

GCr15 轴承钢 250 mm × 280 mm 铸坯至 138 mm × 150 mm 坯粗轧数值模拟及工艺优化

苟复钢¹ 王青海² 王东明¹ 孙世平¹

(西宁特殊钢集团有限责任公司 1 精品小棒线分厂; 2 股份公司, 西宁 810005)

摘要 生产 $\Phi 50 \sim 75$ mm 的 GCr15 轴承钢时, 轧后棒材存在中心疏松缺陷。通过数值模拟研究, 观察棒材心部等效应变的渗透情况, 并对粗轧孔型工艺进行优化, 将优化前一二道次的压下量从 21 mm、58 mm 分别增加到 51 mm、85 mm, 第三道次的压下量从 60 mm 减小到 34 mm。等效应变值随着道次的增加, 呈逐渐增大趋势, 棒材中的拉应力在经工艺优化后变为压应力, 变形均匀度也得到提升, 促进了铸坯心部的变形, 有利于中心孔洞的压合。工艺优化后轴承钢的探伤合格率由原 93.25% 提高到 96.06%。

关键词 GCr15 钢 粗轧 数值模拟 等效应变 中心疏松

Numerical Simulation and Process Improvement on Rough Rolling of 250 mm × 280 mm Cast Bloom to 138 mm × 150 mm Billet of GCr15 Bearing Steel

Gou Fugang¹, Wang Qinghai², Wang Dongming¹ and Sun Shiping¹

(1 High-quality Small Bar Rolling Factory, 2 Limited Company, Xining Special Steel Group Co Ltd, Xining 810005)

Abstract When producing GCr15 bearing steel $\Phi 50 \sim 75$ mm bar, there is center porosity in rolled bar. A numerical simulation is carried out to study the penetration of effective strain in the core of bar and optimize the rough rolling pass technology, increase the reduction of the first two passes from original 21 mm and 58 mm to 51 mm and 85 mm respectively, and reduce the third pass from 60 mm to 34 mm. Through the effective strain value gradually increases with the increase of the pass, the tensile stress in the bar becomes compressive stress after the optimized process, and the uniformity of deformation is also obtained to promote the deformation of core of casting slab be available to the closure of the center porosity. After the process optimization, the qualified rate by ultrasonic detection of bearing steel increases from original 93.25% to 96.06%.

Material Index GCr15 Steel, Rough Rolling, Numerical Simulation, Effective Strain, Center Porosity

经过几十年的快速发展, 我国制造业规模虽已跃居世界前列, 但仍需完善以企业为主体的制造业创新体系^[1]。进入“十三五”新的历史发展时期, 包括轴承行业在内的制造业面临国际上发达国家和新兴国家的“双向挤压”^[2]。如何实现产业转型升级, 尤其是利用信息技术和互联网技术, 更好地提升中国制造业的质量、水平和竞争力是亟待解决的问题。

在轴承钢轧制过程中, 运用计算机辅助规程设计不仅能极大缩短了设计周期, 并且随着计算机能力的提高, 还能更精确的反映现场的实际情况, 减少试错次数^[3]。

本文利用 Deform-3D 软件, 模拟 GCr15 轴承钢小规格棒材的粗轧过程, 通过对影响小棒线心部变形的粗轧阶段进行数值模拟, 以提高轴承钢棒材的产品质量水平。

1 试验材料与工艺方案

1.1 试验材料

西宁特钢公司小棒线是 2013 年 9 月改造完成并投入生产, 坯料规格为 250 mm × 280 mm 连铸坯, 可生产轴承钢系列产品。产品规格: $\Phi 16 \sim 100$ mm (全规格 PSM 轧制, 可实现轧制规格范围内自由尺寸轧制), 设计年产量 45 万 t, 设计最大轧制速度 15 m/s, 定尺长度 3 000 ~ 12 000 mm (范围可调)。GCr15 钢生产工艺流程为: 坯料验收 → 坯料加热 → 轧制 → PSM 减定径 → 锯切 → 热处理 → 矫直 → 探伤 → 清理 → 包装。GCr15 轴承钢产品的化学成分为 (%): 0.95 ~ 1.05C, 0.15 ~ 0.35Si, 0.25 ~ 0.45Mn, 1.40 ~ 1.65Cr, P ≤ 0.025, S ≤ 0.025, Ni ≤ 0.30, Cu ≤ 0.25, Mo ≤ 0.10, Ni + Cu ≤ 0.50; O ≤ 12 × 10⁻⁶。本文图中的数值 1 至 7 代表轧机道次, V 代表立式轧机, H 为平式轧机。

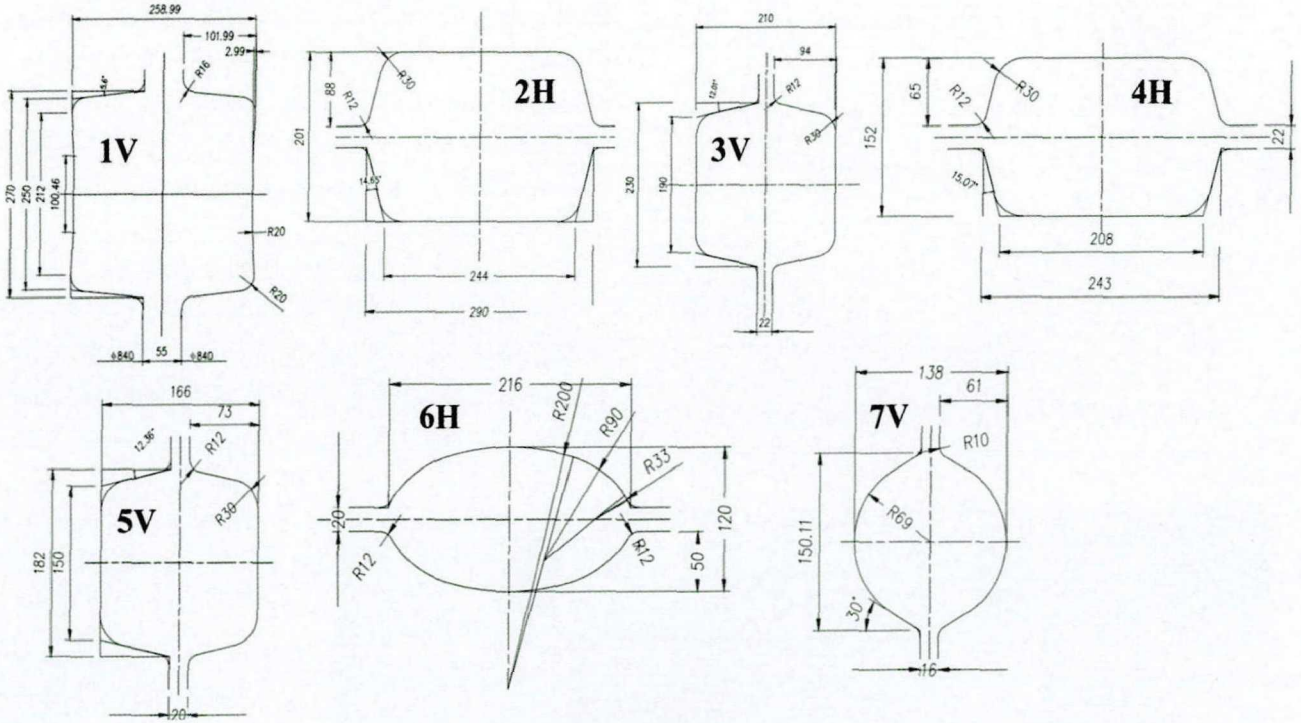


图1 粗轧各道次孔型
Fig. 1 Groove of each pass of rough rolling

1.2 数据建模

轧件宽 280 mm × 高 250 mm; 长度 5.3 ~ 6 m, 本模型取 1.5 m, 模型取 1/4 模型^[4]。实际生产过程 7 道次粗轧孔型如图 1 所示。材料选择自 Deform-3D 自带材料库里的 GCr15 钢, 开轧温度为 1 150 °C, 网格数量 30000, 各道次的轧辊速度为实际速度, 建立了七道次模型。

2 模拟结果分析讨论

2.1 工艺优化前等效应变和静水压力的变化

以下为粗轧阶段的尺寸变化规程: 250 mm × 280 mm → 270 mm × 259 mm (21 mm) → 290 mm × 201 mm (58 mm) → 230 mm × 210 mm (60 mm) → 243 mm × 152 mm (58 mm) → 182 mm × 166 mm

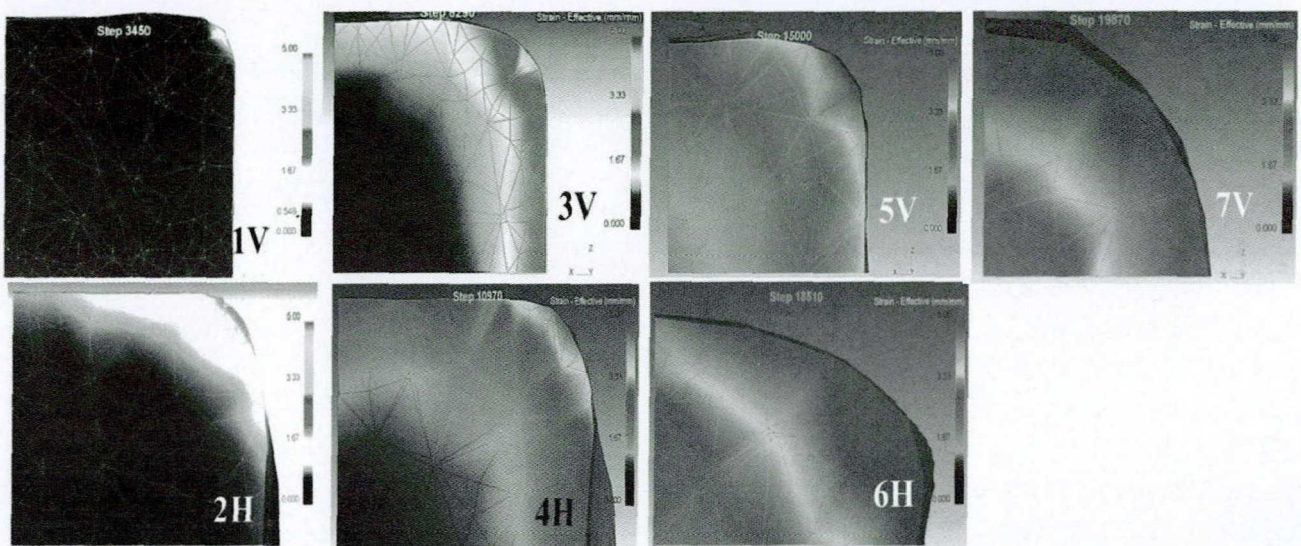


图2 各轧制道次等效应变云图
Fig. 2 Effective strain simulation diagram at each rolling passe

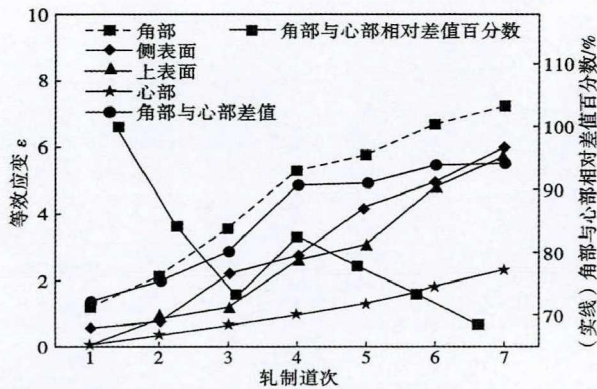


图 3 各轧制道次下不同部位的等效应变
Fig. 3 Effective strain of different parts at each rolling passe

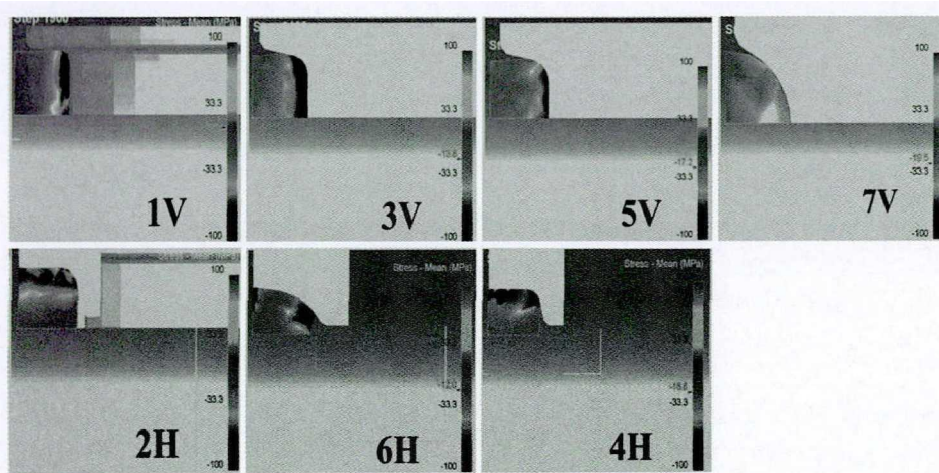


图 4 各轧制道次静水压力云图
Fig. 4 Hydrostatic pressing molding diagram at each rolling passe

(61 mm)→216 mm × 120 mm (46 mm)→138 mm × 150.11 mm (78 mm)。

图 2 为不同道次下的坯料 1/4 截面的等效应变云图。由图 2 可以看出,在坯料的右上角 A 部位(对应完整坯料的角部)等效应变最大,左上角 B 和右下角 C 部位(对应完整坯料的上表面和侧表面)等效应变值次之,心部 D 部位等效应变最小。

第一道次后,等效应变主要集中在表面,心部和上表面无变形。由图 3 可以看出,随着道次的增加,各部位的等效应变均增大。同时,角部与心部的等效应变差值也逐渐增加,从第一道次到第四道次,等效应变差值增加明显,随着道次继续增加,等效应变也增加,但增加变缓。心部与角部的相对差值百分数来表示变形的均匀性,可表达为:(角部等效应变 - 心部等效应变)/角部等效应变,随着道次的增加,相对差值百分比逐渐减小,第四道次表面等效应变增加显著,相对差值百分比有所升高,道次继续增加,相对差值百分比逐渐降低,均匀性提高^[5]。

图 4 为不同道次下的坯料 1/4 截面的静水压力

云图。由图 4 可以看出,坯料与轧辊接触表面的压应力最大,心部的压应力最小。图 5 为不同道次下心部的静水压力值,除了第一道次的心部存在拉应力,其余道次的心部均为压应力。由轧制规程可知,第一道次的压下量较小,在心部形成拉应力,不利于内部缺陷的压合。

2.2 工艺优化后的等效应变和静水压力

根据之前的轧制规程,在第一道次心部无变形,且存在拉应力,不利于孔洞的闭合。将轧制规程中辊缝进行调整,调整如下:压下量 51 mm→85 mm→34 mm→55 mm→64 mm→46 mm→65 mm。主要增加了前两道次的压下量。

图 6 为不同道次下的坯料 1/4 截面的等效应变云图。由图 6 可以看出,第一道次后,等效应变主要集中在表面,与原压下规程相比,心部和上表面已变形,等效应变值分别为 0.19 和 0.23。随着道次的增加,等效应变值逐渐增大。由图 6 可以看出,随着道次的增加,各部位的等效应变均增大,同时,角部与心部的等效应变差值也逐渐增加,最终心部等效应变值为 2.63,角部与心部的等效应变差值为 5.84,与原工艺相比,心部等效应变大于原工艺的 2.28,但等效应变差值亦大于原工艺的 4.95。

图 7 为测得的不同部位的等效应变值以及等效应变最大值和最小值的差值(衡量变形的均匀性)

图 7 为测得的不同部位的等效应变值以及等效应变最大值和最小值的差值(衡量变形的均匀性)

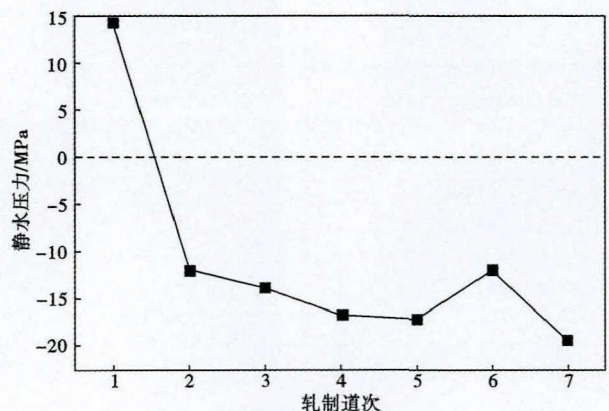


图 5 各轧制道次心部的静水压力
Fig. 5 Hydrostatic pressing of bar core at each rolling passe

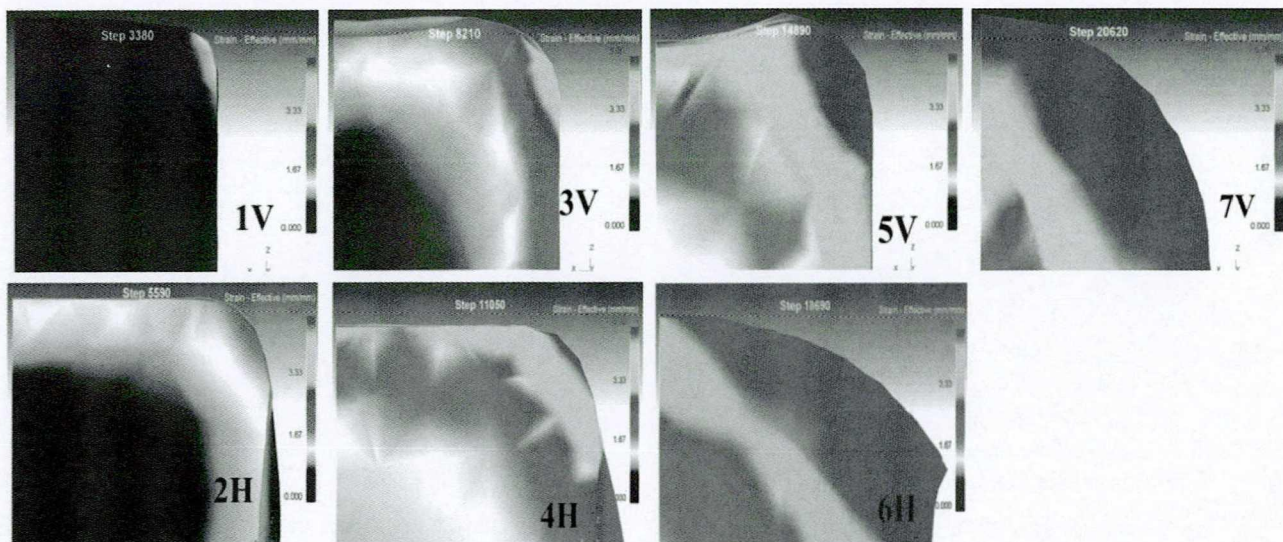


图6 轧制规程优化后各轧制道次等效应变云图

Fig. 6 Equivalent strain cloud diagram at each rolling passe after optimization of rolling schedule

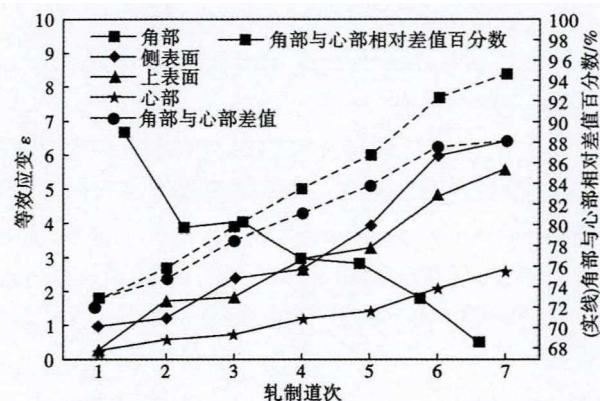


图7 轧制规程优化后各轧制道次等效应变

Fig. 7 Equivalent strain at each rolling passe after optimization of rolling schedule

随着道次变化图。不同工艺下最终变形后的相对差值百分数变化不大,均匀性差异不大。轧制工艺的改变对最终的均匀性影响不大,但是促进了心部的变形,有利于孔洞的压合。

由图8可以看出,坯料与轧辊接触表面的压应力最大,心部的压应力最小。图9为不同道次下心部的静水压力值,均为压应力。第一道次压下量的增加,促进了心部的应力由拉应力转变为压应力,促进孔洞的压合。从图10可以看出,优化轧制孔型参数后,棒材心部与角部的相对差值百分数变化幅度较优化之前要小,表明了孔型参数优化后,变形更加均匀。

3 优化工艺实践

将粗轧7架轧机孔型工艺参数进行优化,将7架轧机压下量分别调整为: 21 mm → 51 mm、58 mm → 85 mm、60 mm → 34 mm、58 mm → 55 mm、61 mm → 64 mm、第6架不做改变、78 mm → 65 mm。孔型参数优化后联合探伤共涉及42个钢种26个规格126批次,总数102591,合格率96.06%,其中规格Φ < 30 mm GCr15 轴承钢探伤11768支,合格率96.71%,

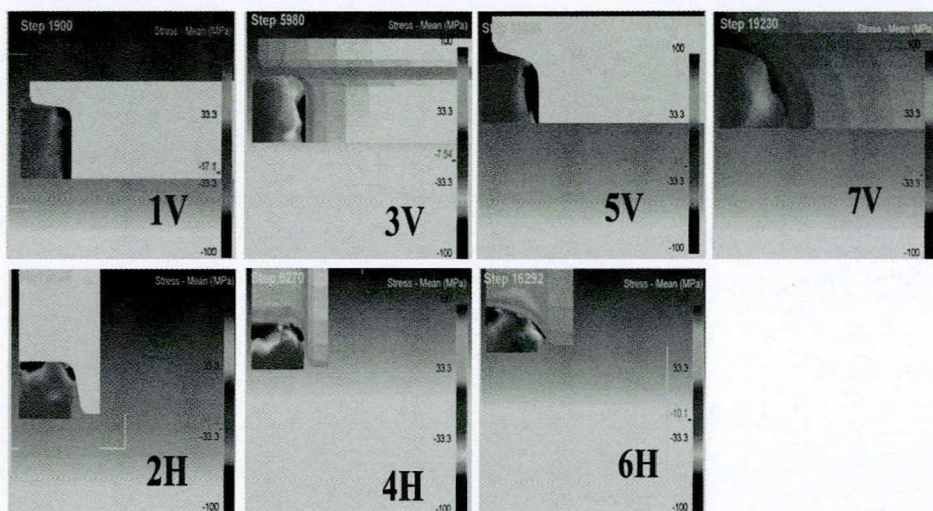


图8 轧制规程优化后各轧制道次静水压力云图

Fig. 8 Hydrostatic pressing cloud diagram at each rolling passe after optimization of rolling schedule

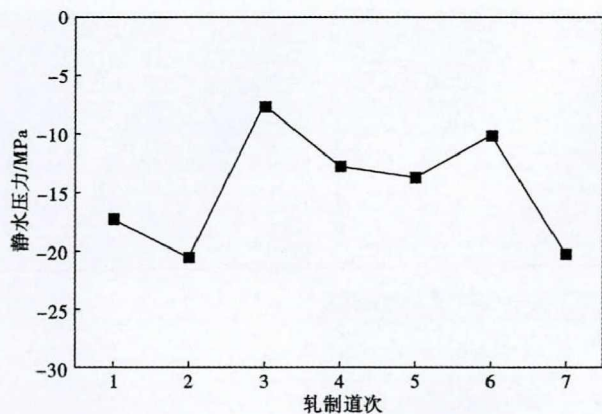


图 9 轧制规程优化后各轧制道次静水压力

Fig. 9 Hydrostatic pressing at each rolling passe after optimization rolling schedule

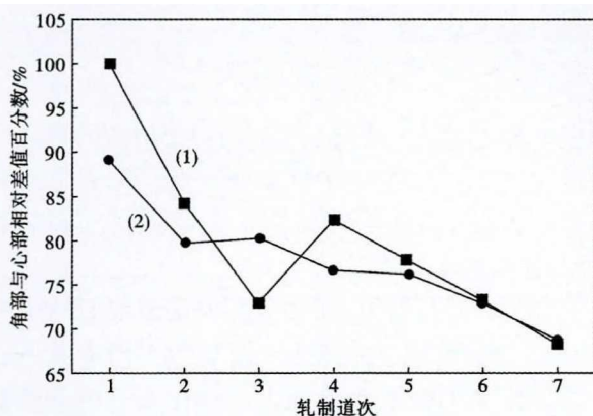


图 10 原工艺(1)和优化工艺(2)各道次角部与心部等效应变相对差值百分数

Fig. 10 Relative difference percentage of equivalent strain at corner and core of bar at each rolling pass by original (1) and optimization (2) process

30 mm ≤ Φ ≤ 50 mm 探伤 4024 支, 合格率 95.54%, Φ ≥ 50 mm 探伤 2467 支, 合格率 96.02%, 总计探伤 18259 支, 合格率 96.85%, 均满足 GB/T4162-2008 中 A 级探伤要求。孔型优化前后联合探伤情况对比结果如表 1 所示, 工艺优化前探伤合格率 93.25%, 工艺优化后探伤合格率 96.06%, 优化后提高了 2.81%。轧批 Φ < 50 mm 组距优化前 95.18%, 优化后 96.59%, 优化后提高 1.41%, 轧批 Φ ≥ 50 mm 组距优化前 94.15%, 优化后 96.14%, 优化后提高 1.99%; 250 mm × 280 mm Φ < 50 mm 组距优化前 93.05%, 优化后 96.60%, 优化后提高

表 1 优化前后联合探伤情况对比

Table 1 Comparison of combined ultrasonic detection before and after optimization

工艺	总探伤/支数	内部不合格/支数			内部合格率/%
		点状	断续	连续	
优化前	83934	2459	2427	805	93.25
优化后	102591	2183	1509	351	96.06

3.55%, 250 mm × 280 mm Φ ≥ 50 mm 组距优化前 89.25%, 优化后 95.15%, 优化后提高 5.90%。对于大规格和小规格均有所提高。

4 结论

(1) 通过对粗轧 1~7 架孔型优化调整, 主要增加了前两道次的压下量, 将优化前一二两个道次的压下量从 21 mm、58 mm 分别增加到 51 mm、85 mm, 第三道次的压下量从 60 mm 减小到 34 mm。不同道次下心部的静水压力值均变为压应力。尤其是第一道次压下量的增加, 心部的应力由拉应力转变为压应力。此外, 变形均匀度也得到提升, 从而可以有效促进孔洞的压合。

(2) 工艺优化前探伤合格率 93.25%, 工艺优化后探伤合格率 96.06%, 比优化前提高 2.81%。优化前 Φ < 50 mm 组距探伤合格率为 95.18%, 优化后 96.59%, 比优化前提高 1.41%; 轧批 Φ ≥ 50 mm 组距优化前 94.15%, 优化后 96.14%, 比优化前提高 1.99%。大、小规格棒材内部质量明显提高, 月复探量减少 2000 t 左右, 提高了生产效率和降低了人工成本。

参考文献

- [1] 赵宗源. 金融集聚对制造业全要素生产率增长的影响研究—基于长三角地区的实证分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
- [2] 赵昌文. “十三五”时期中国产业发展新动向[J]. 财经问题研究, 2016(3): 27-34.
- [3] 冯光宏, 张培, 周礼, 等. 特殊钢大棒材连轧规程的研究[J]. 特钢技术, 2012, 18(1): 1-5.
- [4] 李小龙, 周敦世, 冯亮. GCr15 轴承钢 Φ130 mm 棒材热连轧过程轧制力的数值模拟和分析[J]. 特殊钢, 2015, 36(1): 5-8.
- [5] 李小龙, 程卫国, 周立新, 等. Φ16 mm GCr15 轴承钢棒材 KOCKS 轧机热连轧工艺数值模拟和分析[J]. 特殊钢, 2016, 37(5): 5-9.

苟复钢(1972-), 男, 高级工程师, 2000 年青海省联合职工大学毕业, 特殊钢棒材生产孔型技术及质量管理。
E-mail: gfgvsrxl@163.com

收稿日期: 2020-11-25