生物质燃料应用于铁矿烧结的研究

范晓慧，季志云，甘敏，姜涛，陈许玲，李文琦，王强，余志元，黄晓贤，袁礼顺

(中南大学资源加工与生物工程学院，湖南长沙，410083)

摘要：通过烧结杯试验对2种木炭、1种固体成型锯末替代焦粉进行研究。研究结果表明：随着生物质燃料替代焦粉质量分数的提高，烧结适宜水分呈增加趋势，且生物质燃烧速度快使垂直烧结速度提高，而料层最高温度降

低使烧结矿熔融区铁酸钙质量分数减小，大孔薄壁结构增加，造成烧结矿成品率和转鼓强度降低；当此3种生物质燃料分别替代质量分数为40%的焦粉进行烧结时，烧结速度均升高，但烧结矿成品率和转鼓强度降低，且生物质的燃料比(即固定碳与挥发分的质量比)越低，其替代焦粉的适宜质量分数也越低，经过炭化的生物质能获得更好的烧结指标；通过降低生物质燃料的热量置换比以及适当提高生物质的平均粒径，提高了料层的最高温度，从而强化生物质燃料的铁矿烧结，提高了烧结矿产量和质量。

在我国高炉含铁炉料结构中，烧结矿质量分数一般在75%以上，是高炉炼铁的主要含铁炉料。而烧结工序能耗在钢铁企业中仅次于炼铁工序能耗，居第2位，一般为企业总能耗的9%~12%，且固体燃料消耗占烧结工序总能耗的75%~80%[1－4]。我国铁矿烧结主要采用焦粉、无烟煤等化石燃料，其燃烧排放的烟气中含有大量的温室气体CO_2以及污染性气体SO_x和NO_x等，是钢铁工业的主要大气污染源[5－7]，因此，寻求清洁且价廉的燃料替代焦粉、无燃煤等化石燃料是缓解我国环境污染和能源紧缺双重压力的重要途径。

生物质能是由植物光合作用固定于地球上的太阳能，是一种清洁可再生能源，其来源十分丰富，资源量大。由于生物质燃料N和S质量分数低，且燃烧产生的CO_2参与大气碳循环，可以有效降低CO_x，SO_x和NO_x的排放量[8－13]。2004年澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)采用红桉树炭化得到的木炭替代焦粉进行了烧结试验研究[14]；2007年荷兰柯罗斯(Corus)技术与发展研究中心研究了橄榄树残渣、向日葵壳、杏仁壳等生物质燃料分别取代25%的焦粉对烧结料层热波曲线的影响[15]。目前，针对我国的原料结构，还没有应用生物质燃料进行烧结的研究报道。为此，本文作者拟通过研究生物质燃料种类、替代焦粉质量分数的研究，以便揭示生物质作燃料的烧结特性，并采用强化措施提高烧结矿的产量和质量。

1原料性能及试验方法

1.1原料性能

本试验在混匀铁料中配加石灰石、白云石、生石灰3种熔剂，以及燃料和烧结返矿生产57.5%(质量分数，下同)TFe，4.82%SiO_2，2.0%MgO以及碱度R为2.0的烧结矿。混匀铁料、熔剂、返矿的化学成分和配比见表1。

本试验采用的燃料有1种焦粉、3种生物质燃料。生物质燃料分别为2种木炭和1种锯末。焦粉为焦炭破碎的副产物，木炭为木材炭化得到的产品，锯末是固体成型燃料。各种燃料的化学成分及工业分析、灰分成分、粒度组成分别见表2~4。

由表2可知：从化学成分看，木炭1#的C质量分数最高，而锯末的C质量分数最低；焦粉的H质量分数最低，而锯末的H质量分数最高；从工业分析来看，与焦粉相比，生物质燃料的灰分质量分数较低，挥发分质量分数高，特别是未经炭化处理的锯末，挥发分质量分数高达84.74%，而灰分只有1.99%。木炭的热值比焦粉的大，而锯末的热值比焦粉的热值低得多。

由表3可知：焦粉灰分中的SiO_2和Al_2O_3的质量分数高，而

生物质灰分中CaO质量分数高；生物
质灰分中的CaO和MgO的总质量分数比SiO_2和Al_2O_3的总质量分数高，其灰分呈碱性，而焦粉的灰分呈酸性。

由表4中各种燃料的粒度组成可知：生物质燃料的平均粒度比焦粉的大，且生物质中粒度低于0.5mm的细粉质量分数比焦粉的低。

表 1　原料化学成分(质量分数)及配比

Table 1　Chemical composition of raw materials and their percents in mixture

原料种类	质量分数/%							配比/%
	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	FeO	LOI	
混匀铁料	63.02	4.58	0.35	0.28	1.42	6.50	3.10	60.73
白云石	—	0.71	32.64	19.83	0.56	—	46.47	5.58
石灰石	—	1.49	50.66	2.28	0.43	—	40.72	2.16
生石灰	0.4	2.86	76.69	1.18	1.20	—	12.36	4.62
烧结返矿	56.81	5.11	9.02	1.86	2.00	6.25	0	23.08

注：配比是在焦粉质量分数为 3.85%的条件下计算的。

表 2　燃料的化学成分及工业成分(质量分数)

Table 2　Chemical composition and industrial analysis of fuels

燃料种类	质量分数/%				工业(干基)成分质量分数/%			热值/($kJ·g^{-1}$)
	C	H	S	其他	固定碳	灰分	挥发分	
焦粉	78.89	2.46	0.224	18.43	74.68	19.54	5.88	26.84
木炭-1#	94.64	2.77	0.037	2.55	87.34	5.10	7.55	30.77
木炭-2#	71.60	4.76	0.083	23.56	71.25	5.15	23.60	28.77
锯末	50.89	6.13	0.082	42.90	13.27	1.99	84.74	18.60

表 3　燃料灰分的化学成分(质量分数)

Table 3　Chemical composition of fuel ash　%

燃料种类	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	P
焦粉	37.92	24.26	17.34	14.21	2.58	—	—	0.51
木炭-1#	40.14	10.30	2.52	18.18	2.89	0.58	3.67	0.65
木炭-2#	22.25	11.10	2.26	33.52	3.70	0.76	4.69	0.92
锯末	13.43	4.04	3.14	32.00	5.03	1.34	9.85	0.36

表 4　燃料的粒度组成

Table 4　Size distribution of fuels

燃料种类	不同粒度的木炭质量分数/%							平均粒度/mm
	>8 mm	5~8 mm	3~5 mm	1~3 mm	0.5~1.00 mm	0.25~0.50 mm	<0.25 mm	
焦粉	0.10	1.17	7.66	14.57	18.23	21.30	36.97	0.99
木炭-1#	0	4.01	38.73	22.49	11.19	7.18	16.40	2.41
木炭-2#	0	1.55	20.14	22.40	17.16	12.82	25.94	1.60
锯末	0	1.60	38.88	30.41	15.42	7.23	6.46	2.43

1.2试验方法

烧结采用质量配料法配料，配料后将混合料混匀，将混合料送入直径×长度为600mm×1400mm的圆筒混合机内制粒4min。混合料经制粒后装入有铺底料的直径为150mm的烧结杯内，采用天然气点火及保温，点火时间为1min，保温1min，点火温度为(1150±50)℃，点火负压为5kPa。点火后，抽风负压调整至10kPa。从点火至烧结废气温度达到最高后开始降温时所需时间即为烧结时间。到达烧结终点时，抽风负压调低至5kPa，冷却3min后卸料，经单齿辊破碎机破碎，然后进行落下、分级及转鼓强度检测等。评价指标包括垂直烧结速度、利用系数、成品率和转鼓强度等。

在烧结过程中，采用B型热电偶对距烧结料层表面200mm的位置进行连续测温。

2试验结果及分析

2.1生物质取代焦粉质量分数对烧结的影响采用焦粉为燃料时，通过单因素试验得到适宜的烧结水分质量分数和焦粉质量分数分别为7.25%和3.85%。生物质替代焦粉是采用等热量替换的计算方法，研究木炭-1#替代焦粉的质量分数对烧结的影响。

2.1.1对适宜烧结水分的影响

木炭替代焦粉质量分数对烧结适宜水分的影响见图1。由图1可知：适宜烧结水分随着木炭1#替代焦粉质量分数的提高总体上呈现增大的趋势，当木炭1#替代焦粉的质量分数低于40%时，适宜烧结水分变化不大；当替代质量分数提高到60%时，适宜烧结水分由7.25%提高到7.50%，而全部取代时，烧结适宜水分应提高到7.75%。这主要是由于木炭密度小、孔隙率高，其吸水能力比焦粉的大，且单位质量的木炭体积比焦粉的大，使得制粒过程中木炭吸水量比焦粉的大。

2.1.2对烧结产量和质量的影响

在各自适宜的烧结水分条件下，木炭1#替代焦粉的质量分数对烧结产量和质量的影响见图2。从图2可知：随着替代质量分数的增加，烧结速度加快，但成品率降低，利用系数在木炭质量分数为20%时略有上升，之后开始下降；烧结矿转鼓强度在木炭替代焦粉质量分数40%以内，从65.00%降低到63.27%，但继续提高替代质量分数，转鼓强度会大幅度降低，因此，替代质量分数大于40%以后，烧结矿产量、质量指标将大幅恶化；完全替代时，烧结速度从21.94mm/min提高到27.17mm/min，利用系数从1.48$t\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$下降到0.93$t\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$，成品率由72.66%下降到41.11%，转鼓强度由65%下降到23.87%。

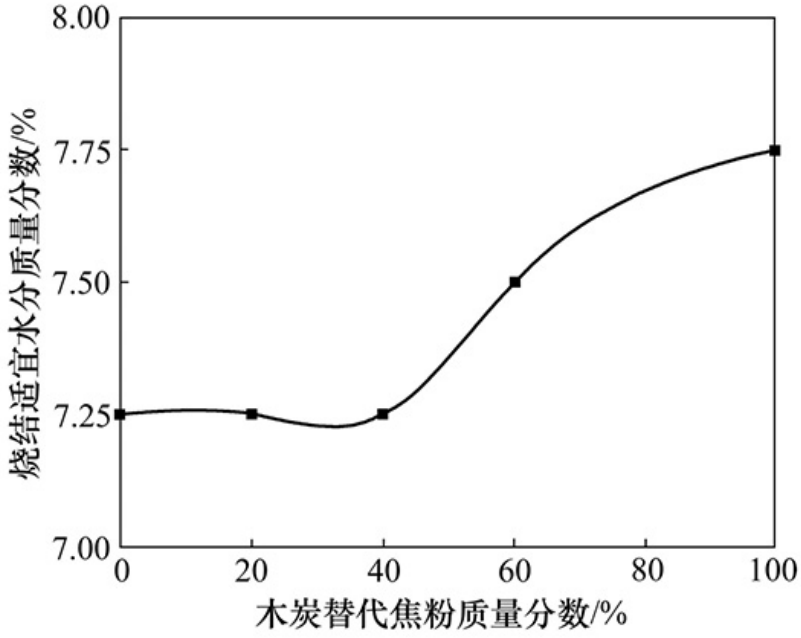
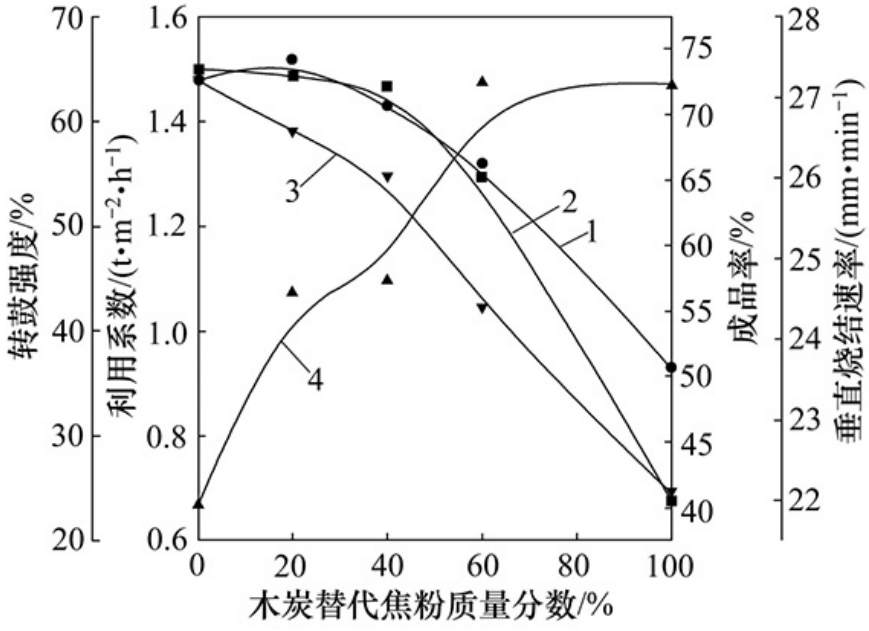


图 1　木炭替代焦粉质量分数对烧结适宜水分质量分数的影响

Fig.1　Effect of mass fraction of charcoal replacing coke breeze on mass fraction of proper moisture of sintering



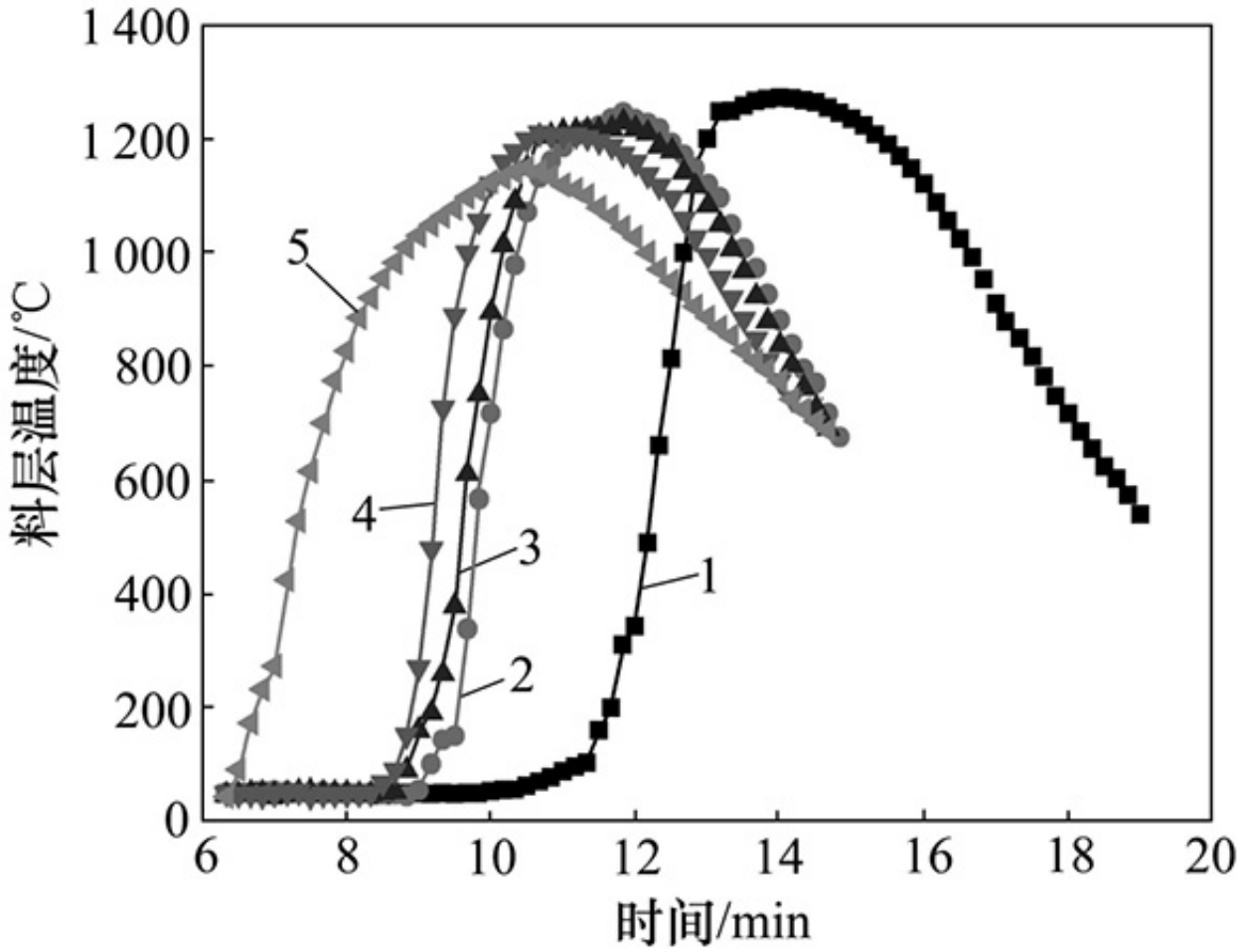
1—利用系数；2—转鼓强度；3—成品率；4—垂直烧结速度

图 2　木炭替代焦粉质量分数对烧结矿产和质量的影响

Fig.2　Effect of mass fraction of charcoal replacing coke breeze on yield and quality of sinters

2.1.3对烧结料层温度的影响

用热电偶测定距离料面200mm处的温度变化，结果见图3。从图3可见：随着木炭替代焦粉质量分数的增加，料层达到最高温度的时间逐渐提前，料层最高温度逐渐降低，热曲线变宽；当取代质量分数由0增加到20%，40%，60%和100%时，料层最高温度由1273℃分别下降到1247，1230，1211和1150℃。由于当木炭取代焦粉质量分数超过40%时，料层温度降低到难以将物料熔化的程度，降低了烧结过程中的液相量，因而，烧结矿成品率和转鼓强度低。



木炭替代焦粉质量分数：1—0；2—20%；3—40%；4—60%；5—100%

图 3　木炭替代焦粉质量分数对料层温度的影响

Fig.3　Effect of mass fraction of charcoal replacing coke breeze on sinter-bed temperature

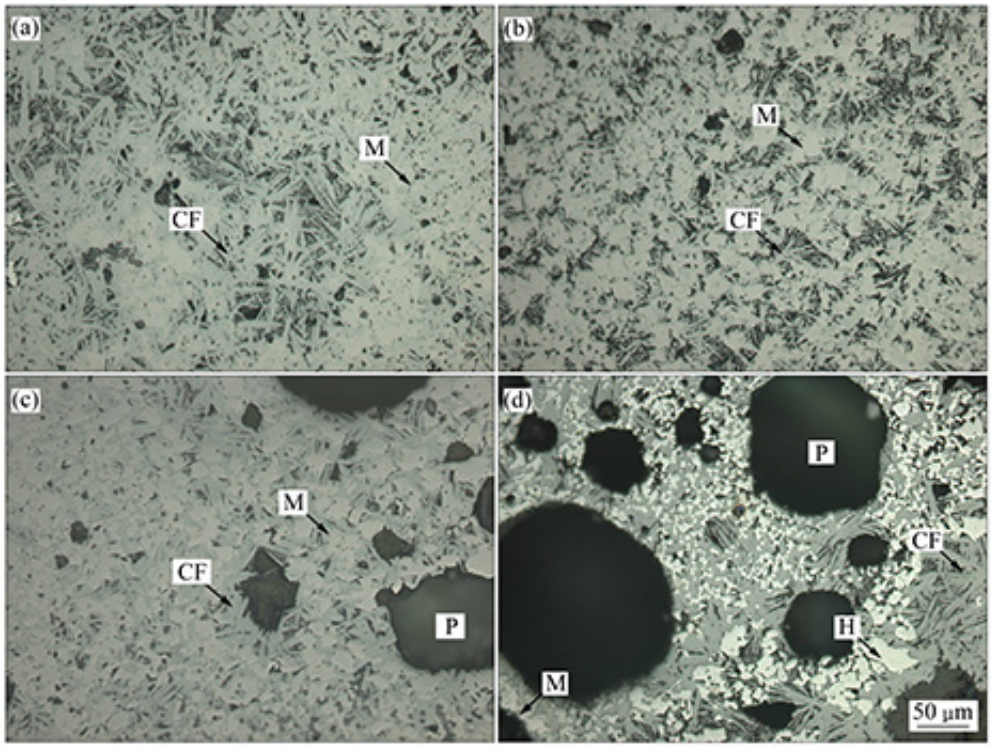
2.1.4对烧结矿显微结构的影响

烧结矿的矿相见图4。从图4可见：当全部使用焦粉时(见图4(a))，烧结矿熔融区针状、条状铁酸钙较多，磁铁矿与

铁酸钙形成交织的熔蚀结构，具有较大的强度；当木炭1#替代20%和40%的焦粉时(见图4(b)和4(c))，烧结矿熔融区仍由铁酸钙和磁铁矿构成，但铁酸钙质量分数减少，且铁酸钙针状结构没有图4(a)中的明显；当木炭替代焦粉质量分数提高到60%，烧结矿熔融区由铁酸钙、磁铁矿、赤铁矿构成，铁酸钙、磁铁矿质量分数比图4(a)中的小，而赤铁矿质量分数增大，形成大孔薄壁结构，使得烧结矿强度较低，这与料层温度低使得液相量减少是相符的。

2.2生物质种类对烧结的影响

木炭1#、木炭2#、锯末3种生物质燃料分别取代40%焦粉进行铁矿烧结，结果见表5。从表5可知：这3种生物质取代焦粉都可提高垂直烧结速度，提高程度从大到小依次为锯末、木炭2#和木炭1#；但会降低烧结矿成品率、转鼓强度和利用系数，且料层最高温度也降低，降低程度从大至小依次为锯末、木炭2#和木炭1#，这主要与燃料自身的性质有关；木炭1#、木炭2#和锯末的挥发分质量分数依次提高，固定碳质量分数依次降低，而生物质的燃料比(即固定碳与挥发分质量比)越小，反应性越好，使得燃烧速度越快。因而，烧结速度增加，而料层温度降低。



(a) 没有取代；(b) 20%取代；(c) 40%取代；(d) 60%取代
浅灰色—铁酸钙；白色—Fe_2O_3；浅黄色—Fe_3O_4；黑色—气孔

图 4 木炭替代焦粉质量分数对烧结矿微观结构的影响

Fig.4 Effect of mass fraction of charcoal replacing coke breeze on sinter microstructure

表 5 生物质种类对烧结的影响

Table 5 Effect of biomass types on sintering

燃料种类	木炭取代焦粉的质量分数/%	混合料水分质量分数/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	料面下 200 mm 处最高温度/℃
焦粉	0	7.25	21.94	72.66	65.00	1.48	1 273
木炭-1#	40	7.25	24.73	65.30	63.27	1.43	1 230
木炭-2#	40	7.50	25.93	62.38	58.33	1.40	1 217
锯末	40	8.50	26.12	54.38	50.11	1.07	1 174

对这3种生物质燃料替代焦粉比例进行研究，其各自适宜的替代质量分数及相应的烧结矿指标见表6。从表6可知：木炭1#、木炭2#和锯末取代焦粉的适宜质量分数依次降低，分别为40%，20%和15%。这3种生物质燃料在各自适宜取代质量分数条件下进行烧结时，产质量指标以及料层最高温度均相接近。

2.3强化生物质燃料应用的研究

由于生物质燃料在烧结过程中燃烧过快，导致料层温度低，这是烧结矿成品率和转鼓强度降低的主要原因。可适当降低生物质替代焦粉的热量置换比，以及改善生物质的粒度组成，以提高料层的温度，达到强化烧结矿质量的目的。

2.3.1适宜的热量置换比

木炭1#替代焦粉的热量置换比对烧结的影响见表7。从表7可知：当置换比从1.00降低到0.75时，料层最高温度由1230 ℃上升到1287℃，烧结矿成品率、转鼓强度明显提高，分别从65.30%提高到69.63%，从63.27%提高到64.18%，烧结矿质量得到改善。

2.3.2适宜的粒度

研究了木炭1#的3个粒度组成(见表7)对烧结的影响，结果见表8。从表8可见：提高生物质的平均粒度可提高料层的最高温度，当粒度由2.41mm提高到2.84mm时，料层温度由1230℃提高到1252℃，但继续提高生物质粒度，对料层温度的影响不大；采用粒度3#进行烧结时，与粒度-
1#相比，烧结矿成品率由65.30%提高到67.12%，转鼓强度由63.27%提高到64.93%。

表 6　生物质种类对适宜替代质量分数的影响及相应烧结指标

Table 6　Effect of biomass types on optimum replacement mass fraction and corresponding sinter index

燃料种类	木炭取代焦粉的质量分数/%	混合料水分质量分数/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	料面下 200 mm 处最高温度/℃
焦粉	0	7.25	21.94	72.66	65.00	1.48	1 273
木炭-1#	40	7.25	24.73	65.30	63.27	1.43	1 230
木炭-2#	20	7.25	24.17	67.60	63.95	1.46	1 237
锯末	15	8.25	23.17	66.21	63.30	1.37	1 241

表 7　热量置换比对烧结矿质量的影响

Table 7　Effect of heat replacement ratio on sinter

热量置换比	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	料面下 200 mm 处最高温度/℃
1.00	24.73	65.30	63.27	1.43	1 230
0.85	24.29	67.27	64.47	1.41	1 272
0.75	23.88	69.63	64.18	1.46	1 287

表 7　木炭-1#的 3 个粒度组成

Table 7　Three size distributions of charcoal-1#

粒度	不同粒度的木炭质量分数/%							平均粒度/mm
	>8 mm	5~8 mm	3~5 mm	1~3 mm	0.5~1.00 mm	0.25~0.50 mm	<0.25 mm	
粒度-1#	0	4.01	38.73	22.49	11.19	7.18	16.40	2.41
粒度-2#	0	4.80	46.33	26.90	13.39	8.59	0	2.84
粒度-3#	0	5.25	50.68	29.43	14.64	0	0	3.07

表 8　粒度组成对烧结矿产量和质量的影响

Table 8　Effect of fuel size distributions on yield and quality of sinters

燃料种类	混合料水分质量分数/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	料面下 200 mm 处最高温度/℃
粒度-1#	7.25	24.73	65.30	63.27	1.43	1 230
粒度-2#	7.25	25.83	67.33	63.07	1.54	1 252
粒度-3#	7.25	24.73	67.12	64.93	1.49	1 251

3结论

(1)随着生物质燃料替代焦粉质量分数的增加，适宜烧结水分呈增大趋势，垂直烧结速度提高，但烧结矿成品率、转鼓强度和料层最高温度均降低；烧结矿中铁酸钙生成量减少，大孔薄壁结构增加。

(2)当木炭1#、木炭2#、锯末分别替代焦粉烧结时，烧结速度均升高，但是，烧结矿成品率和转鼓强度降低，特别是高挥发分质量分数和低热值的锯末替代焦粉时指标下降幅度较大。随着生物质燃料比值降低，其替代焦粉的适宜质量分数依次降低。

(3)降低生物质燃料的热量置换比以及适当提高生物质的粒度，可以显著提高料层的最高温度，提高烧结产量和质量，能够强化生物质燃料的铁矿烧结。

参考文献：

[1]许景利.烧结生产的能源消耗与节能对策[C]//全国炼铁原料学术会议文集.昆明: 中国金属学会，2005: 25－28.

[2]范晓慧，孟军，陈许玲，等.铁矿烧结中铁酸钙形成的影响因素[J].中南大学学报: 自然科学版，2008，39(6):1125－1131.

[3]李士琦，纪志军，吴龙，等.钢铁企业能源消耗分析及节能措施[J].工业加热，2010,39(5): 1－3.

[4]彭志坚，郑银珠.铁矿烧结节能减排添加剂的试验研究[C]//2009 年度全国烧结球团技术交流年会论文集.长沙: 全国烧结球团信息网，2009: 32－36.

[5]朱德庆，潘建，何奥平，等.铁矿烧结工艺中温室气体CO2的排放规律[J].中南大学学报: 自然科学版，2005，36(6):944－948.

[6]潘建，朱德庆.铁矿烧结过程烟气中SO2的排放规律研究[C]//中国金属学会 2009 年烧结工序节能减排技术论文集.三明: 中国金属学会，2009: 49－56.

[7]朱德庆，何奥平，潘建，等.铁矿烧结过程温室气体COx排放规律的研究[J].钢铁，2006，41(2): 76－80.

[8]蒋正武.生物质燃料的燃烧过程及其焚烧灰特性研究[J].材料导报，2010，24(4): 66－80.

[9]刘建禹，翟国勋，陈荣耀，等.生物质燃料直接燃烧过程特性的分析[J].东北农业大学学报: 自然科学版，2001，32(2):290－294.

[10]魏学锋，黄娟，董铁有，等.生物质燃料催化氧化燃烧机理[J].河南科技大学学报: 自然科学版，2009，30(2): 32－34.

[11]陈曦，韩志雄，孔繁华，等.生物质能源的开发与利用[J].化学进展，2007，19(7): 1091－1096.

[12]郭瑞超，唐军荣，胥辉，等.木质生物质能源的开发利用现状与展望[J].林业调查规划，2007，32(1): 90－94.

[13]孙永明，袁振宏，孙振钧，等.中国生物质能源与生物质利用现状与展望[J].可再生能源，2006(2): 77－82.

[14]Lovel R，Vining K，Dell’Amico M.Iron ore sintering with charcoal[J].Mineral Processing and Extractive Metallurgy，2007,116(2): 85－92.

[15]Mohammad Z，Maria M P，Trevor A T F.Biomass for iron ore sintering[J].Minerals Engineering，2010，23: 1139－1145.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/107967.html