

铬的迁移形式、成矿机理新探

郑大中, 郑若锋

(成都综合岩矿测试中心, 成都 610081)

摘要: 通过对地球深部富氢流体、若干金属氢化物及合金氢化物的形成条件与性质、铬矿物的化学成分及其共生伴生矿物的研讨, 结合铬铁矿成矿的地质背景, 认为铬氢化物、铬合金氢化物是铬成矿的主要迁移形式。它们从地球深部富氢强还原环境随岩浆迁移至地壳浅部, 由于 H_2 , CO , CH_4 等逃逸、氧化, 氧逸度大增, 温度、压力下降, 铬氢化物和铬合金氢化物分解、氧化、固化富集成铬矿床。

关键词: 铬氢化物; 铬合金氢化物; 迁移形式; 氧化固化富集; 铬矿床

中图分类号: P611.5; P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2012)01-0001-08

0 引言

铬在地球各圈层的丰度为: 地核 $w(Cr) = 660 \times 10^{-6}$, 下地幔 $w(Cr) = 2\,000 \times 10^{-6}$, 上地幔 $w(Cr) = 1\,600 \times 10^{-6}$, 地壳 $w(Cr) = 110 \times 10^{-6}$ [1]。铬是深源元素, 地幔是它的储库。铬矿床成因有地幔说、岩浆说、变质说、复合说等 [2-10]; 但迄今对铬是以何种化学形式迁移至地壳浅部成矿的报道不多, 因此, 本文对其探究, 这对铬的地质找矿及其地球化学、矿床学、矿物学、开发利用具有重要意义。

1 地球深部的强还原富氢环境

氢是形成其他元素的始祖 [11], 也是宇宙中丰度最大的化学元素, 其原子的数目比宇宙空间中其他所有元素的原子数目的总和约大 100 倍, 占宇宙质量的 98% 以上 [12]。在元素合成过程中, 除形成原子氢、分子氢外, 还可能形成许多单质氢化物、合金氢化物及氢的氧化物。

地球是太阳系中的一员。太阳主要由氢、氦 2 种元素组成, 太阳的能量是由其内部的氢氦聚变提

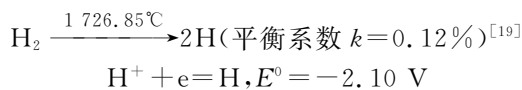
供的 [13]。太阳的大气中氢占 81.75% (以原子相对质量分数计), 氢是太阳风的主要成分。地球从形成到现在从太阳风中吸收氢的总量为 $1.70 \times 10^{23} g$ [13]。类地行星大气的化学成分: 木星中 $\varphi(H_2) = 89\%$, $\varphi(He) = 11\%$, $\varphi(CH_4) = 0.06\%$, $\varphi(NH_3) = 1.2 \times 10^{-3}$, $\varphi(H_2O) = 8.8 \times 10^{-11}$, 微量的 GeH_4 和 PH_3 ; 水星中 $\varphi(H_2) = 58\%$, $\varphi(He) = 0.41\%$, $\varphi(CO_2) = 1.2\%$, $\varphi(H_2O) = 18\%$, $\varphi(O_2) = 5.9 \times 10^{-7}$, $\varphi(CO) = 1.2\%$; 土星中主要是 H_2 和 CH_4 , 有少量的 NH_3 ; 海王星的大气主要为 H_2 , CH_4 和 C_2H_6 ; 冥王星的大气则是 H_2 , He 和 Ne [14]。木星、水星的星壳、星幔均由液态分子氢、液态原子氢组成 [15]。月壤细颗粒中 $w(H_2) = 10 \times 10^{-6} \sim 211 \times 10^{-6}$ [16]。地球的形成过程既有太阳的抛出物, 亦有俘获的宇宙物质, 其胚胎阶段的原始大气成分以 H_2 和 He 为主, 迄今地核、地幔中储存有巨量的氢。这可从深源矿物岩石中储存有相当高的氢和其他还原性气体得到证明。金刚石流体包裹体中的挥发成分: 南非普雷米岩筒八面体 II 型金刚石中 $w(H_2) = 59.0\%$, $w(CH_4) = 8.4\%$, $w(H_2O) = 22.5\%$, $w(CO_2) = 10.1\%$; 八面体 I 型金刚石中 $w(H_2) = 43.1\%$, $w(CH_4) = 12.9\%$, $w(H_2O) = 17.0\%$, $w(N_2) = 2.6\%$, $w(CO) = 14.7\%$, $w(CO_2) = 9.5\%$ 。美国阿肯色州八面体 I 型金刚石中 $w(H_2) =$

收稿日期: 2010-05-10; 责任编辑: 余和勇

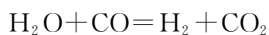
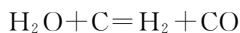
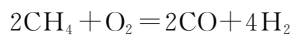
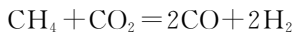
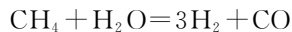
作者简介: 郑大中(1937-), 男, 高级工程师, 从事岩矿测试及地球化学研究。通信地址: 成都市人民北路一段 25 号, 成都综合岩矿测试中心; 邮政编码: 610081。

29.4%, $w(\text{CH}_4) = 8.2\%$, $w(\text{H}_2\text{O}) = 33.2\%$, $w(\text{N}_2) = 3.7\%$, $w(\text{CO}) = 9.4\%$, $w(\text{CO}_2) = 10.0\%$; 菱形十二面体金刚石中 $w(\text{H}_2) = 37.4\%$, $w(\text{CH}_4) = 6.5\%$, $w(\text{H}_2\text{O}) = 16.5\%$, $w(\text{N}_2) = 7.3\%$, $w(\text{CO}_2) = 1.0\%$, $w(\text{CO}) = 7.5\%$ ^[17]。科拉半岛岩石中气体成分(均值): 奥列涅戈尔斯基及其他地区片麻岩中 $\varphi(\text{H}_2) = 90.48\%$, $\varphi(\text{CH}_4) = 8.22\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 1.12\%$; 格列米亚哈—维尔麦斯岩体辉石岩—辉长岩—斜长岩中 $\varphi(\text{H}_2) = 78.96\%$, $\varphi(\text{CH}_4) = 13.14\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 7.90\%$; 霞石正长岩中 $\varphi(\text{H}_2) = 83.87\%$, $\varphi(\text{CH}_4) = 5.04\%$, $\varphi(\text{CO}) = 6.70\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 4.47\%$; 科夫多尔斯基岩体磷灰石—橄榄石岩中 $\varphi(\text{H}_2) = 96.66\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 3.14\%$; 金云母岩中 $\varphi(\text{H}_2) = 99.93\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 0.07\%$; 阿夫里康德斯基岩体辉闪苦橄岩、辉石岩中 $\varphi(\text{H}_2) = 85.87\%$, $\varphi(\text{CH}_4) = 13.69\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 0.44\%$ ^[18]。还可从许多岩浆中喷出以氢为主的还原性气体得到证明。1925年, 在原苏联 Тагильски 纯橄榄岩打钻至 600 m 深处有气喷, 其成分中 $\varphi(\text{H}_2) = 81.8\%$, $\varphi(\text{CH}_4) = 9.2\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 0.5\%$, $\varphi(\text{N}_2 + \text{稀有惰性气体}) = 8.5\%$; 乌拉尔泥盆纪喷发岩的气体中 $\varphi(\text{H}_2) = 80.4\%$, $\varphi(\text{N}_2 + \text{稀有惰性气体}) = 19.0\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 0.2\%$; 南澳前寒武纪变质岩及花岗岩打钻出气, 其中 $\varphi(\text{H}_2) = 76.0\%$, $\varphi(\text{CH}_4) = 7.5\%$, $\varphi(\text{CO}_2) = 0.8\%$ ^[19]。

氢的原子质量和半径都很小, 扩散、穿透能力很强, 它能穿透金属、合金、岩石、矿物、玻璃等物质; 氢具有还原性, 其还原能力随温度升高而增强, 当温度升至 1 726.85 °C 时, 可解离成氢原子, 还原能力剧增:



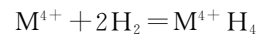
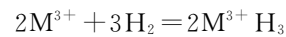
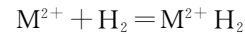
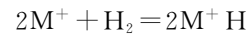
值得一提的是, 在一定温度、压力条件下, CH_4 可与 H_2O , CO_2 , O_2 裂化为 H_2 和 CO ; H_2O 与 C , CO 作用产生 H_2 。



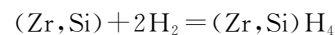
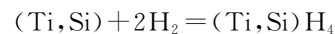
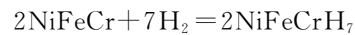
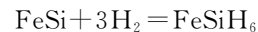
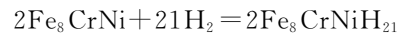
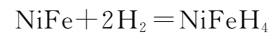
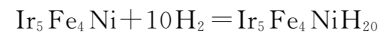
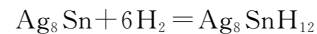
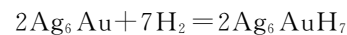
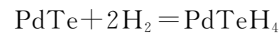
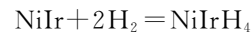
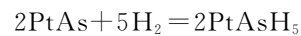
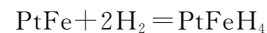
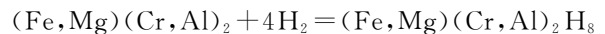
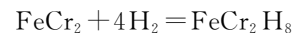
2 金属氢化物的形成条件和性质

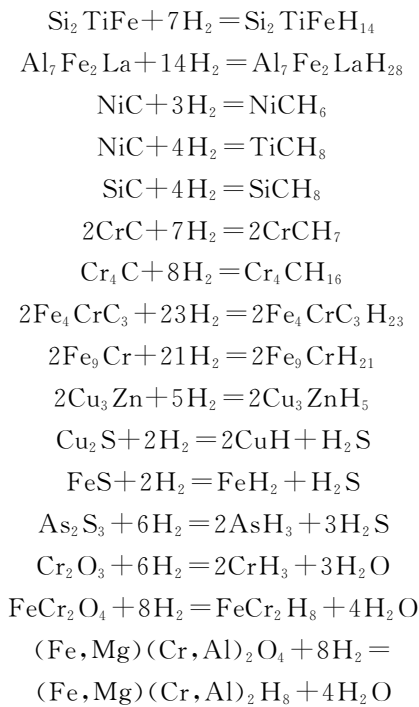
在高温强还原环境中, H_2 , CO , C 能将 Cr_2O_3 ,

FeCr_2O_4 , $(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$ 还原为 Cr , FeCr_2 , $(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{Cr}, \text{Al})_2$ 。在室温以铁、铬混合盐为原料, 甲苯为溶剂, 三乙基硼氢化钠为还原剂, 即能制得 FeCr 纳米合金粉^[20]。在一定温度的高压强还原富氢环境中, 许多单质、合金、化合物等均能形成氢化物^[21], 它们的纳米微粒有许多悬空键和晶格缺陷, 有很强的吸气性, 更易于形成氢化物。铂黑能吸收相当于自身体积 502 倍的 H_2 , 钨黑能吸收相当于自身体积 2 800 倍的 H_2 , 金熔融时能吸收相当于自身体积 37~46 倍的 H_2 , 钛铁合金可储存相当于自身体积 700 倍的 H_2 , 相当于 700 个气压的高压氢钢瓶^[22], 纯钛的吸氢密度高达 9.2×10^{22} 氢原子/ cm^3 , 比液氢密度大 1 倍多^[23], 它们在吸氢过程中即形成氢化物, 其晶格参数及体积随着增加, 熔点、沸点显著降低^[21]。在高压强还原富氢碱性环境中, 氢化物相当稳定, 不分解、不水解、不硫化、不砷化、不氧化, 一些硫化物反而能氢化。氧化物可直接氢化成氢化物:



式中, M^+ 为 $\text{K}, \text{Na}, \text{Li}, \text{Rb}, \text{Cs}, \text{Au}, \text{Ag}$; M^{2+} 为 $\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Ba}, \text{Sr}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Zn}, \text{Mn}, \text{Pt}, \text{Pd}, \text{Os}, \text{Ir}, \text{Rh}, \text{Ru}$; M^{3+} 为 $\text{Cr}, \text{V}, \text{Al}, \text{N}, \text{P}, \text{As}, \text{Sb}, \text{Bi}, \text{REE}$ (稀土元素) 等; M^{4+} 为 $\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Si}, \text{Ge}, \text{C}, \text{Sn}, \text{Pb}$ 。





在低压贫氢相对氧化环境中, 氢化物分解成单质、合金, 有的还氧化成氧化物。如再遇一定温度的高压强还原富氢环境, 即能再氢化形成单质氢化物、合金氢化物, 这表明氢化反应具可逆性。

上述的氢化物特性, 在氢的安全高效储运、能量变换、化学热泵、氢的分离提纯富集回收、氢同位素分离、氢能汽车及自行车、高能密度及高性能新型电池、化学元素的分离及富集与测定得到越来越广泛的应用^[21-22], 成为研究的热点和重点之一, 呈现百花齐放的势态。仅与铬有关的储氢合金就有 TrCr_2 ^[22], TiCr , $\text{TiCr}_{1.8-x}\text{V}_x$ ^[24], VTiCr , VTiCrFe ^[25], TiFe_xCr_y ^[26], TiZrVMnCrNi ^[27],



3 铬矿物的化学成分

铬矿物的化学成分存储有可靠的地球化学成因与找矿信息, 可判断识别铬等成矿元素的迁移形式和成矿过程。现将具代表性的铬矿物化学成分列于表 1, 表 2。

除表 1, 表 2 所列铬矿物外, 还有自然钨中含 $\omega(\text{Cr}) = 3.51\%$, 自然铝含 $\omega(\text{Cr}) = 2.54\%$, 方铁矿含 $\omega(\text{Cr}) = 2.66\%$, 方锌矿含 $\omega(\text{Cr}) = 1.19\%$, 硅金红石含 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 0.77\%$, 赤铁矿含 $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 0.79\%$ ^[31]; 以及 Fe_9Cr , CrC , Cr_3C , Cr_3C_2 , Cr_4C , Cr_7C_3 , $\text{Ni}_5\text{Fe}_3\text{Cr}_2$, Fe_4CrC_3 , Fe_6CrC_3 , Fe_8CrNi ^[9], 雅鲁矿 ($\text{Cr}_4\text{Fe}_4\text{Ni}$)_{Σ9} C_4 ^[47], 硼铬矿 (Cr_2B)^[48], 铬铋矿 ($\text{Bi}_{16}\text{CrO}_{27}$)^[49], 镁铬矾矿 [$\text{Mg}(\text{Cr}, \text{V})_2\text{O}_4$]^[50] 等。

由此可知: ① 铬矿物化学成分中有众多深源元素: Cr , Ni , Co , Fe , Au , Ag , PGE (铂族元素); 有易于形成氢化物的元素 B , Bi , C , Cu , Ti , V , Zn , Si , Zr , REE (稀土元素), 有的氢化物氢含量相当高, 如 CH_4 , SiH_4 , B_2H_6 中氢的质量分数分别为 24.98%, 12.46% 和 21.72%, 其沸点分别为 -161.5°C , -111.8°C 和 -92.5°C , 这表明成矿物质来自地球深部, 在高温、高压强还原富氢还原环境中, 它们可呈单质氢化物、合金氢化物迁移; ② 铬矿物中有自然元素矿物、合金矿物、低价氧化物矿物, 也有高价氧化物矿物, 同一铬矿床中同一元素呈现多价态, 如铬有

表 1 自然铬及铬合金矿物化学成分

Table 1 Chemical composition of native Cr and Cr alloy

编号	矿物名称	Cr	Al	Fe	Ni	Ti	Au	Ag	Cu	Ir	C	Mn	Si	Mg	Ca	Σ	资料来源(文献)
1	自然铬	100.00														100.00	[31]
2	Cr-自然铝	2.54	97.42													99.96	[31]
3	Cr-自然铁	4.75	0.03	94.23	0.05	0.02						0.14	0.38	0.01	0.01	99.62	[32]
4	Cr-自然金	3.74		0.01			90.50	5.04	0.02							99.31	[33]
5	铁铬镍合金	20.09		70.31	9.17											99.57	[34]
6	镍铬铁合金	27.18	0.36	26.19	45.33	0.13										99.19	[35]
7	铬碳镍铁合金	58.51		2.84	15.19						23.45					99.99	[36]
8	铬碳镍铁合金	67.41		2.97	9.52						20.28					100.18	[36]
9	镍铬铁碳合金	32.60		13.60	42.20						11.60					100.00	[36]
10	铁铬镍碳合金	22.83		42.86	21.68						12.63					100.00	[36]
11	铁铬镍合金	19.08		72.08	8.84											100.00	[37]
12	镍铁铬合金	17.88		33.71	48.41											100.00	[37]
13	镍铌铁铬合金	0.98		11.03	48.64				39.34							99.99	[37]
14	镍铁铬合金	22.72		34.52	41.53	0.01						0.26	0.22			99.30	[38]
15	铌铁镍铬合金	1.00		30.38	2.20				64.30							97.88	[39]

注: 量的单位: $\omega_B/\%$ 。样品 14 中 $\omega(\text{Na}) = 0.03\%$, $\omega(\text{K}) = 0.01\%$; 空格为未测。

表2 铬的氧化矿物化学成分
Table 2 Chemical composition of Cr oxide

编号	矿物名称	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	NiO ₂	TiO	V ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂
1	绿铬矿	100.00								
2	钛铬铁矿	26.20	0.83	1.24		2.93	0.58	6.41		
3	钛铬铁矿	20.43	0.14	10.73		21.04		1.31	12.95	
4	铬铁矿	57.30		6.80				7.60	5.80	
5	铬铁矿	49.67	2.10	5.40	0.02	0.35		10.12	9.58	
6	铬镁矿	79.04		20.96						
7	铬铁矿	67.91								
8	铬铁矿	43.46		2.70				0.37	25.65	
9	铬尖晶石	38.64	1.10	5.33				27.12	0.61	
10	铬尖晶石	45.36	0.50	10.54	0.16	0.26		12.56	10.57	
11	镁铬榴石	17.47	0.60	16.79		0.11		9.74	1.20	
12	铬鳞镁矿	23.24		36.98						
13	铬云母	2.10	0.05	0.70		2.10		31.70		
14	红宝石	1.24	0.03					98.17		
15	钛钡铬石	17.19		3.76		53.30	0.78	0.27		4.39
16	钛钾铬石	17.70		4.05		56.86		0.51		5.22
17	铬硬玉	8.79		0.95		0.23		15.85		
编号	矿物名称	CaO	FeO	ZnO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	CO ₂	Σ
1	绿铬矿									100.00
2	钛铬铁矿		61.59							99.78
3	钛铬铁矿		33.99							100.59
4	铬铁矿		23.00							100.50
5	铬铁矿		21.67	1.84						100.77
6	铬镁矿									100.00
7	铬铁矿		32.09							100.00
8	铬铁矿		25.08	2.74						100.00
9	铬尖晶石		27.00		0.28			0.25		100.33
10	铬尖晶石	0.08	19.78		0.31	0.06	0.09			100.27
11	镁铬榴石	8.14	6.53		39.92					100.68
12	铬鳞镁矿							33.05	6.73	100.00
13	铬云母	0.10	2.30		44.40	1.10	10.70	4.70		99.95
14	红宝石		0.03			0.03	0.01			99.51
15	钛钡铬石	0.38	8.92		0.17		0.29			99.08
16	钛钾铬石	0.39	8.71				1.30			99.99
17	铬硬玉	0.46	2.22		56.69	14.82				100.01

注:量的单位:w_B/%。样品15中w(TR₂O₃)=1.59%,w(SrO)=0.93%,w(Nb₂O₅)=2.04%,w(BaO)=5.07%;样品5中w(CO)=0.02%;样品16中w(TR₂O₃)=1.21%,w(BaO)=3.25%,w(SrO)=0.79%;空格为未测。数据据文献[4,6,8,40-46]。

Cr⁰,Cr³⁺,铁有Fe⁰,Fe²⁺,Fe³⁺,铝有Al⁰,Al³⁺等,这表明成矿过程是从地球深部高压强还原环境向地球浅部低压相对氧化环境演化的;③由于单质氢化物、合金氢化物的熔点较低,与围岩橄榄石等不混溶,易呈液态球体或椭球体氧化、固化成豆荚状铬矿体;④碳酸盐含水铬矿物表明,岩浆期后热液或变质热液可以形成铬矿物。

4 铬矿物的共生伴生矿物

铬的主要矿物为铬尖晶石类矿物,其化学通式为

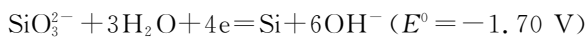
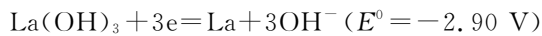
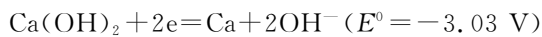
(Mg,Fe)(Cr,Al,Fe)₂O₄,它们总是与橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、蛇纹石、石榴石、金云母、白云母、滑石、水镁石、方镁石、菱镁矿、铂族元素矿物共生伴生。

西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿床中铬矿物的共生伴生矿物还有金刚石、石墨、自然硅、自然铁、自然铝、自然锌、自然铅、自然锡、自然镍、自然铜、自然金、自然银、自然钛、自然钨、自然硫;NiC,FeC,TiC,Wc,SiC,(W,Co)C,Ni₆C₄;FeSi,Fe₂Si₃,Fe₃Si₇,Fe₃Si₂,Fe₇Si₃,Fe₂Ni,Ni₃Fe,Ni₇Fe₃,Fe₃Mn,Cu₃Zn,Ti₆W₄,Si₂Ca,Si₇Ca₃,Ti₂N,Ti₂N₃,Ag₆Au,Ag₈Sn,Al₇Fe₂La,NiFeSi,Si₂TiFe,Si₇Ca₂Fe,Si₇(Fe,Al)₃,

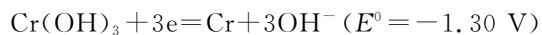
SiFe₅Ti₅, Si₆CaCu, Si₅Fe₂Al₂Ca, Si₆CaAlFe; FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, MgO, (Mg, Fe)O, (Fe, Mg)O, CaO, ZnO, PbO, CuO, SiO₂, TiO₂, (Ti, Si)O₂, (Si, Ca)O₂, (Zr, Si)O₂, Al₂O₃, MgAl₂O₄, Mg(Al, Si)_{2-x}O₄, (Fe, Ni, Si)_{1-x}O; FeS, FeS₂, Ni₂S, MoS₂, Ni₃S₂, Sb₂S₃, FeAsS, Pd₃As₂, Sb₃S₅, PbS, MnS, Ag₄S, Ti₇S₃, (Fe, Cu)₂S₂, (Ni, Fe)₃S₂, (Ni, Fe)₄S₃, (Fe, Ni, Co)S 等^[9]。

俄罗斯乌拉尔豆荚状铬铁矿床中自然铬的共生伴生矿物也有金刚石、自然铁、自然铝、自然钴、自然钨、自然钼等; SiC, WC 等碳化物; CrFe, NiCu, FeSi, FeP, AgAu, AgSn, SiAlFe, AgZnSn 等合金矿物; FeO, Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, (Ti, Si)O₂, MgO, SnO₂, FeTiO₃ 及稀土氧化物等^[47]。

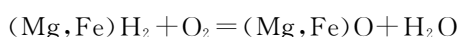
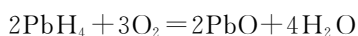
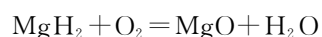
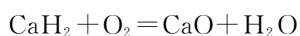
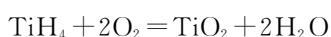
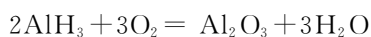
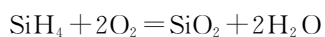
上述铬矿床中铬矿物的共生伴生矿物有众多的深源矿物, 如: 镁橄榄石、铂族元素矿物、自然元素矿物、合金矿物、碳化物、氮化物、磷化物等, 它们形成于地球深部高温强还原环境, 也证明铬矿物来自地球深部, 可能经历过单质、合金阶段。这是因为共生伴生矿物中钙、铝、镧、硅、磷形成单质的标准电极电位很低:



而 Cr(OH)₃ 还原成金属的标准电极电位相对较高, 更易于被还原。

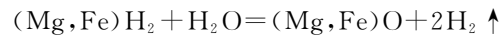
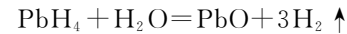
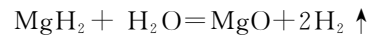
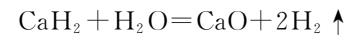
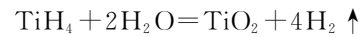
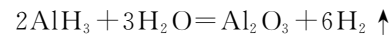
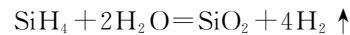


铬矿物的共生伴生矿物中既有酸性矿物如 SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ 等, 又有碱性矿物如 MgO, CaO, PbO, (Mg, Fe)O 等, 酸性矿物与碱性矿物为什么不化合而独立存在同一矿床中, 用传统理论是很难解释的。若它们各自呈氢化物络合物迁移至温度较低且较氧化的环境中分别被氧化结晶, 由于缺乏高温和活化条件, 它们不能进行化学反应。



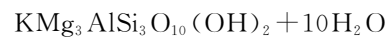
在有水环境中, 氢化物可水解成氧化物, 这可以

解释晶洞产出巨量水晶而水却相当少的原因。



铬铁矿与橄榄石等碱性硅酸盐密切伴生, 但橄榄石中含铬很低, 甚至不含铬, 这是由于: ①迁移形式不同, 一个是铬铁合金氢化物, 一个是硅酸盐氧化物, 在地球深部高温时虽都是熔融液态, 并一道迁移, 但它们不互溶; ②形成机制不同, 橄榄石在熔体降温时即能晶出, 而铬铁合金氢化物熔点相对较低, 并需氧化后方能晶出。

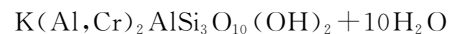
金云母、白云母、铬云母的形成机制可能与铬铁矿的形成机制相似, 即呈合金氢化物与铬合金氢化物一道迁移, 然后在较氧化环境和较低温度条件下结晶。



金云母

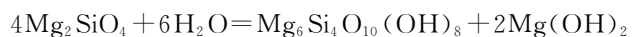


白云母



铬云母

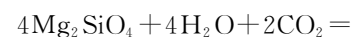
合金氢化物氧化结晶产生的水与天水混合形成岩浆期后热液, 可作用于橄榄石、辉石等产生蚀变, 生成蛇纹石、滑石、水镁石、菱镁矿。铬铁矿稳定性高, 难发生热液蚀变。



橄榄石

蛇纹石

水镁石

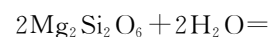


橄榄石



蛇纹石

菱镁矿

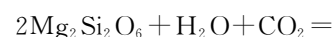


辉石



滑石

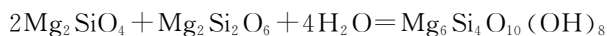
水镁石



辉石

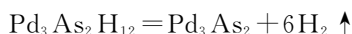


滑石 菱镁矿

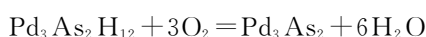


橄榄石 辉石 蛇纹石

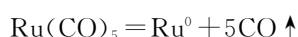
铂族元素矿物、硫化物、砷化物、硫砷化物与铬矿物共生伴生,与有关元素呈氢化物、羟基络合物迁移、降压, H_2 和 CO 逃逸、氧化、硫化结晶有关:



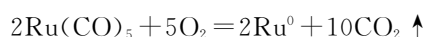
二砷三钯矿



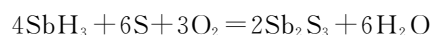
二砷三钯矿



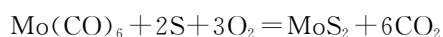
自然钌



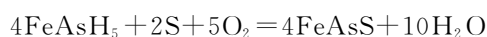
自然钌



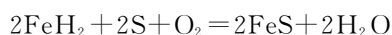
辉锑矿



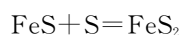
辉钼矿



毒砂



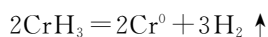
硫铁矿



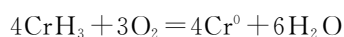
黄铁矿

5 铬的成矿机制

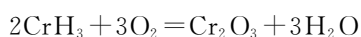
铬矿的形成具有深部构造运动、富铬基性—超基性岩浆大规模侵入地壳浅部的地质背景,有的还有长期性、多期次、多阶段入侵和脉动特征。铬呈铬氢化物、铬合金氢化物通过断裂、裂隙随岩浆迁移至地壳浅部,由于 H_2 , CO , CH_4 , CO_2 等逃逸、氧化,氧逸度大增,温度、压力下降,铬氢化物分解形成自然铬,或氧化形成绿铬矿、铁镁铬铝等合金氢化物氧化形成铬铁矿等氧化矿物,结晶、富集成矿。



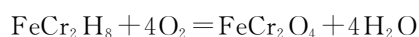
自然铬



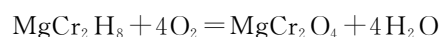
自然铬



绿铬矿



铬铁矿



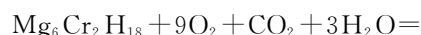
镁铬矿



铬尖晶石



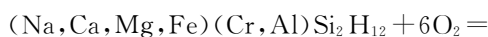
钛铬铁矿



铬鳞镁矿



镁铬榴石



铬硬玉



钛钡铬石

参考文献:

- [1] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京:北京大学出版社,1999:34-38.
- [2] 白文吉,崔翼. 铬铁矿床类型及其成因的探讨[J]. 地质学报,1977,51(1):29-42.
- [3] 鲍佩声,王希斌,彭根水. 中国铬铁矿床[M]. 北京:科学出版社,1999:1-350.
- [4] 鲍佩声,王希斌,郝梓国,等. 对富铝豆荚状铬铁矿矿床成因的新认识[J]. 矿床地质,1990,9(2):97-111.
- [5] 魏文中. 论甘肃铬铁矿的成因和成因类型[J]. 地质学报,1978,52(4):269-280.
- [6] 骆耀南. 攀枝花地区辛阶含钛铬铁矿的层状超镁铁岩体的矿化特征[J]. 地球化学,1981,10(1):66-73.
- [7] 陈世忠,杨经绥. 苏鲁超高压变质带岗上超镁铁质岩铬尖晶石形成过程:铬成矿新机制[J]. 地学前缘,2009,16(5):232-244.
- [8] Hock H. 菲律宾吕宋岛三描礼士蛇绿岩中的耐火型和冶金型铬铁矿石[J]. 地质地球化学,1987(11):1-10.
- [9] 白文吉,杨经绥,方青松,等. 西藏蛇绿岩中不寻常的地幔矿物群[J]. 中国地质,2003,30(2):144-150.
- [10] Уханов А В, Когарко Л Н. 橄榄岩与辉长岩类接触带附近的铬铁矿矿床的成因:以古巴梅塞迪塔矿床为例[J]. 地质地球化学,1986(1):11-16.
- [11] 郑大中,郑若锋. 论氢化物是成矿的重要迁移形式[J]. 盐湖研究,2004,12(4):9-17.
- [12] 阿莱格尔 C J. 陨石地球太阳系[M]. 北京:地质出版社,1989:139-141.
- [13] 徐道一,杨正宗,张勤文,等. 天文地质学概论[M]. 北京:地

- 质出版社, 1983: 1-284.
- [14] 欧阳自远. 天体化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 1-360.
- [15] 盖保民. 地球演化: 第一卷[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 67-181.
- [16] 林文祝, 欧阳自远. 重返月球[J]. 地质地球化学, 1995(4): 28-44.
- [17] 伊万金 П. Ф. 金伯利岩形成作用的阶段和金刚石形成条件的演变[J]. 国外地质科技, 1989(4): 1-6.
- [18] 杜乐天. 国外天然气地球科学研究成果介绍与分析[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 1-18.
- [19] 杜乐天, 陈安福, 王驹, 等. 地球的排氢作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1995(3): 193-195.
- [20] 程起林, 赵斌, 古宏晨. 液相还原制备 Fe-Cr 纳米粉[J]. 华东理工大学学报, 1999, 25(4): 499-501.
- [21] 郑大中, 郑若锋. 论氢化物的形成及其在分析测试领域的应用[J]. 江苏地质, 2008, 32(1): 5-11.
- [22] 邹盛欧. 金属氢化物的合成与应用概况[J]. 化学工程师, 1990(5): 27-30.
- [23] 王宁, 王佩璇, 张建伟, 等. 纯钛吸氢后的微观结构研究[J]. 稀有金属, 1995, 19(5): 348-351.
- [24] 黄太仲, 吴铸, 冯尚龙, 等. V 取代 TiCr 基储氢合金中部分 Cr 对储氢性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(1): 141-144.
- [25] 梁浩, 严义刚, 吴朝玲, 等. V-Ti-Cr-Fe 合金吸放氢性能研究[J]. 稀有金属, 2005, 29(2): 138-142.
- [26] 周德歧, 周自强. TiFe_xCr_y 三元储氢合金的研究[J]. 稀有金属, 1989, 13(4): 330-333.
- [27] 朱云峰, 潘云革, 刘永锋, 等. 新型 TiV 系储氢电极合金[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 680-684.
- [28] 黄太仲, 吴铸, 徐乃欣. Tr Cr Mo 三元储氢合金的结构和性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(11): 1855-1860.
- [29] Bulyk I I. 钛对氢诱发 ZrCr₂ 金属间化合物中相结构转变的影响[J]. 有色金属文摘, 2007, 22(2): 87.
- [30] 钟俊辉. 稀土储氢材料的发展动向[J]. 稀土, 1994, 15(6): 54-62.
- [31] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏蛇绿岩地幔中的主要自然金属矿物[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 179-187.
- [32] 郑建平, 路风香, 郑曙, 等. 地幔中自然铁: 偏离正常矿物化学成分矿物共生体与深源流-岩作用[J]. 地质科技情报, 2000, 19(2): 27-30.
- [33] 蔡长金, 陆荣军, 宋湘荣. 中国金矿物志[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 36, 375.
- [34] 张仲明, 杨经绥, 熊明, 等. 东海榴辉岩中发现未知 Fe-Cr-Ni 矿物[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(1): 101-102.
- [35] 代明泉, 施倪承, 马哲生, 等. 西藏罗布莎 Ni-Cr-Fe 合金的 X 射线晶体学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(1): 74-76.
- [36] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿中的合金成分[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 675-682.
- [37] 白文吉, Robinson Paul T, 方青松, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿中的铂族元素和贱金属合金[J]. 地球学报, 2004, 25(4): 385-396.
- [38] 白文吉, 施倪承, 杨经绥, 等. 西藏蛇绿岩二种合金矿物新变种[J]. 矿物学报, 2002, 22(3): 203-206.
- [39] 熊明, 施倪承, 代明泉, 等. 西藏罗布莎 Ir-Fe-Ni 合金的 X 射线晶体学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(2): 155-156.
- [40] 白文吉, 施倪承, 杨经绥, 等. 西藏蛇绿岩豆荚状铬铁矿中简单氧化物组合及其超高压成因[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1538-1549.
- [41] 陆琦, 周湖云, 刘惠芳, 等. 上地幔交代氧化物及其相关矿物: 金伯利岩中复杂氧化物的相互关系及地幔交代作用探讨[J]. 矿物学报, 1998, 18(4): 483-495.
- [42] Ппаксенко А Н. 科马提岩系中与其成因有关的铬尖晶石类副矿物的化学成分[J]. 地质地球化学, 1988(11): 31-37.
- [43] 中国地质科学院地质矿产研究所. 透明矿物显微镜鉴定表[M]. 北京: 地质出版社, 1977: 68, 90, 94, 202.
- [44] 何谋春, 朱选民, 洪斌. 云南元江红宝石中包裹体的拉曼光谱特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2001, 3(4): 25-27.
- [45] 张建洪, 马建国, 李良景. 钛钽铬石和钛钾铬石的晶体结构及晶体化学[J]. 地质评论, 1988, 34(2): 132-144.
- [46] 亓利剑, 吕晓瑜, 刘卫东, 等. 缅甸西玉[J]. 宝石和宝石学杂志, 2003, 5(4): 1-6.
- [47] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中超高压矿物和新矿物[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 263-274.
- [48] 韩英善. 北祁连地区新发现硼化铬 Cr₂B 矿物[J]. 青海地质, 1999, 8(2): 24.
- [49] 李锦平, 王立本, 郭月敏, 等. 新矿物: 1997, 1-1998, 12[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(2): 181-123.
- [50] 李锦平, 王立本. 新矿物: 1995, 1-1996, 12[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 301-320.

Discussion on a new mechanism of Cr transportation

ZHENG Da-zhong, ZHENG Ruo-feng

(Chengdu Sichuan Province Departmental Comprehensive Rock Testing Center, Chengdu 610081, China)

Abstract: Based on study on nature of hydrogen-rich fluid, some metallic hydrides and metallic hydride alloy to depth of the earth and their formation conditions and chemical composition of Cr minerals and the accompanying minerals and Cr ore-forming background we consider that Cr is mainly transported in Cr hy-

drides and Cr hydride alloy in the metallogenic process. The Cr hydrides and Cr hydride alloy migrate together with magma from strong hydrogen-rich environment at depth of the earth to shallow crust and pressure decreases due to escape of H₂, CO, CH₄ then Cr hydrides and Cr hydride alloy are decomposed, oxidized, solidified and enriched to Cr ore deposit.

Key Words: Cr hydride; Cr hydride alloy; transportation form; oxidation-solidification-enrichment; Cr ore deposit

欢迎订阅 2012 年《地质找矿论丛》

《地质找矿论丛》为国家新闻出版总署批准,由中钢集团天津地质研究院有限公司主管、主办的地学科技期刊,创刊于 1986 年。

《地质找矿论丛》为中国科技核心期刊,被美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》、《中国学术期刊文摘(中文版)》、《中国地质文摘》等著名文摘刊物收录,是《中国科技论文统计》、《中国学术期刊综合评价数据库》和《中国科学引文数据库》的来源期刊,期刊全文入编《中国学术期刊(光盘版)》、《中国知网》(CNKI)、《万方数据科技期刊群》、《中文科技期刊数据库》(维普)和《华艺 CEPS 中文电子期刊》等电子出版物及数据库,以多种媒体方式向读者提供服务。

《地质找矿论丛》主要报道矿产成矿理论与成矿预测、物质成分及综合利用、矿产地质勘查新技术新方法及其应用、地学信息技术、水文地质与工程地质、环境地质调查与治理、资源勘查工程、矿产品深加工技术、地质矿产技术经济等方面的科研成果、进展评介、研究简报,并不断开拓报道领域与深度。

《地质找矿论丛》刊物信息丰富、学科跨度大,兼顾理论与应用,是地学研究、矿产勘查、矿业开发领域专业人员和院校师生的良师益友。热忱欢迎地矿行业、地学院校、文献信息部门的单位和个人踊跃订阅并投稿。

《地质找矿论丛》为季刊;国际标准连续出版物号 ISSN 1001-1412,中国标准连续出版物号 CN 12-1131/P;铜版纸彩色印刷,国际开本(A4),每季末月 25 日出版;每期定价 20.00 元,全年定价 80.00 元;公开发行,国内邮发代号:6-283。

订阅办法

(1)通过各地邮局订阅:

邮发代号:6-283,全国各地邮局均可办理订阅。

(2)通过“全国非邮发报刊联合发行部”订阅:

地址:天津市大寺泉集北里别墅 17 号,全国非邮发报刊联合征订服务部

邮政编码:300385

电话:022-23973378;23962479 传真:022-23973378

E-mail:LHZD@public.tpt.tj.cn “刊林网”网址:www.LHZD.com

(3)向《地质找矿论丛》编辑部订阅:

编辑部地址:天津市河东区友爱东道平房 4 号,中钢地质院《地质找矿论丛》编辑部

邮政编码:300181 电话:022-84283083 联系人:任光义

E-mail:luncong@163.com;luncong@yeah.net