

煤粉挥发分对高炉燃料比的影响及混合煤粉的燃烧行为

(日) 国友和也 折本 隆等

摘要 对高炉 1400℃ 以上区域的煤粉有效热值进行了研究,结果表明,在高炉下部热平衡为控制因素的操作中,平均挥发分低的煤粉对降低燃料比是有效的。然而,挥发分相对较低的半无烟煤的资源总量是有限的。对低挥发分煤和高挥发分煤的混合煤粉进行了研究。用燃烧实验和模拟分析的方法,考察了混合煤粉的燃烧特性,结果发现,当使用不同挥发分的煤组成的混合煤时,其燃烧温度高于各煤种单独燃烧时燃烧温度的加权平均值。混合煤粉的使用对初期升温有显著的促进作用。这是因为高挥发分煤能形成高温燃烧场,并可促进低挥发分煤的燃烧。

关键词 炼铁 高炉 喷煤 燃烧

1 前言

1981 年新日铁公司大分厂 1 号高炉在日本首先开始向高炉喷吹煤粉。在此之后,喷煤就成了稳定操作、降低成本、提高生产率和扩大选煤自由度的有效手段。作为可以应对焦炉老化、环境问题等的有效方法,喷煤操作在各个高炉展开。至 2002 年末,日本国内有 31 座高炉实施了喷煤,平均煤比约为 130kg/t,有的高炉年平均喷煤达到了 200kg/t 以上。另外,伴随着高炉的喷煤操作,明显存在着焦粉蓄积到炉芯,阻碍透气、透液性,风压波动,炉墙热负荷升高等问题。对此,炼铁工作者一直在进行各种各样的研究开发。

作者认为,为了实现稳定的喷煤操作,在高炉风口至回旋区的有限空间内,如何使煤粉稳定燃烧是关键。在该空间内煤粉的滞留时间变短,而且氧过剩率大幅度下降到 1.0,作为燃烧条件可以说是极其苛刻的。因此,进行了许多燃烧实验,研究了影响燃烧的各种因素。另外,考虑到高炉喷吹用煤粉的特性,一直以来就希望使用挥发分较高的煤。这主要是因为其在风口前具有良好的燃烧性,同时,这也与输送性有关。小于某一挥发分的煤其输送性要比高挥发分煤的输送性差。但是,最近开始从多种煤中综合考虑燃烧性、输送性、价格、置换比等因素进行选煤,其中对将挥发分低的半无烟煤或无烟煤等作为高炉喷吹用煤进行了研究。依靠燃烧技术的提高和对未燃碳、高炉下部焦粉行为的深入认识,从而适应更多样资源。如下面

所述,喷煤量一定时,使用半无烟煤或无烟煤与挥发分高的煤混合,以降低煤的平均挥发分时,煤粉对焦炭的置换比升高,可以降低燃料比,这一点在实际高炉也得到了证实。为此,低挥发分煤也可望获得降低高炉燃料比的效果。进而,也可望降低单位能耗和 CO₂ 排放量。但是,由于这种效果的判别方法和燃烧性等的局限,特性不同煤的混合作用等尚有许多不明之处。

同传统喷吹用煤相比,挥发分相对低(百分之十几)的半无烟煤即使有降低燃料比的效果,同其它煤相比,也受开采地域和开采量等的制约,使用量大幅度的增加会造成稳定供给和价格方面的问题。为此,可将挥发分、灰分等性状不同的煤混合使用,使煤粉的平均挥发分降低,达到降低燃料比的效果,同时提高其燃烧性、输送性。但是,也担心混入燃烧性差的煤会使煤粉整体燃烧效率降低。因此,必须弄清煤粉挥发分对高炉燃料比的影响机理是什么,单一特性煤粉和特性不同煤粉混合后的煤有什么差异。

在这种想法下,首先,从宏观角度分析了挥发分不同的煤粉对高炉燃料比的影响,研究了燃料比降低的机理。然后,在此基础上,用竖式圆筒燃烧炉进行了燃烧实验和燃烧模拟分析,弄清楚了挥发分较低的半无烟煤和高挥发分、低挥发分混合煤粉之间燃烧行为的差异。

2 低挥发分煤降低燃料比的效果

图 1 为君津厂 4 号高炉(内容积 5151m^3)在喷煤量基本固定为 $108\sim 118\text{kg/t}$ 的条件下,煤粉平均挥发分对燃料比的影响情况。从图中可知,喷煤量固定时,随着煤粉挥发分降低,燃料比也下降。这可理解为挥发分越低的煤粉,对焦炭的置换比越高。其原因之一可认为是如图 2(略)所示的那样,煤挥发分越高,发热值越低,高低差值约为 20%。为了说明降低高炉燃料比的效果,必须注意到在碳素溶解反应活跃的高炉下部的高温区域,煤粉挥发分差异的影响更大。即,挥发分中的主要成分碳氢化合物分解生成的氢,在有高温焦炭的高炉下部,燃烧后变为水蒸气,和焦炭反应,分解成氢和 CO,在进行不放热反应的同时,气体的升温也需要一定的热量。于是,使用挥发分高的煤时,为了确保高炉下部必需的热量,就需要比使用低挥发分煤时更高的燃料比。

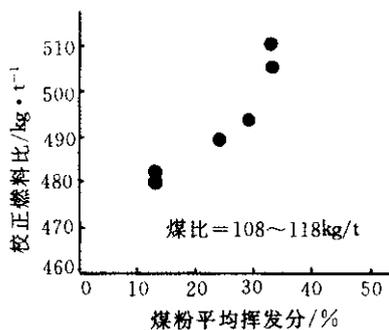


图 1 煤粉平均挥发分对降低燃料比的影响

根据上述观点,对高炉下部发热值加以定义。即:将滴下带 1400C 以上区域煤粉的有效发热值定义为高炉下部发热量。高炉下部发热值用式 1 表示,即为从煤粉的 CO 部分燃烧热和带入的显热中减去煤粉带入的 CO 、 H_2 、灰分升温所需的热量。

$$Q_{\text{下}} = Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4 - Q_5 - Q_6 + Q_7 \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{下}}$ ——煤粉在高炉下部的发热值/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Q_1 ——煤粉的低发热值/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Q_2 —— $\text{CO}(\text{g}) + 1/2\text{O}_2(\text{g}) = \text{CO}_2(\text{g})$ 的发热值/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Q_3 —— $\text{H}_2(\text{g}) + 1/2\text{O}_2(\text{g}) = \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 的发热值/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Q_4 ——CO 从基准温度升高到 1400C 所需热量/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Q_5 —— H_2 从基准温度升高到 1400C 所需热量/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Q_6 ——灰分从基准温度升高到 1400C 所需热量/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Q_7 ——煤粉带入的显热/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

煤粉的发热量和高炉下部发热值之间的关系示于图 3,总的趋势是煤的发热值越高,高炉下部发热值也越高,但也存在煤粉发热值相同,高炉下部发热值不同的情况。一般而言,如果发热值相同,煤中 H 含量少时,高炉下部发热值较高。如上所述,产生这种现象的原因不仅在于高炉下部存在高温焦炭,使在风口前燃烧的 H 立即被还原,所以没有放热,而且煤气升温也需要热量。此外,煤种不同其发热值之差约为 20%,但高发热值和低发热值煤相应的高炉下部发热值之差在一倍以上。因此可以认为,在高炉下部的热平衡成为控制因素的操作中,喷吹高炉下部发热值高的低挥发分煤是有利于高炉生产的。

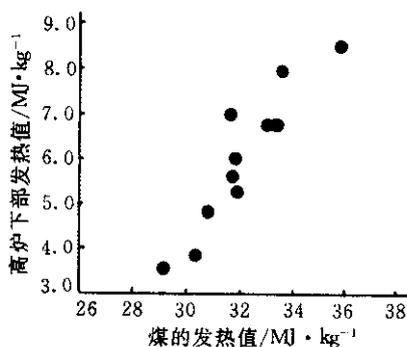


图 3 煤粉的发热量和高炉下部发热值的关系

在实际操作中,考察了煤粉挥发分变化时燃料比降低的效果。图 4 为在名古屋厂 1 号和 3 号高炉使用各种不同煤粉时,煤粉在高炉下部的发热值和实际焦炭置换比的关系。高炉下部发热值低的煤粉其置换比也低,在实现低燃料比操作中,不希望使用这种煤粉。但是,为了调查这是否为普遍现象,增加了北海厂 2 号高炉和户畑厂 4 号高炉的数据。在使用高炉下部发热值不同的煤粉时,对热、物质收支平衡,用李斯特线图加以研究。根据高炉下部的发热值和碳、氢、氧的收支,不考虑

炉身部的还原限制,推测燃料比的变化和实际燃料比变化的关系示于图 5。从图中可知,由高炉下部发热值变化推测的燃料比降低幅度较小时,和燃料比实际变化值基本一致;但降低幅度大时,推测值不符合实际值。这是因为没考虑炉身部的还原对燃料比降低的制约。即,高炉下部热收支中,计算的燃料比下降时,单位炉腹煤气量的降低幅度增大。如炉身效率不超过 100%,没有还原补偿就不能平衡,在达到此水平以后,就不能得到降低燃料比的实际操作结果了。因此,炉身效率有富余时,使用在高炉下部发热值高的煤粉,有可能降低燃料比。即,热流比低的操作等炉身效率低时,使用高炉下部发热值大的煤粉,既可保持高炉下部的热平衡,也能使流向炉身的还原煤气量减少,使炉身效率提高,燃料比降低。

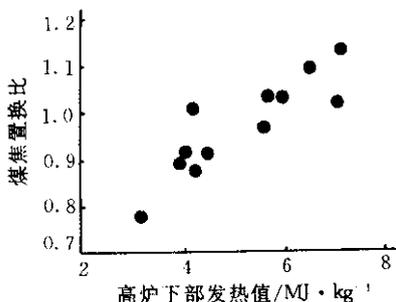


图 4 高炉下部发热值与焦炭置换比间的关系

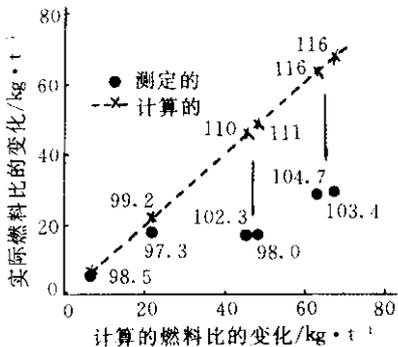


图 5 推测的燃料比的变化

图中数字表示炉身效率/%(以 950℃为基准)

3 不同挥发分煤的燃烧实验

在上节中,从热收支的观点研究了低挥发分煤降低高炉燃料比的效果,但是使用低挥发分

煤时,必须注意其燃烧性。使用高、低挥发分的混合无烟煤与只使用挥发分相对低的半无烟煤时,其燃烧结果有什么差异,这是必须了解的,对此进行了实验研究。

3.1 实验装置

煤粉燃烧实验所用的装置示于图 6(略)。该装置是内径为 100mm,有效炉长 800mm 的竖式圆筒燃烧炉。使用等离子电弧加热器进行加热,同时将煤粉从斜上方吹入。为了依次测定吹入炉内煤粉的热分解、燃烧行为,在距喷吹位置 50mm、100~800mm 处,每隔 100mm 设置一个测定孔。

实验中,用加热到 1600℃的氮气将炉体加热 3h 后,在规定的实验条件下,送入预热空气或富氧空气,同时从喷枪喷入煤粉。将 W-Re 热电偶从各测定孔插入到炉中心轴上进行温度测定,同时用小型点辐射温度计测定颗粒温度。在燃烧稳定状态下采集粉尘(燃烧碳)样。

3.2 实验条件

在煤粉燃烧实验中,使用表 1 所示的各种煤粉(干燥粉碎后整粒到 -100μm)。为了考查特性不同煤混合后的燃烧行为,将 A1 煤(高挥发分煤)和 B1 煤(低挥发分煤)分别按质量比 1:3、1:1、3:1 三种水平混合,加上单独使用 A1 煤和 B1 煤共 5 种情况进行了比较。

表 1 用于实验和计算的煤粉特性

项目	A1 煤	B1 煤
挥发分/%	36.30	8.05
灰分/%	4.33	10.20
C/%	77.1	83.0
H/%	4.68	3.28
O/%	12.70	1.99
发热量/MJ·kg ⁻¹	30.54	32.46

下列条件在该实验中是固定的:送风温度 1280℃;总气体流量 108.6m³/h;煤粉喷吹速度 19kg/h;煤粉浓度 175g/m³;氧气比 0.82;喷枪为单管 8A 枪;输送煤粉氮气 5.0m³/h。

另外,各种方案中氧气比固定为 0.82,按煤粉的平均组成来变更富氧率。

变更气体条件和煤粉种类后保持 10min 以上,温度、喷吹速度稳定后进行各种测定和取样。

距喷枪前端 50mm 和 100~800mm 处以 100mm 的间距测定温度。其中 600mm 处经常测定,而 200mm、400mm、800mm 处根据实验情况用辐射温度计测定固体温度,其它位置用热电偶测定气氛温度。在 100~700mm 之间以 200mm 间距采集粉尘样,求出煤粉燃烧效率。假设喷吹煤粉前后的灰分量不变,质量差是可燃物燃烧的量,则可求出燃烧效率。4 实验结果和分析

4.1 不同挥发分煤粉的混合燃烧行为

在挥发分高的煤粉中混入低挥发分的煤粉,用燃烧实验装置进行燃烧实验时,用热电偶测定的温度分布示于图 7(略)。对于 A1 煤,距喷枪 50mm 处的温度和 B1 煤的相同或稍低,其后迅速上升,距喷枪前端 500mm 处达到 1700℃。而 B1 煤,气体温度上升缓慢,最终达到的温度约为 1600℃。如图 8 所示,采用距喷枪前端 400~800mm 的平均温度作为到达的气体温度进行比较,这一趋势更加清晰。可以看出,A1 煤的比例达到 50% 以上(1:1、3:1)时,与单一煤燃烧数据的加权平均值相比,向高温方向偏移。可以认为这是 A1 煤形成的燃烧场促进了 B1 煤的燃烧。

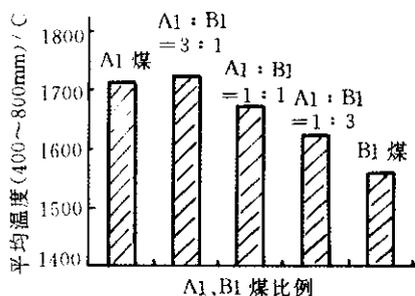


图 8 单一煤粉和混合煤粉燃烧时距喷枪前端 400~800mm 平均温度的比较

图 9 是在距喷枪 600mm 处用辐射温度计测出的颗粒温度的对比。混合比为 1:1 或 A1 煤的比例高于 1:1 时,最高温度约达到 1700℃ 的高值,而当 B1 煤占主导地位时,温度急剧下降。

图 10 是 A1 煤和 B1 煤混合时,平均挥发分和距喷枪 100mm、700mm 处采集的炭的平均燃烧效率之间的关系。相对于距喷枪前端 700mm 处的燃烧效率来说,当平均挥发分为 16% 以下时,距喷枪前端 100mm 处的燃烧效率特别低。可以认为

此处的燃烧滞后影响了上述的温度分布。平均挥发分在 22% 以上时,700mm 处的燃烧效率为 60% 以上,100mm 处燃烧滞后不显著。从上述情况看,在使用低挥发分煤时,应混合使用高挥发分煤,形成高温燃烧场,以保证一定的燃烧效率。

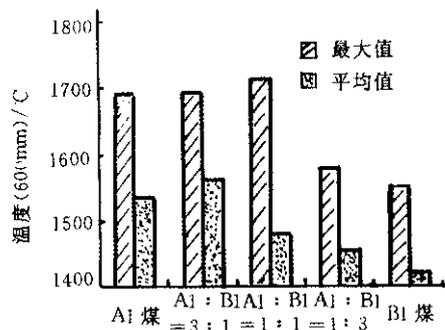


图 9 单一煤粉与混合煤粉燃烧时用辐射温度计测定的距风口前端 600mm 处的最高温度和平均温度

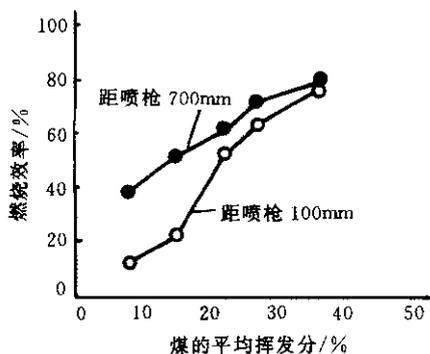


图 10 距喷枪 100~700mm 处煤粉平均挥发分和燃烧效率之间的关系

4.2 关于混合煤影响的模拟分析

关于煤粉的燃烧模型以前进行过许多研究。例如,赫等人对送风管、风口内和风口前燃烧带的各工艺参数进行了反应工学的理论解析,将其模型与全焦操作进行了对比;田村等人根据回旋区燃烧炉实验结果和风口前燃烧带的数学模型解析,对喷煤量的上限进行了研究;肖等人提出煤粉和粉矿复合喷吹时回旋区煤气流、传热特性的数学模型。这些数学模型的研究其目的是用平均值代表煤粉特性,例如研究挥发分差异大的煤粉混合使用时的燃烧行为就不适合。即,如按上节的结果,影响挥发分的燃烧不是线性的,所以用平均值

不能正确地评价同时喷吹多种煤的模型的燃烧行为。因此,以田村等人的煤粉燃烧模型为基础,经修改,得到可以推测多种煤混合燃烧行为的模型。具体变更以下几点。

(1) 根据田村等人的模型中对微小时间 dt 的基础式,计算出各时刻煤粉颗粒的位置,评价颗粒的温度、反应状况、煤气温度和组成等。为此,给出微小距离 dx 的基础式,独立解出各个特性、不同颗粒的热分解速度、碳的粒径变化、移动速度、燃烧率等,同时假设在微小区间内气体是立即混合的,就可以评价多种煤粉颗粒的行为。

(2) 在田村等人的模型中,用挥发量的一次函数评价煤粉的热分解反应速度,同时用以实验值为基础的回归方程求出比实际挥发量的工业分析值增加的部分。因此,用高温热分解反应和低温热分解反应两种反应的共存模型进行评价。由于是根据田村模型中由 Badzioch 等人提出的等温气化过程的一级过程速度式进行评价的,所以不可能评价气氛裂化,特别是温度变化对燃烧特性的影响。而为评价以 Q 因素为主的煤种影响的参数时也存在缺少普遍性的缺点。因此采用 Kobayashi 等人提出的低温反应和高温反应两种反应共存模型,来考虑气氛温度变化对燃烧特性的影响。

图 11 是在燃烧实验装置和同样的空塔燃烧条件(送风温度 $1280\text{ }^{\circ}\text{C}$;煤粉浓度 $175\text{g}/\text{m}^3$;氧气比 0.82)下,评价使用单一高挥发分煤(表 1 中的 A1 煤)、单一低挥发分煤(表 1 中的 B1 煤)和将两者以等量混合使用时的燃烧特性的例子。对于煤气温度为极大值的燃烧焦点,高挥发分煤位于距吹入位置约 150mm 处,而无烟煤位于 220mm 处。将两者混合之后燃烧,升温曲线比前两种煤的平均值更靠前。这是采用两者的平均组成进行计算的结果中所不能表现出现象,而只能从数学模型确认出的效果。改变混合比例时煤气温度达到 $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 位置的变化示于图 12(略)。高挥发分煤的混合比例比较少时,煤气温度达到 $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 位置移到前方。

温度水平和位置等的实验值和计算值之间有差异,其原因是计算中没有考虑放散热的影响,并假设煤粉颗粒和煤气呈理想状态下的完全混合,同时实验中在炉中心轴上测定的温度不能完全代表全断面的温度。

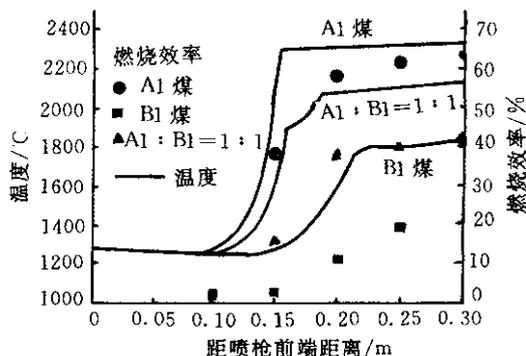
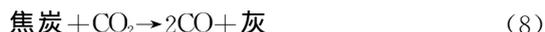
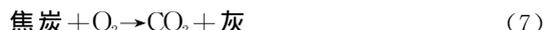
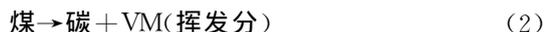


图 11 单一煤和混合煤粉燃烧时气体温度计算值

4.3 混合煤粉在回旋区燃烧行为的推测

上一节的模拟是设定单一煤粉燃烧的情况,和实际高炉风口前状况不同。因此,以田村等人的模型为基础,进行了下列修正,形成了风口前燃烧带的模型。

田村等人的模型是将燃烧带的断面积设为一定,并假设在风口中心轴上扩张角为 30° 的扩张燃烧空间,在距风口前端或煤粉喷枪前端位置长度为 dx 的微小圆筒内,伴随着传热和反应的热量以及质量的变化,取微分收支平衡。忽略煤气在通过风口、回旋区和煤粉、焦炭加速燃烧引起的煤气压力变化,设煤气线速度与断面积变化成反比例。另外,田村等的模型中,设定煤粉分解、挥发分的燃烧和碳的燃烧反应为逐级反应,但为了明确对混合煤粉的影响,允许分解前的煤粉和分解后的碳混合存在。为此,假定不同煤种的分解和燃烧为独立进行的反应,没有相互作用。但随着分解、燃烧的进行,煤气组成和温度变化对其场内的各种含碳物质反应存在间接影响。作为各种含碳物质的反应,和田村等人的模型一样,考虑如下反应。



关于反应速度,反应(2)作为挥发量一次式的两反应共存来处理,反应速度常数使用的是

Kobayashi 等人的值; 反应(3)瞬间完成; 反应(4)~(6)是反应和扩散的共存; 反应(7)~(9)假定扩散是决定因素, 速度常数等使用了田村等人模型中用的数值。

煤粉吹入后, 伴随煤粉升温排出挥发分和燃烧, 使 CO_2 、 H_2O 增加。焦炭回旋区产生的碳及焦炭又同其燃烧产生的 CO_2 、 H_2O 反应, 生成 CO 和 H_2 。高挥发分煤和低挥发分煤混合燃烧时, 挥发分排出、燃烧时 O_2 的消耗和 CO_2 、 H_2O 的生成都比低挥发分煤单独燃烧时进行得快, 在 CO_2 峰值处的燃烧焦点比较接近煤粉吹入位置。低挥发分煤单独燃烧时, 挥发分的排出和燃烧都少, 所以燃烧焦点位于炉内侧。平均挥发分在 10% 以下时, 燃烧效率大幅度降低, 所以为促进低挥发分煤粉的燃烧, 需要有效地混入一定量的高挥发分煤。

5 结语

引入高炉下部发热值的概念, 对煤粉的挥发分和高炉燃料比的关系进行了研究。通过竖式圆筒燃烧炉的燃烧实验, 明确了高挥发分煤、低挥发

分煤和混合煤粉的燃烧行为, 并通过模拟解析进行了研究, 得出如下结论。

(1) 研究了高炉 1400℃ 以上区域的煤粉有效放热量, 在以高炉下部热平衡为控制因素的操作中, 平均挥发分低的煤粉对降低燃料比有效。

(2) 低挥发分煤和高挥发分煤混合使用时, 燃烧温度比各自单独使用时的加权平均值高。尤其是对初期升温的促进效果较显著。认为这是高挥发分煤形成高温燃烧场, 促进了低挥发分煤的燃烧所致。

(3) 建立了可以推测多煤种的混合燃烧行为的燃烧模型。明确认为, 与低挥发分煤相反, 高挥发分煤有促进燃烧的效果。平均挥发分在 10% 以下时, 煤的燃烧效率大幅度降低, 所以, 为了促进燃烧, 混入一定量的高挥发分煤是有效的。

全 荣 译自《铁と钢》2004vol. 90 No. 4

安云沛 校

(编辑 孙永方)

收稿日期: 2004—04—12

(上接第 49 页)

试验结果表明, 连铸 35CrMnSiA 钢经过适当的热处理后, 其力学性能可以满足使用要求。与模

铸工艺生产的 35CrMnSiA 钢相比, 其性能水平相当。



图 7 连铸 35CrMnSiA 钢淬火+回火组织(回火马氏体+铁素体)

(a)230℃回火; (b)250℃回火

4 结论

(1) 供货热处理试验证明, 连铸 20CrMnSiA 钢、25CrMnSiA 钢和 35CrMnSiA 钢的热处理制度应为: 20CrMnSiA 钢采用 900℃ 正火处理; 25CrMnSiA 钢采用 880℃ 正火处理; 35CrMnSiA 钢 750℃ 回火处理。在该制度下热处理后的 CrMnSiA 系列钢种各项指标全部满足订货要求。

30CrMnSiA 钢宜采用 730℃ 回火处理。

(2) 连铸 25CrMnSiA 钢和连铸 35CrMnSiA 钢的应用热处理试验证明, 采用合适的热处理制度, 其力学性能能够满足使用要求。

(编辑 袁晓青)

收稿日期: 2004—03—29