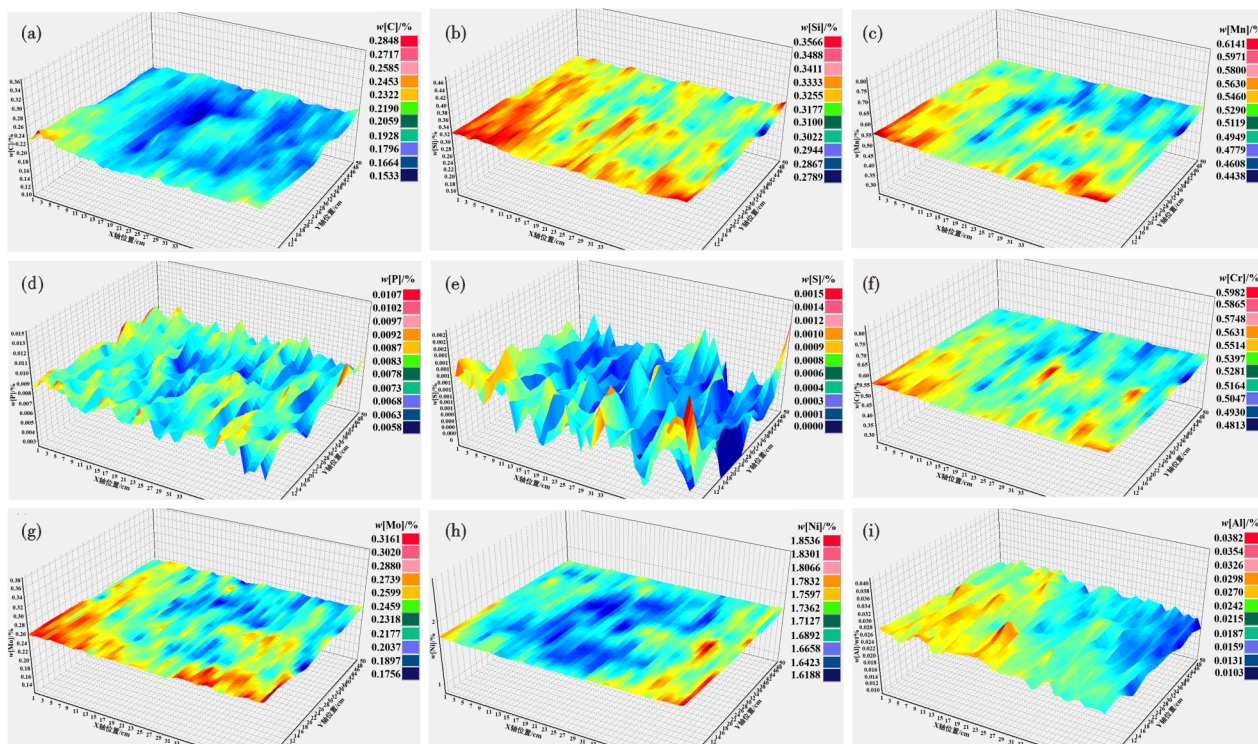
项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
实测值	0.20	0.31	0.55	0.006	0.001 0	0.54	1.73	0.017	0.25	0.024
标准范围	0.19~0.23	0.25~0.40	0.55~0.70	≤0.020	≤0.015	0.45~0.65	1.60~2.00	≤0.25	0.20~0.30	≤0.050
项目	H	N	O	Ti	As	Ca	Pb	Sb	Sn	
实测值	<0.000 1	0.009 1	0.000 6	0.000 7	0.007 2	<0.001	<0.000 1	0.000 6	0.000 8	
标准范围	≤0.000 2	—	≤0.001 5	≤0.005 0	≤0.010	≤0.001 0	—	—	—	

图 1 $\phi 60$ mm 棒材金属原位扫描位置示意图Fig. 1 Schematic diagram of in-situ scanning positions for $\phi 60$ mm bar

的占比,该值越大元素分布越均匀。统计偏析度=

95% 置信度下含量数据的置信区间半径/所有含量数据的中位值,该值表示在 95% 的置信概率下,材料的成分含量在中位值附近的波动幅度百分比,该值越小表明元素在材料中的分布越均匀。

由表 2 可知,除 P、S 外,其余元素分布均匀,其中, C 的最大偏析度为 1.193,统计均匀度为 97.19%,统计偏析度为 0.062,表明该棒材的 C 分布均匀,97.19% 的区域 C 含量在允许范围内。C 的偏析会促进带状组织的形成,显著降低轴承的疲劳性能和服役寿命,该棒材 C 元素分布均匀将有利于轴承疲劳性能的提升和服役寿命的延长。钢材中的关键合金元素 Cr、Ni、Mo、Mn 的偏析会影响局部区域的淬透性,导致硬度分布不均匀,上述合金元素在棒材中的统计均匀度均高于 99%,表明元素分布的均匀性高。有害杂质元素 P、S 的统计均匀度低

图 2 G20CrNi2Mo 钢 $\phi 60$ mm 棒材的化学成分三维分布图: (a) C, (b) Si, (c) Mn, (d) P, (e) S, (f) Cr, (g) Mo, (h) Ni, (i) AlFig. 2 Three-dimensional distribution diagram of chemical composition of $\phi 60$ mm G20CrNi2Mo steel bar: (a) C, (b) Si, (c) Mn, (d) P, (e) S, (f) Cr, (g) Mo, (h) Ni, (i) Al表 2 $\phi 60$ mm 钢棒中元素偏析统计表Table 2 Statistical table of elemental segregation of $\phi 60$ mm steel bar

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
平均含量 $w/\%$	0.219	0.313	0.534	0.008	0.001	0.545	0.251	1.741	0.025
最大偏析度	1.193	1.049	1.039	1.397	2.819	1.042	1.042	1.027	1.267
统计均匀度/%	97.19	98.77	99.59	77.88	60.53	99.73	100	100	87.69
统计偏析度	0.062	0.028	0.020	0.1615	0.860	0.019	0.023	0.010	0.143

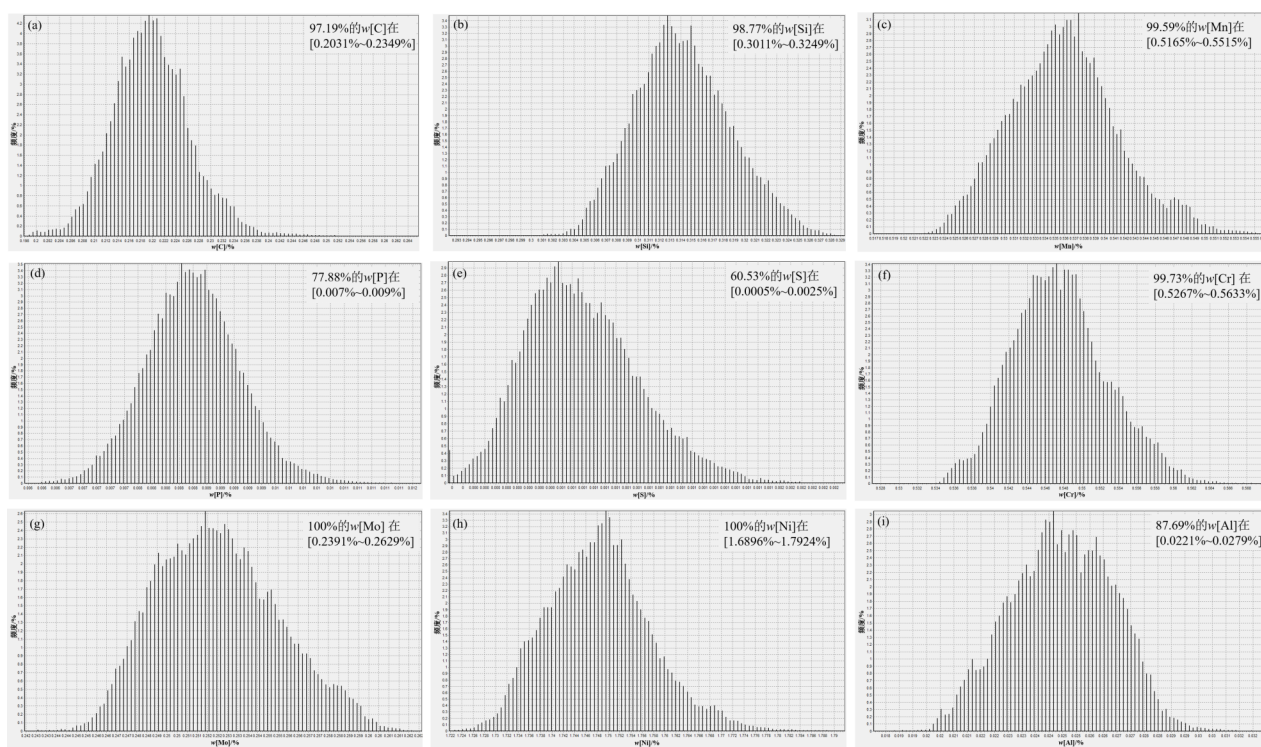


图3 G20CrNi2Mo钢 $\phi 60$ mm棒材的元素含量统计分布图:(a)C,(b)Si,(c)Mn,(d)P,(e)S,(f)Cr,(g)Mo,(h)Ni,(i)Al

Fig. 3 Statistical distribution chart of element content of $\phi 60$ mm G20CrNi2Mo steel bar: (a) C, (b) Si, (c) Mn, (d) P, (e) S, (f) Cr, (g) Mo, (h) Ni, (i) Al

于80%,说明其分布波动较大,但 $w[P]$ 、 $w[S]$ 在分析区域内最高含量分别为0.011%、0.0028%,均在GB/T 3203—2016标准规定的范围内,为了减缓P、S元素的偏析程度需对浇铸工艺进行优化以改善元素分布的均匀性。

1.2 非金属夹杂物分布

对棒材进行非金属夹杂物评级,结果见表3,该棒材的非金属夹杂物A类粗系、B类、C类、DS类均为0级,A类细系最高为1.0级,D类细系为0.5级,各类夹杂物级别均达到GB/T 3203—2016高级优质钢的标准要求。

基于1.1.2节金属原位分析结果,统计Al系夹杂物的平均粒径为 $2.825\ \mu\text{m}$,按照尺寸区间统计夹杂物的占比,如图4所示。由图4可知,Al系夹杂物尺寸在 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 占比最高,为58.07%, $>3\sim 5\ \mu\text{m}$ 占比

为32.11%, $5\ \mu\text{m}$ 以上夹杂物占比为9.82%。文献表明小尺寸夹杂物通常不构成独立的疲劳源,对轴承钢接触疲劳寿命影响极小^[15-16]。

1.3 低倍组织级别

按照GB/T 1979—2001标准对 $\phi 60$ mm棒材进行低倍组织评级,形貌如图5所示,其中一般疏松、中心疏松及锭型偏析均为0.5级,未发现其他低倍缺陷,符合GB/T 3203—2016高级优质钢的合格级别。

1.4 淬透性分析

G20CrNi2Mo轴承钢作为一种渗碳轴承钢,必须满足一定的淬透性。实验采用末端淬火试验方法测定钢材的淬透性,按照GB/T 225—2006规定,将 $\phi 60$ mm棒材在 $920\ ^\circ\text{C}$ 保温30 min后空冷,加工为 $\phi 25\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 的圆棒,进一步在 $900\ ^\circ\text{C}$ 保温

表3 非金属夹杂物评级结果
Table 3 Non-metallic inclusion rating results

样品编号	A类		B类		C类		D类		DS
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	
1	0	1.0	0	0	0	0	0	0.5	0
2	0	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0
高级优质钢标准要求	1.5	2.0	0.5	1.5	0	0	0.5	1.0	1.0

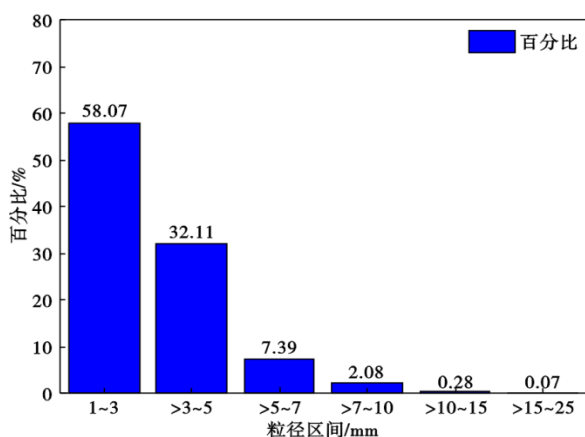


图4 Al系夹杂物尺寸分布及占比

Fig. 4 Size distribution and proportion of Al-based inclusions

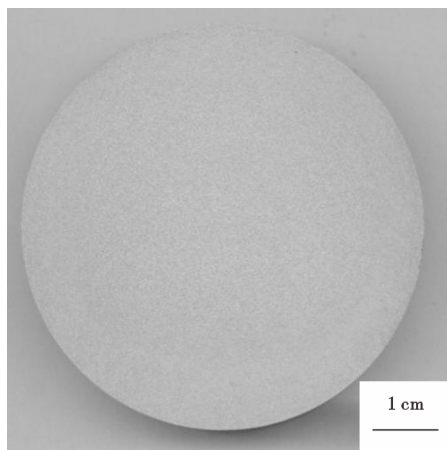


图5 φ60 mm 棒材低倍组织形貌

Fig. 5 Macrostructure morphology of the φ60 mm bar

30 min 后按图 6(a) 所示图纸加工样坯, 进行端部淬火试验。沿轴线方向在试样上磨制两个平行面后, 从淬火端起取 8 个测试点测试洛氏硬度, 位置分别为 1.5、3、5、7、9、11、13、15 mm^[17-18], 深度-硬度分布曲线如图 6(b) 所示。

该棒材距末端 1.5~7 mm 时, 硬度处于 40.5~44.5HRC, 距末端 9~15 mm 时, 硬度处于 30~36.5HRC, 均符合 GB/T 3203—2016 对钢材末端淬透性的要求, 棒材淬透性结果良好。

2 接触疲劳试验

2.1 试验方法

接触疲劳试验在 TRF-1000/5-H 试验机上进行, 模拟推力轴承工作原理 (如图 7 所示), 按照 JB/T 10510—2005 标准进行, 采用与推力球轴承相似的推力片式接触方式, 将推力轴承的活圈用 G20CrNi2Mo 轴承钢制成的环形平面试样代替进行

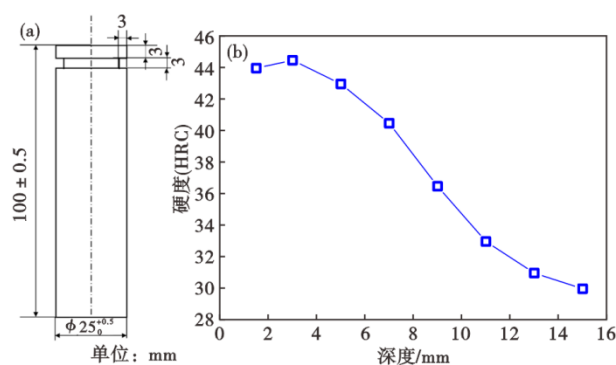


图6 淬透性分析: (a) 样坯尺寸图, (b) 样坯末端深度与硬度变化关系

Fig. 6 Hardenability analysis: (a) dimensional drawing of the test sample, (b) relationship between depth from quenched end and hardness variation

试验^[19-21]。试验时施加一定的应力载荷, 当主轴转动时通过摩擦力驱动保持架中的钢球进行自转和公转, 在环形试样上形成一条应力循环带, 直到循环带上出现 0.5~1.0 mm 疲劳剥落坑时, 振动传感器试验机自动停机, 并在计数器上记录试验机的计数。接触疲劳试验的最大接触应力设定为 4.5 GPa, 转速 1 500 r/min, 试验温度为常温, 润滑介质为 4010 润滑油, GCr15 钢球作为滚动体, 加工 16 个试样作为一组试样, 在试验机上交替进行试验。试验采用 1×10^8 次定数截尾方法, 数据采用威布尔分布函数进行处理, 参数估计采用最佳线性不变估计 (BLIE) 方法, 得到额定寿命 L_{10} 、中值寿命 L_{50} 、斜率 b ^[8, 22-23]。

2.2 接触疲劳试样的制备

采用 φ60 mm 棒材按照 1.4 节的工艺进行渗碳、淬火和回火热处理, 最终成品试样尺寸如图 8 所示。

接触疲劳试样厚度方向的硬度分布如图 9 所示 (硬度的测试沿试样厚度方向, 从距表面约 0.5 mm 开始, 每间隔 400 μm 测定一点, 直到试样的另一端为止)。由图 9 可知, 疲劳试样的表面硬度为 712.37HV (60HRC) 和 753.66HV (61.5HRC), 两端硬度不同是由于试样渗碳后磨加工时采用一端多磨保证试样尺寸, 另一端少磨保证高性能的加工方法, 高硬度一端将作为疲劳测试面使用, 由此可见, 疲劳试样的表面硬度均可保证大于 60HRC, 满足 JB/T 8881—2011 规定的淬回火后硬度在 59~64HRC 的要求。

由图 9 可知, 即使是多磨的一面, 以大于 58HRC 为标准测定, 试样的有效渗碳层厚度达到 2 mm;

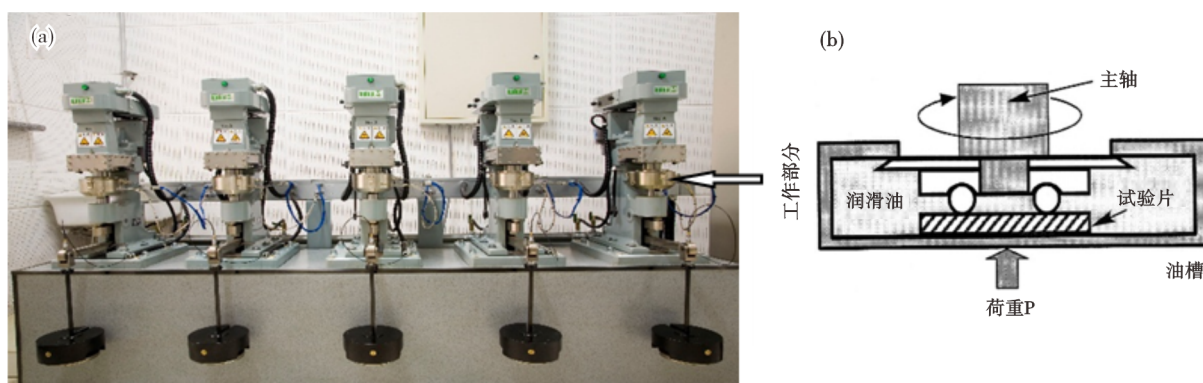


图 7 TRF-1000/5-H 试验机图片和工作原理图: (a) 试验机图片, (b) 工作原理图

Fig. 7 Photo and working principle diagram of TRF-1000/5-H testing machine: (a) photo of the testing machine, (b) schematic diagram of the working principle

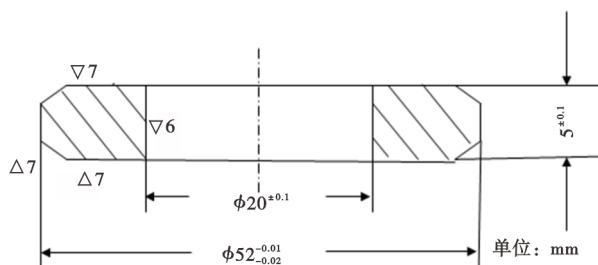


图 8 接触疲劳试样尺寸图

Fig. 8 Dimensional drawing of the contact fatigue specimen

若以 JB/T 8881—2011 规定的以 550HV (52.5HRC) 为标准测定, 试样的有效渗碳层厚度达到 3 mm。表面至 58HRC 的距离占实际有效渗碳层深度的 67%, 大于标准规定的应占 40% 的要求。同时, 疲劳试样的心部硬度最低为 472HV (47.5HRC), 也满足 JB/T 8881—2011^[24] 规定的心部硬度在 32~48HRC 的要求。

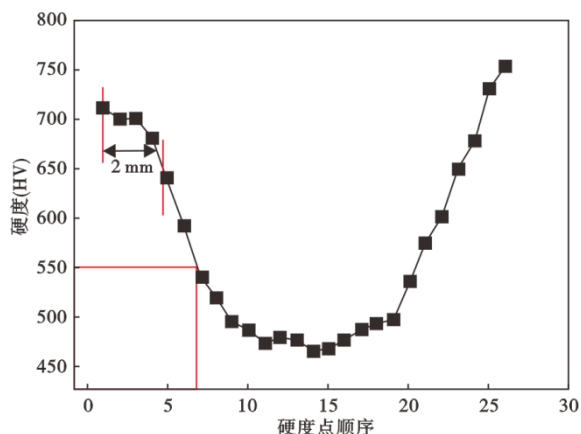


图 9 疲劳试样渗碳淬火回火后硬度分布

Fig. 9 Hardness distribution of fatigue specimens after carburizing, quenching and tempering

接触疲劳试样典型的渗碳层、过渡层及心部组织的金相照片如图 10 所示。由图 10 可见, 疲劳试样的表面渗碳层组织为孪晶马氏体+大量细小弥散的残留碳化物+少量残余奥氏体, 按 JB/T 8881—2011 的渗碳表层粗大碳化物深度测量图以及第一、二、五级别图评定, 疲劳试样表面渗碳层组织中不存在粗大的碳化物, 渗碳大颗粒碳化物、渗碳网状碳化物评级均为 1 级, 淬回火马氏体组织均匀细小, 评定级别为 1 级。疲劳试样的过渡区组织为孪晶马氏体+少量残留碳化物+残余奥氏体的组织。与表面组织相比较, 过渡层的碳化物数量减少, 马氏体组织略微变得粗大。疲劳试样的心部组织为板条马氏体+残余奥氏体+少量铁素体的组织, 按照 JB/T 8881—2011 第六级别图评定, 疲劳试样心部显微组织级别为 1 级, 组织良好。

2.3 试验结果

接触疲劳试样试验前后以及疲劳滚道和疲劳剥落坑的典型形貌如图 11 所示。加工好的接触疲劳试样如图 11(a) 所示, 在特定的应力载荷下运转, 首先形成桔皮状的滚道如图 11(b)、(c) 所示, 运转一定时间后某些试样将发生疲劳剥落, 形成疲劳剥落坑, 如图 11(d) 所示, 此时试验机自动停机, 停机时的运转次数即为该试样的疲劳寿命数值。如果试样运行到 $\geq 1 \times 10^8$ 次仍未发生疲劳剥落, 则手动停机, 该试样疲劳寿命值记作 1×10^8 次。

试验钢的接触疲劳试验数据统计结果见表 4, 16 个试样中有 2 个试样破坏, 其余试样的运转次数均超过 1×10^8 次, 试验 P-N 曲线如图 12 所示, 试验结果采用威布尔分布函数处理得到材料的额定疲劳寿命 L_{10} 为 7.97×10^7 次、中值寿命 L_{50} 为 1.33×10^8 次、

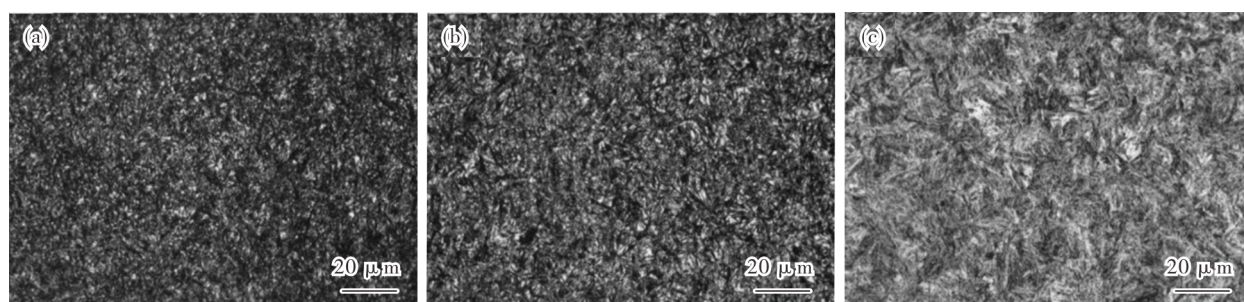


图10 疲劳试样的组织:(a)渗碳层组织,(b)过渡层组织,(c)心部组织

Fig. 10 Microstructure of fatigue specimens: (a) carburized layer microstructure, (b) transition layer microstructure, (c) core microstructure

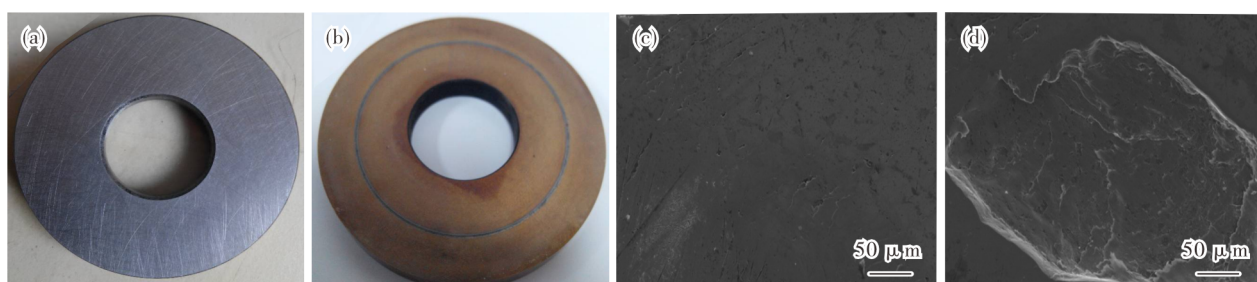


图11 接触疲劳试样试验前后的典型形貌:(a)疲劳试样(试验前),(b)疲劳试样(试验后),(c)疲劳滚道,(d)疲劳剥落坑

Fig. 11 Typical morphologies of contact fatigue specimens: (a) fatigue specimen (before testing), (b) fatigue specimen (after testing), (c) fatigue raceway, (d) fatigue spalling crater

表4 试验钢接触疲劳试验循环次数统计表

Table 4 Table of cycle statistics from contact fatigue testing of the test steel

试样序号	1	2	3-16
疲劳寿命/次	45 219 900	78 643 200	≥100 000 000

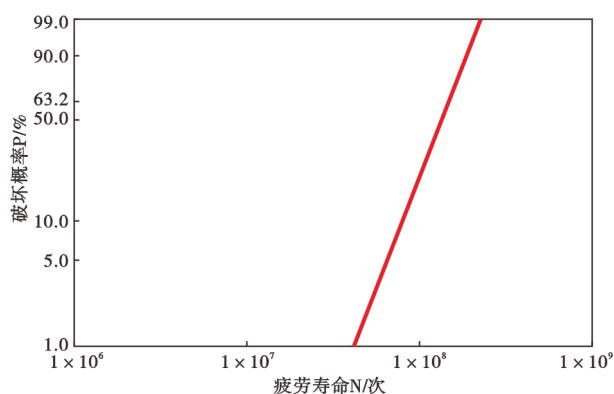


图12 试验钢接触疲劳试验 P-N 曲线

Fig. 12 P-N curve of the test steel in contact fatigue testing

斜率参数 b 为 3.67, 材料的接触疲劳寿命长, 稳定性高。

2.4 冶金质量对接触疲劳寿命的影响

1) 冶炼成分的控制: G20CrNi2Mo 钢冶炼过程

C、Mn 按照标准下限控制, Si、Cr、Ni、Mo、Al 按中下限控制, $w[\text{O}]$ 控制在 0.000 6%, 远低于标准要求, 且残余元素含量低。钢材 O 含量控制在较低水平, 能够显著减少氧化物夹杂, 是获得高接触疲劳寿命的前提。同时, 合理的成分控制有助于淬硬层均匀且获得良好的基体韧性, 从而抵抗次表面疲劳裂纹萌生。金属原位分析方法测量得到的元素偏析度和均匀度显示 C、Cr、Ni、Mo 元素在棒材上分布均匀, 其统计均匀度均高于 97%, 确保了组织和硬度的一致性, 减少了应力集中和局部弱化区, 是实现高稳定性、长寿命的重要微观基础。

2) 非金属夹杂物的控制: 棒材各类夹杂物级别处于 GB/T 3203—2016 高级优质钢的标准。Al 系夹杂物尺寸 $>5 \mu\text{m}$ 的比例小于 10%, 夹杂物的低级别和细小尺寸有效延缓了次表面疲劳剥落, 提高了钢材的接触疲劳寿命^[15]。

3) 低倍组织评级结果显示棒材缩孔和偏析程度低, 能够降低接触疲劳过程的早期开裂风险, 保障了疲劳寿命的高可靠性, 接触疲劳试验结果采用威布尔分布函数处理得到的斜率也反映了材料的稳定性较好。

4)材料良好的淬透性能够保证渗碳层与心部形成合理的硬度梯度和足够深的硬化层,有效抵抗接触剪切应力,防止深层剥落。

3 结论

本研究针对真空脱气+连铸工艺生产的 $\phi 60$ mm的G20CrNi2Mo钢棒开展了冶金质量与接触疲劳寿命分析。结果表明,该钢在冶炼纯净度、元素分布

均匀性、夹杂物细化、低倍组织致密度、淬透性五方面均控制优良,尤其是极低的氧含量和细小弥散的夹杂物特征是获得超长接触疲劳寿命的关键。冶炼质量的综合提高使得钢材具有超高接触疲劳寿命和稳定性,经威布尔分布处理得到该材料的额定疲劳寿命 L_{10} 为 7.97×10^7 次,中值寿命 L_{50} 为 1.33×10^8 次,斜率参数 b 为3.67,材料的接触疲劳寿命长,稳定性高。

参考文献

- [1] 杨红兵,邵子恒,颜莹,等. 渗碳高强轴承钢的微观组织与滚动接触疲劳行为[J]. 金属热处理, 2025, 50(12): 1-10.
- [2] 王坤,胡锋,周雯,等. 轴承钢研究现状及发展趋势[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 119-128.
- [3] 俞峰,陈兴品,徐海峰,等. 滚动轴承钢冶金质量与疲劳性能现状及高端轴承钢发展方向[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 513-522.
- [4] 曹文全,俞峰,王存宇,等. 高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 1-10.
- [5] 李昭昆,雷建中,徐海峰,等. 国内外轴承钢的现状与发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(3): 1-12.
- [6] 安学良. G20CrNi2Mo钢的组织细化调控与抗疲劳机制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2024.
- [7] 张智杰,尹青,洪继要,等. 连铸冶炼G20CrNi2Mo钢材在薄壁圆锥轴承的应用研究[J]. 特钢技术, 2025, 31(3): 48-50+66.
- [8] MONNOT J H B, COGNE J Y. Relationship of melting practice, inclusion type, and size with fatigue resistance of bearing steel: [J]. ASTM Special Technical Publication; Effect of steel manufacturing processes on the quality of bearing steels, 1988, 1(1): 149-165.
- [9] 张伟成,张海杰,付铭宇,等. 夹杂物类型与力学参数对轴承钢滚动接触疲劳损伤的影响[J]. 中国冶金, 2025, 35(12): 79-90.
- [10] 崔皓哲. G20CrNi2Mo渗碳轴承钢显微组织与力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 渗碳轴承钢: GB/T 3203—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [12] 王旭,魏军,仇圣桃,等. 12Mn钢连铸圆坯的原位统计分布分析[J]. 冶金分析, 2019, 39(3): 1-6.
- [13] 邓藏龙,贾云海,盛亮,等. 大尺寸高温合金棒材成分的原位分析表征[J]. 冶金分析, 2025, 45(5): 1-10.
- [14] 王志鹏. 原位统计分布分析在焊接结构用大壁厚钢铸件应用性能评价中的应用: [J]. 冶金分析, 2019, 39(12): 16-24.
- [15] 李豪. 非金属夹杂物对轴承钢滚动接触疲劳寿命的影响研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2023.
- [16] 孙飞龙,耿克,俞峰,等. 超洁净轴承钢中夹杂物与滚动接触疲劳寿命的关系[J]. 金属学报, 2020, 56(5): 693-703.
- [17] 刘瑞军. G20CrNi2Mo轴承钢洁净度及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 钢淬透性的末端淬火试验方法(Jominy 试验): GB/T 225—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [19] Cao Z X, Shi Z Y, Yu F, et al. A new proposed Weibull distribution of inclusion size and its correlation with rolling contact fatigue life of an extra clean bearing steel[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 126: 1-5.
- [20] 叶健熠,袁新生,杨巧玲,等. G20CrNi2MoA钢的接触疲劳寿命及渗碳层特性[J]. 轴承, 1996(2): 23-26.
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 滚动轴承材料接触疲劳试验方法: JB/T 10510—2005[S]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [22] 尹青,曹文全,吴小林,等. 高洁净轴承钢GCr15滚动接触疲劳机制研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 113-120.
- [23] 李祥才,陈新艳,刘金强,等. GCr15圆钢滚动接触疲劳试验疲劳失效原因分析[J]. 山东冶金, 2025, 47(3): 44-47.
- [24] 中华人民共和国工业和信息化部. 滚动轴承 渗碳轴承钢零件 热处理技术条件: JB/T 8881—2020[S]. 北京: 机械工业出版社, 2020.