

# 烧结 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁材料的力学性能及 断裂行为的各向异性\*

李安华 董生智 李 卫

(钢铁研究总院功能材料研究所, 北京 100081)

(2001 年 12 月 14 日收到, 2002 年 3 月 4 日收到修改稿)

对从同一磁体上切取的取向方向不同的三组烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  试样的抗弯强度进行测定, 对其抗弯断口进行宏观观察和扫描电镜观察. 对烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料的力学性能和断裂行为的各向异性进行了研究. 研究结果表明: 烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料的抗弯强度和断裂行为具有明显的各向异性, 烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料断裂的微观机制为解理断裂, 材料易于沿密排面(0001)面或沿与密排面的夹角大约为  $60^\circ$  的晶面解理断裂.

关键词:  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁, 抗弯强度, 解理断裂, 各向异性

PACC: 6220, 7550W

## 1. 引 言

烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料因其优良的磁性能、良好的耐腐蚀性和温度稳定性在许多领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>. 但同许多金属间化合物一样,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁的内部滑移系统不足, 室温脆性很大. 极大的室温脆性已成为  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁的致命弱点.  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁大的脆性给机械加工带来困难, 对永磁器件的稳定性造成不利影响, 因而限制了材料在精密仪表和抗冲击、抗振动要求严格的场合的应用<sup>[2-4]</sup>.

近年来, 国内外在 Fe-Al 系、Ti-Al 系等金属间化合物的脆性本质、韧化机理等方面做了大量的研究工作<sup>[5-7]</sup>. 同为脆性材料,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁的力学特性、断裂行为的系统研究却未见报道. 仅有少数研究者针对磁体在制备过程中易开裂、机械加工困难等具体的工艺问题, 对  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁的某些力学指标做过研究<sup>[4, 8]</sup>. 这是因为: 1)  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁作为重要的功能材料, 长期以来人们对它的研究重点一直放在磁性研究上<sup>[9-12]</sup>; 2) 磁性材料的力学性能与磁性能密切相关<sup>[13]</sup>, 致使  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁的力学性能的研究具有其复杂性.

由于烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料的力学性能与磁性能是密切相关, 要获得兼具较高磁性能和较高强韧性的磁体, 首先要对材料的力学性能与磁性能的关系进行研究. 本文分析研究了不同取向方向的烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型磁体试样的抗弯强度和断裂行为.

## 2. 实验方法

本研究使用的样品为  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型烧结磁体. 样品的磁性能和其他物理性能如表 1 所示. 抗弯试验采用三点弯曲试验法, 试样尺寸为  $5\text{mm} \times 6\text{mm} \times 19\text{mm}$ , 测量跨距  $L_s$  为  $14.7\text{mm}$ . 抗弯试验试样是用电火花线切割方法从同一块磁体上切取的取向方向不同的三组试样(每组试样包括①, ②和③三个试样). 第一组试样沿高度等于  $5\text{mm}$  的方向取向; 第二组试样沿宽度等于  $6\text{mm}$  的方向取向; 第三组试样沿长度等于  $19\text{mm}$  的方向取向.

抗弯试验是在 MTS880-25T 型低周疲劳试验机上进行的. 加载速率为  $0.1\text{mm}/\text{min}$ . 沿高度等于  $5\text{mm}$  的方向加载, 如图 1 所示. 利用 S-250MK3 型扫描电镜观察抗弯断口, 用 Link 公司生产的 NH10000 型能谱仪进行相分析.

\* 国家自然科学基金(批准号: 59901010)资助的课题.

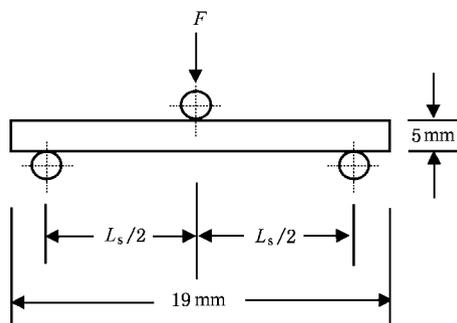


图 1 三点弯曲试验示意图

表 1 试验合金的磁性能

$(BH)_{\max}/\text{MGOe}$	$iH_c/\text{kOe}$	$bH_c/\text{kOe}$	$Br/\text{kGs}$	$H_v$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
27.3	19.1	10.0	10.7	849	8.40

### 3. 实验结果与讨论

#### 3.1. 不同取向方向试样的抗弯强度

表 2 列出了试验合金的抗弯强度的测定结果。

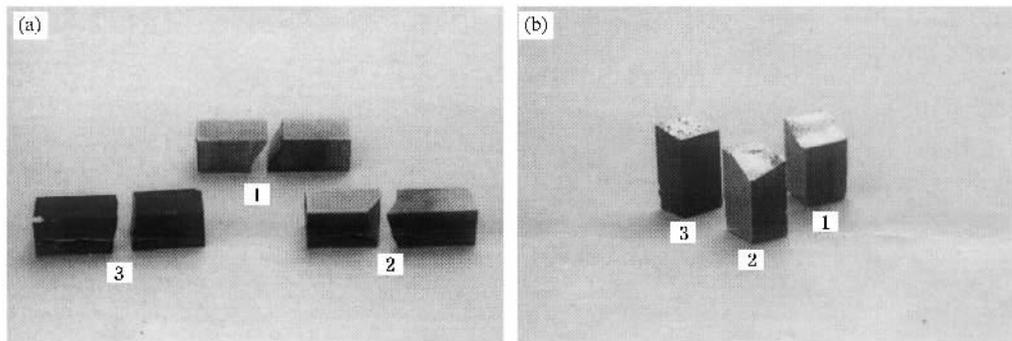
表 2 试验合金的抗弯强度

试样号	抗弯强度 $\sigma_{bb}/\text{MPa}$		
	第一组	第二组	第三组
①	70	111	59
②	81	105	89
③	88	103	102
平均值	80	106	83

从表 2 可以看出:在三者之间,沿 6mm 方向取向的试样其抗弯强度明显高于沿另外两个方向取向的试样.沿 5mm 和 19mm 方向取向试样的抗弯强度的平均值基本相当,但沿 19mm 方向取向的试样的抗弯强度值分散性较大。

#### 3.2. 不同取向方向的试样断口的宏观形貌分析

对断口的宏观观察表明:断口呈明显的脆断特征,断口具有闪烁的金属光泽,未见纤维区和剪切唇,放射花样也变得很细.注意到,不同取向方向的试样其断口的宏观形貌具有明显差异,如图 2 所示。

图 2 不同取向方向试样的典型宏观断口形貌 ( $\times 1$  1 2 3 分别为沿 5mm 6mm 和 19mm 方向取向试样的典型断口)

在抗弯试验时,受弯曲的试样中存在由中性轴分隔开的受压区和受拉区,裂纹尖端始终保持在受拉区内,且该区随着裂纹的扩展而移动,直至贯穿整个试样<sup>[14]</sup>.抗弯强度即为矩形截面梁在弯曲应力的作用下受拉面断裂时的最大应力<sup>[15]</sup>.本试验中,抗弯试样所受的最大拉应力的方向平行于长度等于 19mm 的方向。

图 2(a)和图 2(b)中的“1”为沿 5mm 方向取向试样的典型宏观断口形貌,可以看出,沿 5mm 方向取向的试样,其断面为与最大拉应力方向成大约  $60^\circ$  角的斜面,断口平整,有很细的放射花样.进一步的观察表明,断裂源一般出现在试样的棱上,如图 2(a)所示,裂纹首先沿接近 6mm 的方向扩展直到试样的表面.该

方向的放射花样扫过的面积很小.然后在垂直于原放射花样的方向形成新的相互平行的放射花样沿 5mm 的方向向前扩展,直至断裂。

图 2(a)和图 2(b)中的“2”为沿 6mm 方向取向试样的典型宏观断口形貌,可以看出,沿宽度等于 6mm 取向的试样,其断口起伏很大,可明显看出裂纹是沿不同的断裂面及方向扩展的.进一步的观察表明,在试样表面附近的薄弱环节或棱上出现断裂源,如图 2(b)所示,从这里开始裂纹便沿着不同的晶面和方向扩展,其中一部分与最大拉应力方向垂直(称断面 1),另一部分与断面 1 成一定角度(称断面 2).在断裂一开始时,两断面的夹角大约为  $30^\circ$ ,随着断裂的发展,断面 2 及其裂纹扩展方向趋于与

断面 1 统一。

图 2(a) 和图 2(b) 中的“3”为沿 19mm 方向取向试样的典型宏观断口形貌, 可以看出, 沿长度等于 19mm 取向的试样, 其断面多与最大拉应力方向垂直, 断口较粗糙。进一步的观察表明, 断口放射花样的方向远不及沿 5mm 和 6mm 方向取向的试样明显, 如图 2(c) 所示。

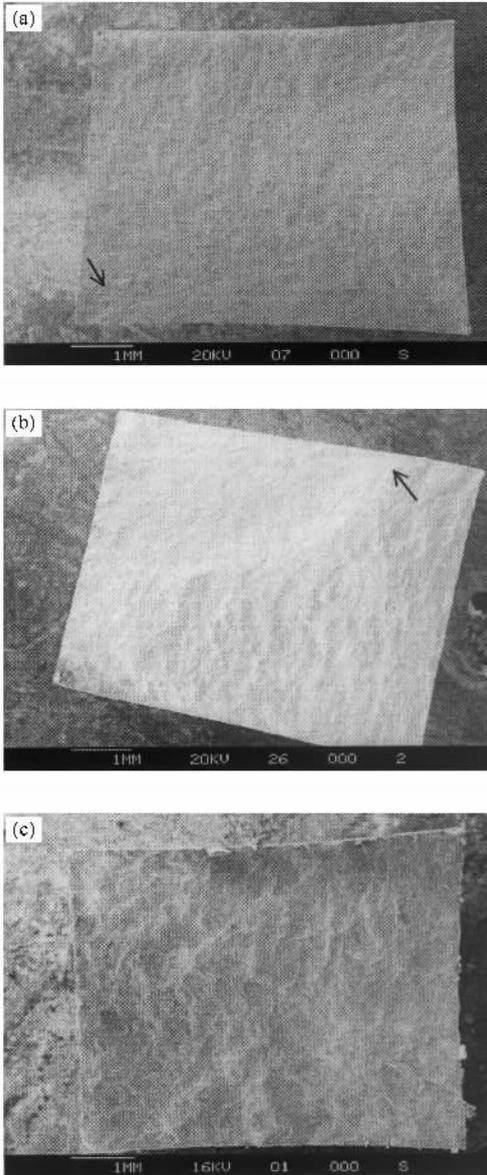


图 3 低倍下不同取向方向试样的典型断口形貌 (a) (b) (c) 分别为沿 5mm、6mm 和 19mm 方向取向试样的典型断口)

### 3.3. 材料断裂的微观机制

试样弯断后立即置于 S-250MK3 型扫描电镜下对断口的微观形貌进行观察及能谱分析。观察结果表明, 不同取向方向试样断裂的微观机制都为解理

断裂, 图 4(a) 为合金显微断口的典型形貌。

沿 6mm 方向取向的试样, 其解理裂纹是沿两个不同断裂面扩展的。在较低倍数下观察到, 两断裂面的交界处出现特征的“麻花状”形貌, 如图 4(b) 和 4(c) 所示, 这是解理裂纹沿不同断裂面和方向扩展的“分界线”及“过渡区”; 在较高倍数下, 观察到如图 4(d) 所示的形貌, 可以看出解理裂纹沿不同的面和方向扩展。

### 3.4. 不同取向方向试样的断裂行为分析

烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁的晶体结构属于六方晶系, 具有强的晶体结构各向异性; 又因烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料是经取向然后烧结而成的, 其显微组织结构有点像金属经大量冷加工变形以后出现的“织构”, 所以其力学性能及解理断裂行为具有明显的各向异性是不难理解的(同时,  $\text{SmCo}$  永磁的这种类似“织构”的显微组织也是造成其脆性很大的原因之一。根据文献 [16] 在穿晶脆性断裂中, 晶界对裂纹的扩展起阻挡作用, 而当金属有明显织构时, 裂纹就会在相当长的距离内穿过实际上具有相同取向的晶粒而扩展, 使材料的穿晶解理断裂更易进行 [14], 结果是韧性相应地下降。)

结合 3.2. 和 3.3. 节的研究结果, 对不同取向方向试样的断裂行为作如下分析:

1) 对于沿长度 19mm 方向取向的试样, 其断面与最大拉应力方向垂直; 又知沿该方向取向时,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  晶体的密排面与最大拉应力方向垂直, 故可以判断: 当试样沿 19mm 方向取向, 烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料的解理断裂面为密排面 (0001) 面。沿密排面 (0001) 面发生的解理断裂可能有多个解理方向, 这或许是该组试样的断口放射花样没有明显走向、断口粗糙的原因。

2) 对于沿高度 5mm 取向的试样, 其断面为与最大拉应力方向成大约  $60^\circ$  角的斜面; 又知沿 5mm 方向取向时,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  晶体的密排面与最大拉应力方向平行, 所以解理断面与密排面的夹角也大约为  $60^\circ$ 。由此看来, 烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料不仅可以沿晶体最密面 (0001) 面解理, 还可沿与密排面的夹角大约为  $60^\circ$  的晶面进行解理。由文献 [14] 可知, 解理断裂主要沿结晶学的密排面进行, 有时也可沿孪晶界发生解理。这里的解理断面可能是钕钴永磁的孪晶界。

3) 对于沿宽度等于 6mm 取向的试样, 其断口起伏很大, 可明显看出裂纹是沿不同的断裂面及方向

扩展的.这是因为:1)沿 6mm 方向取向时,应力在垂直于密排面(即  $5\text{mm} \times 19\text{mm}$  面)的方向上没有分量,所以试样不可能沿密排面(0001)面解理断裂;2)虽然应力在与孪晶界面垂直的方向上有分量,试样沿孪晶界面断裂是可能的,但是试样的应力状态使其沿孪晶界面的解理不如 5mm 方向取向的试样那么

容易;3)抗弯试验时,裂纹总是趋向于在和主应力垂直的面萌生和扩展.所以,试样一方面沿垂直于最大拉应力的面断裂,同时还沿晶体的孪晶界解理断裂.由于该组试样既不沿晶体的密排面、也不完全沿晶体的孪生面解理,所以断裂时消耗较大的能量,抗弯强度值明显高于其他两个取向方向的试样.

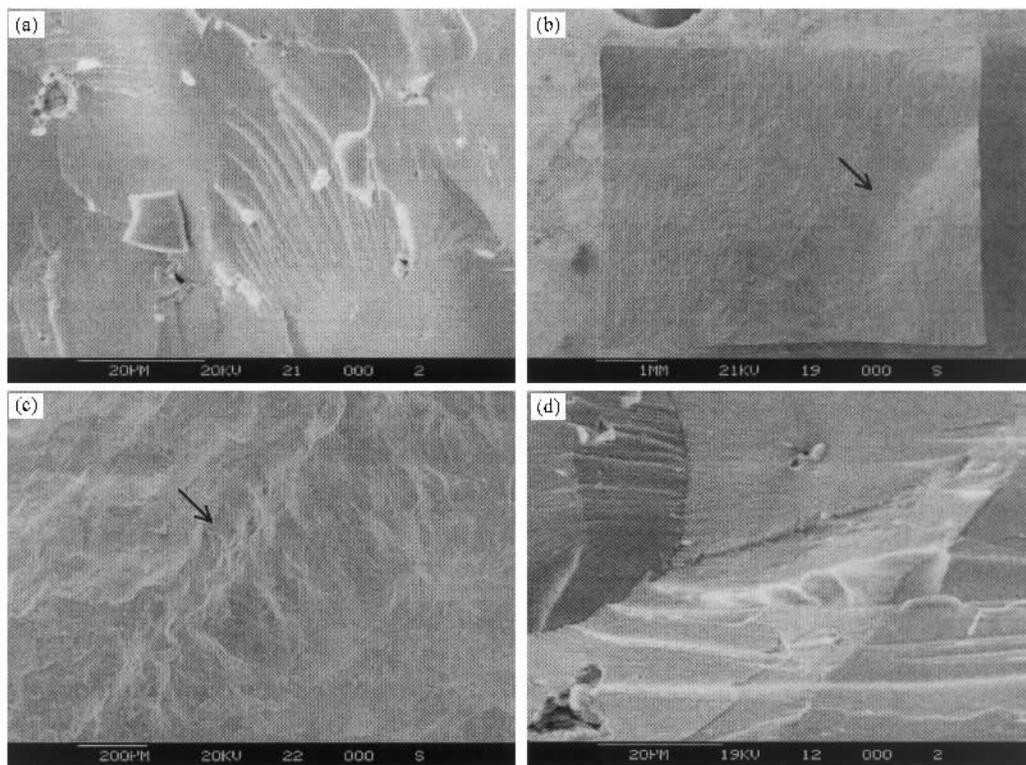


图4 合金解理断裂的微观形貌 (a)典型的解理形貌 (b)低倍下,沿 6mm 方向取向试样的典型断口形貌 (c)图(b)的局部放大——“麻花状”形貌 (d)沿 6mm 方向取向的试样,其解理裂纹沿不同的面和方向扩展

## 4. 结 论

1. 烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料的抗弯强度和断裂行为具有明显的各向异性.其中沿 6mm 方向取向试样的抗弯强度最高;沿其余两个方向取向试样的抗弯强度值基本相当,但当 19mm 方向取向试样的抗弯强度的分散性较大.

2. 烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料断裂的微观机制为解理断裂,材料趋向于沿密排面(0001)面或沿与密排面的夹角大约为  $60^\circ$  的孪晶界面解理断裂.

3. 强的晶体结构各向异性和类似“织构”的显微组织保证了烧结  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  型永磁材料具有较高的矫顽力,但这同时也导致材料具有强的力学性能各向异性.

- [1] Zhou S Z 1990 *Rare Earth Permanent Materials and Application* (Beijing: Metallurgical Industry Press) p423 (in Chinese) 周寿增 1990 稀土永磁材料及其应用(北京:冶金工业出版社)第 423 页
- [2] Tang R Y 1997 *Modern Permanent Machines—Theory and Design* (Beijing: Mechanical Industry Press) Chapter 2 (in Chinese) 唐任远 1997 现代永磁电机理论与设计(北京:机械工业出版社)

### 第二章

- [3] Sun T D 1979 *Acta Metall. Sin.* **15** 58 (in Chinese) 孙天铎 1979 金属学报 **15** 58
- [4] Liu X C 1989 *Ph. D. Thesis* (Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) 刘新才 1989 博士学位论文(西北工业大学)
- [5] Zhong X P, Deng W and Tang Y S 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1734 (in Chinese)

- Chinese ] 钟夏平、邓文、唐郁生 1998 物理学报 **47** 1734 ]
- [ 6 ] li W , Chen D M and Guan Z Z 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 2064( in Chinese ] 李文、陈岱民、关振中 1998 物理学报 **47** 2064 ]
- [ 7 ] Guo F A , Vincent JI and Zhang Y G 2001 *Rare Metal Material and Engineering* **30** 105( in Chinese ] 郭富安、Vincent JI、张永刚 2001 稀有金属材料与工程 **30** 105 ]
- [ 8 ] Chen Z M , Shi Z X and Fu H Z 1988 *Research in Metallic Material* **14** 17( in Chinese ] 陈钟敏、史正光、傅恒志 1988 金属材料研究 **14** 17 ]
- [ 9 ] Wang W Q , Wang J L , Tang N *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 752( in Chinese ] 王文全、王建立、唐宁等 2001 物理学报 **50** 752 ]
- [ 10 ] Zhang H W , Zhang S Y and Shen B G 1999 *Acta. Phys. Sin.* **45** 163( in Chinese ] 张宏伟、张绍英、沈保根 1999 物理学报 **45** 163 ]
- [ 11 ] Hadjipanayis G C 1984 *J. Appl. Phys.* **15** 2091
- [ 12 ] Wang J L , Yang F M and Tang N 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 752( in Chinese ] 王建立、杨伏明、唐宁 2001 物理学报 **50** 752 ]
- [ 13 ] Zhong W D 1998 *Ferromagnetism* 1st ed Vol 2( Beijing : Science Press ) pp21—44( in Chinese ] 钟文定 1998 铁磁学(中册)第一版(北京 : 科学出版社)第21—44页 ]
- [ 14 ] Henry G and Horstmann D 1990 *De Ferri Metallographia V Fraktographie und microfraktographie*( Beijing : Mechanical Industry Press ) p15 51( in Chinese ] G. 亨利 D. 豪斯特曼 1990 钢铁金相图谱之宏观断口学及微观断口学(北京 : 机械工业出版社)第15和51页 ]
- [ 15 ] Jin Z Z and Bao Y W 1996 *Characterization of Mechanical Properties for Brittle Materials and Ceramics*( Beijing : China Railway Press ) p143( in Chinese ] 金宗哲、包亦望 脆性材料力学性能评价与设计(北京 : 中国铁道出版社)第145页 ]
- [ 16 ] Xing X S 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 107( in Chinese ] 邢修三 1999 物理学报 **48** 107 ]

## A study of the anisotropy of mechanical properties and fracture behaviour in sintered $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ permanent magnetic materials<sup>\*</sup>

Li An-Hua Dong Sheng-Zhi Li Wei

( Department of Functional Materials , Central Iron & Steel Research Institute , Beijing 100081 , China )

( Received 14 December 2001 ; revised manuscript received 4 March 2002 )

### Abstract

The bending strength of three groups of samples with different oriented directions have been measured. All the samples were cut off from the same bulk of sintered  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  magnet. The bending macrofractography has been carefully observed and scanning electron microscope has been used to study microfractography. The anisotropy of mechanical properties and fracture behaviour of sintered  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  permanent magnetic materials are emphatically investigated. It shows that the bending strength and fracture behaviour of sintered  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  permanent magnetic materials obviously display anisotropy. The fracture micromechanism of sintered  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  permanent magnetic materials appears to be cleavage fracture and the materials tend to fracture in the close-packed (0001) plane or in the plane which has about  $60^\circ$  angle with the former.

**Keywords :**  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  permanent magnets , bending strength , cleavage fracture , anisotropy

**PACC :** 6220 , 7550W

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 59901010 ).