

安康地区某钒钛磁铁矿工艺矿物学研究

惠 博 杨耀辉 陈 伟 邓 冰

(中国地质科学院矿产综合利用研究所 四川 成都 610041)

摘 要: 利用 X 射线荧光光谱分析(XRF)、光学显微镜、扫描电镜(SEM)、X 射线能谱探针(EDS)等手段对安康地区某钒钛磁铁矿的工艺矿物学特征进行了研究。原矿化学分析结果显示,矿石中可供选矿回收的主要元素为钛和铁,其品位分别为 20.9%、7.67%。矿物鉴定结果表明,矿物类型主要为:钛磁铁矿(16.8%)、钛铁矿(8.81%)、硫化物(1.10%)、脉石矿物(73.29%)。矿物工艺粒度特征表明有用矿物钛磁铁矿、钛铁矿、硫化物粒径主要集中在 500~100 μm ,脉石矿物相对于有用矿物较粗。元素平衡配分结果表明,铁和钛的理论品位分别为 52.44% 和 47.83%,分布率分别为 41.65% 和 54.30%。阐明了影响选矿指标的因素,为制定合理的选冶工艺提供了理论依据。

关键词: 钒钛磁铁矿; 工艺矿物学; 赋存状态; 品位

中图分类号: TF041,TD92 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)06-0088-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.06.016 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Study on Process Mineralogy of a Titanium Magnetite in Ankang Area

Hui Bo ,Yang Yaohui ,Chen Wei ,Deng Bing

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources ,Chengdu 610041 ,Sichuan ,China)

Abstract: The process mineralogy characteristics of a titanomagnetite in Ankang region were studied by means of X-ray fluorescence spectrometry (XRF), optical microscope, scanning electron microscope (SEM), X-ray energy spectrum probe(EDS) etc. The chemical analysis results of the crude ore show that the main elements available for beneficiation and recovery in the ore are titanium and iron, with grade of 20.9% and 7.67% respectively. Mineral identification results show that the mineral types are mainly titanomagnetite(16.8%), ilmenite(8.81%), sulfide(1.10%), gangue minerals(73.29%). The particle size characteristics of mineral technology show that the particle sizes of useful minerals titanomagnetite, ilmenite and sulfide are mainly in the range of 500~100 μm , which are closely linked in different forms. Equilibrium of elements show that the theoretical grade of iron and titanium are 52.44% and 47.83%, respectively, and the distribution rates of iron and titanium are 41.65% and 54.30%, respectively. The factors affecting the beneficiation indexes are clarified, which provides a theoretical basis for the formulation of a reasonable beneficiation and metallurgy process.

Key words: vanadium-titanium magnetite, process mineralogy, occurrence state, ore grade

0 引言

钒钛磁铁矿作为一种富含铁、钛、钒的复合型矿

石,其中的钛元素是我国最主要的钛资源来源之一^[1-2],伴随国民经济的发展,各国对钒、钛、铁的需求量广泛增加。我国高品位的钒钛磁矿主要分布于

收稿日期: 2020-05-12

资助项目: 四川省科技计划资助(2019YJ0268)。

作者简介: 惠 博(1984—),男,陕西西安人,高级工程师,长期从事矿物学、岩石学和矿床学研究。E-mail: huiibo0728@foxmail.com。通讯作者: 杨耀辉(1985—),男,副研究员,主要从事黑色金属、有色金属选矿工艺及药剂研究工作。E-mail: yangyaohuiyyh@126.com。

攀西地区 相对低品位的钒钛磁铁矿研究却较少,然而陕西地区蕴藏有大量低品位的钒钛磁铁矿,为综合利用该地区的钒钛磁铁矿,开展工艺矿物学研究是非常有必要的^[3-5]。笔者通过多种分析手段对陕西安康地区某钛磁铁矿进行工艺矿物学研究,查明了该矿的化学成分、矿物组成及主要矿物的产出形式以及有价元

素的赋存状态,为制定合理的选冶工艺提供理论依据。

1 物质组成

1.1 化学组成

通过 X 射线荧光光谱、ICP-MS 等方法对样品进行了化学组成分析,结果见表 1。

表 1 原矿化学组成
Table 1 Chemical components of raw ores

	TiO ₂	TFe	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P	Cu	Co	Ni	Sc
	7.67	20.9	19.1	8.63	7.3	4.18	0.41	12.58	32.22	0.063	0.003 59	0.016	0.002 3	0.001 91

分析结果表明:原矿中 TFe 和 TiO₂ 组分含量均较低,分别仅为 20.9%、7.67%,属低品位钒钛磁铁矿;为达到富集有用矿物的目的,需要选矿排除或降低脉石组分的含量,主要为 SiO₂,含量高达 32.22%,有害杂质磷和硫的含量均较低。

1.2 矿物组成

采用光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线能谱、X 射线衍射等方法鉴定和统计,从矿石加工利用角度,将矿物分为钛磁铁矿(包含微量的赤铁矿和客晶矿物)、钛铁矿(粒状钛铁矿)、金属硫化物和脉石矿物四大类(表 2)。

2 矿石中各矿物的嵌布特征

2.1 工艺粒度

矿物的原生粒度是重要的矿石性质,对选矿工艺有较大的影响^[6-7]。该钛磁铁矿的矿物组成简单,主要的有用矿物为钛磁铁矿、钛铁矿及硫化物,总体粒度较细,它们的原生粒度统计见表 3。

从表 3 可以看出,主要矿物的工艺粒度特征为:钛磁铁矿主要集中在 500~100 μm;钛铁矿主要集中在 200~75 μm;硫化物大多分布在 200~100 μm,其相对大小含量分布较均匀。将脉石矿物作为整体进行统计,脉石工艺粒度分布范围较广,主要集中在 2 000~200 μm,相对于主要有用矿物较粗。

表 2 原矿矿物组成
Table 2 Mineral components of raw ore

工艺矿物分类	矿物组成	含量/%	总计/%
钛磁铁矿	钛磁铁矿	16.80	16.80
钛铁矿	钛铁矿	8.81	8.81
硫化物	黄铁矿、磁黄铁矿	1.10	1.10
	楣石	2.30	
	绿泥石	33.10	
	辉石和角闪石	16.64	
脉石矿物	斜长石	17.94	73.29
	黑云母	1.43	
	粘土矿物、蛇纹石、褐铁矿、锆石、磷灰石等	1.88	

表 3 主要矿物工艺粒度
Table 3 Technological granularity of main minerals

	粒度组成/%								
	5 000 μm	3 000 μm	2 000 μm	1 000 μm	500 μm	200 μm	100 μm	75 μm	~75 μm
钛磁铁矿			0.51	3.11	19.76	45.12	18	8.95	4.55
累计筛下	100	100	99.49	96.38	76.62	31.5	13.5	4.55	0
钛铁矿			1.88	3.45	8.42	42.13	20.21	16.36	7.55
累计筛下	100	100	98.12	94.67	86.25	44.12	23.91	7.55	0
硫化物			7.13	9.98	29.33	27.32	11.35	14.89	
累计筛下	100	100	100	92.87	82.89	53.56	26.24	14.89	0
脉石	1.23	8.35	12.69	22.16	27.65	15.31	5.96	3.32	3.33
累计筛下	98.77	90.42	77.73	55.57	27.92	12.61	6.65	3.33	0

2.2 主要矿物嵌布特征

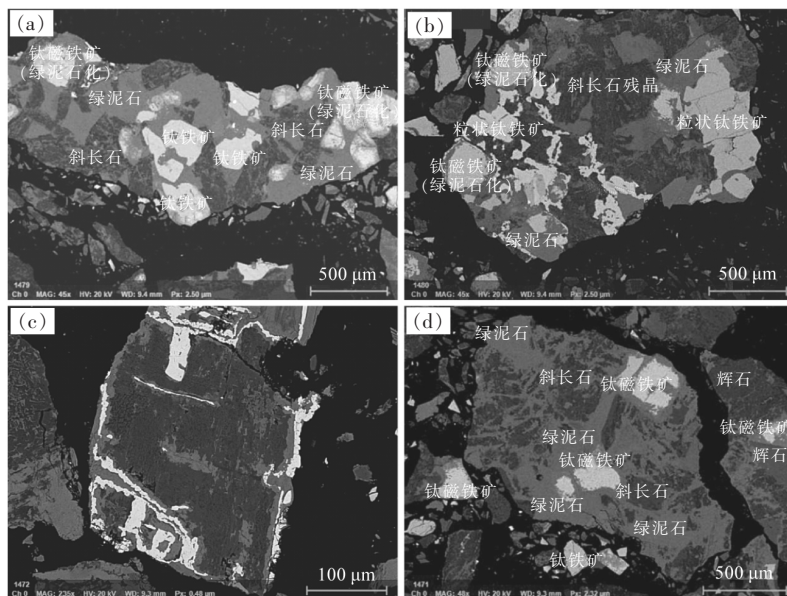
钛磁铁矿、钛铁矿、硫化物以及脉石矿物嵌布特

征如图 1 所示。

1) 钛磁铁矿

矿石中钛磁铁矿边缘和内部常被绿泥石交代,表现出和光学显微镜下一致的特征:表面粗

糙,结构残破,这种特征决定了其在磨矿条件下难以完全解离。



(a)钛磁铁矿;(b)钛铁矿;(c)黄铁矿;(d)脉石矿物

图1 主要矿物嵌布特征

Fig.1 Distribution characteristics of major minerals

钛磁铁矿的蚀变特征对选铁作业有以下两个方面的影响:①绿泥石交代钛磁铁矿,其晶体内部和边缘产生了大量的绿泥石等脉石矿物,导致钛磁铁矿中铁理论品位降低,不同钛磁铁矿的铁理论品位在一定范围波动。②蚀变作用对钛磁铁矿晶体结构的破坏,原生钛磁铁矿本身广泛发育固溶体分离结构(与攀枝花钒钛磁铁矿类似)^[8-9],解离和固溶体的存在导致钛磁铁矿内部存在软弱面,蚀变作用导致钛磁铁矿更容易泥化,难以完全解离。常规磨矿下,

对-0.074 mm(占比73%)产品进行检查,发现仅10%~15%钛磁铁矿完全解离。因此,要想通过细磨增加钛磁铁矿的解离度,进而提高铁精矿的品位,但由于绿泥石从外部和内部广泛交代钛磁铁矿,导致即使细磨,钛磁铁矿也很难完全解离。

通过X射线能谱点分析(表4)、测区分析(表5)和单矿物化学分析对钛磁铁矿中的铁进行了化学分析,利用三种方法对其中铁的理论品位进行了研究。

表4 钛磁铁矿X射线能谱测点分析

Table 4 X-ray energy spectrum analysis of titanomagnetite

类型	测区	w/%							
		Fe	Ti	V	Si	Al	Ca	Mg	O
纯钛磁铁矿干净点	01	65.110	8.830	0.540	0.410	0.800			24.310
	02	65.660	8.480	0.550	0.510	0.750	0.210	0.540	23.300
	03	65.040	8.800	0.600	0.310	0.870	0.030		24.350
	04	65.110	8.410	0.510	0.320	0.840		0.140	24.670
	05	65.430	8.880	0.310	0.480	0.740			24.160
	06	64.870	8.910	0.340	0.560	0.740	0.050	0.060	24.470
	07	64.890	8.870	0.410	0.660	0.760	0.300	0.220	23.890
	08	65.780	8.420	0.550	0.640	0.690			23.920
	09	65.410	8.560	0.560	0.610	0.470			24.390
	10	65.910	8.360	0.490	0.460	0.650	0.110	0.210	23.810
最大值		65.910	8.910	0.600	0.660	0.870	0.300	0.540	24.670
最小值		64.870	8.360	0.310	0.310	0.470	0.050	0.060	23.300
平均值		65.321	8.652	0.486	0.496	0.731	0.140	0.230	24.127

表 5 钛磁铁矿 X 射线能谱测区分析
Table 5 Analysis of X-ray energy spectrum measurement zone of titanium magnetite

类型	测区	w / %							
		Fe	Ti	V	Si	Al	Ca	Mg	O
弱蚀变	01	60.690	10.000		1.740	2.340			24.950
	02	51.770	8.310	0.550	5.060	2.860	4.160	1.090	26.200
	03	59.450	7.940	0.590	2.730	2.360	1.570		25.360
	04	57.060	7.010	0.580	3.990	1.710	4.000		25.660
	05	52.470	9.150	0.640	4.530	2.810	3.460		26.940
	06	46.340	9.770	0.640	6.260	2.540	6.820		27.630
中等蚀变	07	48.590	8.980	0.520	6.270	3.000	5.350		27.300
	08	49.940	8.300	0.740	5.830	2.390	5.820		26.990
	09	49.110	8.420	0.670	5.950	2.730	5.260	1.020	26.850
	10	50.430	9.180	0.520	5.270	3.130	4.360		27.120
	11	25.650	9.810	0.020	12.410	6.060	10.430	1.940	33.680
	12	37.390	8.830	0.630	9.330	4.910	7.580	1.980	29.350
强蚀变	13	42.620	11.120	0.510	5.990	2.740	7.630	1.380	28.020
	14	42.080	11.690	0.440	6.520	2.860	7.960		28.450
	15	42.400	8.350	0.600	7.620	3.320	7.230	1.230	29.250
	最大值	60.690	11.690	0.740	12.410	6.060	10.430	1.980	33.680
	最小值	25.650	7.010	0.020	1.740	1.710	1.570	1.020	24.950
	平均值	47.733	9.124	0.550	5.967	3.051	5.830	1.440	27.583

最终认定从钛磁铁矿的单矿物化学分析结果 Fe 52.44% ,TiO₂14.1% ,从研究原理上更接近选矿的实际情况 ,故将其测试结果作为铁和钛平衡配分参数。

2) 钛铁矿

钛铁矿以他形晶粒状的单体或与钛磁铁矿形成连体充填于脉石矿物间隙中 ,粒度较粗 ,接触界线平

坦 ,是钛铁矿的主要产出形态。粒度较细的自形~半自形钛铁矿包于脉石中 ,数量少 ,难与脉石解离。

采用 X 射线能谱测区分析对钛的理论品位进行了分析(表 6) ,其中 ,未蚀变类型钛铁矿含钛量明显高于蚀变类型。整体来看 ,钛铁矿中 TiO₂ 最大值 51.250% ,最小值 45.120% ,平均值 47.832%。本组数据将作为钛的平衡配分参数。

表 6 钛铁矿 X 射线能谱测区分析
Table 6 X-ray energy spectrum analysis of Ilmenite

类型	测区	w / %									
		TiO ₂	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	CoO	MnO	FeO
未蚀变	01	49.570	0.106	0.010	0.043	0.103	0.449	0.000	0.074	1.330	48.315
	02	51.250	0.090	0.010	0.021	0.080	0.230	0.011	0.045	1.230	47.033
	03	48.370	0.070	0.020	0.021	0.070	0.450	0.000	0.032	1.110	49.857
	04	49.780	0.081	0.000	0.031	0.060	0.480	0.000	0.085	1.320	48.163
	05	48.120	0.111	0.020	0.002	0.000	0.370	0.000	0.074	1.070	50.233
	06	48.480	0.102	0.000	0.007	0.070	0.390	0.010	0.078	0.980	49.883
	07	48.150	0.081	0.000	0.134	0.000	0.330	0.000	0.035	1.430	49.840
	08	48.310	0.083	0.000	0.210	0.000	0.310	0.000	0.042	0.770	50.275
	09	47.780	0.059	0.010	0.010	0.120	0.450	0.000	0.041	0.000	51.530
	10	46.174	0.106	0.020	0.043	0.103	0.449	0.000	0.074	1.330	51.701
	11	46.512	0.082	0.022	0.103	0.028	0.570	0.000	0.082	1.094	51.507
	12	47.382	0.087	0.032	0.002	0.070	0.498	0.000	0.049	1.262	50.618
	13	47.051	0.080	0.009	0.107	0.004	0.481	0.012	0.085	1.113	51.058
	14	45.120	1.110	0.110	1.560	0.770	0.510	0.000	0.084	1.080	49.656
	15	45.430	1.140	0.460	1.430	0.650	0.660	0.010	0.091	1.090	49.039
	最大值	51.250	1.140	0.460	1.560	0.770	0.660	0.012	0.091	1.430	51.701
	最小值	45.120	0.059	0.000	0.002	0.004	0.230	0.000	0.032	0.000	47.033
	平均值	47.832	0.226	0.048	0.248	0.142	0.442	0.003	0.065	1.081	49.914

3) 金属硫化物

金属硫化物主要包括黄铁矿和磁黄铁矿。呈他形晶粒状或集合体分布于脉石矿物间隙或铁、钛氧化物与脉石矿物接触处,接触界线平坦光滑,粒度较粗,是硫化物的主要产出特征。

X射线能谱探针点分析(定性)结果表明:黄铁矿含 S39.44%,Fe60.56%,磁黄铁矿含 S52.83%,Fe43.69%,Ti0.57%,Co2.9%(表7)。

4) 脉石矿物

脉石矿物主要为绿泥石、辉石、斜长石和榍石等。根据矿物之间的相互穿插关系,判断出绿泥石是后期矿物,对辉石、斜长石进行了强烈的交代,并对矿石原始结构进行了破坏和改造,形成了诸如边

缘交代结构、交代残余结构、骸晶结构、交代假象等特殊结构。

表7 硫化物X射线能谱点分析
Table 7 X-ray point analysis of Sulfides

矿物名称	w/%			
	S	Ti	Fe	Co
磁黄铁矿	52.83	0.57	43.69	2.9
黄铁矿	39.44		60.56	

X射线能谱点分析结果(表8)表明,绿泥石含Fe32.52%,由于绿泥石对钛磁铁矿进行了强烈的交代,二者紧密共生,难以完全解离,因此绿泥石是导致钛磁铁矿的铁理论品位降低的重要因素。

表8 主要脉石化学组成
Table 8 Chemical compositions of main veins

矿物名称	w/%							
	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Ti	Na
绿泥石	37.31	5.2	8.14	14.34	2.48	32.52		
辉石	42.09	10.04	1.78	21.98	17.19	6.92		
榍石	35.49		3.09	15.01	20.32	5.06	21.02	
斜长石	45.61		14.43	24.87	5.12	0.59		7.23 2.15

3 有价值元素的赋存状态

矿石中有益和有害元素的赋存状态是拟订选矿试验方案的重要依据。研究元素的赋存状态是矿石物质组成特性研究中必不可少的一部分,也是一项细致而又复杂的工作^[10-12]。

对样品典型位置进行相分析,更能直观地看出矿石的矿物组成、嵌布关系、蚀变特征以及铁和钛的

赋存状态。

为定量确定铁和钛的理论指标和损失途径,对其进行了配分及平衡。钛磁铁矿和钛铁矿作为铁元素和钛元素主要载体矿物,是其工业应用矿物。

通过对其理论品位和矿物含量的研究计算出其相对分布率,反映其理论回收率;同时对其理论损失途径进行了研究,即明确铁和钛的合理损失以及不合理损失(表9)。

表9 矿石中铁、钛的平衡配分
Table 9 Equilibrium distribution of iron and titanium in ores

类型	铁平衡配分				钛平衡配分				%
	矿物量	矿物中Fe含量	Fe分量	Fe分布率	矿物量	矿物中TiO ₂ 含量	TiO ₂ 分量	TiO ₂ 分布率	
钛磁铁矿	16.80	52.44	8.81	41.65	16.80	14.10	2.37	30.53	
钛铁矿	8.81	38.82	3.42	16.17	8.81	47.83	4.21	54.30	
硫化物	1.10	47.30	0.52	2.46	1.10	0.07	0.00	0.01	
总脉石	73.29	11.46	8.40	39.71	73.29	1.61	1.18	15.21	
总计	100.00		21.15	100.00	100.00		7.76	100.04	
平衡系数	Fe绝对配分=21.00(Fe分量总和)/20.9 (原矿全铁)=101.19%				TiO ₂ 绝对配分=7.76(TiO ₂ 分量总和)/7.67 (原矿TiO ₂)=101.22%				

4 矿石性质对选矿指标的影响

综合分析来看,影响选铁的因素有四方面:①由

于绿泥石交代钛磁铁矿,铁理论品位为52.44%,难以取得高质量铁精矿;②铁的理论回收率为41.65%,39.71%的铁进入总脉石中,绿泥石产生了重要影响;③

钛磁铁矿和绿泥石难以完全解离,这对磁选将造成较大影响,如常规磨矿下,对 -0.074 mm (占比73%)产品进行检查,发现仅10%~15%钛磁铁矿完全解离;④磁选过程中,绿泥石为弱磁性矿物,会和钛磁铁矿相互夹带,从而影响铁精矿质量。

影响选钛的因素有四个:①钛的理论品位为47.83%,相比较钛磁铁矿,钛铁矿蚀变较弱。影响钛理论品位主要有:以榍石为代表的交代作用、钛铁矿晶体内部的固溶体和包裹体的影响;②钛的理论回收率为54.3%,钛磁铁矿、脉石和硫化物中钛的分布率分别为30.53%、0.01%和15.21%;③磨矿方面,通过对浮钛物料进行检查,粒状钛铁矿解离较好,定性分析其解离度在80%~90%,解离度较高;④浮选过程中的主要问题在于如何分离钛铁矿、辉石和绿泥石。

而绿泥石广泛交代辉石,二者相互穿插,难以解离,这对选钛工艺是一个挑战。

5 结论

研究表明:矿石中可供选矿回收的主要元素为钛和铁,其品位分别为20.9%、7.67%,主要矿物类型为:钛磁铁矿(16.8%),钛铁矿(8.81%),硫化物(1.10%),脉石矿物(73.29%)。矿物工艺粒度特征表明有用矿物钛磁铁矿、钛铁矿、硫化物粒径主要集中在 $500\sim 100\text{ }\mu\text{m}$,脉石矿物相对于有用矿物较粗。铁和钛的理论品位分别为52.44%和47.83%,分布率分别为41.65%和54.30%。选铁过程中,多注意绿泥石性质的影响;选钛过程中,则要多注意如榍石、辉石和绿泥石等矿物对矿石性质的影响。

参考文献

- [1] Wang Xun, Han Yuexin, Li Yanjun *et al.* Research status on comprehensive development and utilization of vanadium-titanium magnetite [J]. *Metal Mine* 2017(6): 33-37.
(王勋, 韩跃新, 李艳军. 钒钛磁铁矿综合利用研究现状[J]. 金属矿山 2017(6): 33-37.)
- [2] Li Zhenqian, Zou Dingzhao. Experimental research on the recycle of ilmenite from a vanadium titanium magnetite ore by the combined magnetic-flotation process [J]. *Metal Mine* 2017(1): 67-72.
(李振乾, 邹定朝. 磁-浮联合工艺回收某钒钛磁铁矿石中钛铁矿试验[J]. 金属矿山 2017(1): 67-72.)
- [3] Guo Ke, Zhang Zhiqiang, Wang Shaoyan *et al.* Study on separation technology of titanium and iron from vanadium-titanium magnetite concentrate [J]. *Metal Mine* 2019(8): 113-119.
(郭客, 张志强, 王绍艳, 等. 钒钛磁铁矿中钛铁分离技术研究[J]. 金属矿山 2019(8): 113-119.)
- [4] Liu Yan, Li Qingcui, Wang Yang. Process mineralogical research on vanadium titanomagnetite in ziyang of shanxi province [J]. *Mining Engineering* 2018, 16(1): 4-7.
(刘岩, 李青翠, 王洋. 陕西紫阳某地钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 矿业工程 2018, 16(1): 4-7.)
- [5] Fu Rao, Deng Feiyue, Zhang Ligang *et al.* Discussion on preconcentration process of ultra-low grade vanadium-titanium magnetite in daxigou shaanxi Province [J]. *Information Resources and Engineering* 2019, 34(5): 53-55.
(傅饶, 邓飞跃, 张立刚, 等. 陕西大西沟超低品位钒钛磁铁矿预富集工艺探讨[J]. 信息资源与工程 2019, 34(5): 53-55.)
- [6] Li Liang, Luo Jianlin. Process mineralogy studies on V-Ti magnetite in Panzhihua region [J]. *Metal Mine* 2010(4): 89-92.
(李亮, 罗建林. 攀枝花地区某钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 金属矿山 2010(4): 89-92.)
- [7] Zhao Liangliang, Zheng Cuiyong, Wei Mingqiang *et al.* Geological characteristics and vanadium occurrence of Ziyang vanadium deposit in Ankang area, Shanxi province [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)* 2019, 71(3): 45-49.
(赵亮亮, 郑崔勇, 魏明强, 等. 陕西安康地区紫阳钒矿地质特征及钒赋存状态研究[J]. 有色金属(矿山部分) 2019, 71(3): 45-49.)
- [8] Chen Xiaoping, Yang Jinzhong, Mao Yilin *et al.* An innovative process for comprehensive utilization of low-grade clay-vanadium ores [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)* 2010(5): 9-12.
(陈晓青, 杨进忠, 毛益林, 等. 低品位黏土型钒矿资源综合利用新技术研究[J]. 有色金属(选矿部分) 2010(5): 9-12.)
- [9] Liu Caize, Qin Jianhua, Li Mingxiong *et al.* Metallogenic element enrichment process modelling and mineral resource assessment of the Fe-Ti-V oxide deposits in the Panxi district, Sichuan, SW China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(3): 758-775.

(下转第123页)

- search International 2014 21(Supplement 1) : 99–103.
- [4] Kim H S ,Chang C H ,Lee H G.Evolution of inclusions and resultant microstructural change with Mg addition in Mn/Si/Ti deoxidized steels[J].Scripta Materialia 2005 53(1) : 1255–1258.
- [5] Sun Rongyao ,Hao Shiming.Investigation on the improvement of cutting properties of tool steels by the addition of rare earth elements[J].Iron and Steel ,1982 ,17(5) : 58–63.
(孙荣耀 郝士明.稀土元素改善工具钢切削性能的研究[J].钢铁 ,1982 ,17(5) : 58–63.)
- [6] Zhao Maiqun ,Wang Weike ,Zhang Hao ,et al.Analysis on sulphide inclusions in free-cutting 42CrMoS steel modified by rare earth elements[J].Heat Treatment of Metals 2004 29(11) : 20–23.
(赵麦群 王伟科 张颢 等.稀土改性 42CrMoS 易切削钢中的硫化物夹杂分析[J].金属热处理 2004 29(11) : 20–23.)
- [7] Wang Jinlong ,Qiao Aiyun ,Zhang Xinggang.Summary on mechanism of machinability and control of sulfide for sulphur free-cutting steel[J].Science and Technology of Baotou Steel 2015 41(1) : 30–32.
(王金龙 乔爱云 张行刚.含硫易切削钢切削性能机理与硫化物控制简述[J].包钢科技 2015 41(1) : 30–32.)
- [8] Xu Chuancai ,Zhang Longshui.The effect of rare earth on the structure and properties of bearing steel[J].Journal of Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering ,1987 50(2) : 71–78.
(许传才 张隆水.稀土对轴承钢组织和性能的影响[J].西安冶金建筑学院学报 ,1987 50(2) : 71–78.)
- [9] Zhang Shuo ,Yang Shufeng ,Li Jingshe ,et al.Morphology of MnS inclusions in Y15 high sulfur free-cutting steel by tellurium treatment[J].Iron and Steel 2017 52(9) : 27–33 41.
(张硕 杨树峰 李京社 等.碲处理控制 Y15 易切削钢中 MnS 夹杂物形貌[J].钢铁 2017 52(9) : 27–33 41.)
- [10] Binnewies M ,Milke E.Thermochemical data of elements and compounds[J].Applied Mathematics & Mechanics ,1999 31(1) : 55–65.
- [11] Hu D L ,Liu Hui ,Xie J B ,et al.Analysis of precipitation behavior of MnS in sulfur-bearing steel system with finite-difference segregation model[J].Journal of Iron & Steel Research International 2018 25(8) : 803–812.
- [12] Jiang Laizhu ,Cui Kun.Experimental study and thermodynamic calculation on the formation of MnS-RE₂S₃ and (Mn ,Ca) S-RE₂S₃ in free cutting steel[J].Journal of the Chinese Society of Rare Earths ,1993 ,11(1) : 46–66.
(江来珠 崔崑.易切削钢中共晶相 MnS-RE₂S₃ 和 (Mn、Ca) S-RE₂S₃ 形成的试验研究及热力学计算[J].中国稀土学报 , 1993 ,11(1) : 46–66.)

编辑 杨冬梅

(上接第 93 页)

- (刘才泽 秦建华 李明雄 等.四川攀西地区钒钛磁铁矿成矿元素富集过程模拟与资源潜力评价[J].吉林大学学报(地球科学版) 2013 43(3) : 758–775.)
- [10] Hui Bo ,Chen Xiaoqing ,Xu Ying.Study on vanadium occurrence state in shale-type vanadium ore and forecast of beneficiation index[J].Mining and Metallurgical Engineering 2013 33(1) : 37–40.
(惠博 陈晓青 徐莺.某页岩型钒矿中钒的赋存状态研究及选别指标预测[J].矿冶工程 2013 33(1) : 37–40.)
- [11] Zhong Wen ,Yin Jin ,Huo Dongchan ,et al.Geological characteristics of shimen vanadium deposit in chongyang county ,Hubei province and analysis of occurrence status of vanadium[J].Resources Environment and Engineering 2018 32(4) : 523–527.
(钟温 尹近 霍东婵 等.湖北省崇阳县石门钒矿地质特征及钒的赋存状态分析[J].资源环境与工程 2018 32(4) : 523–527.)
- [12] Yang Yaohui ,Hui Bo ,Liao Xiangwen ,et al.Beneficiation test on low-grade and refractory olivine-pyroxenite type vanadium-titanium magnetic ore from hongge[J].Metal Mine 2016(10) : 77–82.
(杨耀辉 惠博 廖祥文 等.红格低品位难选橄辉岩型钒钛磁铁矿石选矿试验[J].金属矿山 2016(10) : 77–82.)

编辑 邓淑惠