

文章编号:1673-500X(2006)05-0088-05

X80 管线钢埋弧焊缝组织特征及其控制的试验研究

张 敏,姚成武,周永欣,王为波

(西安理工大学 材料科学与工程学院 陕西 西安 710048)

摘要:从贝氏体强化针状铁素体基体角度出发,采用降低碳元素、提高锰元素含量,并添加镍元素以增加贝氏体转变区 and 高温铁素体转变区的分离程度的技术路线,进行 Mn-Ni-Mo-Ti-B 合金系 X80 级($\sigma_s \geq 551$ MPa)管线钢埋弧焊丝的试验研究。焊缝的力学性能测试以及 SEM、TEM 显微组织观察结果表明,对于所研究的焊缝,过高的锰元素含量因提高冷裂纹敏感指数(P_{cm})而细化焊缝金属原奥氏体晶粒尺寸,增加贝氏体形核质点,减少了晶内形核的针状铁素体含量,焊缝韧性下降。镍元素对 P_{cm} 贡献较小,且镍元素使焊缝金属基体易于交叉滑移,因而合适的镍元素含量有利于提高焊缝的强韧性。针状铁素体片以夹杂物为核心呈放射状生长,夹杂物周围的局部合金元素(Mn、Ti 等)贫乏区提高铁素体相变温度,有利于针状铁素体在该区优先形核。另外,夹杂物周围不存在镍元素的贫乏区。

关键词:高强度管线钢;焊缝;贝氏体;针状铁素体;强韧性

中图分类号: TG 401 **文献标识码:** A

Experiment study of microstructure property and its control of submerged arc welding seam of X80 pipeline steels

ZHANG Min, YAO Cheng-wu, ZHOU Yong-xin, WANG Wei-bo

(School of Material Science and Engineering, Xian University of Technology, Xian 710048, China)

Abstract: Based on the design of strengthening acicular ferrite using bainite, the Mn-Ni-Mo-Ti-B alloy system submerged-arc welding wire for X80 (the yield strength of $\sigma_s \geq 551$ MPa) pipeline steel was fabricated according to the technological route, which is to increase the degree of separation between the bainite transition region and high-temperature ferrite transition region by reducing the content of carbon element, raising the content of Mn element, and adding Ni element. The results of mechanics performance test of weld metal, and microscopic analysis by scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), respectively, indicate that excessive content of Mn is disadvantageous to the intragranular nucleated acicular ferrite. The cold cracking sensitivity index (P_{cm}) of weld metal increases with Mn content increasing, the austenite grain of weld metal is thinner when the P_{cm} of weld metal is higher. Thereby, the austenite grain boundaries increases, which is effective for the formation of bainite nucleation and is disadvantageous to the content of acicular ferrite. Ni element has light contributions to P_{cm} , and makes the matrix of weld metal apt to alternate slip. Thereby, the adequate content of Ni element is beneficial to the toughness of weld metal. The laths of acicular ferrite nucleated at inclusions grow radially, and the depletion of alloying elements such as Mn and Ti may increase the driving force for ferrite transformation, which will lead to form acicular ferrite preferentially in the region. In addition, there is not depletion of Ni element around the inclusions.

Key words: high strength pipeline steel; welding seam; bainite; acicular ferrite; strength and toughness

X80 级管线钢是现行油气输送管道使用级别最高的钢种,其开发目的是为了满足不同条件下油气输送技术发展和节约管线建设所用材料成本要求。德国研制了 X80 钢级管线钢,并铺设了 3.2 km 的试验管道^[1],此后 X80 级管线钢不断发展。我国目

前在 X80 钢级油气输送管道使用方面还是空白。笔者以研制的 X80(按 API SPEC 5L 标准^[2],其力学性能为:屈服强度 $\sigma_s \geq 551$ MPa,极限强度 $\sigma_b \geq 620 \sim 827$ MPa,屈服应变 $\delta_5 \geq 18\%$,冲击韧性 $A_{kv} \geq 120$ J(-20 °C))管线钢匹配埋弧焊丝为研究对

收稿日期:2005-12-28

基金项目:陕西省教育厅自然科学基金资助项目(01JK134)

作者简介:张敏(1967-),男(汉族),陕西西安人,教授,博士,主要从事新型焊接材料、焊接结构断裂强度及焊接工程结构方面的研究。

象,通过对熔敷金属显微组织特征进行分析,确定针状铁素体焊缝组织的控制原则,为提高针状铁素体焊缝性能提供理论基础。

1 焊缝金属组织及合金设计

根据 X80 管线钢的性能要求,其匹配焊缝的强韧性应与母材及其焊接热影响区的强韧性相当,而且应具有较高低温韧性的特点。

针状铁素体为原奥氏体晶内有方向性、非自发形核的细小铁素体,是在低合金高强度钢连续冷却条件下获得的不同于铁素体和珠光体的一种晶内形核的类贝氏体组织^[3]。大量试验研究表明^[4-5],提高焊缝强韧性的一个有效方法是获得大量均匀细小的针状铁素体组织。然而,当针状铁素体达到相当水平后,其强度的上升空间是有限的。为了提高 X80 管线钢埋弧焊缝的强度,有必要继续添加合适的合金元素以强化针状铁素体基体,且在提高强度的同时,要确保韧性尤其是低温韧性不致于下降。现有发现的合金元素中,Ni 元素不但降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变温度,而且减小低温时焊缝金属的摩擦阻力和钉扎常数,增加层错能,促进低温时螺型位错交滑移^[6],从而使裂纹扩展消耗功增加,进而可以获得较高的材料低温韧性。

鉴于国内现有 X70 级以下管线钢埋弧焊丝的 Mn-Ti-B 合金系统很难满足高强度管线钢的性能要求,尤其是高强度下的低温韧性要求,笔者根据贝氏体相变动力学、针状铁素体形核机制以及微合金韧化理论,提出 X80 焊丝的设计思想如下:

(1)为了获得 $\sigma_s \geq 551$ MPa 和 $A_{kv} \geq 120$ J(-20℃)的焊缝金属,在现有管线钢针状铁素体埋弧焊丝 Mn-Ti-B 合金系的基础上,降低碳的含量,调整和添加合金元素,以获得针状铁素体为主和少量低碳贝氏体组织,避免生成高温铁素体,达到增强增韧的目的。

(2)提高焊缝金属中 Mn 元素含量,并添加 Ni 元素,以弥补降碳带来的强度损失,同时可以使焊缝金属 CCT 图中贝氏体相变点降低,增加贝氏体铁素体转变区与高温铁素体转变区分离程度,使得高温铁素体转变区右移,从而降低针状铁素体的临界冷却速度,达到降低焊缝金属对冷却速度敏感性的目的。

2 试验

2.1 试验材料和工艺

试验用焊丝为试制的 X80 管线钢用埋弧焊丝,匹配烧结焊剂 SJ101G,焊剂化学成分(质量分数)如下:SiO₂ 占 15%~20%,MgO 占 20%~30%,Al₂O₃ 占 15%~20%,CaF₂ 占 15%~25%,S 含量小于 0.06%,P 含量小于 0.08%,Basicity 占 2.1%。试验用钢板为武汉钢铁公司研制的 X80 管线钢,厚度为 15 mm,钢板中,C,Si,Mn,Nb,V,Ti,B,Cu,Ni,Mo,S 和 P 的含量分别为 0.06%,0.24%,1.57%,0.04%,0.01%,0.013%,0.0006%,0.045%,0.14%,0.29%,0.005%和 0.033%。采用双面焊接,坡口采用不对称 X 形坡口,正面焊完后反面清根焊接。焊接方法为埋弧焊接,焊接设备为 ZD5-1000 型埋弧焊机。焊接时的工艺参数:电流为 520~530 A,电压为 30~32 V,焊速为 26 m/h。

2.2 试验方法

在 JB-30B 冲击试验机上进行焊丝焊缝冲击韧性试验,在 PCS-25T 试验机上进行拉伸试验。组织结构分析在光学显微镜、Hitachi-3000N 型电子扫描仪(SEM)和 JEM3010 型透射电镜(TEM)上进行。

3 试验结果

焊丝熔敷金属的化学成分和力学性能分别见表 1($\sigma_{0.2}$ 为材料屈服强度, ψ 为延伸率)。试验焊丝匹配 SJ101G 焊剂的焊缝金属低温(-20℃)冲击试验结果见表 3。

表 1 焊丝熔敷金属的化学成分(质量分数)

编号	C	Mn	Si	Mo	Ti	B	Ni	Cu	Al	S	P	P_{cm}^*
1 [#]	0.032	1.849	0.302	0.228	0.010	0.0012	1.084	0.190	0.0010	0.007	0.019	0.183
2 [#]	0.042	2.102	0.267	0.213	0.009	0.0010	0.534	0.200	0.0010	0.006	0.015	0.194
3 [#]	0.046	1.484	0.420	0.346	0.022	0.0023	0.320	0.008	0.0028	0.016	0.021	0.174

注: $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/30 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$ 。

表 2 试验焊丝焊缝金属常温力学性能

编号	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	A_{kv} /J
1 [#]	567	681	24.2	55.47	210.7
2 [#]	555	662	21.6	56.76	156.8
3 [#]	565	655	20.7	48.24	174.8

表 3 试验焊丝焊缝金属低温冲击性能

编号	冲击功 A			A_{kv}
	A_1	A_2	A_3	
1 [#]	137.2	196.0	172.4	168.5
2 [#]	96.4	73.5	102.3	90.7
3 [#]	129.9	68.6	102.9	100.5

4 结果分析

由表2和表3可见,相对于超低碳的2[#]、3[#]试样焊丝,1[#]试样焊丝熔敷金属具有较高的强度和优良的低温韧性。1[#]、2[#]、3[#]试样焊丝熔敷金属均为超低碳金属并具有较高的纯净度,然而其强韧性却有较大的差别(-20℃冲击功1[#]比2[#]、3[#]约提高70J)这表明除了低碳和纯净度外,还有其他的因素影响焊缝熔敷金属的韧性。因此有必要进一步从显微结构特征方面对不同合金成分影响高强度焊缝熔敷金属强韧性的因素作进一步的研究。

图1为1[#]、2[#]、3[#]试样焊丝熔敷金属金相组织((a)(b)(c)分别为1[#]~3[#]试样的图片)。从金相照片可以看出,3个试样显微组织均主要为针状铁素体(AF)结构,其为篮筐编织形态,晶态大小不等,相互之间的位向关系不定,呈混杂分布状态,符合Smith对管线钢中针状铁素体的定义^[7]。3[#]试样在原始奥氏体晶界处析出有先共析铁素体(PF)(图1(c)),而1[#]、2[#]试样金相显微组织中却较少出现,取而代之的是由粒状贝氏体和针状铁素体组成的混合组织。

先共析铁素体(PF)等高温铁素体影响焊缝的低温韧性,并可用下式来预测焊缝冲击韧性随组织变化的趋势^[8]:

$$C_{VN} = -av_{cin} + b \tag{1}$$

式中, v_{cin} 为高温铁素体网在金相组织中的比例; a 、 b 为常数系数。

式(1)表明,高温铁素体含量越高,焊缝的冲击韧性越低。参照已有的研究结果^[9],焊缝金属的韧-脆转变温度随针状铁素体含量的增加而降低,当针状铁素体的含量达到90%时,焊缝金属的韧-脆转变温度可降到-20℃~-60℃。由于1[#]试样熔敷金属大量针状铁素体的存在,高温铁素体网几乎消失(图1(a)),因而具有优良的低温韧性。

针对1[#]试样进行TEM分析(图2),其针状铁素体组织特征为彼此咬合、互相交错分布的非平行片状结构,在片条内部具有高密度位错团(图2(a))。这些位错团对裂纹的扩展起到一定的阻碍作用,相当于进一步细化了晶粒,因而当裂纹沿着大量互相穿插交错的针状铁素体扩展时,路径曲折,消耗能量较大,这是针状铁素体在低温条件下具有较高韧性的重要原因。

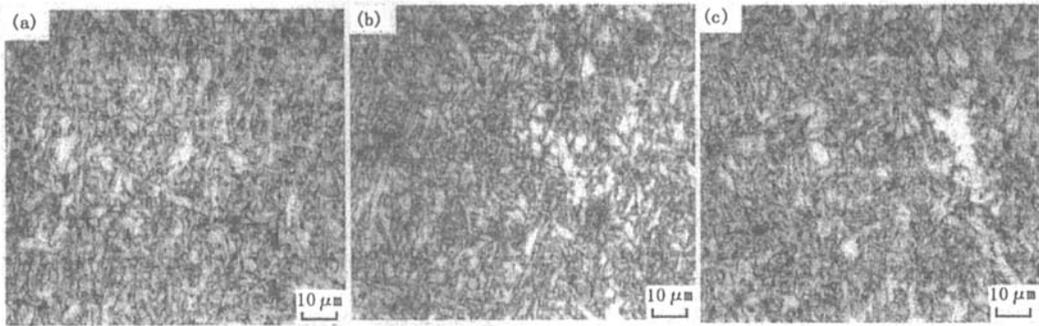


图1 试验焊丝熔敷金属金相照片

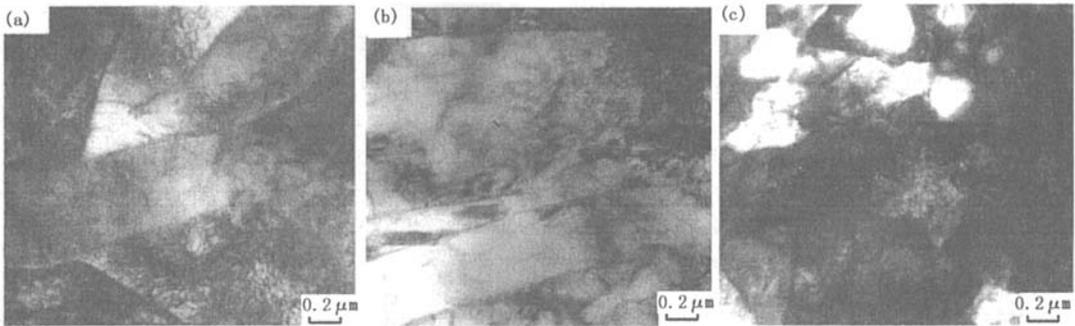


图2 1[#]试样焊丝熔敷金属的透射电镜组织

除了针状铁素体板条之外,还可以发现一些贝氏体铁素体板条(图2(b))和粒状贝氏体(图2(c)),这些组织同样含有较高的位错密度。另外,1[#]试样TEM图中还可发现少量的细小等轴铁素体存在(图

2(c))。

图3为1[#]、2[#]试样焊丝熔敷金属SEM照片((a)(b)分别为1[#]、2[#]的图片)。利用电子探针对岛状物进行分析,发现岛内C元素浓度约为周围基

体的 1.5~2 倍。参照已有的研究成果^[10-11],这种岛状物为 M-A 组元,粒状贝氏体就是由 M-A 组元和贝氏体铁素体组成。相对于针状铁素体,M-A 组元提高了粒状贝氏体基体的强度。由此可见,贝氏体铁素体和粒状贝氏体的存在,强化了以针状铁素体为主的 1[#] 试样焊缝,从而使 1[#] 试样焊缝有较高的屈服强度。

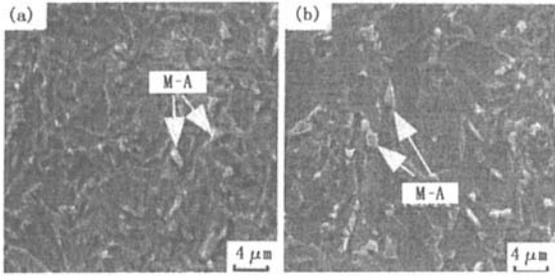


图 3 试验焊丝焊缝 M/A 组元 SEM 照片

比较 1[#] 2[#] 试样化学成分,最大的差别是 Mn,Ni 元素含量的不同,其他化学元素都在较小范围内波动。研究表明^[12-13],由于针状铁素体在奥氏体晶

内形核,贝氏体为晶界形核,如果焊缝金属冷裂纹敏感指数(P_{cm})高,则奥氏体晶粒较小,贝氏体形核占优(形核质点增加)会不利于针状铁素体形成。

由于 2[#] 试样的高 Mn 含量而获得更高的 P_{cm} 值,从而大大降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变温度,奥氏体晶界处高温铁素体薄片几乎难以生成,其焊缝熔敷金属显微组织以粒状贝氏体占优(图 1(c))。从材料的化学成分对组织影响来分析,Mn,Ni 元素是奥氏体稳定化元素,能够降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的相变温度,抑制在较高温度下向高温铁素体的相变,从而促进针状铁素体组织的形成,但 Ni 元素对 P_{cm} 贡献较小,且 Ni 元素还有影响位错摩擦力,使基体易于产生交叉滑移的作用,因此 1[#] 焊缝具有较好的强韧性。

研究^[3]认为针状铁素体为非自发性形核,为了进一步确定针状铁素体的形核特征,对 1[#] 试样的夹杂物二次相形貌进行 SEM 观察和电子衍射花样分析,结果见图 4。

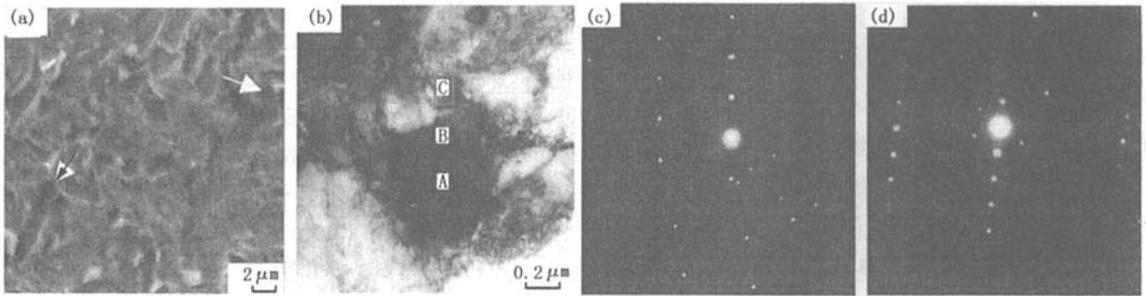


图 4 夹杂物形貌及电子衍射花样

由图 4(a)可以看出,夹杂物呈圆球形(箭头所指),且球形夹杂物为多个铁素体片的核心,其 TEM 显微组织见图 4(b)。利用电子探针针对图 4(b)中的夹杂物 A、B 以及基体 C 部位进行微区成分能谱分析,结果见表 4。图 4(c)(d)为夹杂物的电子衍射花样,图 5 为其衍射花样标定。根据微区成分能谱

分析,在夹杂物的不同部位,其成分相差很大,且夹杂物与基体成分相差也很大(表 4)。相对于基体 C 区,夹杂物边缘 B 区的合金元素 Mn、Al、Ti 以及 Si、O 含量显著增加。在夹杂物的周围,没有发现 Ni 元素贫乏区。

表 4 夹杂物中各元素的质量分数

部位	C	O	Si	Ti	Mn	Al	Ni	Cu	S	Fe
A	0.80	17.8	3.27	0.72	7.94	6.51	0.56	1.42	—	60.9
B	0.94	25.08	5.74	1.48	12.78	12.01	0.23	1.39	0.42	39.52
C	0.36	5.53	0.60	—	1.21	—	0.86	2.01	—	89.44

经标定夹杂物的相有 Al_2O_3 、 MnO 、 Ti_2O_3 、 α - MnS 、 α -Fe 等,结合表 4 结果,可以确定该复相组织夹杂物边缘 B 区有 α - MnS 析出,且在形成过程中造成该区 Mn 元素含量的提高,从而造成夹杂物附近基体 C 区出现贫 Mn 区(MDZ)。

温度上升。基于相变动力学方面考虑,夹杂物的贫 Mn 区(MDZ)造成周围基体的铁素体相变点升高,意味着铁素体形核转变更早的出现,形核驱动力增加,从而促进多个铁素体片以夹杂物为中心呈放射状生长(图 4(a))。同样, Ti_2O_3 相造成周围 Ti 元素的贫乏,该贫乏区也会造成相变点提高,从而促进铁

Mn 元素在奥氏体中含量下降会使相变的平衡

素体的晶内形核。比较1#、2#、3#试样,虽然3#试样Mn、Ni元素含量较低,但Ti、B等元素含量较高,

可以形成较多的夹杂物粒子促进针状铁素体的形核,因而仍有较高的强韧性。

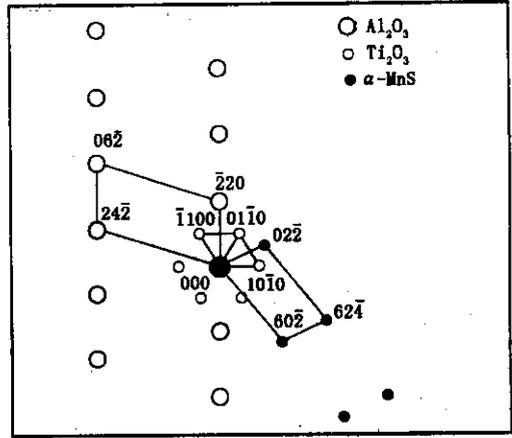
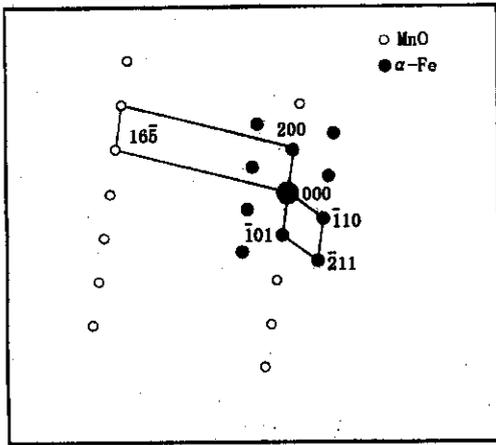


图5 夹杂物电子衍射花样标定

5 结论

(1) 1#焊缝熔敷金属组织主要以针状铁素体为主,其间弥散状分布少量粒状贝氏体、等轴铁素体和板条铁素体。针状铁素体组织特征为彼此咬合、互相交错分布的非平行针状片状结构,在片条内部具有高密度位错团,粒状贝氏体和板条铁素体也含有较高的位错密度。1#焊丝能够满足X80管线钢($\sigma_s \geq 551$ MPa)埋弧焊缝力学性能要求。

(2) 过高的Mn元素含量因提高冷裂纹敏感指数(P_{cm})而细化焊缝金属原奥氏体晶粒尺寸,从而增加晶界形核的贝氏体形核质点,粒状贝氏体量增加,针状铁素体量相应减少,焊缝韧性下降。由于Ni元素淬硬倾向小, P_{cm} 贡献较小,且使基体易于产生交叉滑移,因而适当提高Ni元素含量有利于提高焊缝的高强韧性。

(3) 焊缝中含有 Al_2O_3 、MnO、 Ti_2O_3 、 α -MnS等相形成的夹杂物,其周围存在合金元素(Mn、Ti等)贫乏区,该区铁素体的相变温度高于基体,从而有利于促进针状铁素体片以夹杂物为核心优先形核,呈发射状生长。夹杂物周围不存在Ni元素的贫乏区。

参考文献:

[1] 孔君华,郭斌,刘昌明.高钢级管线钢X80的研制与发展[J].材料导报,2004,18(4):23-25.
KONG Jun-hua, GUO Bin, LIU Chang-ming. Research and development of high strength pipeline steel X80[J]. Guide to Material 2004, 18(4):23-25.

[2] 马秋荣,霍春勇,冯耀荣.国外X80管道钢管的研究现状[J].万方数据

状与应用研究[J].油气储运,2000,19(11):9-13.

MA Qiu-rong, HUO Chun-yong, FENG Yao-rong. The development and application actualities of oversea X80 line pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2000, 19(11):9-13.

[3] BABU, SUDARSANAM Suresh. The mechanism of acicular ferrite in weld deposits[J]. Current Opinion in Solid State & Materials Science 2004, 8(3-4):267-278.

[4] POKHODNYA I K, SHVACHKO V I. Effect of hydrogen on structure of steel welds[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1997, 22(2-3):285-289.

[5] PENG Yun, CHEN Wu-zhu, XU Zu-ze. Study of high toughness ferrite wire for submerged arc welding of pipeline steel[J]. Materials Characterization, 2001, 47(1):67-73.

[6] 王笑天.金属材料学[M].北京:机械工业出版社,1991:39-40.

[7] SMITH Y E, COLDREN A P, CRYDERMAN R L. Toward improved ductility and toughness[M]. Tokyo, Climax Molybdenum Company (Japan) Ltd, 1972:119-142.

[8] SNYDER J P, PENSE A W. The effects of Titanium on submerged arc weld metal[J]. Welding Journal, 1982, 61(7):201-211.

[9] FARRAR R A, HARRISON P L. Review acicular ferrite in carbon-manganese weld metal[J]. Journal of Materials Science, 1987, 22(11):3812-3820.

[10] JORGE J C F, SOUZA L F G, REBELLO J M A. The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C-Mn weld metal deposits[J]. Materials Characterization, 2001, 47(3-4):195-205.

变量[J]. 物理学报, 2002, 51(8):1666-1670.

ZHANG Yi. Perturbation to symmetries and adiabatic invariant of Birkhoffian systems with unilateral constraints [J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(8):1666-1670.

[16] ZHANG Yi. Conservation laws for mechanical systems with unilateral holonomic constraints[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(1):55-59.

[17] 张毅. 单面完整约束系统的形式不变性[J]. 物理学

报, 2004, 53(2):331-336.

ZHANG Yi. Form invariance of mechanical systems with unilateral holonomic constraints[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(2):331-336.

[18] 梅凤翔. 约束力学系统的对称性与守恒量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.

(编辑 沈玉英)

(上接第 87 页)

[8] 陈丽华, 金军, 樊建人, 等. 电站锅炉受热面管束防磨技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7):67-71.

CHEN Li-hua, JIN Jun, FAN Jian-ren, et al. Study on the erosion protection technique for the boiler tube bundles of power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7):67-71.

[9] 邓化凌, 宋云京, 肖世荣. 循环流化床锅炉磨损及防磨措施[J]. 山东电力技术, 2004(5):51-53.

DENG Hua-ling, SONG Yun-jing, XIAO Shi-rong. Introduction to abrasion and anti-abrasion measures of circulating fluidized bed boilers[J]. Shandong Electric Power Technology, 2004(5):51-53.

(编辑 沈玉英)

(上接第 92 页)

[11] MAZANCOVÁ E, MAZANEC K. Physical metallurgy characteristics of the M/A constituent formation in granular bainite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 64(1-3):287-292.

[12] BABU S S, BHADESHI H K D H. Mechanism of the

transition from bainite to acicular ferrite[J]. Materials Transitions, 1991, 33(1):679-688.

[13] NOBUO T, CHIAKI S. Toughness degradation mechanism for reheated Mo-Ti-B bearing weld metal[J]. ISI International, 1995, 35(10):1232-1238.

(编辑 沈玉英)

下 期 要 目

高 岗, 等 有机质初次生烃升温速率对二次生烃的控制作用

段宏亮, 等 柴西阿尔金山前侏罗系含煤地层展布及其油气勘探方向

王夕宾, 等 濮城油田南区沙二上 4-7 砂层组低渗储层特征及成因分析

赵卫卫, 等 柴达木盆地东部地区中生界不整合与油气成藏关系

张松扬, 等 塔河油田岩溶型碳酸盐岩储层自然伽马能谱测井的层次划分与对比

孙永壮, 等 济阳拗陷胜坨地区沉积体系及油气源特征

冯其红, 等 可动凝胶调驱快速模拟方法研究

吕彦平, 等 单螺杆泵采油系统启动扭矩动力学模型研究

黄河福, 等 MTC 固井液二界面胶结强度实验研究

邱正松, 等 改性多元醇防塌剂的研制及其作用机理

陈建义, 等 旋风分离器分离空间流场的理论分析

姬忠礼, 等 高温陶瓷过滤器循环过程的热态实验研究

赵环宇, 等 浓液沉积硅改性 ZSM-5 条件对催化甲苯歧化反应的影响

于剑峰, 等 溶剂萃取-重结晶法提纯氨基甲酸甲酯

王铭华, 等 超细颗粒声场流态化机理研究

孙凤侠, 等 催化裂化沉降器旋流快分器内气体停留时间分布的研究

刘会平, 等 东营凹陷烃源岩低温催化酯水解生烃动力学研究

闫 伟, 等 基于动态模型的油田勘探开发项目投资优化研究

魏宝君, 等 层状介质中计算体积分方程的弱化 BCGS-FFT 算法