

小口径锅炉管生产技术开发

林震¹, 王增海², 高和平¹, 米永峰², 张瑞林¹

(1. 内蒙古包钢特种钢管有限公司, 内蒙古包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢管有限公司, 内蒙古包头 014010)

摘要: 内蒙古包钢特种钢管有限公司围绕集团公司“突围打样提升产品质量”的要求, 通过创新工艺设计, 设计开发小口径锅炉管, 并提高锅炉管的质量指标。机组原设计使用 $\Phi 150$ mm 连铸坯料轧制外径范围为 51 ~ 114.3 mm、壁厚范围为 3.5 ~ 12 mm 的无缝钢管。锅炉管行业对于外径 38 ~ 48 mm、壁厚 3.5 ~ 8 mm 的小口径锅炉管有较大的需求量。研究开发连轧机组大减径率技术, 利用 $\Phi 150$ mm 连铸坯料生产外径范围为 38 ~ 48 mm 的无缝钢管, 实现使用同一直径坯料生产两组外径范围无缝钢管, 钢管的壁厚精度为 $-7.14\% \sim 9.14\%$ 。轧制材质为 25MnG、15CrMoG 和 12Cr1MoVG 小口径锅炉管时, 在钢管的内表面出现了“内直道”缺陷, 外表面出现了“青线”缺陷和“皮下裂纹”缺陷, 结合变形工艺和材质特性分析了这些缺陷产生的原因, 制定解决措施, 产品超声探伤合格率达 86.82% 提高到 91.32%。制定了材质为 15CrMoG 和 12Cr1MoVG 小口径锅炉管热处理制度, 在该工艺制度下, 产品的机械性能稳定, 能够满足 GB/T 5310—2017 标准要求。

关键词: 锅炉用无缝钢管; 大减径率技术; 内直道; 皮下裂纹

中图分类号: TG335.7

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)06-0038-07

Development of Production Technologies for Small-diameter Boiler Tube

Lin Zhen¹, Wang Zeng-hai², Gao He-ping¹, Mi Yong-feng², Zhang Rui-lin¹

(1. Inner Mongolia Baotou Steel Special Steel Pipe Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. Inner Mongolia Baotou Steel Pipe Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The small-diameter boiler tube is designed and developed through innovating process design as well as its quality indexes are improved by Inner Mongolia Baotou Steel Special Steel Pipe Co., Ltd. based on the requirements of group company, “break through and improve product quality”. The seamless steel pipe with outer diameter of 51 ~ 114.3 mm and wall thickness of 3.5 ~ 12 mm is rolled by continuous casting billet of $\Phi 150$ mm in the original design of the unit. The demand of small-diameter boiler tube with outer diameter of 38 ~ 48 mm and wall thickness of 3.5 ~ 8 mm in the boiler tube industry is greater. The seamless steel pipes of two groups of outer diameter produced with the billets of the same diameter is realized and their wall thickness accuracy is $-7.14\% \sim 9.14\%$ through researching and developing the technology of large tube reducing rate for continuous mill unit as well as producing the seamless steel pipe with outer diameter of 38 ~ 48 mm by continuous casting billet of $\Phi 150$ mm. When rolling small-diameter boiler tubes made of materials of 25MnG, 15CrMoG and 12Cr1MoVG, there are defects of “straight fold” on inner surface as well as “linear indentation” and “subsurface cracks” on outer surface of steel tube. Their causes are analyzed combining with the deformation process

and material characteristics as well as the solutions are formulated so that qualified rate of ultrasonic flaw detection of product is increased from 86.82% to 91.32%. The heat-treatment schedule for small-diameter boiler tubes made of materials of 15CrMoG and 12Cr1MoVG is formulated as well as the mechanical properties of products are stable under this process schedule, which could meet the requirements of GB/T 5310-2017 standard.

Key words: seamless steel pipe for boiler; technology of large tube reducing rate; straight fold; subsurface crack

高压合金小口径锅炉管是企业的重要产品,结合锅炉市场对于小口径锅炉管的需要,开发了外径范围为38~48 mm、壁厚为3.5~8 mm的无缝钢管生产技术,目前主要牌号为20G、25MnG、15CrMoG、12Cr1MoVG。该部分锅炉管在超声探伤时,出现了“内直道”“青线”“皮下裂纹”缺陷,通过质量攻关逐一解决了这些问题。锅炉用无缝钢管超声探伤无损检测的合格率从2022年攻关前的86.82%提高到2023年攻关后的91.32%,综合成材率达到84.78%。

机组原设计用 $\Phi 150$ mm坯料生产钢管外径为51~114.3 mm的无缝钢管,用 $\Phi 90$ mm坯料生产外径为38~48 mm的无缝钢管。在使用 $\Phi 90$ mm坯料轧制外径为38~48 mm的无缝钢管时出现了生产效率低、工艺事故频发的问题。针对锅炉管行业对外径小于51 mm规格有较大需求量,开发了连轧机组大减径率技术,利用 $\Phi 150$ mm坯料生产外径范围为38~48 mm、壁厚范围为3.5~8 mm、材质为20G、15CrMoG、12Cr1MoVG、25MnG等牌号的锅炉管。

1 生产技术开发

1.1 大减径率技术

设计思路为在目前6架三辊连轧机的基础上建立一架独立的减径机架,该机架的孔型区别于一般意义的连轧机空减径孔型。一般意义上的空减径孔型(VRC)最大减径率设定为2%~3%^[1-5],其目的是为了改善穿孔机轧制毛管的椭圆度,为连轧机咬入创造条件,提高连轧机第一架轧辊的寿命,该VRC机架放在连轧牌坊入口侧,传动电机功率配置的较小。设计将原6架连轧机的第一架轧机设定为减径机架,减径率设计为6%~7%,孔型设计上区别于VRC机架的孔型设计,该机架的电机功率满足大减径率的要求。

设计方案分为三个主要部分:①连轧机设计一套带空减径的轧机孔型,将连轧机组的总减径量由30 mm增加到40 mm,减径率由18.18%增加到25.0%;由6架轧机减壁厚转化成5架轧机减壁厚,第一架轧机不减壁厚,只是减小外径,即空减径孔

型,连轧机的最大延伸系数4.0不变。②减小毛管外径。原设计 $\Phi 150$ mm连铸坯料对应的毛管外径为165 mm,扩径率为10%;新设计的变化是将 $\Phi 150$ mm坯料对应毛管外径增加到155 mm,扩径率减小为3.33%。扩径率减小后限制宽展进一步加剧,热工具的磨损显著加剧,同时对保证毛管外表面的质量带来挑战,需要改进原来穿孔机孔型设计,解决新问题。③张力减径机的单机架减径率由5.2%增加到5.8%,减径率的增加容易导致轧辊磨损速度加快,钢管表面容易出现“青线”缺陷。在单机架减径率不变的情况下,通过创新的张力减径机孔型设计解决这些新问题。

1.2 核心工艺制度

设计的核心理念为将入连轧机的毛管首先经过1架空减径孔型,将毛管外径控制到连轧机可以接受的外径范围内。原6架孔型都承担了减小钢管外径和减小壁厚的作用,新设计需要利用后面的5架轧机承担同样的减径减壁任务。新开发的系列连轧机出口钢管外径为120 mm,所以该系列为 $\Phi 120$ mm系列。新开发的 $\Phi 120$ mm系列与 $\Phi 135$ mm系列相比连轧机减径率增加了6.82%,总减径率由 $\Phi 135$ mm系列的18.18%增加到25.0%,这样的设计为使用 $\Phi 150$ mm坯料生产小口径钢管创造了条件。设计时参照了江苏诚德 $\Phi 89$ mm连轧机组,该连轧机组生产的钢管组距与包钢 $\Phi 100$ mm连轧机组基本一致,但是连轧机是5架三辊连轧机,这就验证了生产外径38~60 mm、壁厚3.5~12 mm的无缝钢管利用5架轧机的可行性。

减径率分配:VRS孔型承担6.3%的减径率任务,第一架到第五架孔型承担18.92%减径率任务。

减壁率分配:VRS孔型不承担减壁任务,第一架到第五架孔型承担100%减壁任务。来料毛管壁厚设计为12.2 mm,外径为155 mm;连轧机出口最薄钢管壁厚为3.5 mm,外径为120 mm,总减径率达到71.31%。

新设计的系列与国内先进企业衡阳钢管厂 $\Phi 89$ mm连轧机组做对比,两个机组都使用直径为

150 mm 的连铸坯料,穿孔机组的扩径率相同,衡阳钢管厂 $\Phi 89$ mm 连轧机组的减径率为 20%,包钢 $\Phi 100$ mm 连轧机组减径率为 25%,6 架连轧机架的第一机架改为减径机架,其他 5 架减壁厚和外径,可以轧制的最薄壁厚为 3.5 mm。对应同类型的 $\Phi 89$ mm 连轧机组同样设置 6 架连轧机架,都用于减壁厚和外径,可以轧制的最薄壁厚为 4.0 mm,所以

连轧机减壁率和平均延伸系数都大于衡阳钢管厂 $\Phi 89$ mm 连轧机组。衡阳钢管厂 $\Phi 89$ mm 连轧机组配备 24 架张力减径机架,包钢 $\Phi 100$ mm 连轧机组配备 20 架张力减径机架,最终衡阳钢管厂 $\Phi 89$ mm 连轧机组的可以生产的最小钢管外径为 48 mm,包钢 $\Phi 100$ mm 连轧机组可以生产的最小钢管直径为 38 mm,具体的工艺参数对比如表 1 所示。

表 1 衡阳钢管厂 $\Phi 89$ mm 连轧机组与包钢 $\Phi 100$ mm 连轧机组变形工艺对比

名称	坯料直径 /mm	最薄毛管壁厚 /mm	毛管外径 /mm	扩径率 /%	穿孔机最大延伸系数	连轧机外径 /mm	连轧最薄壁厚 /mm	连轧机最大延伸系数	连轧机减径率 /%	连轧减壁率 /%	出脱管机荒管直径 /mm	最小外径 /mm
衡阳	150	13.0	160	6.67	2.94	128	4.0	3.85	20.00	69.23	120	48
包钢	150	12.2	155	3.33	3.12	120	3.5	4.20	25.22	71.31	112	38

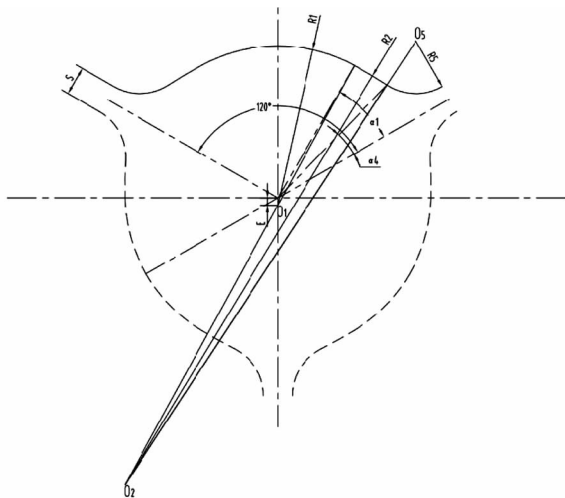
1.3 连轧机孔型设计

连轧机采用“孔型顶部延伸系数分配方法”,计算孔型前要先确定机架数、毛管直径、毛管最薄壁厚、连轧机出口钢管外径、连轧机可以轧制的最薄钢管壁厚、偏心系数、第一脱离弧比例(如果是两段脱

离弧还需要确定第二脱离弧比例)等参数^[6-10],再分配各架轧机的顶部延伸系数,确定孔型高,计算出槽顶弧半径、脱离弧半径,根据脱离弧角度和连接弧角度确定出各架轧机孔型轮廓^[11-13]。最终确定的孔型参数如表 2 所示,孔型轮廓示意图如图 1 所示。

表 2 $\Phi 120$ mm 连轧机孔型参数

项目	空减径	第一架	第二架	第三架	第四架	第五架
槽顶弧 R_{1i}	78.00	66.20	63.33	60.12	60.00	60.00
脱离弧 R_{2i}		198.67	189.98	210.42	150.00	150.00
连接弧 R_{5i}	4.20	21.85	14.58	14.51	7.55	7.55
辊缝 S	6.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
偏心距 $ECC(ECC = R_{1i} - R_i)$	4.00	3.09	2.00	0	0	0



α_1 - 脱离角; α_4 - 连接角; O_1 - 槽顶弧圆心; O_2 - 脱离弧圆心; O_5 - 连接弧圆心; R_1 - 槽顶弧半径; R_2 - 脱离弧半径; R_5 - 连接弧半径; E - 偏心距; S - 辊缝值

图 1 连轧机孔型轮廓

1.4 壁厚精度

该技术开发完成后在 FQM 机组工业化生产了 $\Phi 38$ mm \times 3.5 mm 的无缝钢管,随机抽查一支成品钢管,测量钢管的壁厚精度,检查时沿着钢管的轴向和周向两个维度进行测量,测量结果见表 3。表 3 中的 A、B...I 代表沿钢管轴向,从钢管头端 0.5 m 的位置开始间隔 1 m 的距离确定一个横截面; 0° 、 45° ... 315° 代表在确定了横截面后,在每个截面上间隔 45° 测量一个壁厚值。拓展规格的锅炉管壁厚精度在 $-7.14\% \sim 9.14\%$ 范围内,优于 GB/T 5310—2017 中对于公称壁厚允许偏差为 $-10\% \sim 10\%$ 的要求。钢管所有截面中壁厚不均度的范围是 0.23 ~ 0.48 mm。

表3 钢管壁厚精度

轴向位置	周向测量值/mm								同一横截面壁厚平均值 /mm	同一横截面壁厚差值 /mm	同一横截面壁厚偏差范围 /%
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°			
A	3.30	3.25	3.28	3.30	3.45	3.56	3.58	3.62	3.42	0.37	-7.14~3.42
B	3.42	3.46	3.35	3.51	3.67	3.56	3.72	3.51	3.53	0.37	-4.29~6.28
C	3.51	3.63	3.72	3.65	3.61	3.65	3.71	3.82	3.66	0.31	0.29~9.14
D	3.45	3.42	3.53	3.67	3.54	3.81	3.75	3.73	3.61	0.39	-2.29~8.85
E	3.32	3.25	3.35	3.41	3.45	3.56	3.67	3.73	3.47	0.48	-7.14~6.57
F	3.52	3.63	3.71	3.45	3.61	3.82	3.78	3.68	3.65	0.37	-1.43~9.14
G	3.35	3.45	3.43	3.51	3.56	3.61	3.71	3.65	3.53	0.36	-4.28~6.00
H	3.82	3.82	3.76	3.71	3.52	3.54	3.45	3.46	3.64	0.37	-1.43~9.14
I	3.71	3.56	3.61	3.67	3.71	3.75	3.61	3.52	3.64	0.23	0.57~7.14

2 锅炉管组织和机械性能

2.1 成分设计

生产的锅炉管牌号为 20G、25MnG、15CrMoG、

12Cr1MoVG, 开发的小口径锅炉管成分设计上沿用大口径锅炉的成分设计方案。对于 15CrMoG 和 12Cr1MoVG 熔炼成分如表 4 和表 5 所示。

表4 15CrMoG 熔炼成分(质量分数)

													%
C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	Cu	Mo	Pb	Sn	Ni + Cr + Cu + Mo	
0.138	0.254	0.514	0.008	0.005	0.005 1	0.019	0.892	0.008	0.46	0.001	0.005	1.379	

表5 12Cr1MoVG 熔炼成分(质量分数)

													%
C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	Cu	Mo	Pb	Sn	Ni + Cr + Cu + Mo	
0.118	0.25	0.524	0.007	0.007	0.005	0.021	0.983	0.007	0.284	0.001	0.005	1.295	

2.2 热处理方案

15CrMoG 和 12Cr1MoVG 采用正火加回火的热处理工艺。GB/T 5310—2017 中规定热处理制度如表 6 所示,具体的热处理制度如表 7 所示。

表6 GB/T 5310—2017 中规定的热处理制度 °C

材质	正火温度	回火温度
15CrMoG	900~960	680~730
12Cr1MoVG	980~1 020	720~760

表7 15CrMoG 与 12Cr1MoVG 热处理制度

材质	正火温度 /°C	正火时间 /min	回火温度 /°C	回火时间 /min
15CrMoG	940 ± 10	80	690 ± 10	80
12Cr1MoVG	1 000 ± 10	80	750 ± 10	80

12Cr1MoV 热处理后得到的组织为铁素体、珠光体和少量贝氏体。15CrMoG 的晶粒度等级为 7~7.5 级; 12Cr1MoVG 的晶粒度等级为 8~8.5 级。15CrMoG 热处理后金相照片如图 2 所示, 12Cr1MoVG 热处理后金相照片如图 3 所示。

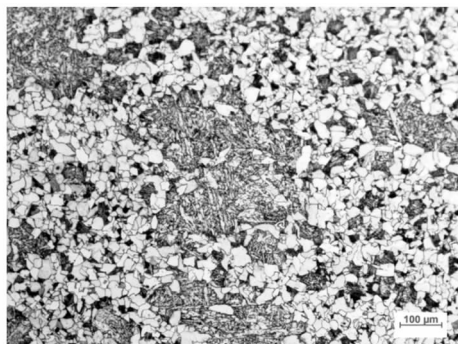


图2 15CrMoG 金相照片

2.3 金相组织

小口径低合金高压锅炉管 15CrMoG 和

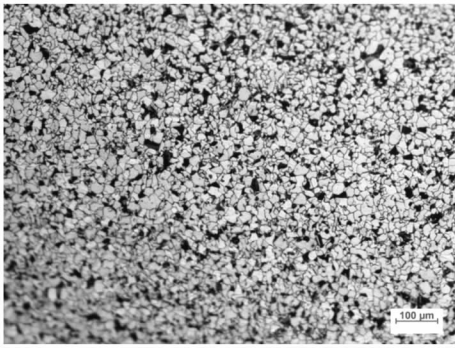


图 3 12Cr1MoVG 金相照片

2.4 机械性能

15CrMoG 和 12Cr1MoVG 经过正火加回火工艺

表 8 15CrMoG 和 12Cr1MoVG 机械性能

材质	项目	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{el} /MPa	断后伸长率 (纵向) A /%	冲击吸收功 KV_2 /J		硬度 HBW
					横向	纵向	
15CrMoG	GB/T 5310—2017	440 ~ 640	≥ 295	≥ 21	≥ 40	≥ 27	125 ~ 170
	实测值	459 ~ 521	345 ~ 407	30 ~ 32	43	29	163 ~ 169
12Cr1MoVG	GB/T 5310—2017	470 ~ 640	≥ 255	≥ 21	≥ 40	≥ 27	135 ~ 195
	实测值	486 ~ 634	369 ~ 519	24 ~ 31	50	35	155 ~ 190



图 4 硼砂原因造成的内直道



图 5 石墨原因造成的内直道

处理后的机械性能符合 GB/T 5310—2017 标准中的要求,具体指标如表 8 所示。

3 缺陷分析及解决措施

3.1 内直道缺陷

超声检查高压合金锅炉管时出现 10% 的内伤缺陷,经过确认后钢管内表面存在“内直道”缺陷,缺陷的形貌如图 4 和图 5 所示。经现场的不断试验,对比分析,图 4 这种线型较细,只在内表面出现一条的是由于硼砂抗氧化效果不好造成;图 5 这种宽度布满钢管内表面,或是直道有起皮的是石墨润滑不好造成的。

针对内直道的这两种类型缺陷,由于石墨原因导致缺陷的解决措施为:

(1) 增加石墨的固体含量,由 60% 提高至 70%。

(2) 增加石墨黏度,在现场温度为 20 ~ 25 °C 的条件下,利用型号 ASTM D 1200 07/287 4 号黏度杯测量石墨黏度,一杯石墨完全流完的时间由 23 ~ 25 s 提高至 28 ~ 30 s。

(3) 增加石墨在芯棒表面的润滑层厚度,由 0.1 ~ 0.2 mm 增加到 0.15 ~ 0.3 mm。

由于硼砂原因导致缺陷的解决措施为:

(1) 调整硼砂抗氧化剂的成分,改进方向是增加还原剂比例,硼砂熔点调整到 600 ~ 700 °C。

(2) 新开发系列对应的穿孔机轧制钢管外径为 157 mm,对应的将硼砂喷嘴直径由 89 mm 调整到 76 mm,喷散效果得到改善。另外与厂家共同设计了带锥体的喷嘴,这种喷嘴可以将硼砂有效的分散开,硼砂更好的分散到毛管内表面。

(3) 根据毛管直径和长度,控制合理喷吹压力,最主要的是在吹硼砂前需要利用高压氮气将毛管内表面的水蒸汽除干净。

3.2 内折缺陷

合金锅炉管因铬和钼元素含量达到1%，所以热轧阶段极易产生“内折缺陷”，小口径锅炉管又不具备修磨条件，需要杜绝该缺陷的产生，否则将会造成废品。开发的12Cr1MoVG内折情况特别严重，内折形貌如图6和图7所示。

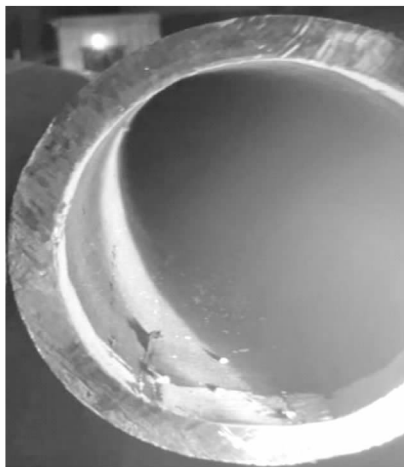


图6 端头内折

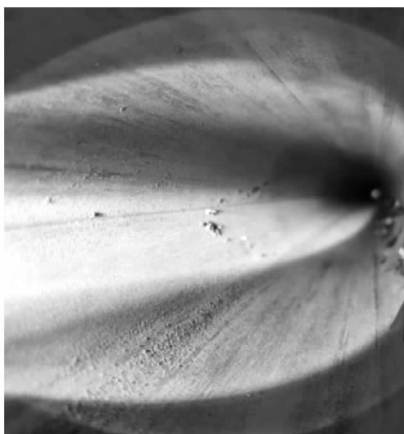


图7 管体内折

针对铬钼钢的内折缺陷行之有效的解决措施为：

- (1) 控制穿孔机轧制的顶头前压下率，对于该材质较合理的压下率范围是4%~6%。
- (2) 穿孔机轧制时选用耐磨的合金顶头，这样就可以避免顶头鼻部磨损严重产生的螺旋状内折。
- (3) 环形炉加热制度选择低温慢速加热方式。

3.3 皮下裂纹

皮下裂纹一般是由于两方面原因造成，一方面

是由于坯料存在气孔和裂纹，在经过轧制后形成皮下裂纹；另一方面是由于在张力减径机前钢管外表面产生划伤，再经过张力减径机轧制造成。本文主要说明轧制造成皮下裂纹及解决措施。轧制造成的皮下裂纹长度较短，一般在10~30mm，另外裂纹深度较浅，在0.1mm以内。这种皮下裂纹修磨前后的对比照片如图8和图9所示。

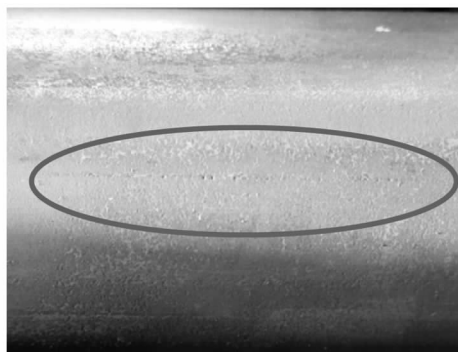


图8 修磨前皮下裂纹

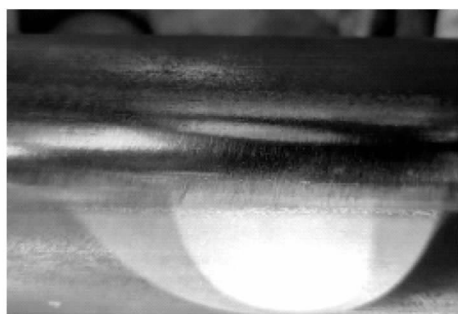


图9 修磨后皮下裂

轧制过程产品的皮下裂纹解决措施：

- (1) 走钢线设备转动顺畅，且辊道没有结疤和粘钢。
- (2) 传输钢管的辊道不能有惰辊，惰辊在启动时容易与钢管产生擦伤。
- (3) 控制穿孔机组的工艺调整，避免过大的压下量，导致金属在导板处折叠，造成皮下裂纹。

3.4 质量指标

通过研究“内折”“内直道”“裂纹”缺陷产生的机理，制定相应的解决措施，锅炉管在超声探伤阶段检查的合格率得到显著提高，表9对比了2022年攻关前和2023年攻关后超声检查钢管合格率、外伤剔除率、内伤剔除率的改善情况。超声探伤检查合格率指标由2022年的86.82%提高到2023年的

91.32%,同时综合成材率也达到了84.78%。

表9 2022年与2023年超声探伤检查锅炉管质量指标对比(质量分数)

项目	2022年													2023年
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	累计	累计
合格率	90.56	87.61	92.23	92.84	92.52	95.65	85.27	95.90	88.22	92.45	89.47	95.9	86.82	91.32
内伤剔除率	1.61	1.92	0.46	0.34	1.58	0	1.10	3.02	6.94	2.78	6.41	3.01	7.73	2.55
外伤剔除率	7.65	9.81	7.31	6.74	2.48	0.93	13.53	0.02	4.48	3.51	3.22	0.03	4.99	4.88
壁厚剔除率	0.18	0.66	0.0	0.08	3.42	3.43	0.10	1.06	0.36	1.26	0.90	1.06	0.46	1.25

4 结论

(1)基于连轧机组大减径率技术,采用孔型顶部延伸系数分配方法,设计开发了连轧机组 $\Phi 120$ mm系列带空减径的孔型系列,该孔型可以实现25%的减径率,实现了用 $\Phi 150$ mm坯料生产外径范围为38~48 mm、壁厚为3.5~8 mm的锅炉管,拓展后的锅炉管产品范围为 $\Phi 38 \sim \Phi 114.3$ mm。新开发系列钢管壁厚精度在-7.14%~9.14%范围内,完全满足锅炉企业的要求。

(2)通过改善钢管硼砂抗氧化工艺解决了钢管“内直道”缺陷,通过优化环形炉加热制度和控制穿孔机头前压下率在4%~6%解决了铬钼合金锅炉管的“内折”缺陷,通过改善钢管传输辊道的状态解决了部分“皮下裂纹”缺陷。超声探伤合格率由86.82%提高到91.32%,综合成材率达到84.78%,达到国内先进水平。

(3)设计了外径为3~114.3 mm、材质为15CrMoG和12Cr1MoVG小口径锅炉管的热处理工艺制度,产品机械性能满足GB/T 5310—2017标准要求。

参 考 文 献

- [1] 汪飞雪. 三辊限动芯棒连轧管(PQF)成形机理及其虚拟仿真系统[D]. 秦皇岛:燕山大学,2013.
- [2] 王增海,林震. $\Phi 100$ mm三辊连轧管机组的工艺与设备[J]. 钢管,2020,49(4):23-24.
- [3] 王栋. Mini-MPM连轧管机194 mm系列孔型

开发[J]. 钢管,2020,49(1):38-39.

- [4] 李群,杨帆,丁德元,等. 从MPM到PQF:限动芯棒连轧管机回顾及展望[J]. 钢管,2007,36(6):19-24.
- [5] 金如崧. PQF、CPS和PAM轧管新工艺浅论[J]. 钢管,2007,36(2):31-34.
- [6] 金如崧. PQF的17年[J]. 钢管,2009,38(1):36-40.
- [7] 岳世斌,刘永利,郭火星. PQF连轧管机组382 mm孔型的设计与开发[J]. 钢管,2009,38(3):46-48.
- [8] 卫晓崧,郭火星,殷雪峰. PQF连轧管机 $\Phi 488$ mm孔型的设计与开发[J]. 钢管,2010,39(2):34-36.
- [9] 高瑞全,周晓锋. PQF连轧管机两种不同换辊方式机型的对比分析[J]. 钢管,2012,41(6):60-62.
- [10] 李晓忠,白屹峰,周晓锋,等. $\Phi 258$ mm PQF连轧管机组连轧辊的优化设计与应用[J]. 钢管,2012,41(1):64-67.
- [11] 吴明宏,李卫河. 包钢 $\Phi 460$ mm三辊连轧管机组的工艺装备特点[J]. 钢管,2013,42(1):34-39.
- [12] 卢立锋,王庆伟. PQF三辊连轧管机辊缝调整[J]. 钢管,2020,49(2):45-48.
- [13] 郭海明,姜长华,李道刚. $\Phi 159$ mm MPM连轧管机的孔型开发与优化[J]. 钢管,2008,37(1):51-56.