新疆博格达山侵入岩地质特征及构造意义

陈邦学*[1],穆利修[2],赵同阳[2],徐仕琪[2],靳刘圆[1],李 平[1],孙臣林[1]
(1.新疆大学,新疆 乌鲁木齐 830046; 2.新疆地调院,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:博格达山侵入岩的岩性岩相、地球化学特征及同位素年代的分析表明研究区存在两期岩浆活动,即:晚石炭世(298~324)Ma和二叠纪(250~289)Ma岩浆活动。常量元素特征及钙碱指数表明,该地区侵入岩为钙碱系列。稀土及微量元素分析表明其岩浆在上升侵位时遭到大陆壳物质或花岗质岩石的混染,其中酸性岩浆是基性岩浆上升过程中高度分离结晶的残余物,并认为博格达造山带形成于裂谷构造背景。

关键词:博格达;侵入岩;岩石地球化学特征;构造意义
中图分类号:P58 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-5716(2014)05-0166-06

博格达—哈尔里克成矿带作为新疆重要的成矿带之一,也是中亚成矿带的重要组成部分。前人对该地区的研究较多,但是对于总面积达$2\times10^4km^2$的博格达造山带[1],迄今有关侵入岩的文章较少。近些年研究表明博格达造山带侵入岩以辉绿岩岩床、岩株和岩墙为主,仅少量中酸性岩株[1]。博格达造山带西南部的上大河沿中酸性侵入体Rb-Sr等时线年龄为(298±0.76)Ma[2],东部的白杨河中基性岩墙的侵位时间为(270~250)Ma,为造山期后伸展构造背景的产物[3],七角井地区晚期酸性岩脉为(242.7±1.7)Ma,为早三叠世②。博格达东段北缘花岗岩的岩相学和地球化学特征表明该区花岗岩为准铝质Ⅰ型花岗岩,形成于陆内拉张环境[4]。郭威等研究表明博格达造山带在早二叠世构造体制发生了重大转折,由碰撞造山挤压环境转变为造山后拉张环境[5]。迄今为止,关于博格达地区构造背景的讨论仍存争议,部分学者认为该区为岛弧环境[6-8],另一部分学者认为是裂谷[9-12]。本文旨在通过对博格达造山带中的侵入岩研究,岩石地球化学特征的分析,厘定研究区侵入岩浆构造序列,确定研究区主要侵入岩浆构造事件及与其相对应的侵入岩浆构造组合,探讨其岩浆侵位时的大地构造环境,进而为区域构造属性的判别提供一些佐证。

1 地质概况

博格达山沿东西(EW)向延伸,呈波状弯曲,长近400km,东西两端较窄(30~40km)。大地构造上,位于北天山晚古生代造山带中部,北隔准噶尔盆地与西伯利亚板块相望,南与吐哈盆地和觉罗塔格石炭纪火山岩带相邻,西界在乌鲁木齐市一带,东段位于巴里坤县西侧,以断层与哈尔里克山脉相接[13]。

博格达造山带主体由石炭系等组成,其中下石炭统下部塔普捷尔泉组(C_1t)为一套海陆交互相砂岩、粉砂岩夹凝灰质砂岩和玄武岩。整合其上的七角井组(C_1q)为一套海相双峰式火山—沉积建造,灰绿色、灰黑色中—厚层状枕状玄武岩与青灰色、深灰色薄层状钠质流纹岩及酸性凝灰岩互层,夹少量深灰色杂砂岩和黑色炭质页岩。上石炭统柳树沟组(C_2l)为一套海相火山岩夹陆源碎屑岩,上石炭统祁家沟组(C_2q)为一套碎屑岩建造,平行不整合覆盖于柳树沟组火山岩—火山碎屑岩之上。该带侵入岩很少,除拉张后期大量辉绿岩顺层贯入和岩株外,仅有个别花岗闪长岩和钾长花岗岩小岩体和岩株[1,14-15]。该区侵入岩出露总面积为$725km^2$,其中辉绿岩为53.8%,闪长岩3.6%,花岗闪长岩2.8%,二长花岗岩15.2%,钾长花岗岩24.9%③。博格达地区的基性侵入岩主要出露在七角井刺梅沟、西地、铜沟铜矿矿区内、高泉南石、七角井哈萨坟沟沟脑处等地。该地区的中—酸性侵入岩主要出露在肠沟北端出口处、刺梅沟和大河沿岩体等地。

2 岩体地质、岩石序列及时代

* **收稿日期**:2013-07-11 **修回日期**:2013-07-19
项目资助:十二五科技支撑计划重点项目(2011BAB06B04)和新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室开放课题(XJDX1102-2011-04)共同资助。
第一作者简介:陈邦学(1986-),男(汉族),陕西商洛人,新疆大学地质与矿业学院在读硕士研究生,研究方向:矿物学、岩石学、矿床学。

万方数据

2.1 晚石炭世侵入序列

该序列的侵入岩主要有(如图1)辉绿岩、辉石石英二长闪长岩、辉石石英闪长岩、角闪二长岩、石英二长闪长岩、钾长花岗岩、花岗岩等。在博格达地区的侵入岩主要为基性的辉绿岩和石英辉绿岩,多呈长条状的岩床产出,岩体厚数米至数百米,延长几百米到数千米;少数岩体成切割围岩的岩株和岩墙,围岩受到不同程度的角岩化[1]。岩体主要侵入石炭系的海相火山—沉积岩中[16]。从宏观上来看侵入岩主要呈零星状分布于整个博格达地区,其岩石类型由基性到中酸性至弱碱性的演化趋势。

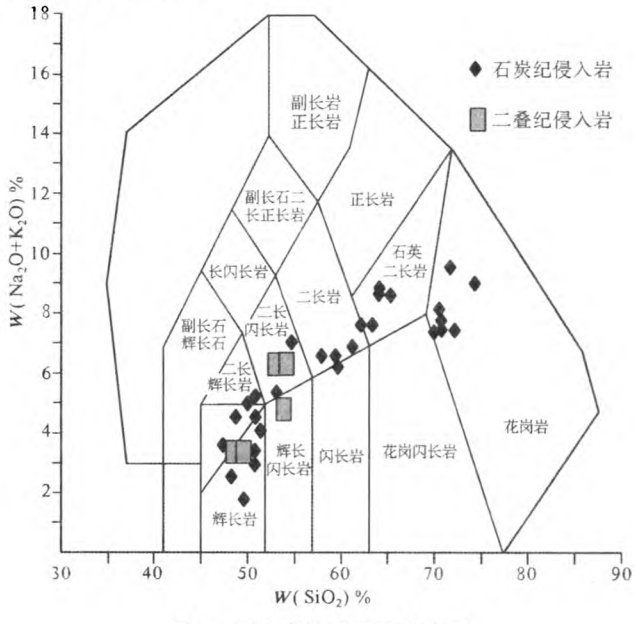

图1 侵入岩主量元素分类图

该序列的岩体在整个博格达造山带都有零星点分布,出露总面积为725km²。近期的下涝坝1:5万区调报告,依据锆石SHRIMP U-Pb测年数据,七角井地区的深色辉绿岩为(301±10)Ma,依据博格达—哈尔里克成矿带铜—金成矿条件研究及靶区评价哈萨坟沟的辉长岩(BGD-14)(324±1.9)Ma,下涝坝东部的两件闪长岩为(HK-101)(320.2±2.1)Ma,(HK-100)(303.6±1.8)Ma;顾连兴等人测得上大河沿体中酸性侵入岩Rb-Sr年龄为(298.4±0.76)Ma。由同位素年龄数据大体可知,年龄数据分布于(298~324)Ma区间,是晚石炭纪的产物,说明岩浆作用发生于晚石炭。

2.2 二叠纪侵入序列

该序列的侵入岩较少仅在阿特卓勒萨依东部有小面积呈岩株产出,面积约有0.39km,在北部下涝坝乡西北部、夏尔巴特萨依以南有近东南方向呈带状展布的小岩株,面积约有1.87km²。岩体与地层侵入界线比较清楚,出露的岩性比较单一为一套灰—灰绿色辉长岩,局部见轻微蚀变。

二叠纪辉长岩侵入最新地层为上石炭统柳树沟组。在二叠纪辉长岩中取同位素年龄样(090TW1-Ⅷ-4)进行SHRIMP锆石U-Pb年龄测定,获得年龄(298±7)Ma,顾连兴、胡受奚等人测得白杨沟辉绿岩(289±10)Ma,东部的白杨河中基性岩墙的研究表明该岩墙的侵位时间为(270~250)Ma左右[3]。根据现有资料以及同位素年龄数据大体可知,年龄数据分布于(250~289)Ma区间,其时代应为二叠纪。

3 侵入岩岩石化学特征

博格达地区侵入序列的岩石化学主要特征见表1。其主要特征如下:

(1)晚石炭世侵入序列侵入岩主要为辉长岩、二长辉长岩、辉长闪长岩、二长闪长岩、闪长岩、二长岩、石英闪长岩、花岗岩为主(如图1),SiO_2含量介于51.2%~73%之间,里特曼指数(σ)介于2.052~3.456(大部分介于1.80~3.3之间),属钙碱性岩。依据M.A.Peacock的钙碱(*CA*)指数求法,获得钙碱指数为56~61[18],属钙碱性岩系。侵入岩K_2O-SiO_2判别图(如图2)表明,该序列岩石基本上都落在钙碱系列和高钾钙碱系列,K_2O含量较高且增加较快。岩石碱度率(*AR*)由基性—酸性,逐渐升高的趋势表明岩系的碱性逐渐增强,随着岩浆的演化,壳源物质逐渐增多,受地壳物质的混染越来越明显。固结指数(*SI*)由基性—酸性逐渐减小,反映岩浆的结晶分异作用不断增强,基性程度逐渐降低。长英指数(*FL*)和镁铁指数(*FM*)由基性到酸性呈逐渐升高的趋势,表明岩浆的分离结晶作用程度越来越高。岩石铝饱和指数(*A/CNK*)均大于或等于1,属准铝质岩石。(K_2O+Na_2O)含量较高,且K_2O和Na_2O增加较快,具有明显的裂谷岩浆岩的特征[18]。

(2)二叠纪侵入岩主要为中基性岩(如图1)。里特曼指数(σ)介于1.9~3.1之间,基本上在1.80~3.3之间,属于钙碱性岩。通过侵入岩全岩K_2O-SiO_2判别图(如图2),序列岩石基本上都落在钙碱系列。岩石的碱度率(*AR*)由辉长岩→中基性岩逐渐升高。固结指数(*SI*)由辉长岩→中基性岩降低。K_2O和Na_2O含量较高,且增加较快。$K_2O/(K_2O+Na_2O)$含量为0.12~0.20,即$K_2O<Na_2O$。该序列岩石铝饱和指数(*A/CNK*)均大于或近似等于1,属准铝质岩石。

4 地球化学特征

万方数据

表1 博格达侵入岩主量元素主要特征值(10^{-6})

时代	岩石	样品数	SiO_2(%)	(K_2O+Na_2O)(%)	K_2O/(K_2O+Na_2O)	里特曼指数	碱度率 *AR*	固结指数 *SI*	*A*/*CNK*	*A*/*MF*	*C*/*MF*	长英指数 *FL*	铁镁指数 *MF*
石炭纪	辉绿岩	13	51.2	4.3507363	0.2517	2.314	1.41045	30.35	1.2	1.0	0.57	32	62
	辉石石英二长闪长岩	3	61.3	7.00241	0.5165	2.684	2.108	13.94	1.23	1.5	0.49	59	77
	辉石石英闪长岩	1	65.1	8.60368	0.0165	3.356	2.486	13.62	1.08	3.2	1.14	62	61
	角闪二长闪长岩	1	59.6	6.2734	0.3968	2.365	1.777	17.61	1.26	1.7	0.66	49	71
	石英二长闪长岩	4	63.6	8.4393	0.4535	3.456	2.696	10.19	1.23	1.9	0.46	70	79
	钾长花岗岩	2	73	9.23864	0.6247	2.847	5.134	3.458	1.29	4.0	0.24	92	87
	花岗岩	6	70.8	7.55859	0.4348	2.052	2.795	8.094	1.53	2.9	0.36	81	80
二叠纪	辉长岩	2	51.7	4.05723	0.2072	1.902	1.372	30.44	1.15	1.0	0.62	29	62
	中基性岩	4	51.4	5.13381	0.1282	3.135	1.593	22.79	1.14	0.8	0.42	40	–

注:(1)原始数据引自文献[1]、[4-5]和下涝坝1:5万区调报告;(2)表中"–"为原始数据缺失。

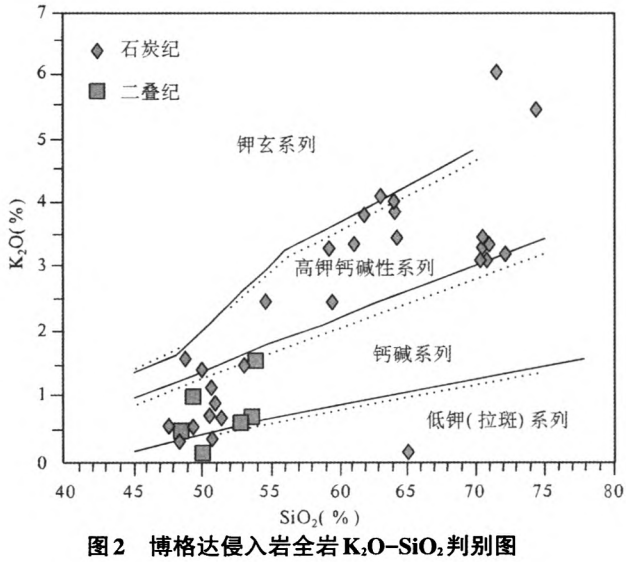

图2 博格达侵入岩全岩 K_2O–SiO_2 判别图

4.1 稀土元素

博格达地区基性中酸性岩类稀土元素地球化学主要特征见表2,其主要有:

(1)晚石炭世侵入岩稀土元素特征基本相似,稀土总量介于(43.6~145)×10^{-6}之间,平均值为112.8×10^{-6},总体含量较低,稀土的总量明显具有从早到晚,从基性到中酸性升高的趋势。由基性—酸性,$(Ce/Yb)_N$逐渐增高,反映岩浆分离结晶程度逐渐增强。$(La/Yb)_N$平均值为4.3,表明轻稀土富集,分配曲线右倾。在稀土元素球粒陨石标准化配分型式图上,其各种岩性的配分型式基本相同,表现为统一的、近平行的缓右倾的曲线簇(图3–a)表明岩浆来源于同一源区。Eu值除钾长花岗岩为0.32,斜长花岗岩为1.67外,其余平均值为0.87,表现为轻度铕负异常。

(2)二叠纪侵入岩稀土元素基本特征相同,稀土总量介于(132~170)×10^{-6}之间,平均含量151×10^{-6},稀土(*REE*)平均含量及总量明显较石炭纪含量增高。$(La/Yb)_N$依次为2.76、1.76;δEu依次为1.045、0.495,即铕负异常愈来愈加深。在稀土元素球粒陨石标准化配分型式图上,表现为轻稀土富集型(图3–c),分配曲线略右倾。与石炭纪比较,稀土总量略高,轻重稀土分异基本相同,具有明显的同源性。在反映源岩稀土基本特征的基础上,显示出有岩浆分异的特点。

4.2 微量元素

万方数据

表2 博格达侵入岩稀土元素主要特征(10^{-6})

时代	岩石	样品数	∑REE	LREE/HREE	$(La/Yb)_N$	δEu	$(Ce/Yb)_N$	δCe	Eu/Sm	$(La/Lu)_N$
石炭纪	辉绿岩	11	145	4.27	3.4395	0.98	3.464	1.0258	0.32	4.45
	辉石石英二长闪长岩	1	121	4.42	3.4849	0.62	3.144	0.879	0.21	3.47
	石英二长闪长岩	1	133	4.49	3.8789	0.69	3.196	0.889	0.23	4.17
	钾长花岗岩	1	128	4.58	3.0406	0.32	2.922	1.0081	0.11	3.44
	花岗岩	6	106	6.92	5.4927	0.81	4.472	0.9601	0.26	5.60
	斜长花岗岩	1	43.6	6.92	6.4087	1.67	5.305	0.9498	0.55	6.91
二叠纪	辉长岩	2	170	3.30	2.2563	1.045	2.323	1.0219	0.34	2.54
	中基性岩	4	132	0.43	1.7585	0.495	1.971	1.0796	0.31	1.65

注:(1)原始数据引自文献[1]、[4-5]和下涝坝1:5万区调报告;(2)表中"-"为原始数据缺失。

表3 博格达侵入岩微量元素特征值(10^{-6})

时代	岩石	样品数	Nb^*	Th^*	Sr^*	P^*	Zr^*	Ti^*	Th/U	$(Rb/Yb)_N$	Zr/Hf
石炭纪	辉绿岩	12	0.53	0.83098	0.7005	1.029	0.973	0.582	2.54	0.752	34.22
	钾长花岗岩	1	0.27	1.02095	0.1179	0.062	2.722	0.089	3.05	6.224	36.333
	辉石石英二长闪长岩	1	0.36	1.08814	0.554	0.427	1.862	0.37	3.06	3.125	30.714
	辉石石英闪长岩	1	0.44	12.7002	0.4492	0.355	6.947	0.897	1.93	0.207	33.723
	石英二长闪长岩	1	0.42	0.47734	1.5549	0.475	5.618	1.495	1.56	-	34.07
	花岗岩	6	0.18	1.40139	0.6341	0.199	2.364	0.288	6.29	3.3645	24.624
二叠纪	辉长岩	2	0.83	27.9014	0.5877	1	1.016	0.386	82.9	0.3628	38.029
	中基性岩	4	0.66	1.30763	0.7482	0.362	1.833	0.52	2.61	0.3145	45.007

注:(1)原始数据引自文献[1]、[4-5]和下涝坝1:5万区调报告;(2)表中"-"为原始数据缺失。

博格达地区基性中酸性岩类微量元素地球化学主要特征见表3,其主特征要有:

(1)两期侵入序列各类岩石中,其中中基性岩$(Rb/Yb)_N$均远小于1,表明岩浆部分熔融程度高较高,分离结晶较低的残余体;而酸性岩$(Rb/Yb)_N$均大于1其可能是中基性岩浆分离结晶较低的残余体进一步分离结晶程度较高的产物。

(2)研究区内岩石Nb^*值均小于1,介于0.18~0.83之间,表明该岩浆在上升的过程中遭到大陆壳物质或花岗质岩石的混染。

(3)研究区内岩石Sr^*值(除石英二长闪长岩外)均小于1,表明该岩石与消减作用或岛弧环境无关,在岩浆结晶分离时发生了斜长石的结晶分离。

(4)研究区内岩石P^*值(辉绿岩为1.029,辉长岩为1)均小于1,表明岩浆遭到地壳物质或花岗质岩石不同程度混染,在岩浆结晶分离时发生了磷灰石的结晶分离。

(5)由微量元素原始地幔标准化蛛网图(图3-b、3-d)可知,2个序列的侵入岩微量元素配分模式极为相似,Ba元素较富集,Nb和Ti相对亏损,与Holm法判别不同构造背景下的大陆初始裂谷环境极为相似[18]。

5 讨论

(1)博格达地区岩浆侵入序列的讨论。由同位素年龄数据判断,研究区可划分为2个侵入岩浆序列,分别为晚石炭世[(298~324)Ma]和二叠纪[(250~289)Ma]两期岩浆序列。两期侵入岩稀土分配图基本上相似,分配曲线略右倾,但稀土总量由基性向酸性逐渐增高,两期侵入岩浆序列微量元素蛛网图形态近似表现为Ba富集,Nb、Ti等亏损,与Holm法判别不同构造背景下的大陆初始裂谷环境极为相似[18]。

(2)博格达地区侵入岩岩浆物源区与侵位环境的讨论。博格达地区的岩浆从稀土元素与球粒陨石比值蛛网图,以及微量元素蛛网图来看,其配分模式基本一致,表明其来自同一源区,以及微量元素的特征值(Rb/

万方数据

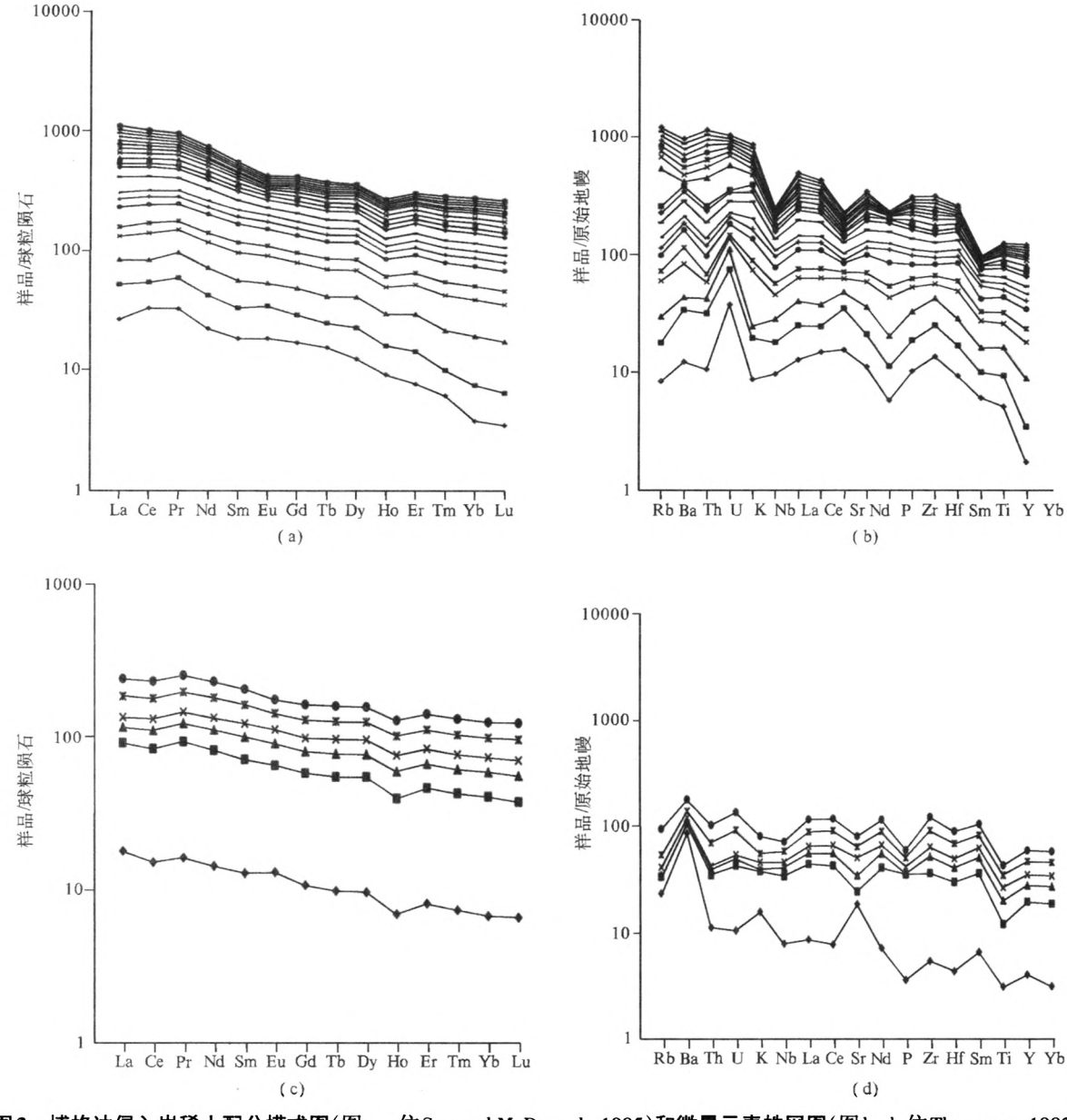

图3 博格达侵入岩稀土配分模式图(图a、c仿Sun and McDnongh, 1985)**和微量元素蛛网图**(图b、d、仿Thompson, 1982)
图a、b—晚石炭世侵入序列;图c、d—二叠纪侵入序列

Yb)$_N$均远小于1,Nb*值均小于1,Sr*值(除石英二长闪长岩外)均小于1,P*值(辉绿岩为1.029,辉长岩为1)均小于1,表明岩浆在上升的过程中发生了结晶分离并遭受到大陆壳或花岗质的岩石混染。博格达造山带经历了2次动力学构造,即晚石炭世[(298~324)Ma]的造山挤压和早二叠纪[(250~289)Ma]由碰撞造山挤压环境转变为造山后期的拉张环境[3,5]正好与两期侵入序列及同位素年龄相吻合,认为岩浆应经过了2个阶段:第一阶段,即晚石炭世侵入序列,来源地幔玄武质岩浆底侵地壳底部形成岩浆房遭到造山作用的挤压后上升并在侵位的过程中发生了高度的结晶分离形成了后期的酸性岩;第二阶段,二叠纪侵入序列,由造山挤压变为拉张环境时使岩浆房压力减小[5],岩浆再一次急速上升,并没由充分的时间结晶分离以至于形成第二次中基性岩浆。

参考文献:

[1] 顾连兴,胡受奚,于春水,等.东天山博格达造山带挤压—拉张构造转折期的侵入活动[J].岩石学报,2001,17(2):187-198.

[2] 顾连兴,于春水,李宏宇,等.博格达上大河沿铜—锶同位素年龄及其地质意义[J].矿物岩石地球化学通报,2000,19(1):19-22.

(下转第173页)

万方数据

托盘)→出渣→打注两帮锚杆(挂钢网、安装托盘)→打注锚索。达到了以下目的:①保证巷道长期稳定性;②适应回采工作面的动压需求;③适应于地质条件变化的要求;④在巷道服务期间,要满足巷道的支护要求,使锚索辅助支护系统不失效,与锚杆支护系统相协调。

采用锚网喷、锚索、套棚、锚注(成束锚索注浆)联合加固支护的耦合支护技术后,巷道施工进度加快,巷道顶板下沉量、两帮收敛量、基础位移量等均达到设计要求和预期目标,有效地控制了巷道顶板下沉和两帮近移,实现了巷道的稳定。实践证明,该支护体系能够完全适应高地应力下新掘大跨度交岔点和大跨度硐室施工支护,是理想的支护形式。

5 结论

通过对深部复杂岩层巷道围岩控制与支护技术的研究现状、矿压显现规律、围岩控制与支护原理和技术体系进行总结,有以下几点认识:

(1)深部复杂岩层巷道矿压问题由矿井深度和岩性2个因素决定。其特征为:矿压显现剧烈;围岩变形量大,巷道破坏严重;破坏范围大。

(2)围岩强度、围岩应力和支护技术是决定巷道稳定性的3大因素,深部巷道围岩控制主要通过提高围岩强度、减小巷道围岩应力和选用合理的巷道支护技术来实现。

(3)深部复杂岩层巷道围岩控制与支护遵循深部巷道围岩的破裂区原则和先柔后刚、二次支护原则,合理确定相应的支护方式,一般而言,深部巷道耦合支护体系是目前主要采用且较为合理有效的支护方式。

参考文献:

[1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2814.

[2] 何满潮,齐干,等.深部复合顶板煤巷变形破坏机制及耦合支护设计[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):987-993.

[3] 王连国,李明远,等.深部高应力极软岩巷道锚注支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2889-2893.

[4] 郭志飚,李乾,等.深部软岩巷道锚网索—桁架耦合支护技术及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):3914-3919.

[5] 齐干,李占金,等.深部大断面软岩巷道变形力学机制及耦合支护设计[J].采矿与安全工程学报,2009,26(4):455-459.

[6] 李国峰.兴安煤矿深部高应力强膨胀型软岩巷道支护对策研究[J].煤炭工程,2009(9):31-33.

[7] 刘文岗,赵毅鑫,等.深部巷道锚杆支护围岩稳定性研究[J].煤炭科学技术,2004,32(1):28-31.

[8] 杜计平,张先尘,等.煤矿深井采场矿压显现及其控制特点[J].中国矿业大学学报,2000,29(1):82-84.

[9] 柏建彪,侯朝炯,等.深部巷道围岩控制原理与应用研究[J].中国矿业大学学报,2006,25(2):145-148.

[10] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].中国矿业大学出版社.

[11] 周创兵,陈益峰,等.论岩体多场广义耦合及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1329-1340.

(上接第170页)

[3] 欧阳征健,周鼎武,等.博格达山白杨河地区中基性岩墙地球化学特征及其地质意义[J].大地构造与成矿学,2006,30(4):495-503.

[4] 王方成,蔡晓菊,等.新疆博格达晚古生代花岗岩地球化学特征及构造意义[J].兰州大学学报,2010,46(5).

[5] 郭威,周鼎武,欧阳征键,等.博格达山南缘达坂城东沟乡二叠纪岩浆岩及其形成地质环境[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2009,37(1):103-108.

[6] 成守德,王广端,杨树德,等.新疆古板块构造[J].新疆地质,1986,4(2):1-26.

[7] 方国庆.博格达晚古生代岛弧的沉积岩石学证据[J].沉积学报,1993,11(3):31-36.

[8] COLEMAN.Continental Growth of North China[J].Tectionics,1989,8(1):621-625.

[9] Han B F,He G Q,Wang S G. Postcollisional Mantle-derived Magmatism, Underplating and Implications for Basement of the Junggarbasin. Science in China (SeriesD), 1999,42(2):113-19.

[10] 吴庆福.准噶尔盆地构造演化及含油气远景[J].新疆地质,1986,4(3):1-19.

[11] 王利利,张恺,高明远.准噶尔盆地南缘的构造演化特征及含油气预测[J].新疆石油地质,1986,7(2):1-9.

[12] 何国琦,李茂松,刘德权,等.中国新疆古生代地壳演化及成矿[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1994:1-437.

[13] 马瑞士,舒良树,孙家齐.东天山构造演化与成矿[M].北京:地质出版社,1997:1-202.

[14] 顾连兴,胡受奚,于春水,等.论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化[J].岩石学报,2001b,17(4):585-597.

[15] 顾连兴,胡受奚,于春水,等.东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境[J].岩石学报,2000,16(3):305-316.

[16] 新疆维吾尔自治区地质矿产局.新疆维吾尔自治区区域地质志[M].北京:地质出版社,1993.

[17] 舒良树,朱文斌,王博,等.新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷和水下滑塌构造[J].岩石学报,2005,21(1):25-36.

[18] 李昌年.火成岩微量元素化学[M].武汉:中国地质大学出版社,1992:1-195.

万方数据