

اصول مهندسی سرامیک ها

خواص مغناطیسی

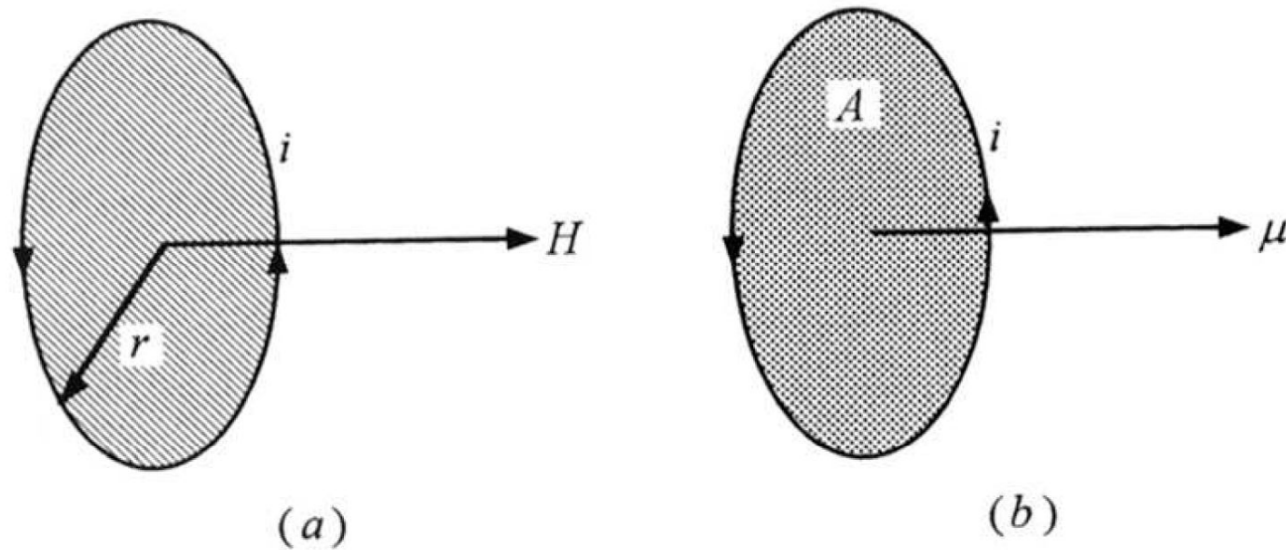


Figure 15.1 (a) Magnetic field intensity resulting from passage of a current through a loop of radius r . (b) Magnetic moment of current loop of area A .

and it is normal to the plane of the loop as shown in Fig. 15.1*a*. The units of magnetic field are amperes per meter: 1 A/m is the field strength produced by a 1-A current flowing through a loop of 1 m.

In vacuum, H will result in a **magnetic field**²⁶⁵ B given by

$$H = \frac{i}{2r} \quad B = \mu_0 H \quad \boxed{B = \mu_0(H + M)} \quad (15.2)$$

In paramagnetic and diamagnetic solids (see below), B is a linear function of H such that

$$B = \mu H \quad (15.5)$$

where μ is the permeability of the solid (not to be confused with μ_{ion}). For ferro- and ferrimagnets, however, B and H are no longer linearly related, but as discussed below, μ can vary rapidly with H .

The **magnetic susceptibility** is defined as

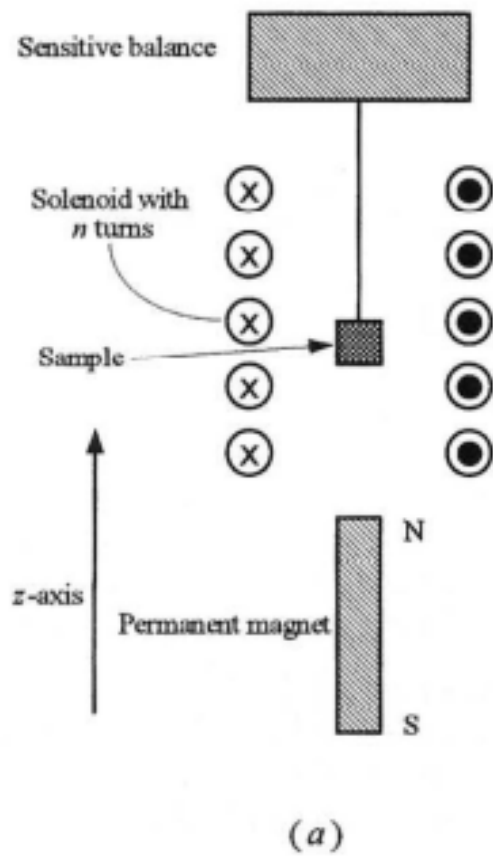
$$\chi_{\text{mag}} = \frac{M}{H} \quad (15.6)$$

The **relative permeability** μ_r is given as

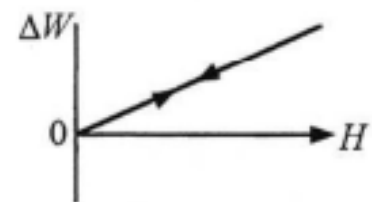
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (15.7)$$

and it compares the permeability of a medium to that of vacuum. This quantity is analogous to the relative dielectric constant k' . And μ_r and χ_{mag} are related by

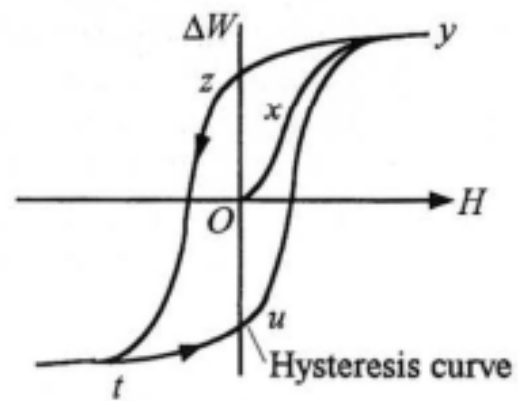
$$\mu_r = \chi_{\text{mag}} + 1 \quad (15.8)$$



(b)



(c)



Quantum Number & Orbital

Principal quantum number	Azimuthal quantum number	Magnetic quantum number	Spin quantum number	Total number of electrons in s, p, d orbital
$n = 1$ (K shell)	$l = 0$ (1S)	$l = 0$ (1S)	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
	$l = 0$ (2S)	$m_l = 0$ (2S)	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
$n = 2$ (K shell)	$l = 1$ (2P)	$m_l = 0$ (2P _x) $m_l = +1$ (2P _y) $m_l = -1$ (2P _z)	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	$\left. \begin{matrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{matrix} \right\} 6$
$n = 3$ (K shell)	$l = 0$ (3S)	$l = 0$ (3S)	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
	$l = 1$ (3P)	$m_l = 0$ (3P _x) $m_l = +1$ (3P _y) $m_l = -1$ (3P _z)	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	$\left. \begin{matrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{matrix} \right\} 6$
	$l = 1$ (3d)	$m_l = 0$ (3d _{xy}) $m_l = +1$ (3d _{yz}) $m_l = -1$ (3d _{zx}) $m_l = +2$ (3d _{x²-y²}) $m_l = -1$ (3d _{z²})	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	$\left. \begin{matrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{matrix} \right\} 10$

$$M = \frac{\mu_{\text{ion}}}{V} \quad \boxed{\mu_{\text{ion}} = 2\mu_B \sqrt{S(S+1)}}$$

Calculate the spin and total magnetic moment of an isolated Mn^{2+} cation, assuming that the orbital angular momentum is quenched, that is, $L = 0$.

Answer












Mn^{2+} has five d electrons (see Table 15.2) that occupy the following orbitals:

m_l	2	1	0	-1	-2	2	1	0	-1	-2
m_s	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2
s	↓	↓	↓	↓	↓					

It follows that $S = \sum m_s = 5 \times 1/2 = 2.5$. Since the angular momentum is quenched, $J = S$, and according to Eq. (15.27), the total magnetic moment for the ion is

$$\mu_{\text{ion}} = 2\mu_B \sqrt{S(S+1)} = 5.92\mu_B$$

Table 15.2 Magnetic moments of isolated cations of 3*d* transition series

Cations	Electronic configuration	Calculated moments $2\mu_B\sqrt{S(S+1)}$	Classical	Measured moments in μ_B
Sc ³⁺ , Ti ⁴⁺	3 <i>d</i> ⁰ 	0.00	0	0.0
V ⁴⁺ , Ti ³⁺	3 <i>d</i> ¹ 	1.73	1	1.8
V ³⁺	3 <i>d</i> ² 	2.83	2	2.8
V ²⁺ , Cr ³⁺	3 <i>d</i> ³ 	3.87	3	3.8
Mn ³⁺ , Cr ²⁺	3 <i>d</i> ⁴ 	4.90	4	4.9
Mn ²⁺ , Fe ³⁺	3 <i>d</i> ⁵ 	5.92	5	5.9
Fe ²⁺	3 <i>d</i> ⁶ 	4.90	4	5.4
Co ²⁺	3 <i>d</i> ⁷ 	3.87	3	4.8
Ni ²⁺	3 <i>d</i> ⁸ 	2.83	2	3.2
Cu ²⁺	3 <i>d</i> ⁹ 	1.73	1	1.9
Cu ⁺ , Zn ²⁺	3 <i>d</i> ¹⁰ 	0.00	0	0.0

WORKED EXAMPLE 15.3

Show that the angular momentum of any atom or ion with a closed shell configuration is zero.

Answer

A good example is Cu^+ . It has 10 d electrons arranged as follows:

m_l	2	1	0	-1	-2	2	1	0	-1	-2
m_s	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2
s	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑

Thus $L = \sum m_l = 0$ and $S = \sum m_s = 0$, and consequently, $J = 0$.

Two important conclusions can be drawn from these worked examples:

1. When an electronic shell is completely filled, all the electrons are paired, their magnetic moments cancel, and consequently, their net magnetic moment vanishes. Hence in dealing with magnetism, only partially filled orbitals need to be considered. Said otherwise, the *existence of unpaired electrons is a necessary condition for magnetism to exist*.
2. The fact that the calculated magnetic moment assuming *only* spin orbital momentum for the isolated cations of the 3d transition series compares favorably with the experimentally determined values (see Table 15.2) implies that the orbital angular momentum for these ions is indeed quenched.

$$\chi < 0$$

در یک میدان مغناطیسی در جهت مخالف میدان ممان القا می‌شود و توسط میدان دفع می‌شوند.

مواد دیامغناطیس
Diamagnetism

$$\chi_{\text{mag}} = \frac{C}{T}$$

ماده مغناطیس پذیری (پذیر رفتاری - حساسیت) مثبت اما کوچک دارند.

مواد پارامغناطیس
Paramagnetism

حتی در نبود میدان خارجی، مغناطش M_r غیر صفر دارند.

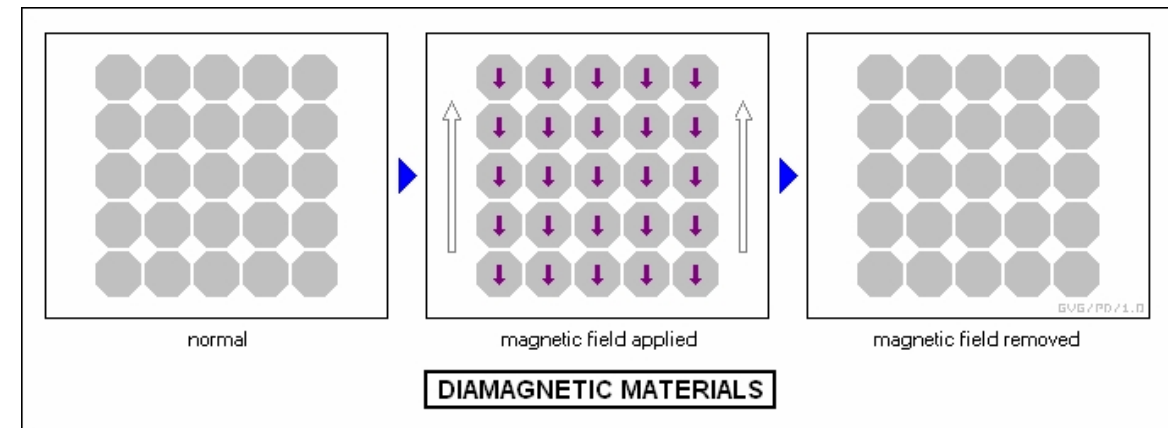
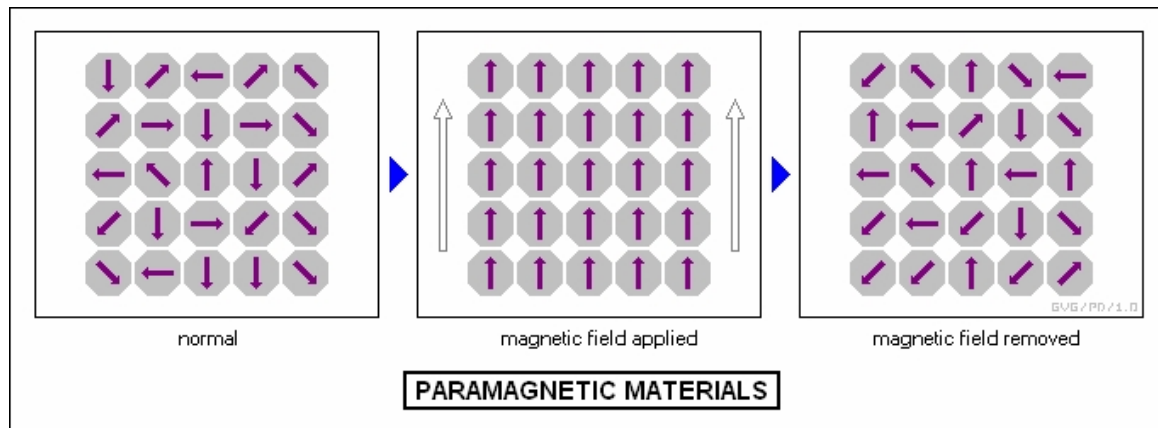
مواد فرومغناطیس
Ferromagnetism

بردارهای مغناطیسی موازی و خلاف جهت و نا مساوی هم دارند لذا شبیه فرومغناطیس هستند.

مواد فری مغناطیس
Ferrimagnetism

بردارهای مغناطیسی موازی و خلاف جهت و مساوی هم دارند لذا شبیه پارامغناطیس هستند.

مواد آنتی فرومغناطیس
Antiferromagnetism



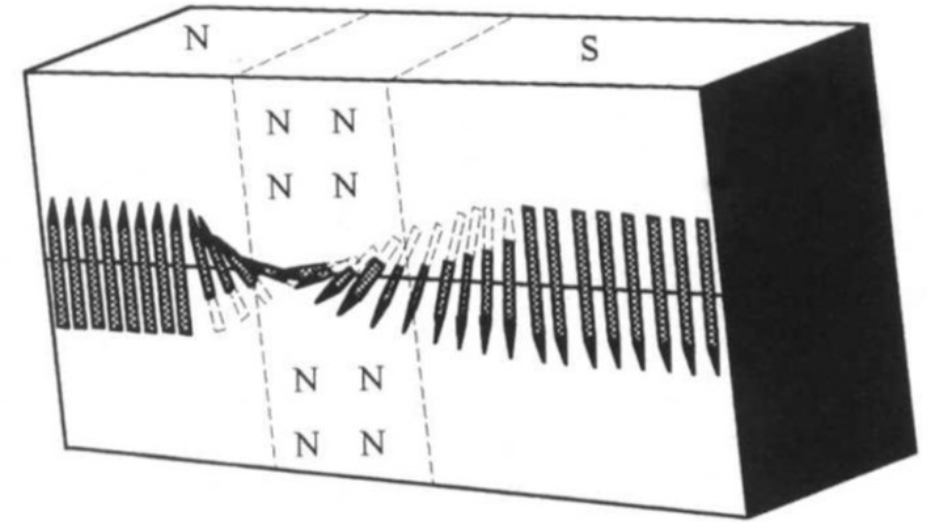
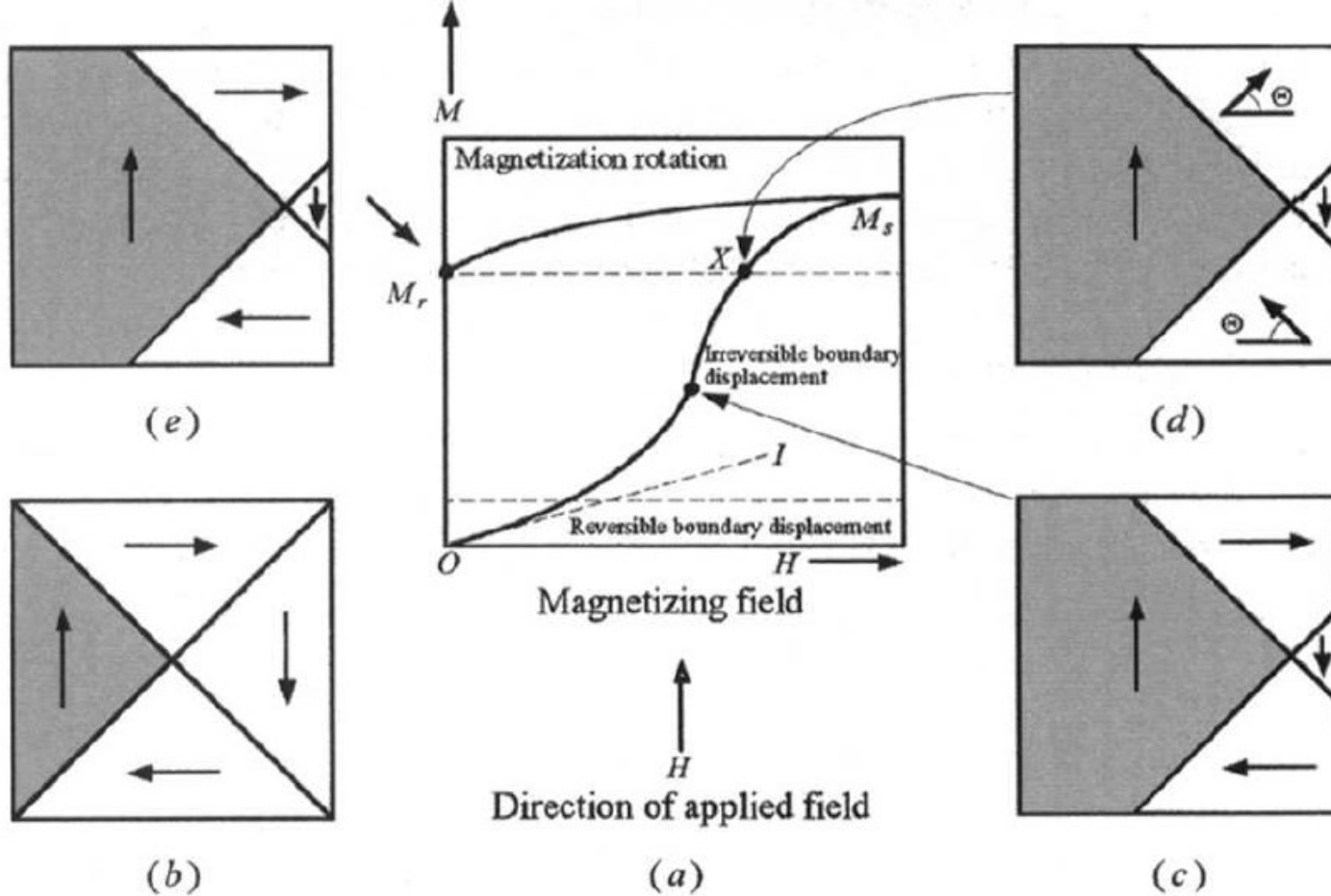
Ferromagnetism

Anti-Ferromagnetism

Ferrimagnetism

حوزه Domain





چرخش تدریجی ممان های مغناطیسی
در یک دیوار ۱۸۰ درجه

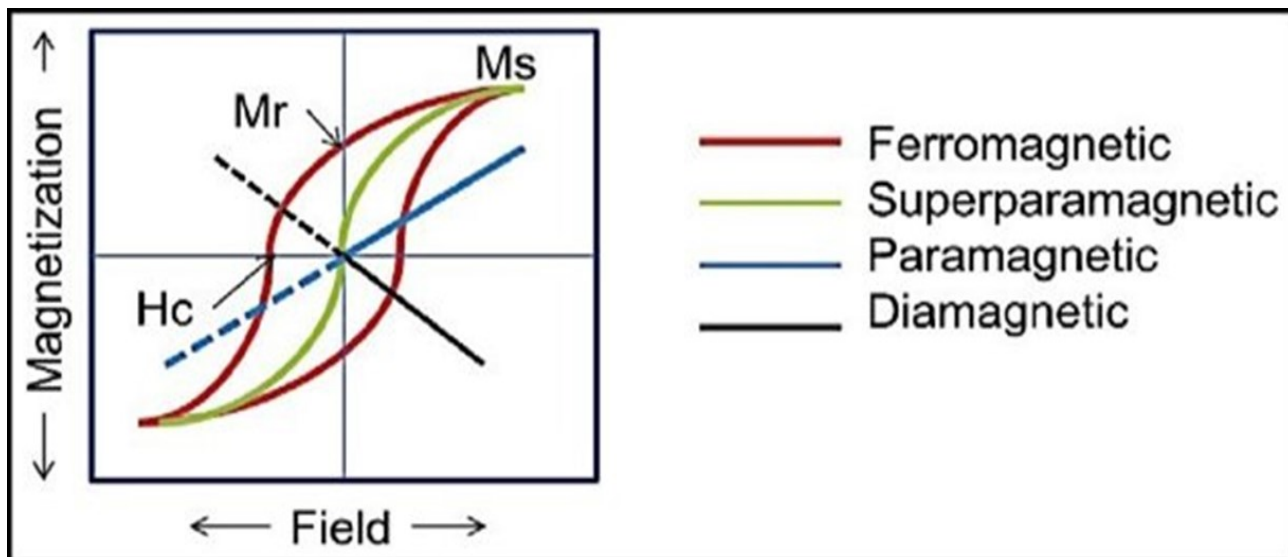
a: تغییرات مغناطش با میدان

b: حوزه ها در حضور میدان صفر

c: افزایش میدان و رشد حوزه های هم جهت میدان با حرکت دیوارها و افزایش M

d: افزایش میدان و تغییر جهت سایر حوزه ها و افزایش M

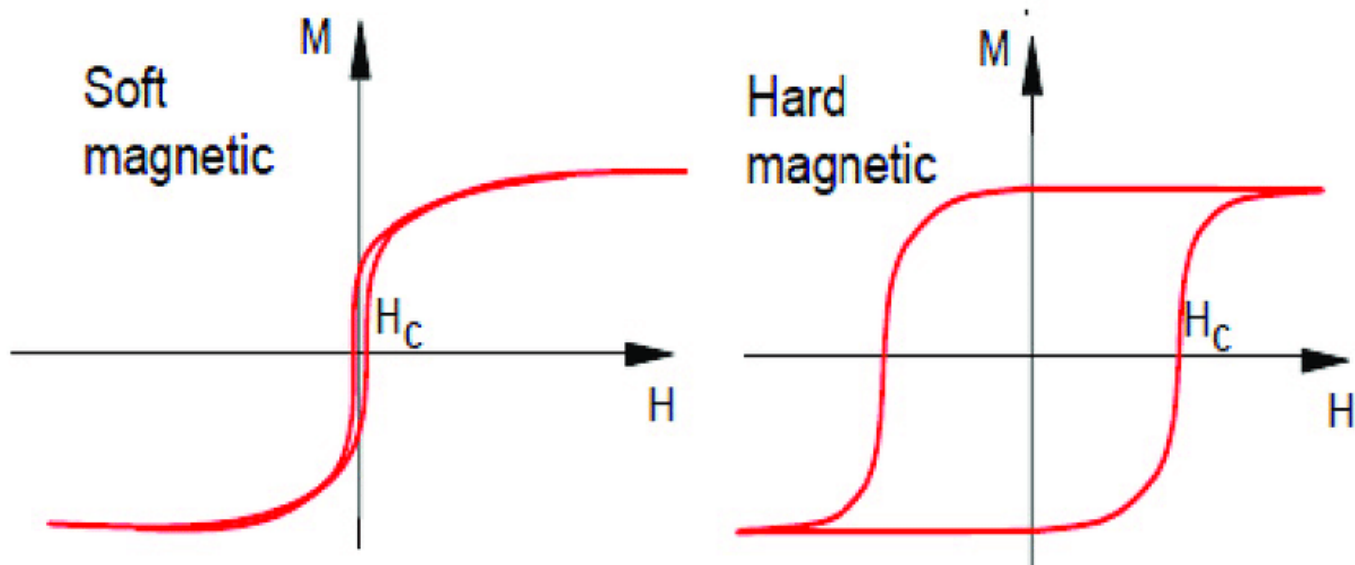
e: حذف میدان و چرخش حوزه ها به حالت اما عدم بازگشت دیوارها و باقی ماندن M_r



M_s مغناطش اشباع که بیشترین مقدار نیز هست.

M_r مغناطش باقیمانده پس از حذف میدان خارجی می باشد.

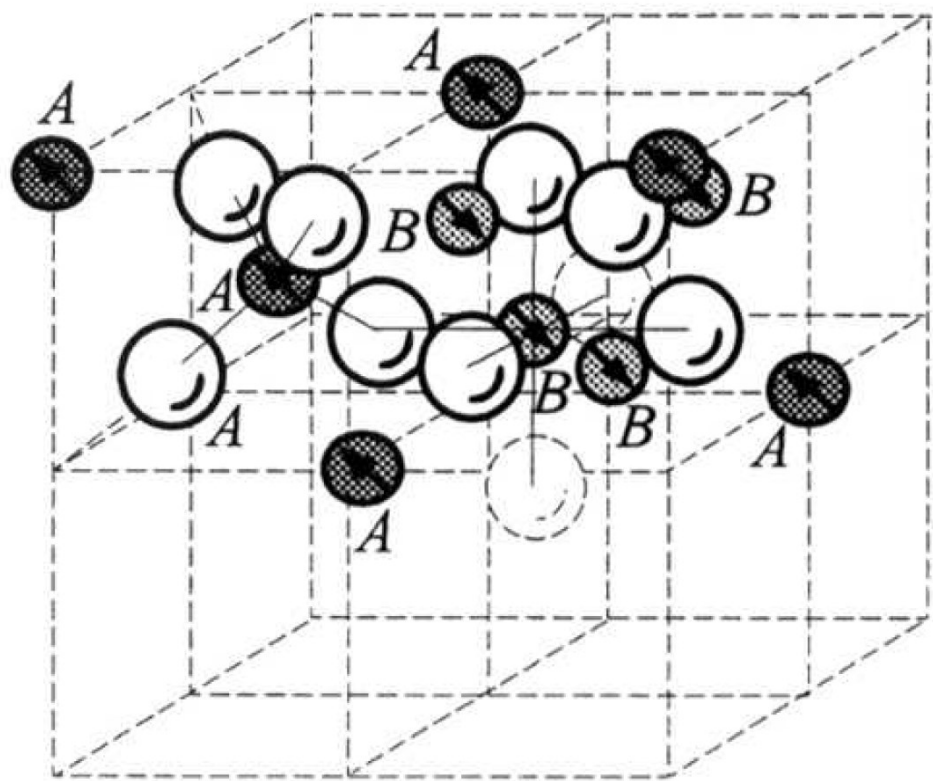
H_c مقدار میدان پسماندزدا برای حذف مغناطش اشباع است.



مواد نرم مغناطیس: دارای H_c کمتری هستند.

مواد سخت مغناطیس: دارای H_c بیشتر هستند.

محاسبه ممان مغناطیسی ماده



ابتدا باید تعداد و نوع و جایگاه اتم ها در سلول مشخص شود.

سپس مقدار ممان هریک محاسبه شود.

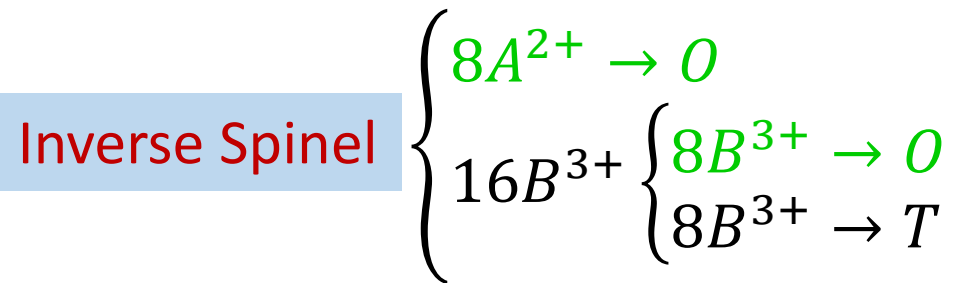
با در نظر گرفتن تعداد و برآیند ممان کل محاسبه شود.

حجم سلول واحد محاسبه شود.

با تقسیم برآیند ممان ها بر حجم مغناطش سلول بدست آید.

Table 15.4 Magnetic properties of a number of magnetic ceramics. Magnetic moments are given in Bohr magnetons per formula unit at 0 K

Material	Curie temp., K	B_{sat} (T) (@ RT)	Calculated moments [†]			Experi- mental
			T site	O site	Net	
Fe^{\dagger}	1043	2.14			2.14	2.22
Spinel ferrites $[\text{AO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3]$						
$\text{Zn}^{2+}[\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$			0	5 – 5	0	(Antiferro.)
$\text{Fe}^{3+}[\text{Cu}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$	728	0.20	–5 ^s	1 + 5	1	1.30
$\text{Fe}^{3+}[\text{Ni}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$	858	0.34	–5 ^s	2 + 5	2	2.40
$\text{Fe}^{3+}[\text{Co}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$	1020	0.50	–5 ^s	3 + 5	3	3.70–3.90
$\text{Fe}^{3+}[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$	858	0.60	–5 ^s	4 + 5	4	4.10
$\text{Fe}^{3+}[\text{Mn}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$	573	0.51	–5 ^s	5 + 5	5	4.60–5.0
$\text{Fe}^{3+}[\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}]\text{O}_4$	943		–5 ^s	5 + 2.5	2.5	2.60
$\text{Mg}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}[\text{Mg}_{0.9}\text{Fe}_{1.1}]\text{O}_4$	713	0.14	0–4.5	0 + 5.5	1	1.10
Hexagonal ferrites						
$\text{BaO} : 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	723	0.48				1.10
$\text{SrO} : 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	723	0.48				1.10
$\text{Y}_2\text{O}_3 : 5\text{Fe}_2\text{O}_3$	560	0.16				5.00
$\text{BaO} : 9\text{Fe}_2\text{O}_3$	718	0.65				
Garnets						
$\text{YIG}\{\text{Y}_3\}[\text{Fe}_2]\text{Fe}_3\text{O}_{12}$	560	0.16			5	4.96
$\{\text{Gd}_3\}[\text{Fe}_2]\text{Fe}_3\text{O}_{12}$	560				16	15.20
Binary oxides						
EuO	69					6.80
CrO_2	386	0.49				2.00



در اسپینل این محاسبه اهمیت دارد.

حالت های جانشینی اتم ها باید مدنظر باشد.

ظرفیت و ممان اتم هر جایگاه می تواند

متفاوت باشد.

محاسبه ممان مغناطیسی مگنتیت

(a) Fe_3O_4 can be written as $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ or $\text{Fe}^{3+}[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$. Because it is an inverse spinel, one-half the Fe^{3+} cations occupy the T sites, and the other half the O sites. These cations interact *antiferromagnetically* which implies that their net moment is zero. The Fe^{2+} cations occupy the remaining O sites, and their net magnetic moment is (see Table 15.2) $4.9\mu_B$. The calculated net moment is thus $4.9\mu_B$, which is in reasonably good agreement with the measured value of 4.1 (Table 15.4). Note that this agreement implies that for the most part the orbital angular momentum of the ions in these solids is indeed quenched.

Since each unit cell contains eight Fe^{2+} ions (see Fig. 15.9), the saturation magnetization is given by Eq. (15.4), or

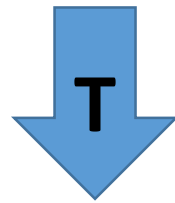
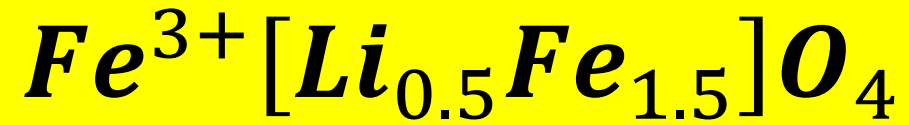
$$M_s = \frac{8 \times 4.9 \times 9.274 \times 10^{-24}}{(8.37 \times 10^{-10})^3} = 6.2 \times 10^5 \text{ A/m}$$

It follows that the saturation magnetic field is given by

$$B_{\text{sat}} = \mu_0 M_s = 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 6.2 \times 10^5 = 0.78 \text{ T}$$

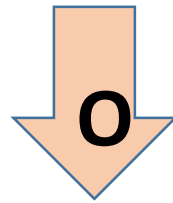
which compares favorably with the measured value of 0.6 (see Table 15.4).

It is interesting to note that, for reasons that are not entirely clear, even better agreement between the measured and theoretical values is obtained if the classical expression for μ_{ion} , that is, $\mu_{\text{ion}} = 2\mu_B \mathbf{S}$, is used instead of the more exact expression [Eq. (15.27)].



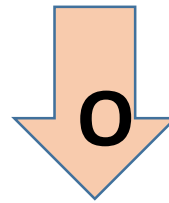
+3

5.9



+1

0



+3

1.5×5.9

+

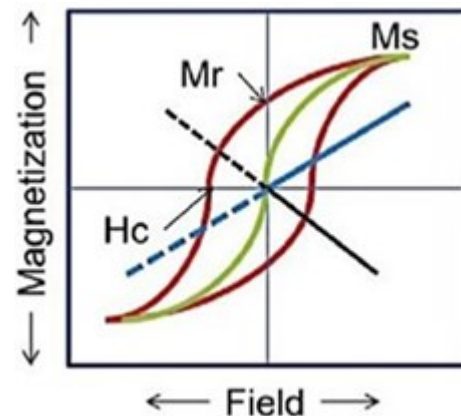
-

=

0.5×5.9

با ضرب مقدار بالا در عدد مگنتون بور و سپس ضرب در عدد ۸ برای سلول اسپینل بزرگ و سپس تقسیم بر حجم سلول مغناطش اشباع بدست می آید.

تمرین

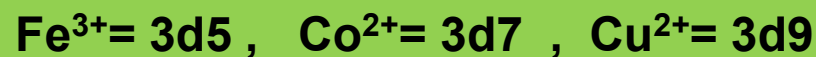


۱- در منحنی های شکل زیر انواع مواد مغناطیسی مربوط به هر یک را بیان کنید و تمام پارامترهای شکل را توضیح دهید.

۲- در سرامیک مگنتیت با فرمول $\text{Fe} [\text{Fe}_2] \text{O}_4$ مقدار مغناطش اشباع را طبق مدل کلاسیک محاسبه کنید.



۳- برای سرامیک فریت کبالت با فرمول $\text{Fe} [\text{Co Fe}] \text{O}_4$ با جانشین کردن مس به جای کبالت مقدار مغناطش اشباع چه تغییری می کند. با محاسبه بیان کنید.



۴- مقدار مغناطش اشباع کاتیون های زیر را به روش تئوری محاسبه کنید.

