某中低钛型钒钛磁铁矿的烧结特性及产品性能研究

尹曾根
(中冶长天国际工程有限责任公司,湖南 长沙 410007)

摘 要: 以某中低钛型的钒钛磁铁精矿为对象,研究了其制粒性能、烧结特性以及烧结产品的冶金性能、物相组成和显微结构。研究结果表明,碱度由2.0降低至0.8时,烧结矿产、质量指标呈现先降低后增高的趋势;高碱度烧结矿中主要物相为钛赤铁矿、钛磁铁矿、铁酸钙、钙钛矿和橄榄石,其熔蚀状的复合铁酸钙(SFCA)充填于钛铁矿物相之间,将铁氧化物物相紧密连接;高碱度烧结矿还原度明显高于低碱度,但高碱度烧结矿的低温还原粉化性能较差。

关键词: 中低钛型钒钛磁铁矿;制粒性能;烧结性能;冶金性能
中图分类号: TF046.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2016)05-0024-05
doi: 10.13403/j.sjqt.2016.05.059

Study on sintering characteristics of low and medium-TiO_2 content V-Ti-bearing magnetite and product performance

Yin Zenggen
(*Zhongye Changtian International Engineering Co.*, *Ltd.*, *Changsha* 410007, *Hunan*)

Abstract In this paper, with low and medium-TiO_2 content V-Ti-bearing magnetite as the object, its granulation performance, sintering characteristics and the metallurgical properties, phase composition and microstructure of the sinter product were studied. The study results show that, when the basicity decreases from 2.0 to 0.8, the sinter output and quality indexes firstly decrease and then increase. The main mineralogical phases of high basicity sinter are titano-hematite, titano-magnetite, SFCA, perovskite and olivine. The molten composite SFCA is filled in the gap between the Ti-bearing iron ores which connects the iron oxide particles tightly. The reducibility of high basicity sinter is obviously higher than that of the low basicity sinter, but the low temperature reduction disintegration index of high basicity sinter is poor.

Key words low and medium-TiO_2 content V-Ti-bearing magnetite; granulation performance; sintering performance; metallurgical performance

1 前 言

钒钛磁铁矿是一种以铁、钒、钛为主,伴生多种有价元素的多元共生铁矿,由于铁钛紧密共生,钒以类质同象的形式赋存于钛磁铁矿中,因此,通常称为钒钛磁铁矿。一般钒钛磁铁矿含TiO_2约1%~15%,V_2O_5约0.1%~2%[1,2]。

高炉法是现行用于处理钒钛磁铁精矿的主要工业生产方法[1,2],该方法是将钒钛磁铁精矿先烧结,后送高炉冶炼。由于我国主要的钒钛磁铁矿矿床中TiO_2含量均较高,因此目前钒钛磁铁矿造块主要针对TiO_2含量较高的钒钛磁铁

收稿日期:2016-07-15
作者简介:尹曾根(1978-),男,高级工程师,以前从事烧结球团技术设计,现在从事烧结球团的设计经营。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

矿展开研究，对于中低钛型钒钛磁铁矿烧结性能的系统研究较少。

相关研究结果表明[3~7]，高钛型钒钛磁铁矿造块过程主要存在的问题有：①钒钛磁铁精矿粒度粗，亲水性差，成球性能不好，不利于制粒；②与普通磁铁精矿相比，其 TiO_2 含量高，SiO_2 含量偏低，烧结过程中生成的粘结相矿物少；③烧结过程中生成的钙钛矿多，而铁酸钙较少，导致烧结矿强度变差、成品率下降和低温还原粉化加剧。因此，在烧结生产实践中需要添加大量不含钛的普通铁矿（配比通常在 40% 以上），才能生产出合格的烧结矿，不仅增加了企业的矿石采购和运输成本，而且降低了炉料钒品位和铁水中钒的含量，限制了钒资源的深度利用。

为查明中低钛型的钒钛磁铁矿是否也存在上述问题，本论文系统地研究了某中低钛型钒钛磁铁精矿的制粒性能和烧结工艺参数对烧结产、质量的影响，以及烧结矿的产品性能和微观结构。

2　原料性能及研究方法

2.1　原料性能

研究所用含铁原料为钒钛磁铁矿、返矿，熔剂为生石灰、石灰石、白云石和硅石。钒钛磁铁精矿和熔剂的主要化学成分和粒度组成分别如表 1 和 2 所示。由表 1 可知，钒钛磁铁精矿的 TFe 为 62.89%，FeO 含量为 22.77%，TiO_2 含量为 4.52%，为某典型的中低钛型钒钛磁铁矿。生石灰、石灰石和白云石用于调节烧结混合料的制粒性能和碱度。由于该钒钛磁铁矿的 SiO_2 含量仅为 0.50%，试验过程中采用硅石调节混合料的硅含量。由表 2 可知，钒钛磁铁精矿 −200 目粒级占 80% 左右，但比表面积仅为 1 058 cm^2/g，与高钛型钒钛磁铁精矿类似，均存在比表面积较低和粒度较粗的特点。焦粉的工业分析和灰分的化学成分如表 3 所示。可见，焦粉的固定碳含量较高，为 84.14%。

表 1　钒钛磁铁精矿和熔剂的主要化学成分（%）

原料	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	V_2O_5	P	S	LOI
钒钛磁铁精矿	62.89	22.77	0.50	3.74	0.19	1.36	4.52	0.78	0.006 5	0.010	0.46
返矿	52.02	6.27	4.77	3.57	9.55	1.70	3.87	0.41	–	–	–
生石灰	1.72	–	1.03	0.72	84.55	0.33	4.01	–	–	–	10.00
石灰石	0.55	–	7.40	0.89	46.63	2.06	0.087	0.015	0.034	0.004 3	37.25
白云石	0.46	–	8.97	0.10	31.34	17.50	0.085	0.017	0.028	0.002 5	38.58
硅石	0.18	–	96.34	0.16	0.66	0.14	0.022	0.015	0.028	0.004 5	0.61

表 2　钒钛磁铁精矿的粒度组成及比表面积

粒度组成/%				比表面积/ $cm^2 \cdot g^{-1}$
+200 目	200 ~ 325 目	325 ~ 400 目	−400 目	
20.25	16.42	15.32	48.01	1 058

表 3　焦粉（干基）的工业分析及灰分的化学成分（%）

固定碳	挥发份	灰分	灰分化学成分				
			TFe	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2
84.14	3.63	12.23	5.03	3.77	0.99	32.57	45.44

2.2　研究方法

通过调节铁精矿、熔剂、焦粉和返矿的配比来调节混合料的 TFe、碱度、燃料配比和 MgO 含量。试验中生石灰消化 5 min，人工配料混匀后，再用 Φ600 mm × 250 mm 圆筒混合机制粒 3 ~ 5 min，然后将料布在烧结杯（Φ180 mm）中点火、烧结、冷却。点火制度为：温度（1 100 ± 50）℃，时间 2 min，负压 5 kPa；保温温度900 ℃，保温时间 1 min；烧结负压 10 kPa，冷却负压 5 kPa，冷却时间 3 min。

在上述条件下，系统考查制粒时间、制粒水分和生石灰用量等对制粒性能的影响，以及焦粉用量、混合料水分、碱度、料高和返矿配比对烧结的影响。烧结过程完成后，对烧结矿的产、质量指标和冶金性能、微观结构进行研究分析。

3　结果与讨论

3.1　钒钛磁铁精矿的制粒性能研究

在钒钛磁铁精矿用量 100%，外配返矿 30%，碱度 2.0，焦粉用量 5% 的条件下，考查了制粒时间、制粒水分和生石灰用量对混合料制粒性能的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

影响，主要评价指标为混合料的透气性指数、粒度组成和平均粒径，其结果如表4所示。

由表4可知，随着制粒时间的延长、制粒水分的提高、生石灰用量的增加，混合料的透气性指数、平均粒径呈逐渐增加的趋势。尤其是随着制粒水分由7.78%增加至8.65%，混合料的平均粒径由2.40 mm增加至5.82 mm；生石灰用量在4.5%～6.0%的范围内变化时，混合料的平均粒径增加的幅度不大。综合考虑，选择制粒时间4 min、混合料水分8.25%和生石灰用量4.5%的制粒参数进行后续的钒钛磁铁矿的烧结试验研究。

表4 制粒参数对中低钛型钒钛磁铁精矿制粒效果的影响

制粒时间/min	水分/%	生石灰用量/%	透气性指数/JPU	粒度组成/%						平均粒径/mm
				+8 mm	5～8 mm	3～5 mm	1～3 mm	0.5～1 mm	-0.5 mm	
3	7.78	4.5	0.094	0.00	3.42	19.18	60.29	14.65	2.47	2.32
4	7.78	4.5	0.097	0.00	6.16	16.31	61.09	15.58	0.85	2.40
5	7.78	4.5	0.105	0.38	7.97	23.59	55.15	11.60	1.31	2.69
4	7.78	4.5	0.097	0.00	6.16	16.31	61.09	15.58	0.85	2.40
4	8.25	4.5	0.147	2.46	21.75	35.77	37.94	2.06	0.02	3.62
4	8.65	4.5	0.252	6.98	65.78	22.00	5.22	0.10	0.00	5.82
4	8.25	4.5	0.147	2.46	21.75	35.77	37.94	2.06	0.02	3.62
4	8.25	5.0	0.154	8.04	14.61	37.25	44.13	2.32	0.02	3.88
4	8.25	5.5	0.176	9.18	17.83	31.34	38.56	3.03	0.06	3.94
4	8.25	6.0	0.220	1.13	23.61	56.49	15.77	2.94	0.06	4.22

3.2 钒钛磁铁精矿的烧结性能研究

在上述制粒性能研究结果的基础上，研究混合料水分、焦粉用量、混合料碱度和料层高度对烧结产质、量指标的影响，研究结果如表5所示。

表5 烧结参数对中低钛型钒钛磁铁精矿烧结产、质量指标的影响

焦粉用量/%	混合料水分/%	碱度	料层高度/mm	返矿配比/%	烧结速度/mm·min^{-1}	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/t·(m^2·h)$^{-1}$
5.0	7.78	2.0	600	30	18.94	65.21	49.80	1.176
5.0	8.25	2.0	600	30	19.81	65.41	52.67	1.229
5.0	8.65	2.0	600	30	18.59	65.27	46.67	1.159
4.7	8.25	2.0	600	30	18.62	61.28	51.60	1.064
5.0	8.25	2.0	600	30	19.81	65.41	52.67	1.229
5.3	8.25	2.0	600	30	18.94	68.59	50.87	1.214
5.0	8.25	2.0	600	30	19.81	65.41	52.67	1.229
5.0	8.25	1.8	600	30	18.58	64.13	45.83	1.209
5.0	8.25	1.6	600	30	18.42	62.15	45.33	1.198
5.0	8.25	1.2	600	30	17.94	65.05	48.18	1.123
5.0	8.25	0.8	600	30	17.29	67.31	50.60	1.205
5.0	8.25	2.0	600	30	19.81	65.41	52.67	1.229
5.0	8.25	2.0	650	30	18.70	66.15	52.18	1.212
5.0	8.25	2.0	700	30	18.04	66.53	52.60	1.203
5.0	8.25	2.0	600	30	19.81	65.41	52.67	1.229
5.0	8.25	2.0	600	40	19.71	65.30	52.07	1.176

由表5可知，当混合料水分为8.25%时，烧结速度最快，转鼓强度与利用系数均达最佳效果，分别为52.67%与1.229 t·(m^2·h)$^{-1}$，当水分过多或过少时，烧结产、质量指标变差；随着焦粉用量从4.7%增加至5.3%时，烧结矿的成品率增大，而转鼓强度呈现先增加后降低的趋

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

势；当烧结矿的碱度由 2.0 降低至 0.8 时，烧结矿的成品率和转鼓强度呈现先降低后增高的趋势，在碱度为 1.6 左右呈现低谷区；随着烧结混合料料层高度由 600 mm 增加至 700 mm，烧结速度降低，烧结矿的成品率和转鼓强度变化不大。增加返矿的配比，烧结产、质量指标变化不大。

3.3　烧结矿产品性能研究

采用钒钛磁铁精矿用量 100%，焦粉用量 5%，生石灰用量 4.5%，碱度为 2.0，混合料水分 8.25%，制粒时间 4 min，点火温度 1 100 ℃，点火时间 2 min，抽风负压 10 kPa，料高 700 mm 条件下获得的烧结矿试样进行物相、微观结构和冶金性能分析。

3.3.1　化学成分、物相组成与微观结构分析

烧结矿的主要化学成分如表 6 所示。可见，烧结矿 TFe、FeO 和 TiO_2 的含量分别为 52.02%、6.27% 和 3.87%。烧结矿的 XRD 图谱如图 1 所示。由图 1 可知，烧结矿中的主要物相为钛磁铁矿、钛赤铁矿、铁酸钙、钙钛矿和氢氧化钙；从各个物相的衍射峰的强度来看，烧结矿中钛磁铁矿、钛赤铁矿的含量较高，钙钛矿和铁酸钙的含量相对较少；XRD 图谱中的氢氧化钙衍射峰的出现是由于制样分析检测过程时烧结矿中游离的氧化钙吸收空气中的水分所致，其衍射峰的出现表明氧化钙没有矿化完全，且铁酸钙含量低，钛赤铁矿与氧化钙反应性能较差。

表 6　钒钛磁铁精矿烧结矿（碱度 2.0）的主要化学成分（%）

TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	V_2O_5	TiO_2	K_2O	Na_2O
52.02	6.27	4.77	3.57	9.55	1.70	0.41	3.87	0.024	0.050

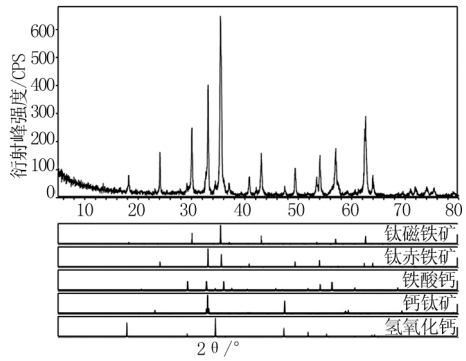


图 1　碱度为 2.0 时钒钛磁铁精矿烧结矿的 XRD 图谱

图 2 和图 3 为烧结矿光学显微镜图。可见，钛磁铁矿和钛赤铁矿结晶互联状况较好，形成片状（见图 2（a））；在钛赤铁矿与钛磁铁矿颗粒的周围出现了鱼骨状的钙钛矿（见图 2（b））；复合铁酸钙（SFCA）粘结相充填于钛赤铁矿颗粒的缝隙中，将铁氧化物颗粒紧紧连接在一起（见图 2（c））。

同时还可以观察到钛磁铁矿氧化不充分的情况。钛磁铁矿颗粒的外层为一圈白色的钛赤铁矿物相（见图 3（a））。其一方面是由于钛磁铁矿晶格中的 Ti 元素稳定了磁铁矿物相，阻碍了其充分氧化，另一方面是由于颗粒表面钛赤铁矿层比较致密，阻碍了空气向颗粒内部的扩散。此外，烧结矿中存在少量的钙钛矿（见图 3（b）与（c）），钙钛矿在橄榄石粘结相和铁氧化物连晶边缘析出，呈树枝状和鱼骨状。由于钙钛矿质硬而脆，其存在对烧结矿强度有不利影响。

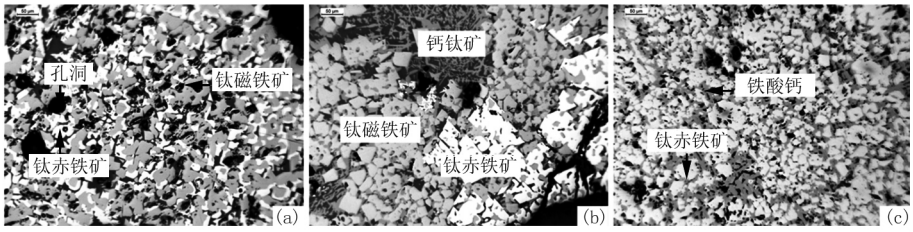


图 2　碱度为 2.0 时钒钛磁铁精矿烧结矿光学显微镜图

（a）—钛赤铁矿与钛磁铁矿结晶状况，×200 倍；（b）—钙钛矿与铁矿物结晶状况，×200 倍；（c）—铁酸钙与钛赤铁矿结晶互联状况，×200 倍

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

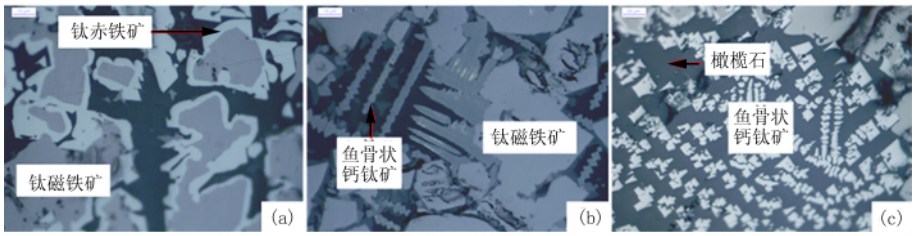


图3 碱度为2.0时钒钛磁铁精矿烧结矿光学显微镜图

(a)—钛磁铁矿氧化不充分状况,×1 000倍;(b)—鱼骨状钙钛矿与铁矿物结晶互联状况,×1 000倍;(c)—鱼骨状钙钛矿结晶状况,×500倍

3.3.2 冶金性能分析

对碱度为0.8和2.0的烧结矿进行了冶金性能试验研究,其还原度、低温还原粉化指数和高温软熔性能如表7所示。由表7可知,碱度为2.0时的还原度较高为81.46%,明显高于碱度为0.8时的70.03%还原度指标;而高碱度烧结矿的低温还原粉化较差,$RDI_{+3.15}$的含量仅为49.22%,低碱度的低温还原粉化性能好,$RDI_{+3.15}$的含量高达92.96%。两种碱度烧结矿的软化区间和滴落区间均较窄。

表8为不同碱度条件下烧结矿FeO的含量。可见,碱度为0.8样品的FeO含量明显高于碱度为2.0时的FeO含量,表明碱度0.8的烧结矿中钛赤铁矿含量低于碱度2.0时的烧结矿。根据文献报道[6~10],高碱度烧结矿中钛赤铁矿含量高,其在低温还原过程中由钛赤铁矿转变成钛磁铁矿时发生晶格畸变的可能性高于低碱度烧结矿,因此碱度0.8的烧结矿还原粉化性能较优。

表7 碱度为0.8和2.0时烧结矿的还原度、低温还原粉化与高温软熔性能比较

碱度	RI/%	还原粉化指数 $RDI_{+3.15}$/%	软化开始温度/℃	软化终了温度/℃	熔融滴落温度/℃	软化区间/℃	滴落区间/℃
0.8	70.03	92.96	1 082	1 154	1 228	90	74
2.0	81.46	49.22	1 076	1 140	1 226	64	86

表8 不同碱度条件下烧结矿FeO的含量

碱度	0.8	1.2	1.6	2.0
FeO含量/%	10.42	8.46	7.84	6.27

4 结 论

1) 某中低钛型钒钛磁铁精矿中大部分颗粒大于50 μm,粗颗粒以不规则的片、块状聚集在一起,颗粒棱角分明、表面较为光滑,比表面积较小仅为1 058 cm^2/g,成球性能较差。制粒研究表明水分对制粒效果影响较大,生石灰用量的影响较小。

2) 烧结试验表明,碱度对中低钛型钒钛磁铁矿的烧结性能影响较大,当烧结矿的碱度由2.0降低至0.8时,烧结矿的成品率和转鼓强度呈现先降低后增高的趋势,在碱度为1.6左右呈现低谷区。

3) 碱度为2.0的烧结矿中主要物相为钛磁铁矿、钛赤铁矿、铁酸钙、钙钛矿和氢氧化钙物相。钛磁铁矿和钛赤铁矿结晶互联状况较好,形成片状。熔蚀状的复合铁酸钙(SFCA)粘结相充填于钛赤铁矿颗粒的缝隙中,将铁氧化物颗粒紧紧连接在一起。同时,在铁氧化物和橄榄石物相的周围出现了鱼骨状的钙钛矿。

4) 烧结矿的冶金性能研究表明,碱度为2.0时的还原度较高为81.46%,明显高于碱度为0.8时的还原度指标,但高碱度烧结矿的低温还原粉化性能较差,仅为49.22%。

参考文献

[1] 郭宇峰. 钒钛磁铁矿固态还原强化及综合利用研究[D]. 长沙:中南大学,2007.

(下转第52页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5.8 技术指标先进,降本增效

项目投产后运行、维护费用降低。例如:通过发挥产能减少物流费用1 400万元、减少物料损失2 400万元,降低下游工序能耗6 724.7万元,合计降本增效10 524.7万元。邯钢第一料场封闭前和封闭后主要数据的对比见表1。

表1 邯钢第一料场封闭前后主要数据的对比

时间	降尘量 /t·km^{-2}·30 d	扬尘损耗 /万t	占地面积/亩	储量 /万t	物料温度/℃	含铁品位波动/%	日均卸车数量 /节车皮
封闭前	140	3	170	40	-7	±1	260
封闭后	20	0	120	70	-2	±0.5	330

6 结 语

1)邯钢物流公司网壳型封闭式第一原料场已经形成了一个经济、绿色环保的具有国内先进水平的现代化原料场,是国内钢铁企业封闭式料场成功运行的范例。

2)本工程可为以后国内钢铁企业料场建设、料场改造提供实物及数据参考。

参考文献

[1] 邯钢第一原料场施工图方案-中冶赛迪[K].中冶赛迪工程技术股份有限公司,2010.

[2] 北京起重运输机械研究所,武汉丰凡科技开发有限责任公司.DTⅡ(A)型带式输送机设计手册[M].北京:冶金工业出版社,2003.

[3] 赛迪技术中心公司环保原料场关键技术研究—原料场降尘量测量[R].重庆:赛迪技术中心公司,2011.

[4] DB13/339-1997,灰尘自然沉降量环境质量标准[S].

[5] 田武双.挡风抑尘技术在工业企业原料场节能减排中的应用[J].河北省科学院学报,2008,25(3):66-69.

(上接第28页)

[2] 中国地调局成都矿产综合利用研究所,国土资源部钒钛磁铁矿综合利用重点实验室.攀西钒钛磁铁矿资源及综合利用技术[M].北京:冶金工业出版社,2015.

[3] 韩秀丽,王海峰,刘丽娜,等.碱度对钒钛烧结矿显微结构的影响[J].钢铁钒钛,2009,30(3):56-60.

[4] 王英杰,韦火明,刘海滨,等.低碱度钒钛烧结矿生产实践[C]//河北省冶金学会炼铁技术暨学术年会论文集,2010:46-48.

[5] 王强.钒钛磁铁精矿烧结特性及其强化技术的研究[D].长沙:中南大学,2012.

[6] Yu Zhengwei,Li Guanghui,Jiang Tao,et al. Effect of Basicity on Titanomagnetite Concentrate Sintering[J]. ISIJ International,2015,55(4):907-909.

[7] Jiang Tao,Yu Zhengwei,Peng Zhiwei,et al. Preparation of BF Burden from Titanomagnetite Concentrate by Composite Agglomeration Process(CAP)[J]. ISIJ International,2015,55(8):1 599-1 607.

[8] 甘勤,何木光,何群.FeO对钒钛烧结矿产质量影响的研究[J].烧结球团,2009,34(1):14-19.

[9] 白永强,程树森,赵宏博,等.钒钛烧结矿还原粉化过程的矿相分析[J].烧结球团,2011,36(2):1-6.

[10] 单继国,任志国,刘淑桂.关于承钢高碱度钒钛烧结矿低温还原粉化性的探讨[J].钢铁钒钛,1992,(4):25-29.

(上接第33页)

[8] Salah D. M. Hasan,Delba N. C. Melo,Rubens M. Filho. Simulation and response surface analysis for the optimization of a three-phase catalytic slurry reactor[J]. Chemical Engineering and Processing,2005,44(3):335-343.

[9] 孙传智,李爱群,缪长青,等.基于响应面法的系杆拱桥吊杆初内力优化[J].中国公路学报,2012,25(3):94-99.

[10] 吕辉,于德介,谢展,等.基于响应面法的汽车盘式制动器稳定性优化设计[J].机械工程学报,2013,49(9):55-60.

[11] 杜浩冉,郑学玲,韩小贤,等.响应面法优化混合发酵制作冷冻面团馒头的复合食品添加剂配方[J].食品科学,2015,36(12):36-43.

[12] 吴彦瑜,周少奇,覃芳慧,等.响应面法优化Fenton处理难降解反渗透垃圾浓缩渗滤液[J].环境工程学报,2010,4(11):2 494-2 498.

[13] 王震,苏春阳,潘明旭,等.响应曲面法分析和优化铁水KR法脱硫工艺[J].特殊钢,2015,36(3):5-8.

[14] 杨德香,袁龙飞,杨继生,等.响应曲面法优化银阳极泥氯化提金工艺[J].矿冶,2014,23(1):61-63.

[15] 严浩,彭文杰,王志兴,等.响应曲面法优化电解锰阳极渣还原浸出工艺[J].中国有色金属学报,2013,23(2):528-534.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net