



## 石油钻铤用 4145H 热轧圆钢用 $\Phi 600$ mm 圆坯 加热装炉优化

张新文, 轩康乐, 孟祥岩, 施嘉凯, 刘 永

(江苏永钢集团有限公司特钢公司, 苏州 215628)

**摘 要:**以石油钻铤用 4145H 热轧圆钢为研究对象,在加热炉预热段温度较高(870~920 °C)的工况条件下,设计出一种温送温装工艺:入炉前铸坯表面温度控制在 200~400 °C,预热段时间 $\geq 120$  min,升温段温度 950~1 050 °C,保温时间 $\geq 60$  min,高温段 1 220~1 280 °C,保温时间 $\geq 240$  min,总加热时间 $\geq 510$  min。通过工艺试验,采用  $\Phi 600$  mm 连铸圆坯轧制  $\Phi 260$  mm 圆钢,对比热送热装、温送温装、冷送冷装三种入炉方式下热轧圆钢的质量情况,得出温送温装工艺可以获得良好的表面质量和内部质量。

**关键词:**钻铤用 4145H 钢;  $\Phi 600$  mm 圆坯; 热送热装; 温送温装; 冷送冷装

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00222

## Heating Furnace Charging Optimization of Hot Rolled Round Billet 4145H $\Phi 600$ mm for Petroleum Drill Collars

Zhang Xinwen, Xuan Kangle, Meng Xiangyan, Shi Jiakai, Liu Yong

(Special steel company Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd., Suzhou 215628)

**Abstract:** Taking 4145H hot-rolled round steel used for oil drill collars as the research object, under the condition of high temperature (870~920 °C) in the preheating section of the heating furnace, a warm delivery and charging process is designed: the surface temperature of the casting billet is controlled at 200~400 °C before being put into the furnace, the preheating section time is  $\geq 120$  min, the temperature of the heating section is 950~1 050 °C, the holding time is  $\geq 60$  min, the high temperature section is 1 220~1 280 °C, the holding time is  $\geq 240$  min, and the total heating time is  $\geq 510$  min. Through process test,  $\Phi 260$  mm specification round steel bar is rolled by using  $\Phi 600$  mm specification continuous casting round billet. By comparing the quality of hot rolled round steel under three furnace charging modes of hot delivery and hot charging, warm delivery and warm charging, and cold delivery and cold charging, it is concluded that the warm delivery and warm charging process can obtain good surface quality and internal quality.

**Key Words:** 4145H Steel for Oil Drill Collar;  $\Phi 600$  mm Round Billet; Hot Delivery and Hot Charging; Warm Delivery and Warm charging; Cold Delivery and Cold Charging

4145H 钢作为通过美国钢铁协会 AISI 标准认证的国际通用石油钻铤用钢,在国内石油天然气行业得到广泛应用。该材料是一种高强度、高硬度、抗扭转、抗弯曲、抗耐磨的特殊合金结构钢,能承受钻井作业的高速旋转、与岩石的剧烈摩擦、大扭矩(井深 3 000 m 以上)以及启动、停止时冲击力等各种交变应力的作用<sup>[1]</sup>。井下恶劣的环境,对钢致密度、纯净度、残余元素等提出了严苛的要求。该钢的成分与 GB/T 3077-2015 中 42CrMo 钢成分接近,但 Mn 含量提高至 1.0%,使其在较高的强度水平上仍然具有较好的韧性<sup>[2]</sup>。目前国内普遍采用连铸工艺生产钢坯<sup>[3-5]</sup>,但连铸钢坯需经过轧制才能成为钻铤用钢的母材,由于其硬度、强度较高,连铸坯在装炉环节中

往往产生表面裂纹、内部缺陷等质量问题,造成批量报废。本文就 4145H 连铸坯热、温送及冷送进行了相关试验研究,取得了较好的效果。

### 1 常见装炉方式及其优缺点

连铸热送热装不仅可以实现较好经济效益,而且可以提高生产效率<sup>[6-7]</sup>。目前常见的有 5 种装炉方式,见表 1。第 I、II 种装炉方式适用于高速连铸,并需要配备专门的温度补偿设备。第 III 种装炉方式,铸坯处于( $\gamma+\alpha$ )两相区,铸坯组织中部分经过  $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$  相变,导致既有原始粗大的奥氏体晶粒,又有经相变的细化奥氏体晶粒,这样经过加热后的铸坯存在混晶组织<sup>[8]</sup>。对于第 IV 种方式,由于 400 °C 至  $A_1$  区域温度难以控制,稍有不慎就会出现表面裂

纹<sup>[9]</sup>。当温度小于400℃时,一般不再称为热装。对于第V种方式,由于铸坯冷态入炉,对于合金元素高、导热系数小、断面尺寸大的产品,入炉后产生较大热应力可能导致内部开裂。

## 2 试验条件

### 2.1 工装条件

配置蓄热式步进梁式加热炉一座,炉膛宽13 m,有效炉长36.2 m。加热炉加热区域分为4段,分别为预热段,加I段,加II段和均热段,由于预热段和加I段无隔温挡墙,导致预热段温度在870℃以上。生产裂纹敏感性较强的钢种及合金含量高的钢种时,容易产生表面裂纹或内部缺陷<sup>[10-11]</sup>。另外,配备了1320 mm可逆式开坯机和9架横立式轧机,可轧制Φ75~360 mm圆钢。

### 2.2 工艺条件

4145H钢的生产工艺为“100 t电弧炉→100 t LF精炼→100 t VD真空→R17 m圆坯连铸→加热→轧制→退火→矫直→滚磨→精整→入库”,成分见表2。

用4145H钢Φ600 mm连铸圆坯经过轧钢加热炉加热后开坯成305 mm×315 mm中间坯,再经过4

架横立式轧机轧成Φ260 mm圆钢,铸坯装炉方式采用热装、温装及冷装三种方式进行试验,试验炉数及加热工艺见表3。

## 3 试验过程控制及结果

### 3.1 热送热装试验

连铸坯由连铸机出坯后直接入轧钢加热炉,热送热装温度及加热时间见表4,入炉时铸坯表面温度为500~650℃,加热炉预热段温度为870~920℃。圆钢经GB/T 6402-2008中4级标准UT探伤全部合格,但是,经滚磨后发现表面有裂纹,如图1所示。

从图1(a、b)可见主裂纹最长达到76 mm,两边存在严重脱碳,且存在较多高温氧化质点,根部充满了氧化铁,未发现夹杂物,裂纹附近组织粗大;由图1(c、d)可见主裂纹附近还有很多小裂纹,呈锯齿状,裂纹两边存在严重脱碳,放大倍数后,发现裂纹开口小而内部大,裂纹附近晶粒大小不均,存在混晶现象。

### 3.2 冷送冷装试验

为避免热送热装过程产生表面裂纹,试验了2

表1 常见连铸坯装炉方式

Table 1 Common charging methods of continuous casting slab

类型	名称	工艺特征
I	CC-DR	连铸坯在1100℃条件下不经加热炉,在输送过程中通过边角补热装置直接送轧机轧制。
II	CC-HDR	连铸坯温度在1100℃以下, A <sub>3</sub> 以上,不经加热炉,在输送过程中补热和均热,使钢坯达到可轧制温度,直接送轧机轧制。
III	CC-DHCR	连铸坯温度在A <sub>3</sub> 以下, A <sub>1</sub> 以上,直接送加热炉内加热后轧制,加热炉在连铸机和轧机间起缓冲作用。
IV	CC-HCR	铸坯在A <sub>1</sub> 以下400℃以上,铸坯不放冷即送保温设备中保温,然后再送加热炉加热后轧制。
V	CC-CCR	连铸坯冷却至室温后,装加热炉加热后轧制。

表2 4145H钢主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of 4145H steel

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
标准	0.42~0.48	0.15~0.30	0.85~1.15	≤0.015	≤0.010	0.95~1.20	0.25~0.35	0.020~0.050
目标	0.45	0.25	1.00	0.010	0.003	1.15	0.30	0.030

表3 4145H钢试验炉数及加热工艺

Table 3 Number of test heats and heating process of 4145H steel

装炉方式	试验炉数/炉	加热工艺	预热段/℃	一加段/℃	二加段/℃	均热段/℃	总加热时间/min
热装	5	温度/℃	≤920	950~1 050	1 220~1 280	1 220~1 280	≥480
		时间/min	≥60	≥60	≥240		
温装	5	温度/℃	≤920	950~1 050	1 220~1 280	1 220~1 280	≥510
		时间/min	≥90	≥60	≥240		
冷装	2	温度/℃	≤920	950~1 050	1 220~1 280		≥540
		时间/min	≥120	≥60	≥240		

表 4 4145H 钢不同装炉方式的入炉温度及加热时间

Table 4 Furnace temperature and heating time of 4145H steel in different charging modes

装炉方式及炉编号	入炉时铸坯表面温度/°C	入炉时炉温温度/°C	预热段时间/min	一加段时间/min	二加段时间/min	均热段时间/min	总加热时间/min
热装 1	611	901	89	87	206	132	514
热装 2	623	919	78	88	214	130	510
热装 3	645	905	74	82	201	129	486
热装 4	625	901	76	77	198	132	483
热装 5	631	893	65	74	212	141	492
冷装 1	25	913	125	76	189	152	542
冷装 2	25	895	127	78	197	142	544
温装 1	312	877	92	65	201	152	510
温装 2	330	905	95	71	211	142	519
温装 3	351	903	93	73	209	138	513
温装 4	230	912	91	75	207	141	514
温装 5	285	907	99	76	203	133	511

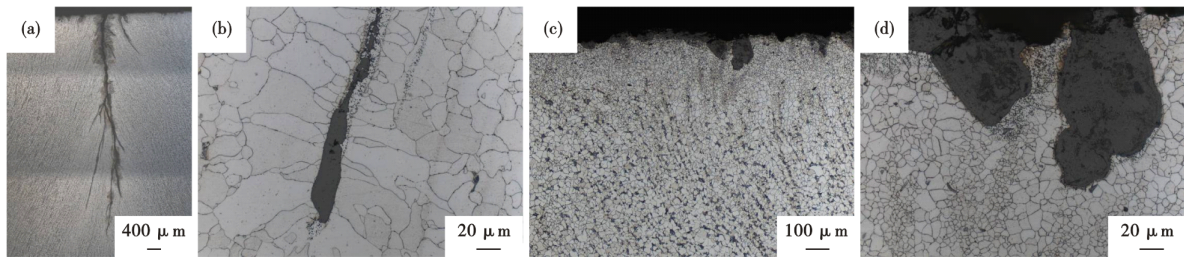


图 1 热送热装表面裂纹形貌

Fig. 1 Surface crack morphology of hot delivery and hot charging

炉连铸圆坯冷却至常温后入炉,入炉时铸坯表面温度为 20~30 °C,加热炉的温度为 870~920 °C,入炉铸坯表面温度及加热时间见表 4。

经轧制后黑皮圆钢表面质量较好,滚磨后未发现表面裂纹,但经 GB/T 6402-2008 中 4 级标准 UT 探伤时发现头尾料圆钢探伤不合格。解剖不合格圆钢,发现中心存在约 15 mm×20 mm 孔洞,如图 2(a),室温下用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀样品 5 s,样品缺陷边缘无异常组织,如图 2(b、c)所示。

将缺陷从中间切开,在电子显微镜下观察,样品缺陷内壁表面为光滑的自由面,无夹杂物,如图 3 所示。分析产生原因为由于加热速度较快,铸坯受到热应力产生裂纹,再经过多道次往返开坯及立、卧式连轧机组轧制后,裂纹中心扩大成孔洞,边缘出现尖角,宏观表现为大孔洞。

### 3.3 温送温装试验

为避免内外部质量问题,采用温送温装工艺,入炉铸坯表面温度及加热时间见表 4。入炉前铸坯

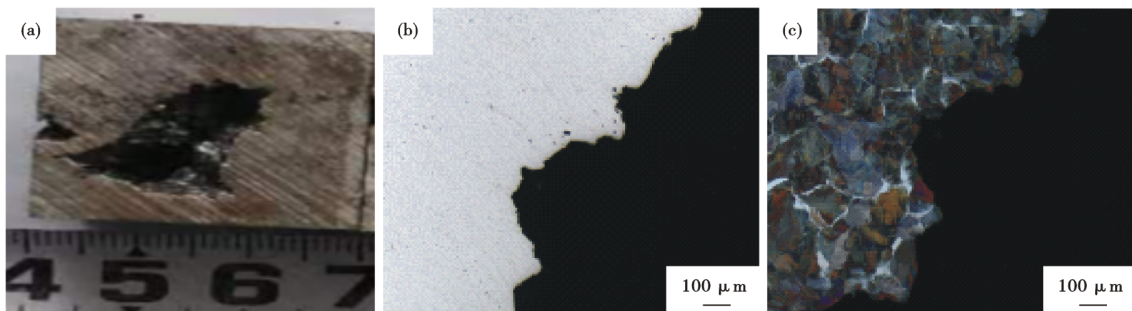


图 2 样品缺陷金相形貌:(a)原始孔洞图,(b)缺陷高倍未腐蚀图,(c)缺陷高倍腐蚀图

Fig. 2 Metallographic morphology of Sample Defects: (a) Original hole map, (b) defect high-power uncorroded map, (c) defect high-power corroded map

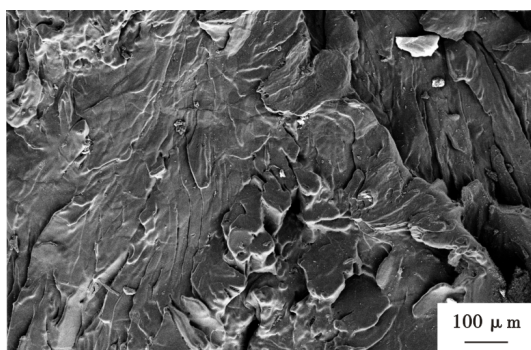


图3 样品缺陷断口形貌

Fig. 3 Fracture morphology of sample defect

表面温度为200~400℃,入炉时炉温为870~920℃。圆钢经滚磨未发现表面裂纹,并经GB/T 6402-2008中4级标准UT探伤全部合格。

#### 4 讨论与分析

圆钢表面裂纹与铸坯表面质量有很大关系,当铸坯表面存在裂纹时,经过轧制后遗留至圆钢表面<sup>[12-14]</sup>。但是,本次试验热送前对铸坯进行机械去除表面氧化铁皮后抽样检查,表面未发现裂纹,同时圆钢表面裂纹中未发现冶金夹杂物,故可以排除坯料遗传裂纹的可能。另外,在裂纹附近发现粗大晶粒及混晶组织,说明进加热炉后,铸坯组织中局部区域经过 $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ 相变,各相体积不同导致局部收缩从而产生表面裂纹。

铸坯冷送时,由于表层和中心温度差过大引起的巨大热应力,加上组织应力和铸造应力,往往会使钢锭中部产生“穿孔”开裂的缺陷<sup>[15]</sup>。4145H钢属

于中碳合金钢,材料塑性差,当冷送冷装时,铸坯表面受热快,受到压应力,而内部受热慢,受到拉应力。当热应力超过铸坯所能承受的抗拉强度时,内部产生裂纹。在连铸坯端部,除了受到径向热辐射,还受到端部热辐射,是热影响区的“重灾区”。在本次试验中,发现探伤不合格处集中在头尾料的中心部位。

针对加热炉预热段温度较高的情况,设计了温送装炉的工艺,即连铸坯在缓冷坑中缓冷至200~400℃后装炉。此时 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变已经结束,且内外部温度均匀,在此温度下装炉,既能确保一定的塑性,也使炉温与坯温之间温差缩小,降低由于内外部温差过大引起的热应力开裂风险。另外,可以提高装炉的自由度和运转效率,同时又节省了能耗。

#### 5 结论

针对加热炉预热段温度较高的情况,通过对比三种不同装炉方式加热轧制的4145H产品质量,得出结论:

(1)热送热装时,入炉前表面温度为500~650℃,表面奥氏体化不均匀,因体积收缩会产生表面裂纹;

(2)冷送冷装时,铸坯内外部温差较大,尤其是铸坯端部,受到径向和端面两重热辐射,靠近端面部位为应力集中点,在后续轧制过程中产生变形而成为大孔洞;

(3)温送温装时,将铸坯在保温坑放置到表面温度200~400℃时再装炉加热轧制,可以获得内外部质量良好的圆钢。

#### 参考文献

- [1] 欧阳峥容. 深井高强度石油钻铤用 AISI4145H 钢的开发生产[J]. 山东冶金, 2017, 39(5): 29-31.
- [2] 杨永峰, 王利, 冯伟骏, 等. 锰含量和淬火温度对 Q&P 钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011(18): 148-152.
- [3] 刘伟, 温秉文. 4145H 钢的电炉连铸工艺生产[J]. 辽宁科技大学学报, 2011, 34(5): 458-462.
- [4] 姚忠. 石油钻具用钢 4145H 连铸圆坯的生产技术研究[J]. 河北冶金, 2015(10): 143.
- [5] 王飞, 赵千水. 转炉连铸生产石油钻铤用 AISI4145H 钢工艺实践[C]//第七届中国钢铁年会论文集, 2009(4): 3457-359.
- [6] 孙永乐, 刘德义, 张吉伟, 等. 连铸坯热送热装生产工艺的实践[J]. 中国冶金, 2006, 16(2): 16-19.
- [7] 温治, 高仲龙, 董补全, 等. 连铸坯热送热装和直接轧制工艺的研究与开发[J]. 冶金能源, 1996, 15(1): 22-26.
- [8] 余志祥. 连铸坯热送热装技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [9] 刘宁, 徐刚军, 董常福, 等. 热送热装过程中 12Cr1MoV 钢相变与组织转变研究[J]. 连铸科技与管理, 2021, (4): 1-4.
- [10] 张新文, 江宏亮, 轩康乐, 等. 热轧圆钢 Q345E 表面裂纹的研究与控制[J]. 中国冶金, 2021, 31(4): 44-47.
- [11] 曹磊, 王国连. 250 mm 连铸红送工艺生产 Nb-V-Ti 微合金钢包表面裂纹分析[J]. 特殊钢, 2018, 39(4): 55-56.
- [12] 张洪才, 林鹏, 许正周, 等. 钢球用钢 Φ380 mm 连铸圆坯表面裂纹原因分析及工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 41(1): 39-41.
- [13] 刘旭隆. 12Cr1MoV 钢轧材表面裂纹控制技术的研究与应用[J]. 特殊钢, 2019, 40(1): 23-24.
- [14] 吕安明, 李猛, 刁峰, 等. 25MnCrNiMoA 钢 Φ120 mm 轧材表面裂纹及分析与工艺改进[J]. 特殊钢, 2018, 39(2): 38-41.
- [15] 包喜荣, 陈林, 定巍, 等. 轧钢工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.