

文章编号:1000-582X(2008)12-1360-05

## 35CrMo 钢超厚壁无缝钢管的轧制

李远睿, 辉志强, 张 瑛, 郑世建

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030)

**摘 要:**用 35CrMo 钢的 305 mm×305 mm 精锻方坯经热定型成圆柱管坯并冲中心孔后,在  $\Phi 216$  mm 皮尔格周期轧管机组上热轧成  $\Phi 215$  mm×72.5 mm(径壁比为 2.97)超厚壁无缝管的工艺过程。在初步确定其热轧工艺流程和工艺参数后,用同尺寸规格的 20 钢坯料 2 批(每批 12 件)进行了 2 批次试验轧制,并分别测定及分析其壁厚偏心量和产生的原因后,注意管坯加热温度的均匀性、冲中心孔的质量、调整了设备、适当修正轧辊孔型和送入量等,最终轧制出符合该种尺寸规格要求的 35CrMo 钢超厚壁无缝钢管。最后,对轧出的此种超厚壁无缝钢管进行几何尺寸、横截面上不同半径处的金相组织、力学性能等检测与分析后,确认其质量达到了技术要求。

**关键词:**径壁比;无缝钢管;热轧

**中图分类号:**TG335.1

**文献标志码:**A

## Hot rolling 35CrMo ultra-thick wall seamless tubes

LI Yuan-rui, HUI Zhi-qiang, ZHANG Ying, ZHENG Shi-jian

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** 35CrMo ultra-thick wall seamless tubes were prepared after being hot rolled from a forged 305 mm×305 mm square blank using a  $\Phi 216$  mm Pilger periodic mill. Tubes with 215 mm outer diameter, thickness of approximately 72.5 mm, and a 2.97 diameter-wall ratio were obtained. Two sets of tubes were prepared after analyzing the reasons for high eccentricity and rolling parameters. The uniformity of rolling temperature, piercing quality and roll pass were considered during the procedure. The geometry size, microstructure and mechanical properties were measured. It is found that the tubes meet the technical requirements.

**Key words:** diameter-wall ratio;seamless steel pipe;hot rolling

高速列车是各工业国表征自己铁路科技水平发展程度的重要标志,国内铁路经过 6 次大提速后,主干线列车时速已达到 200 km 以上。因而,列车上许多材料,特别是车轴材料需要改进和提高。国内外普通列车车轴广泛使用的淬透性差的中碳钢在高速列车上已不适用<sup>[1]</sup>。为解决此问题,考虑轴重、失效原因、应力分布特点和运行中的应力状态,所要求的综合力学性能及热处理工艺等诸多因素后,据国外

车轴材料及其热处理的发展现状,提出用 35CrMo 钢热轧成超厚壁无缝管作为高速列车车轴材料<sup>[2-3]</sup>。

文中介绍了用 305 mm×305 mm 的 35CrMo 钢精锻方坯经热定型成圆柱形管坯后在  $\Phi 216$  mm 皮尔格周期轧管机组上热轧成  $\Phi 215$  mm×72.5 mm 超厚壁无缝管的试验过程。先用同尺寸规格的 20 钢管坯进行了 2 批次(每批次各 12 件)试轧。检测发现,第 1 批次试轧管的壁厚偏心较大。注意加热

收稿日期:2008-07-19

基金项目:攀成钢铁公司与重庆大学工程硕士培养合作项目

作者简介:李远睿(1946-),男,重庆大学教授,主要从事金属材料热处理、金属材料加工及表面工程研究方向,

(Tel)65103625;(E-mail)65103625@163.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

温度的均匀性、冲中心孔的质量、调整了设备及工艺参数、适当修正轧辊孔型和送风量,最终轧制出符合该种尺寸规格要求的35CrMo钢超厚壁无缝钢管。

对轧出的 $\Phi 215\text{ mm}\times 72.5\text{ mm}$ 超厚壁管进行几何尺寸、横截面上不同半径处的金相组织、力学性能等分析和测定后,确认热轧出的35CrMo超厚壁无缝钢管符合技术要求。

## 1 试验材料

### 1.1 化学成分

材料为35CrMo钢<sup>[4]</sup>,除基本化学成分应符合GB/T3077-1999《合金结构钢》标准规定外,为尽量减少疲劳裂纹源<sup>[5-6]</sup>和避免氢损伤<sup>[7]</sup>,对钢中的氢、氧含量要求很严,即氢含量 $\leq 20\times 10^{-6}$ ,氧含量 $\leq 30\times 10^{-6}$ 。此外,还对钢中的S、P作了严格的规定。表1为35CrMo钢钢锭化学成分与标准对照。

### 1.2 精锻开坯

将合格的钢锭加热到 $1\ 175\sim 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ 后出炉于 $1\ 150\sim 1\ 175\text{ }^\circ\text{C}$ 始锻,而终锻温度 $\geq 850\text{ }^\circ\text{C}$ 。用

800T精锻机开成 $305\text{ mm}\times 305\text{ mm}$ 的管坯,锻造比应达到8:1以上,以破坏铸锭中的柱状晶层。

## 2 试轧工艺

### 2.1 技术要求

除钢的化学成分外,对35CrMo热轧超厚壁无缝钢管的主要技术要求为:管子截面尺寸 $\Phi 215\text{ mm}\times 72.5\text{ mm}$ ,定尺长度 $2\ 500\text{ mm}$ ;偏心 $\leq 3\text{ mm}$ ,内径 $\Phi 70\pm 5\text{ mm}$ ;管壁厚误差 $S$ 为 $\pm 10\%$ ;长度误差 $L$ 为 $0\sim +20\text{ mm}$ ;定尺钢管全长弯曲度 $\leq 3\text{ mm}$ ;晶粒度级别 $\geq 5$ 级。

### 2.2 工艺流程

初步确定的热轧工艺流程是:尺寸为 $305\text{ mm}\times 305\text{ mm}$ 的35CrMo钢方形管坯 $\rightarrow$ 环形炉加热至 $1\ 200\sim 1\ 260\text{ }^\circ\text{C}$  $\rightarrow$ 定形成圆柱坯并冲中心孔 $\rightarrow$ 延伸(去除冲孔杯底) $\rightarrow$ 皮尔格轧机轧管 $\rightarrow$ 氧割皮尔格头 $\rightarrow 830\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 室式炉退火 $\rightarrow 1000\text{ T}$ 油压机压力校直 $\rightarrow$ 去头定尺 $\rightarrow$ 检验入库。

表1 35CrMo钢钢锭成分与GB/T3077-1999标准对照

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	O	H
GB/T3077-1999	0.34~0.40	0.17~0.37	0.40~0.60	$\leq 0.020$	$\leq 0.020$	0.90~1.10	0.15~0.25	$\leq 20$	$\leq 30$
钢锭成分	0.37	0.32	0.51	0.017	0.009	0.95	0.17	13	21

### 2.3 加热

据35CrMo钢的相关物理常数<sup>[8]</sup>,在微机控制的环形炉内将管坯加热到 $1\ 200\sim 1\ 260\text{ }^\circ\text{C}$ ,加热时间 $150\sim 180\text{ min}$ 。为使其有优良的高温塑性变形能力,应保证加热温度均匀,管坯沿断面和长度温差 $\leq 10\text{ }^\circ\text{C}$ ,严防过热过烧,且炉内的均热段应保持弱还原性火焰<sup>[9]</sup>。

### 2.4 冲孔

在卧式水压机上,用 $140\text{ mm}$ 的冲头,把加热好并经过定型的坯料装入模孔为圆形的冲孔模内,由冲头压入坯料中,以反挤压方式将实心坯冲挤成空心带杯底的环状坯,应尽量使冲出的中心孔在坯料的中心并保证斜度误差 $\leq 2\text{ mm}$ 。冲孔结束后,用推杆将杯状坯从模内推出。

### 2.5 热轧试验

由于该管的直径( $D$ )与管壁厚度( $S$ )之比达2.97,系超厚壁管。即使在皮尔格周期轧机上逐段轧制,轧机负荷也很大。在攀成钢只能用 $\Phi 216\text{ mm}$ 皮尔格周期轧机机组进行轧制。设计孔型为 $220\text{ mm}$ ,芯棒直径为 $64\text{ mm}$ ,以保证需方有适当的

加工余量。该轧管机组是带有送料机构的二辊式不可逆轧机,在轧管机的上下轧辊上,对称地刻有变截面的轧槽(即可变孔型),轧辊孔型由空轧区和辊轧区组成。空轧区属于非工作带,而辊轧区是轧管时的工作带,它由锻轧段、精轧段和出口区3段组成。轧制时上下轧辊同步运行,选用的芯棒直径为 $64\text{ mm}$ 。轧辊每转1圈,毛管进入轧机的一段被碾轧,该段长度称为轧制送进量,其大小取决于设备能力、钢管尺寸、钢种、轧辊直径和孔型等因素,通常不超出 $30\text{ mm}$ 。由于轧辊的连续转动和毛管的逐段送进,使坯料渐渐地被轧成长钢管。周期轧制时,除加工于轧辊上的孔型周期性变化外,轧辊的施转方向与毛管的送进方向相反<sup>[10-11]</sup>。

为确认所设计的孔型和所制定的轧制工艺的合理性,先用12件同尺寸规格20钢坯料进行了试轧,20钢坯料加热温度同前述,但加热时间取下限,即 $150\text{ min}$ 。轧后空冷并校直,以观察并分析轧制效果,修正孔型,调整相应工艺参数。

轧时先吹去荒管内孔中的氧化皮,并加入石墨和 $\text{MoS}_2$ 混合润滑剂,插入芯棒,进入轧机轧制。始

轧温度约为  $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ , 终轧温度为  $\geq 890\ ^\circ\text{C}$ , 一次加热轧成。

## 2.6 分析与检测

将轧出的长  $2\ 500\ \text{mm}$  的 20 钢超厚壁管等分切断成 4 节, 从管子轧制的前端到末端为序, 测得其内孔直径数据如表 2 所列。

内孔表面光滑、平直、直径偏小, 但随轧制的进行, 其直径微有增加。

表 2 第一次试轧管的内孔直径数据表 mm

序号	×1	×2	×3	×4	极差	均值
内径	63.0	63.6	63.9	64.5	1.5	63.75

再将测内径时等分切成的 4 段每段再等分成 4 节, 同样按轧制的先后为序, 从前端测至尾端, 测得管壁厚数据如表 3 所示。

表 3 第一次试轧管壁厚数据表

序号	mm								极差	均值
	×1	×2	×3	×4	×5	×6	×7	×8		
前段	77.4	77.5	76.7	77.1	76.9	77.4	78.8	79.5	2.8	77.5~77.66
后段	74.7	75.5	77.2	76.6	79.4	79.6	80.6	77.4	5.9	77.4~77.63

显然, 管壁厚偏差较大。但总的趋势是随着周期轧机轧制长度的增加, 壁厚偏差量增大。尺寸误差较大的主要原因是周期轧制时间较长, 轧制前段和后段有一定的温差, 变形抗力逐渐增大, 轧机负载提高, 机架弹跳加大, 轧辊及辊瓦磨损快等原因造成<sup>[12]</sup>。故除了应当尽量使加热温度控制准确, 坯料受热均匀, 使其有相同的塑性变形能力等外, 还应使孔型上的开口角尽可能小, 适当延长精轧段, 重轧系数尽可能取大一些。第二次试轧时, 重轧系数由本

来就较大的 2.6 取到 2.9, 此外, 送料时由始轧段的  $30\ \text{mm}$  逐渐缩短, 最后一段仅约  $15\ \text{mm}$ <sup>[13]</sup>。采取上述措施后, 再用 12 件 20 钢管坯进行了试验。对第二批试轧出的超厚壁无缝钢管按前述方法再次进行了几何尺寸测定, 结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 第二次试轧管的内孔直径 mm

序号	×1	×2	×3	×4	极差	均值
内径	63.0	63.3	63.5	63.8	0.8	63.4

表 5 第二次试轧管壁厚数据

序号	mm								极差	均值
	×1	×2	×3	×4	×5	×6	×7	×8		
前段	74.4	74.6	75.0	75.6	76.3	76.6	77.0	77.4	3.0	75.86
后段	75.5	75.7	76.8	77.4	77.8	78.0	78.3	78.8	3.3	77.26~77.29

将表 4 和表 5 与表 2 和表 3 对照知, 孔型调整后, 不仅内径的精度得到了很好的保证, 而且壁厚均匀性也得到了显著改善。

## 3 实际轧制

### 3.1 工艺要点

介于 35CrMo 钢虽为中碳低合金钢, 但其含碳量较 20 钢高, 且有合金元素 Cr 和 Mo, 轧制时变形抗力会更大, 除调整好设备和孔型外, 应切实做到管坯的均匀加热, 并将加热温度和时间均取上限, 即加热温度  $1\ 250\sim 1\ 260\ ^\circ\text{C}$ , 加热时间增至  $180\ \text{min}$ , 保证坯料冲出的中心孔与圆柱形坯料中心偏差在  $1\ \text{mm}$  内, 且倾斜度小于  $2\ \text{mm}$ 。轧制时喂入量在  $30\sim 15\ \text{mm}$  范围内逐段减少并保证终轧温度  $\geq 900\ ^\circ\text{C}$ <sup>[14]</sup>。采取上述措施后, 正式用 35CrMo 钢坯料轧制出 24 支超厚壁无缝钢管。

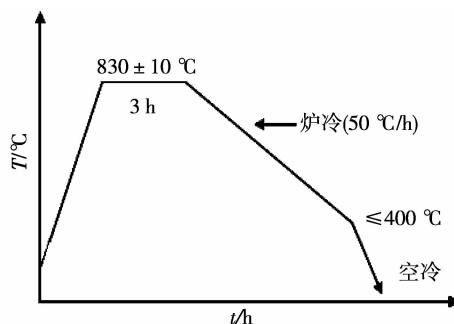


图 1 热轧 35CrMo 钢超厚壁无缝钢管的退火工艺曲线

### 3.2 轧后处理

35CrMo 钢超厚壁无缝管出皮尔格轧机后, 在冷床上空冷氧割去除皮尔格头, 再据图 1 所示的热处理工艺曲线进行相变重结晶退火, 以细化组织和消除应力。热处理后需用 1000T 油压机进行校直, 检验合格后包装入库。

## 4 质量分析

### 4.1 几何尺寸

钢管外径均偏大,在  $\Phi 216 \text{ mm} \sim \Phi 218 \text{ mm}$  范围;内径则均略偏小,且每支钢管都抱紧了芯棒;管子

内壁因有芯棒限制,其表面光滑、平直,尺寸偏小,极差  $\leq 1.5 \text{ mm}$ ,氧化层厚度  $< 1.0 \text{ mm}$ ;定尺钢管(2 500 mm)的最大弯曲度小于 2.5 mm,最大壁厚偏差值如表 6 所列。

表 6 钢管的壁厚偏差数据

序号									mm	
	×1	×2	×3	×4	×5	×6	×7	×8	极差	平均
前段	74.9	75.5	76.7	76.7	77.4	77.6	77.8	78.3	3.4	76.9~76.86
后段	74.6	74.8	76.6	77.3	77.5	78.0	78.4	78.6	4.0	77.2~76.98

### 4.2 金相分析

考虑到轧制过程中钢管外圆、内孔壁及不同半径等处因变形程度和冷却速度不同,其动态回复再结晶情况不一样,可能产生的组织差异,金相试样取自管壁厚的不同半径处,即偏外壁、壁厚中部(略偏

内)和偏内壁 3 处。制样后拍得此 3 处的金相照片如图 2 所示。经  $830 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  相变重结晶退火处理后,组织均为铁素体+珠光体。由细小而较为均匀的铁素体网,参照 GB/T6394-2002《金属平均晶粒度测定方法》评定,其晶粒度大于 5 级,满足技术要求。

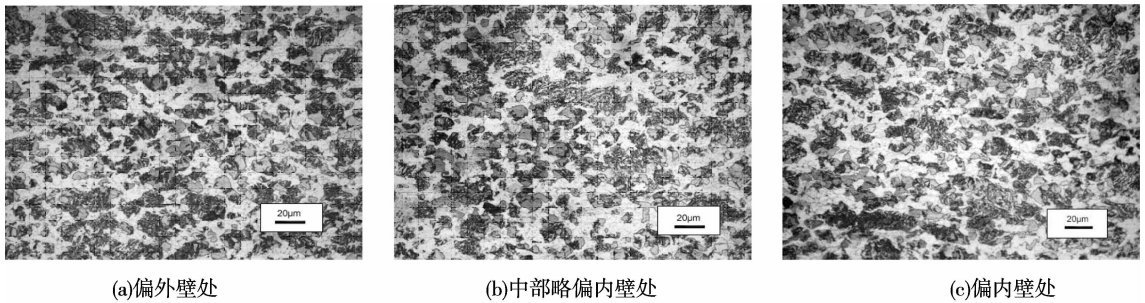


图 2 热轧退火 35CrMo 超厚壁无缝钢管金相组织

### 4.3 力学性能

#### 4.3.1 拉伸试验

从管壁厚的不同半径处沿长度方向取样,按 GB6394-86《金属拉伸试验试样》的规定,加工成  $\delta_5$  拉伸试样。据 GB228-87《金属拉伸试验方法》进行拉伸试验,结果如表 7 所列。

表 7 热轧钢 35CrMo 超厚无缝壁管材料的拉伸试验结果

编号	$\sigma_b / \text{MPa}$	$\sigma_s / \text{MPa}$	$\delta_5 / \%$	$\psi / \%$	HB
1	864	753	14.10	57.50	214
2	846	753	14.20	58.24	210
3	850	751	14.92	58.45	206
平均值	850	752	14.41	58.04	209

显然,表 7 中的数据符合 GB/T3077-1999《合金结构钢》的标准规定,且材料的断面收缩率  $\psi$  明显较其延伸率  $\delta_5$  大,表明材料的塑韧性很好<sup>[15-16]</sup>,且数据分散度小,这说明热轧退火管材在不同壁厚处

组织均匀,与金相分析结果相吻合。

#### 4.3.2 冲击试验

沿轧向取样,按 GB2975-98《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》加工成夏比 U 形缺口冲击试样,按 GB/T299-1994《金属夏比缺口冲击试验方法》在冲击试验机上,分别于室温为  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  5 个温度点作冲击试验,将结果列于表 8 内。

表 8 热轧退火 35CrMo 钢超厚壁无缝管材料在不同温度下的冲击试验结果

温度/ $^\circ\text{C}$	22	0	-20	-40	-60
$A_{kv} / \text{J}$	95.8	91.0	86.7	71.5	49.0
$\alpha_{kv} / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	119.8	113.8	108.4	89.4	61.3

表 8 内的数据表明,材料的冲击韧度高,即使是在  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  下,其值也在  $60 \text{ J/cm}^2$  以上,温度安全储备较大。

## 5 结 论

1) 用皮尔格轧机可以生产出质量符合技术要求的  $\Phi 215 \text{ mm} \times 72.5 \text{ mm}$  的 35CrMo 超厚壁无缝钢管。

2) 在轧辊孔型设计合理的情况下, 热轧 35CrMo 超厚壁无缝钢管壁厚尺寸偏差较大的主要原因是: 皮尔格轧机分段送料, 前后段因有一定温差, 变形抗力不同, 加上周期轧制时负荷大, 使机架跳动较剧烈所致。

### 参考文献:

- [1] 谈大同. 中国铁路车辆轮轴的现状与展望[J]. 铁道车辆, 1998(12):15-19.  
TAN DA-TONG. Prospect and present situation of railway vehicle axle[J]. Journal of Rolling Stock, 1998(12):15-19
- [2] 韩建生. 铁道车辆用 50 钢火车轴的热处理[J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(10):265-266.  
HAN JIAN-SHENG. Heat treatment of 50 steel on railway vehicle axle [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2005, 15(10):265-266.
- [3] KANOSHIMA, EMIKO. Development of the Tokaido Shinkansen railway-axles in 1950s-1960s and risk management[J]. Nippon Kinzoku Gakkaishi/Journal of the Japan Institute of Metals, 2002, 66(12):1236-1245.
- [4] KUWAJIMA T, SAITO Y, SUWA Y. Kinetics of phase separation in iron-based ternary alloys. II. Numerical simulation of phase separation in Fe-Cr-X(X = Mo, Cu) ternary alloys[J]. Intermetallics, 2003, 11:1279-1285.
- [5] HIRAKAWA K, KUBOTA M. On the fatigue design method for high-speed railway axles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(2):73-82.
- [6] HILLMANSEN S, SMITH R A. The management of fatigue crack growth in railway axles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(4):327-336.

- [7] 牟小维. 氢损伤缺陷分析[J]. 天津冶金, 2007(1):21-22.  
MOU XIAO-WEI. Analysis of hydrogen loss defect [J]. Journal of Tianjin Metallurgy, 2007(1):21-22.
- [8] KARL-ERIK THELNING. Steel and its heat treatment [M]. Condon: Printed in Great Britain by Mackays of chathems Ltd, 1984:121-123.
- [9] 王廷溥. 金属塑性加工学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001.
- [10] 成海涛. 周期轧管工艺技术的改进与创新[J]. 钢管, 2005, 34(2):136-142.  
CHENG HAI-TAO. Innovation and improvement at periodic rolling tube[J]. Journal of Steel Pipe, 2005, 34(2):136-142.
- [11] LI SZ, XU J, YIN YD, et al. Mechanism of internal surface crack formation of seamless modified 9Cr-1Mo steel tube rolled by mandrel mill and its application[J]. Journal of Iron Steel Research International Int, 2007, 14:273-276.
- [12] 胡克迈. 无缝钢管的热轧制变形特点与机械热处理工艺[C]. 宜昌:全国轧钢生产技术会议, 2006.
- [13] 郭兆成, 李小龙. 厚壁无缝管轧制工艺研究[J]. 包钢科技, 2006(S1):63-66.  
GUO ZHAO-CHEN, LI XIAO-LONG. Study on rolling process of the thick wall seamless tube [J]. Science & Technology of Baotou Steel (Group) Corporation, 2006, S1:63-66.
- [14] 双远华. 现代无缝钢管生产技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
- [15] KVACKAJ T. Recrystallization and mechanical properties of hot rolled seamless steel tubes [C] // Materials Science Forum, v Recrystallization and Grain Growth III-Proceedings of the Third International Conference on Recrystallization and Grain Growth. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2007:1107-1113.
- [16] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.

(编辑 陈移峰)