酸性球团矿矿相结构及冶金性能研究

丁尚尚，刘 磊，韩秀丽，张 玙，周 祥

（华北理工大学矿业工程学院，河北 唐山 063210）

摘 要：球团矿的矿物组成和显微结构是影响其冶金性能的重要因素，采用偏光显微镜和 X 射线衍射仪对不同钢厂酸性球团矿的矿物种类及含量、形貌大小、分布规律和气孔特征进行了定量研究，并结合冶金性能测试，探讨了酸性球团矿的矿相结构影响其质量的根本原因。结果表明，邯钢、唐钢和承钢球团矿的显微结构较均匀，主要由抗压强度较好的磁铁矿、赤铁矿和铁橄榄石胶结而成；攀钢球团矿抗压强度表现最差，其对应的显微结构不均匀，外部带以钛赤铁矿粒状结构为主，内部带以钛磁铁矿熔蚀结构为主，金属相间晶键连接性弱。承钢球团矿显微结构以分布均匀的大气孔居多，且气孔间连通性好，其还原性明显优于其他钢厂。

关键词：酸性球团矿；矿物组成；显微结构；抗压强度；还原性

中图分类号：TF046.6 **文献标志码：**A **文章编号：**1004-7638(2019)05-0120-06

DOI：10.7513/j.issn.1004-7638.2019.05.020 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

听语音 聊科研 与作者互动

Study on Mineralogical Structures and Metallurgical Properties of Acid Pellets

Ding Shangshang, Liu Lei, Han Xiuli, Zhang Di, Zhou Xiang

(College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: The mineral composition and microstructures of pellets are important factors affecting their metallurgical properties. The mineral types, contents, morphology, size, distribution and pore characteristics of acid pellets from different steel works were quantitatively studied by polarizing microscope and X-ray diffraction, and metallurgical properties were tested. The fundamental reason for the mineral phase structure of acid pellets affects the quality of pellets was discussed. The results show that microstructures of acid pellets in Hangang, Tanggang and Chenggang steel mills are relatively uniform. They are mainly cemented by magnetite, hematite and iron olivine with better compressive strength. The compressive strength of Pangang's pellets is the lowest, and the corresponding microstructures are not uniform. The outer zone is dominated by the granular structure of ilmenite hematite, while the internal zone is mainly composed of titanomagnetite corrosion structure, and the connectivity between metal phases is weak. The microstructures of Chenggang's pellets are mostly uniformly distributed and have good connectivity between the pores. The reducibility of the Chenggang's pellets is obviously better than the those of other pellets.

Key words: acid pellet, mineral composition, microstructure, compressive strength, reducibility

收稿日期：2019-01-23

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51574105)，河北省钢铁联合基金资助项目(E2016209299)，华北理工大学大学生创新创业训练计划项目(X20180239)。

作者简介：丁尚尚(1997—)，女，河北邯郸人，本科生，主要从事工艺矿物学研究。**通讯作者：**刘 磊(1988—)，男，讲师，主要从事工艺矿物学研究；E-mail: heutliulei@163.com。

0　引言

酸性球团矿在粒度均匀性、抗磨性、含铁量、容积密度等方面都比烧结矿优越,它与高碱度烧结矿搭配入炉冶炼是目前较为理想的高炉炉料结构[1]。但是目前我国生产的酸性球团矿存在强度低及还原性差等问题[2],因此探讨影响酸性球团矿质量的根本原因,进一步改善球团矿质量成为钢铁冶炼的重要课题。国内外研究学者从冶金性能指标改善方面对提高酸性球团矿质量进行了大量研究[3-9],但对球团矿质量与矿相结构、冶金性能的关系缺乏系统性研究。笔者运用工艺矿物学研究方法,分析不同钢厂酸性球团矿的矿相结构与冶金性能的定量关系,找出影响球团矿质量的根本原因,为发展高质量球团矿生产工艺提供理论依据。

1　试验材料与方法

试验所用球团矿从邯钢、唐钢、承钢、攀钢四个钢厂现场采集,不同类型球团矿的化学成分相似,但含量相差较大,化学成分见表 1。挑选完整且具有代表性的球团矿试样,沿横切面经切割、研磨、抛光至 0.03 mm,用环氧树脂胶将其粘接于载玻片上制成光薄片,并采用德国蔡司透/反两用 Axioskop A1 pol 研究型偏光显微镜,观察球团矿试样的显微结构特征。采用 SQZ-25 烧结球团转鼓试验机对球团矿试样的抗压强度进行测定,执行国家标准为 GB8209—1987; 采用 MTLQ-HY-6 铁矿石粉化/还原性能综合测定装置,检测球团矿试样的还原性,执行国家标准为 GB/T13241—1991。

表 1　酸性球团矿的化学成分

Table 1　Chemical composition of acid pellets　　%

类型	来源	TFe	SiO_2	CaO	MgO	S	FeO	TiO_2	R_2
普通酸性	邯钢	62.58	7.13	0.79	0.62	0.026	0.02		0.11
球团矿	唐钢	61.83	7.80	0.60	0.93	0.02	0.04		0.07
钒钛酸性	承钢	60.31	5.29	1.64	3.00	0.02	0.79	3.64	0.31
球团矿	攀钢	53.47	6.26	1.53	2.77	0.018	2.73	8.80	0.24

2　试验结果与分析

2.1　球团矿的矿物组成

采用透/反两用偏光显微镜和 X 射线衍射仪对酸性球团矿的矿物组成进行定量分析,不同钢厂球团矿的矿物组成及含量见表 2。

由表 2 可以看出,不同类型球团矿的矿物组成相似,普通酸性球团矿中金属相以赤铁矿和磁铁矿为主,含少量的磁赤铁矿和褐铁矿,黏结相以铁橄榄石和铁酸钙为主,存在少量玻璃质; 邯钢球团矿中磁铁矿、磁赤铁矿的含量明显低于唐钢球团矿。由图 1 的 XRD 分析结果表明,钒钛球团矿中金属相以钛赤铁矿、钛磁铁矿、钛磁赤铁矿等为主; 承钢球团矿中钛赤铁矿含量明显高于攀钢球团矿,钛磁赤铁矿含量低于攀钢,钛磁铁矿含量相差不大。

表 2　酸性球团矿的矿物组成含量及气孔率

Table 2　Mineral composition and porosity ratio of acid pellets　　%

类型	来源	赤铁矿	磁铁矿	磁赤铁矿	褐铁矿	铁橄榄石	铁酸钙	玻璃质	石英	气孔
普通酸性	邯钢	65~75	3~5	1~3	1~3	3~5	少量	少量	3~5	3~5
球团矿	唐钢	60~65	25~35	3~5	1~3	1~3	1~3	少量	3~5	3~5
钒钛酸性	承钢	55~60	25~30	5~10	1~3	3~5	少量	少量	3~5	5~7
球团矿	攀钢	40~45	30~35	10~15	1~3	5~7	1~3	少量	1~3	5~7

注: 承钢、攀钢球团矿金属相为钛赤铁矿、钛磁铁矿、钛磁赤铁矿。

2.2　球团矿的显微结构

从微观角度出发,对球团矿中各矿物相的种类含量、形貌大小、分布规律以及胶结形式等进行系统定量研究。图 2、图 3 分别对应其球团矿显微结构照片。

邯钢球团矿矿物组成简单,显微结构均匀,无明显分带现象。赤铁矿为主要金属相,多呈他形晶,少量呈半自形晶、条状或棱角状,明显的细粒结构(见图 2a),分布相对均匀,局部存在少量未充分反应的磁铁矿,与其形成交代结构(见图 2b)。存在少量粒

度较粗的褐铁矿呈棱角状或他形晶分散出现。石英含量较多，主要呈他形和棱角状，粒度粗细不等，局部出现粗粒石英与赤铁矿相连。赤铁矿间以晶键连接，局部与少量硅酸盐玻璃质胶结，结构较疏松。气孔大小不一，形态不规则，小气孔偏多，气孔间的联通性差，气孔率为 3%~5%。

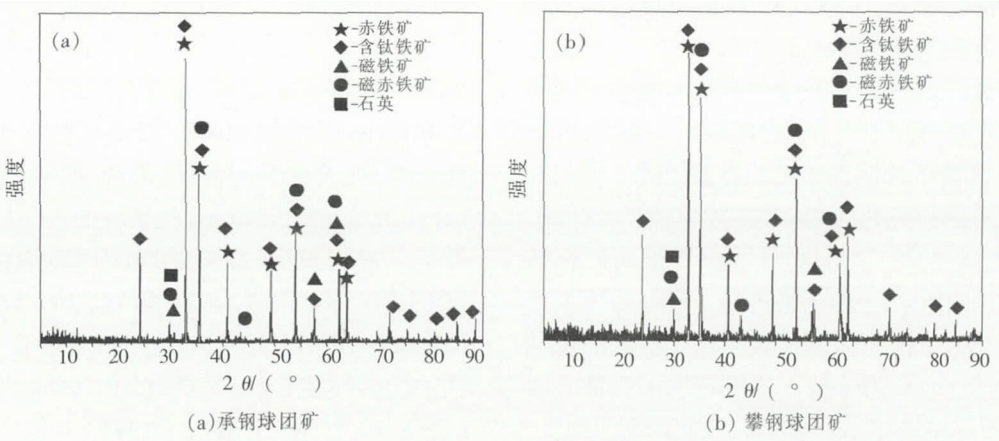

图 1　钒钛球团矿 XRD 分析结果

Fig.1　XRD analysis of vanadium-titanium pellets

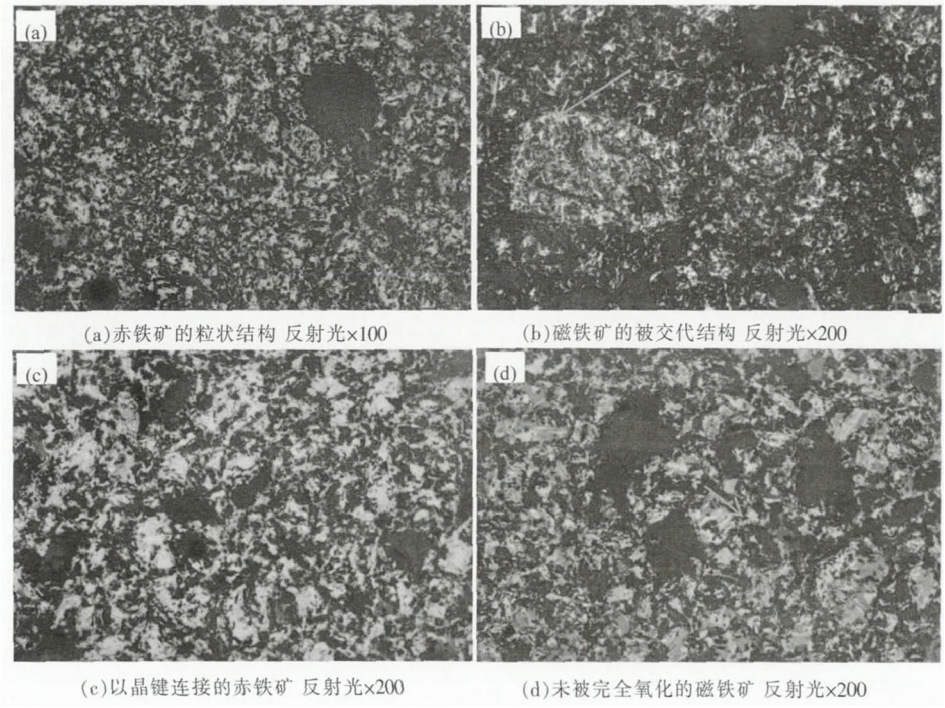

图 2　普通酸性球团矿的显微结构照片

Fig.2　Microstructure of ordinary acid Pellets

与邯钢球团矿相比，唐钢球团矿显微结构致密，出现极弱的分带现象。金属相以赤铁矿和磁铁矿为主。存在半自形块状赤铁矿，粒度较大。球团外部赤铁矿以晶键连接成片（见图 2c），内部赤铁矿与磁铁矿交织连生，少有渣相胶结。外侧带出现少量的褐铁矿，内部磁铁矿被赤铁矿交代现象明显（见图 2d）。石英含量较少，多为细粒，分布较均匀。外部较大气孔间多连通，内部小气孔偏多，气孔率较高。

承钢球团矿显微结构较均匀、致密，略有分带。钛赤铁矿、钛磁铁矿为主要金属相。外部带中，钛赤铁矿多呈他形晶，部分呈棱角状，结晶粒度小，分布均匀，局部出现独立的未被氧化的粗粒钛磁铁矿（见图 3a）。钛赤铁矿间以晶键连接，部分与硅酸盐

玻璃质胶结,少与钛磁铁矿共生。内部带中,钛磁铁矿呈他形和条带状,粒度变大,和钛赤铁矿形成交代结构(见图 3b),以晶相固结为主,少与渣相胶结。在气孔和裂隙附近零散分布少量褐铁矿(见图 3c)。石英含量少,粒度小,多呈半自形,局部粗粒石英中分布钛赤铁矿颗粒。整体气孔大小不一,形态不规则,分布较均匀,以大气孔偏多,且大多气孔间多连通,气孔率为 5%~7%。

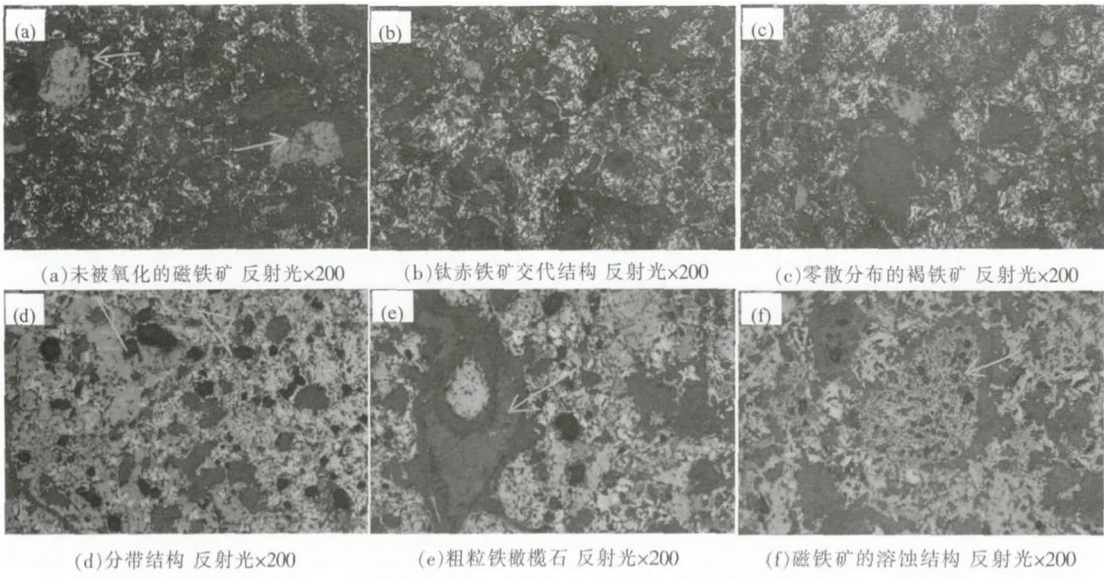

图 3　钒钛球团矿的显微结构照片

Fig.3　Microstructure of vanadium-titanium pellets

与承钢球团矿相比,攀钢球团矿显微结构分布不均匀,有明显的分带现象(见图 3d)。外部带以钛赤铁矿和钛磁赤铁矿为主要金属相,粗粒铁橄榄石为黏结相(见图 3e)。存在少量半自形或条状钛赤铁矿,分布较均匀。钛磁赤铁矿多呈他形粒状,少呈半自形晶粒。石英多呈半自形晶,粒度较细。多数钛赤铁矿以微弱的晶键连接,部分与磁赤铁矿交织连生或与少量硅酸盐玻璃质胶结。在过渡带沿其边缘发育细长的裂隙,钛赤铁矿粒度变小。内部带中,粗粒他形磁铁矿与铁酸钙形成熔蚀结构(见图 3f),以钛磁铁矿再结晶为主,渣相连接为辅。整体以小气孔为主,部分气孔间连通。

2.3　球团矿的冶金性能

球团矿冶金性能的好坏是矿相结构差异的外在表征,由图 4、5 可以明显看出,唐钢球团矿的抗压强度最好,其次为承钢球团矿和邯钢球团矿,攀钢球团矿抗压强度最差。而还原性最好的为承钢球团矿,其次是唐钢球团矿和攀钢球团矿,还原性最差的为邯钢球团矿。

球团矿的抗压强度主要由各矿物自身强度以及赤铁矿晶体的形状大小、晶体间的结合方式和渣相连接的程度所决定[10]。

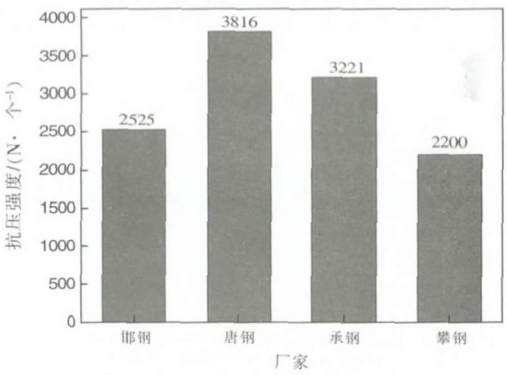

图 4　酸性球团矿的抗压强度

Fig.4　Compressive strength of acid pellets

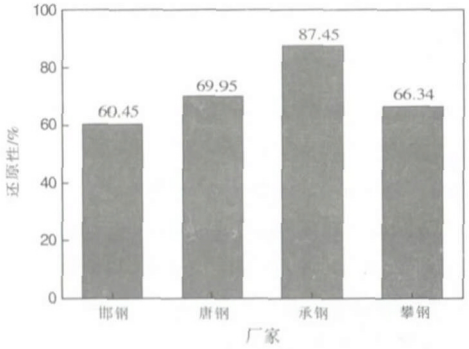

图 5　酸性球团矿的还原性

Fig.5　Reductivity of acid pellets

球团矿中常见矿物的抗压强度表 3 可以看出，磁铁矿>赤铁矿>铁橄榄石>铁酸钙。根据矿相结构分析可知，四种类型的球团矿的矿物组成相似，主要金属相均为赤铁矿和磁铁矿。与邯钢、承钢、攀钢相比，唐钢球团矿的显微结构致密均匀，金属相含量高达 85%，其中赤铁矿多呈他形，粒度较大，颗粒间以赤铁矿晶相固结为主，提供了良好的抗压强度。相对来说，攀钢球团矿显微结构疏松不均匀，有明显的分带现象，钛赤铁矿多呈他形晶，少量半自形或条状，结晶粒度小，在过渡带钛赤铁矿与磁赤铁矿交织连生现象明显，导致晶相固结较差，内部带中出现了大量铁酸钙，局部残留有未反应的氧化钙，多裂纹出现。承钢球团矿显微结构较致密均匀，略有分带，金属相含量仅次于唐钢，局部出现独立的他形钛赤铁矿和钛磁铁矿，二者交代现象不明显，黏结相较多。邯钢球团矿显微结构均匀但较疏松，无明显的分带，金属相中赤铁矿含量较大，粒度小，分布较均匀，局部出现与磁铁矿形成交代结构。由此分析可得，球团矿的抗压强度为唐钢>承钢>邯钢>攀钢。

表 3 酸性球团矿中主要矿物的抗压强度和还原性
Table 3 Metallurgical performance index of main minerals in acid pellets

主要矿物及黏结相	抗压强度/MPa	还原性/%
赤铁矿	2670	49.9
磁铁矿	3690	26.7
铁橄榄石	2000~2600	1.0~13.2
铁酸钙	1420~3700	28.5~40.1

球团矿的还原性主要由气孔率、气孔大小、气孔形态、气孔的连通性和矿物自身的还原性决定[10]。由表 3 看出，常见矿物的还原性大小：赤铁矿>铁酸钙>磁铁矿>铁橄榄石。承钢球团矿以赤铁矿为主，此外，气孔率 3%~5%，整体大小不一，形态不规则，以大气孔为主，且气孔间多连通，分布均匀，还原性最好。相对来说，邯钢球团矿中虽然赤铁矿含量高，气孔率相对较高，但多以小气孔为主，气孔间的联通性差，同时气孔分布不均匀，因此还原性最差。而唐钢球团矿中赤铁矿含量较高，气孔率为 5%~10%，气孔率相对较高，形态不规则，小气孔偏多，外部较大气孔间多连通，所以还原性较好。此外，攀钢球团矿中钛赤铁矿含量相对较少，分带现象明显，内部带中钛磁铁矿被硅酸盐玻璃质包围，难于还原性气体接触，且气孔率较低，多以小气孔为主，部分气孔间出现联通，与邯钢球团矿相比，还原性较好。

3 结论

1) 钒钛球团矿和普通酸性球团矿的矿物组成相似，金属相均以赤铁矿（钛赤铁矿）和磁铁矿（钛磁铁矿）为主，有少量磁赤铁矿和褐铁矿，黏结相均以铁橄榄石为主，含少量铁酸钙和玻璃质。不同之处在于钒钛球团矿中过渡相磁赤铁矿较多，且气孔率较高。

2) 普通酸性球团矿显微结构较均匀，无明显分带现象，磁铁矿被赤铁矿交代结构较普遍。而钒钛球团矿分带现象明显，内部带以铁酸钙胶结粗粒他形磁铁矿形成的熔蚀结构为主，外部带多以赤铁矿的粒状结构为主。

3) 唐钢球团矿抗压强度最高，其次为承钢和邯钢球团矿，而攀钢球团矿抗压强度最低。分带现象明显、显微结构不均匀、金属相间晶键连接性差是导致攀钢球团矿抗压强度差的根本原因。

4) 四个钢厂球团矿中，承钢球团矿还原性明显优于其他钢厂，这与其球团矿中分布均匀的大气孔居多，且气孔间多连通的特征有关。

参考文献

[1] Xu Manxing, Zhang Yulan. Analysis of pellet technology and production of China in 21st century [J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(2): 25-30, 37.
(许满兴，张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势 [J]. 烧结球团，2017，42(2)：25-30，37.)

[2] Ye Kuangwu. About our country's pellet quality [J]. Sintering and Pelletizing, 2005, 30(5): 4-7.
(叶匡吾. 关于我国球团矿质量问题的探讨 [J]. 烧结球团，2005，30(5)：4-7.)

[3] Liu Chanqing, Liu Ran, Lü Qing, *et al*. Study on mineralogical structure of Jidong magnetite pellets [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2014, 35(6): 124-129.
(刘朝卿，刘然，吕庆，等. 冀东磁铁精粉球团矿的矿相结构研究 [J]. 钢铁钒钛，2014，35(6)：124-129.)

[4] Luo Guoping, Zhao Bin, Liu Jingquan, *et al*. Study on mineralogical structure and metallurgical performance of Baosteel MgO-con-

taining pellets [J].Sintering and Pelletizing,2015,40(5):25-27,47.
(罗果萍,赵彬,刘景权,等.包钢含 MgO 球团矿矿相结构与冶金性能研究[J].烧结球团,2015,40(5):25-27,47.)
[5] Qing Gele,Wang Chaodong,Hou Enjian,*et al*.Compressive strength and metallurgical property of low silicon magnesium pellet [J].Journal of Iron and Steel Research,2014,26(4):7-12.
(青格勒,王朝东,侯恩俭,等.低硅含镁球团矿抗压强度及冶金性能[J].钢铁研究学报,2014,26(4):7-12.)
[6] Li Jie,Tian Tielei,Xing Hongwei.Study on influence of flux on compressive strength of high magnesium alkaline pellet [J].Sintering and Pelletizing,2014,39(6):36-40.
(李杰,田铁磊,邢宏伟.熔剂对高镁碱性球团强度影响的研究[J].烧结球团,2014,39(6):36-40.)
[7] Zhao Guohua,Wang Xuesong,Zhang Zhenya,*et al*.Influence of basicity on thermal properties and mineralogical structure of pellets [J].Sintering and Pelletizing,2015,40(6):31-35.
(赵国华,王雪松,张振亚,等.碱度对球团矿热态性能和矿相结构的影响[J].烧结球团,2015,40(6):31-35.)
[8] Wang Liguang,Fu Juying,Zhu Deqing,*et al*.Investigation on the mineral composition and microstructure of acid pellet roasted on sinter strand [J].Journal of Central South University of Technology (Natural Science Edition),2000(5):403-406.
(王黎光,傅菊英,朱德庆,等.烧结机焙烧酸性球团矿矿物组成和显微结构[J].中南工业大学学报(自然科版),2000(5):403-406.)
[9] Xu Chenguang,Long Yue,Tian Tielei,*et al*.Experimental study on metallurgical properties of high magnesia alkaline pellets [J].Sintering and Pelletizing,2016,41(1):36-40.
(徐晨光,龙跃,田铁磊,等.高镁碱性球团矿冶金性能试验研究[J].烧结球团,2016,41(1):36-40.)
[10] Chen Shuangyin,Chu Mansheng,Tang Jue,*et al*.Effects of pre-oxidation on phase composition and microstructure of vanadium titano-magnetite [J].Journal of Northeast University (Natural Science Edition),2013,34(4):536-541.
(陈双印,储满生,唐珏,等.预氧化对钒钛磁铁矿球团矿相及内部结构的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(4):536-541.)

编辑　杨冬梅

攀钢研究院与西南石油大学签订合作协议

9 月 23 日下午,攀钢研究院与西南石油大学联合共建油气田特种材料及防护技术联合实验室签约仪式在成都举行,院长唐历、西南石油大学副校长张烈辉出席并致辞。

院长唐历介绍了研究院的基本情况,希望双方以联合共建创新平台为契机,共同开展科学研究、成果转化、人才培养、平台建设、学术交流等,共建协同创新体系,形成实现创新驱动发展的全面合作局面,为四川省材料产业进步、石油行业及地方经济发展作出更大的贡献。

张烈辉副校长在致辞中介绍了西南石油大学的基本情况,希望双方以联合共建创新平台为起点,充分发挥各自优势,通过联合攻关,形成实实在在的科技成果进行孵化、转化,为实现四川省新材料产业规划迈上万亿台阶做出应有的贡献。

唐历与张烈辉为联合实验室授牌,双方代表陈永与周莹签订了联合实验室合作协议。随后,双方开展了油气田特种材料及应用技术学术交流活动。

http://www.panyan.cn/morenews.aspx tag=1