

强磁场对 Fe-0.28%G-3.0%Mo 合金中退化铁素体转变的影响

Effect of High Magnetic Field on Ferrite Transformation in Fe-0.28%G-3.0%Mo Alloy

周珍妮, 张晶晶, 吴开明

(武汉科技大学“冶金工业过程系统科学湖北省

重点实验室”钢铁新材料与焊接技术研究所, 武汉 430081)

ZHOU Zhen-ni, ZHANG Jing-jing, WU Kai-ming

(Institute of Advanced Steel Materials and Welding Technology, Hubei Province

Key Laboratory for Systems Science on Metallurgical Processing, Wuhan

University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

摘要: 采用等温热处理时外加 12T 强磁场对 Fe-0.28% (质量分数, 下同) G-3.0% Mo 合金中退化铁素体的转变进行研究。在有、无强磁场条件下, 港湾温度附近及以下都得到了退化铁素体。强磁场加速了退化铁素体的转变, 升高了退化铁素体转变 TTT (temperature-time-transformation) 曲线的港湾温度。没有磁场时的港湾温度大概为 610℃ 左右, 外加强磁场后港湾温度为 640℃ 左右, 这主要是由于强磁场降低了退化铁素体的自由能。

关键词: 低合金钢; 强磁场; 铁素体; 相变; 钼

中图分类号: TG111; TG142 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)08-0010-05

Abstract: The transformation of degenerate ferrite in an Fe-0.28%G-3.0%Mo alloy was investigated by isothermal holding under a 12T magnetic field. The degenerate ferrite was observed around and below the bay temperature with and without the magnetic field. The results show that the degenerate ferrite transformation is accelerated by applying a 12T magnetic field. The bay temperature of TTT-curves is raised in magnetic field, *i. e.* The bay temperature is about 610℃ without a magnetic field whereas it becomes approximately 640℃ with a 12T magnetic field; because the free energy of degenerate ferrite is lowered by a high magnetic field.

Key words: low alloy steel; high magnetic field; ferrite; phase transformation; molybdenum

钢铁材料作为传统的结构材料, 在常规的研究条件下, 人们对其进行了深入和系统的研究。随着科学技术的快速发展和进步, 采用新方法和新手段研究和开发新型钢铁材料已经成为当前各国材料科学工作者致力于努力探索的重要领域之一。目前, 利用外场如强磁场来研究和赋予材料新的组织和性能引起了国内外冶金与材料科学工作者的极大兴趣。

Mo 是一种贵重的合金元素。Mo 在钢铁材料中的一个重要作用是固溶强化, 另一个重要作用是形成碳化物。Mo 是强碳化物形成元素, 在钢中加入它可以提高钢的淬透性, 防止回火脆性, 改善疲劳性能。由于 Mo 在低合金钢和合金钢中上述诸方面的作用, 国内外对 Fe-G-Mo 低合金钢进行了很多研究^[1-3]。对于 Fe-G-Mo 合金的相变研究主要成果如下: (1) Mo 的

存在推迟珠光体转变^[4]; (2) 具有明显的溶质拖曳效应^[5]。(3) TTT (temperature-time-transformation) 曲线中存在明显的港湾形^[5]; (4) 存在中温转变停滞现象^[6]; (5) 转变产物具有特殊的形态——退化铁素体^[6]; (6) 有多种类型的碳化物析出^[7]。

强磁场可显著提高奥氏体与铁素体之间的吉布斯自由能差, 即转变驱动力, 因此, 磁场有可能促进奥氏体转变, 加快铁素体的转变速度。本工作在强磁场条件下对 Fe-0.28%G-3.0%Mo 合金中退化铁素体的转变进行研究, 以了解强磁场对退化铁素体转变的影响。

1 实验材料与方法

实验材料采用电解铁、高纯度的碳和钼经真空冶

炼而成,以防止复杂成分对珠光体相变的影响。热锻压后在 1250 °C 下均匀化 48h,其化学成分如表 1 所示。然后将试样加工成 4mm × 4mm × 18mm 的方柱,置入如图 1 所示的装置中进行强磁场热处理。试样先在炉子上部于 910 °C 奥氏体化 30min 后,快速移到炉下部的铅浴炉中,在不同的温度(530~ 640 °C)等温不同时间(10~ 10000s)。反应过程中持续通入氩气保护。等温反应中采取先升磁场再升温的方式,等温反应后立即淬入- 3 °C 的冰盐水中。然后对试样进行磨光、抛光,3%(体积分数)的硝酸酒精溶液腐蚀,再用光学显微镜对组织进行观察和分析。铁素体转变的体积分数采用数点法(Point Counting)^[8]。由于组织转变的不均匀性,先在低倍下(50 倍)测量其体积分数(记为 S'),再在高倍下(500 倍)测量(记为 S''),其总的转变体积分数为 $S = S' \cdot S''$ 。

表 1 实验材料成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of steel sample (mass fraction / %)

| | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|-----|
| C | Si | Mn | P | S | Mo |
| 0.28 | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 | 3.0 |

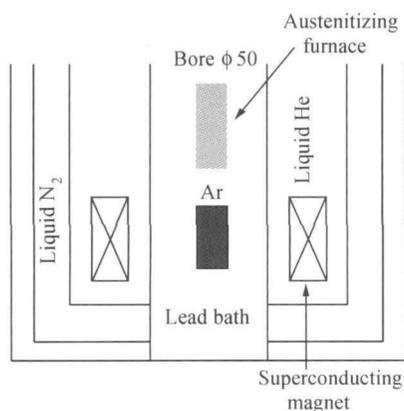
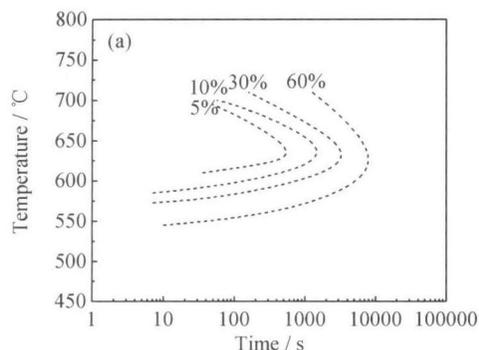


图 1 强磁场热处理炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a high magnetic field heat treatment apparatus



2 实验结果

2.1 TTT 曲线的测定

在无磁场条件下实际测量了等温时间为 20, 60, 600, 3600, 10000s 时铁素体转变的体积分数。从转变 20s 的结果可以看出,随着温度的下降,铁素体转变速度减慢,在 570~ 590 °C 左右变得最慢,随着温度的继续下降最后又有回升。590 °C 左右正好是无磁场下铁素体开始转变 TTT 曲线的港湾温度附近,短时间内铁素体转变量出现这种现象是 Fe-G-Mo 合金铁素体开始转变动力学特征的明显表现:从 TTT 曲线鼻尖到港湾温度处,铁素体长大动力学从最大变到最小。随着温度的进一步降低,铁素体长大驱动力增加,转变速度加快。从 3600s 的转变来看,铁素体在 590 °C 转变得比较慢(15.9%);在 570 °C 等温 3600s 时也才转变了 16.1%。到了更低的温度 530 °C 时,3600s 铁素体就基本完全转变。此无磁场条件下的转变现象与很多 Fe-G-Mo 合金在港湾温度以下出现转变停滞现象是一致的^[6]。采用同样的方法,对 12T 强磁场条件下铁素体的转变进行了测量。

表 2 无强磁场条件下铁素体转变的体积分数(%)

Table 2 Volume fraction of ferrite transformed without a high magnetic field(%)

| Temperature/ °C | 20s | 3600s |
|-----------------|-----|-------|
| 530 | 2.7 | ~ 100 |
| 550 | 1.4 | 29.6 |
| 570 | 1.9 | 16.1 |
| 590 | 2.9 | 15.9 |
| 610 | 4.1 | 29.7 |

在有、无磁场的条件下,测得的 TTT 曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出,在无强磁场的条件下,港湾形温度 T_b 约为 610 °C,在有磁场的条件下,港湾形温度 T_b 约为 640 °C。由此可见,强磁场使港湾形温度 T_b 上升了约 30 °C。从图 2 还可明显看出,强磁场条件下铁素体的转变比没有磁场时的转变要快。

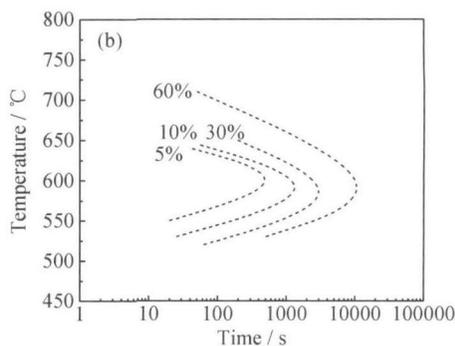


图 2 铁素体转变的 TTT 曲线 (a) 有磁场; (b) 无磁场

Fig. 2 Measured TTT curves of ferrite transformation (a) with a 12T magnetic field; (b) without a magnetic field

2.2 港湾温度附近铁素体的转变

图 3 为无磁场时在港湾温度附近 $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温转变的光学显微镜照片。由图 3 可以看出, 等温 20s 时铁素体转变非常少, 基体主要是淬火马氏体(见图 3a)。等温 60s 后开始有铁素体在晶界析出(见图 3b)。当等温 600s 和 3600s 时, 铁素体的析出就比较多了。另外, 还可以看出铁素体呈现出退化的形态(见图 3c, 爆米花状 Popcorn-like), 析出不均匀, 有的区域铁素体析出多, 有的区域基本上是马氏体。

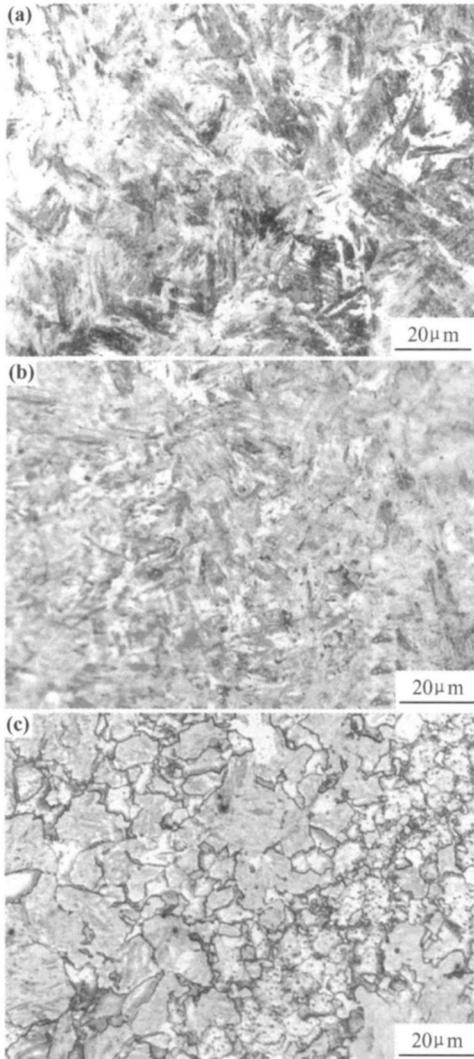


图 3 无磁场条件下 $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温不同时间的铁素体光学组织显微照片

(a) 20s; (b) 60s; (c) 600s

Fig. 3 Optical micrographs of specimens isothermally held at $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ for different time without a high magnetic field

(a) 20s; (b) 60s; (c) 600s

图 4 为 12T 磁场下港湾温度附近 $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ 光学显微镜下的铁素体组织照片。当等温 60s 的时候铁素体转变非常少, 基体主要是淬火马氏体(见图 4a)。从等温

600s 情况可以看出, 强磁场下铁素体主要在晶界析出(见图 4b)。随着等温时间的延长, 部分铁素体从奥氏体晶界长向了晶内(见图 4c)。

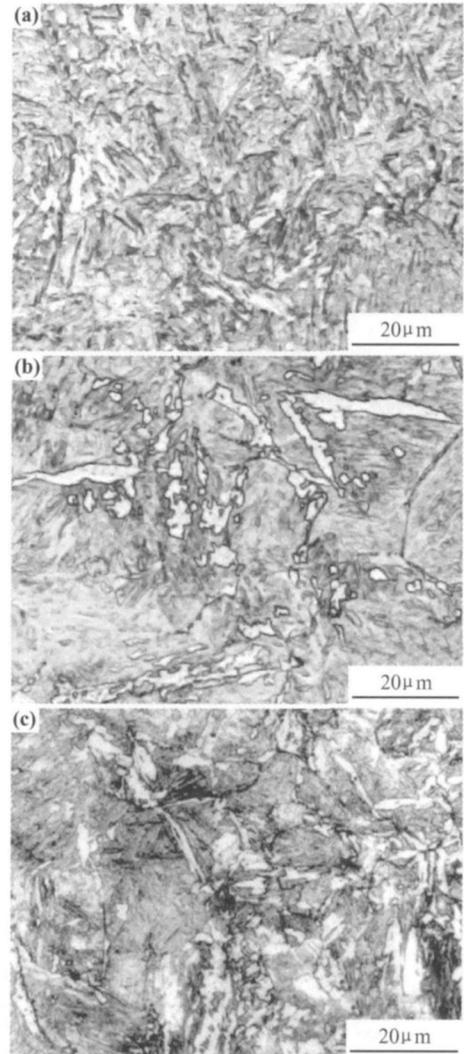


图 4 12T 磁场下 $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温不同时间的铁素体光学组织显微照片

(a) 60s; (b) 600s; (c) 3600s

Fig. 4 Optical micrographs of specimens isothermally held at $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 60s(a), 600s(b), and 3600s (c) with a 12T magnetic field

2.3 港湾温度以下铁素体的转变

图 5 为无磁场时在 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温不同时间的光学显微镜照片。从图 5a 可以看出, 当等温 20s 时形成的铁素体很少, 基体组织主要为淬火马氏体。等温 20s 以后, 铁素体开始大量生成, 铁素体呈现出退化形态, 且可明显看出铁素体从晶界长向晶内(见图 5b)。

图 6 为 12T 强磁场下 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时铁素体光学显微镜照片。从图 6 可以看出, $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时磁场条件下铁素体的转变量比没有磁场时要多很多, 特别是在短时间等温, 转变量增加得更明显(见图 6a)。在强磁场下等温 10s

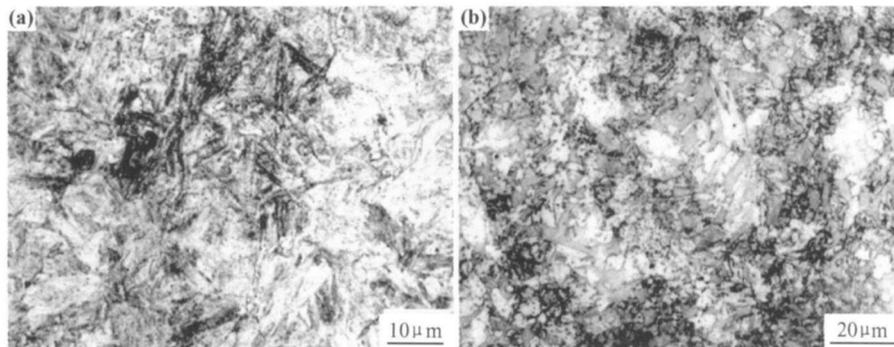


图5 无磁场条件下 530°C 等温不同时间的铁素体光学组织显微照片

(a) 20s; (b) 3600s

Fig. 5 Optical micrographs of specimens held at 530°C for different time without a high magnetic field (a) 20s; (b) 3600s

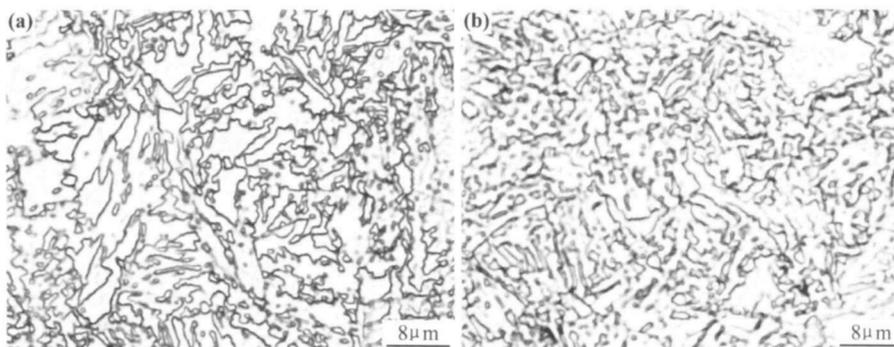


图6 12T 磁场下 530°C 等温不同时间的铁素体光学组织显微照片

(a) 10s; (b) 3600s

Fig. 6 Optical micrographs of specimens held at 530°C for different time with a 12T magnetic field (a) 10s; (b) 3600s

比无磁场时等温 20s 铁素体转变量还多, 等温 3600s 的转变率基本已经接近 100% (见图 6b)。

3 讨论

3.1 磁场加速退化铁素体的转变

磁场对固相最显著和根本的影响是会减少固相的吉布斯自由能, 同样, 奥氏体和铁素体在磁场中均可被磁化, 磁场同样会影响奥氏体和铁素体的自由能, 加速铁素体^[9, 10]和马氏体^[11, 12]的转变。磁场也会加速贝氏体转变^[13, 14], 从图 2 可明显看出, 强磁场条件下铁素体的转变比没有磁场时的转变要快。Ohtsuka^[14]对 10T 磁场条件下 Fe-3.6N±1.5C-0.5C 钢贝氏体转变的研究发现, 相同条件下外加 10T 磁场时贝氏体转变体积分数由没有磁场时候的 0.08 增加到 0.97。

3.2 磁场升高 TTT 曲线的港湾温度

磁场不仅会加速贝氏体转变, 还会升高贝氏体转变温度^[14]。Ohtsuka^[14]对 10T 磁场条件下 Fe-3.6N±1.5C-0.5C 钢贝氏体转变的研究发现, 贝氏体转变温

度升高了至少 40°C, 比铁素体、珠光体、马氏体大得多, 具体原因还不太清楚, 这有待进一步研究。

铁素体开始转变 TTT 曲线港湾的形成有不同的解释。有的认为是在港湾温度上下有两种不同的转变机制(扩散型和位移型)所表现出的 C 曲线分离的结果^[15]。大多数人认为港湾的形成是代位原子在晶界的偏聚, 并与晶界及其附近碳原子的相互作用产生拖曳效应从而降低了碳的化学势和浓度梯度导致了铁素体长大速度减慢的结果^[6]。铁素体开始转变 TTT 曲线出现港湾并不是普遍的现象, 只是某些合金元素对奥氏体-铁素体界面产生溶质拖曳效应的结果, 以及由此产生的转变停滞现象^[5, 6, 8, 15-18]。

4 结论

(1) 在有、无磁场条件下, 在港湾温度附近及以下都得到了退化铁素体; 但是, 在强磁场条件下加速了退化铁素体的转变。

(2) 强磁场升高了退化铁素体转变 TTT 曲线的

港湾温度。没有磁场时的港湾温度为 610 °C 左右, 外加强磁场后港湾温度为 640 °C 左右。

参考文献

- [1] HUMPHREYSE S, FLETCHER H A, HUTCHINS J D, et al. Molybdenum accumulation at ferrite: austenite interfaces during isothermal transformation of an Fe-0.24PctC-0.93Pct Mo alloy [J]. *Metall Mater Trans A*, 2004, 35: 1223- 1235.
- [2] HACKENBERG R E, SHIFLET G J. A microanalysis study of the bainite reaction at the bay in Fe-G-Mo [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51: 2131- 2147.
- [3] ENOMOTO M, WU K M, KAGAYAMA M. Influence of magnetic field on ferrite transformation in Fe-G-Mo alloy [J]. *CAMP-ISIJ*, 2004, 17: 1223- 1226.
- [4] RIDLEY N. The pearlite transformation [M]. Warrendale: TMS-AIME, 1983. 201- 236.
- [5] TSUBAKINO H, AARONSON H I. Ferrite and carbide morphologies in and below the "bay region" of an Fe-0.19Cpct-2.30Pct Mo alloy [J]. *Metall Trans A*, 1987, 18: 2047- 2060.
- [6] REYNOLDS W T, JR, LI F Z, et al. The incomplete transformation phenomenon in Fe-G-Mo alloys [J]. *Metall Trans A*, 1990, 21: 1433- 1463.
- [7] SHTANSKY D V, INDEN G. Phase transformation in Fe-Mn-C and Fe-W-C steels - I. The structural evolution during tempering at 700 °C [J]. *Acta Mater*, 1997, 45: 2862- 2878.
- [8] WU K M, KAGAYAMA M, ENOMOTO M. Kinetics of ferrite transformation in an Fe-0.28mass%-3.0mass% Mo alloy [J]. *Mater Sci Eng*, 2003, A343: 143- 150.
- [9] ENOMOTO M, GUO H, TAZUKE Y, et al. Influence of magnetic field on the kinetics of proeutectoid ferrite transformation in iron alloys [J]. *Metall Mater Trans*, 2001, 32A: 445- 453.
- [10] LUDTKA G M, JARAMILLO R A, KISNER R A, et al. In situ evidence of enhanced transformation kinetics in a medium carbon steel due to a high magnetic field [J]. *Scrip Mater*, 2004, 51: 171- 174.
- [11] KAKESHITA T, KUROIWA K, SHIMIZU K, et al. A new model explainable for both the athermal and isothermal natures of martensitic transformation in Fe-N+Mn alloys [J]. *Mater Trans*, 1993, 34: 423- 428.
- [12] OHTSUKA H, HAO X J, WADA H. Effects of magnetic field and prior austenite grain size on the structure formed by reverse transformation from lath martensite to austenite in an Fe-0.4C alloy [J]. *Mater Trans*, 2003, 44: 2529- 2531.
- [13] OHTSUKA H. Effect of strong magnetic fields on bainitic transformation [J]. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 2004, 8: 279- 284.
- [14] OHTSUKA H. Effects of a high magnetic field on bainitic transformation in Fe-based alloys [J]. *Mater Sci Eng*, 2006, A438- 440: 136- 139.
- [15] SHIFLET G J, AARONSON H I. Growth and overall transformation kinetics above bay temperature in Fe-G-Mo alloys [J]. *Metall Trans*, 1990, 21A: 1413- 1432.
- [16] FLETCHER H A, GARRATT-REED A J, AARONSON H I, et al. A stem method for investigating alloying element accumulation at austenite: ferrite boundaries in an Fe-G-Mo alloy [J]. *Scripta Mater*, 2001, 45: 561- 567.
- [17] WU K M, ENOMOTO M. Three-dimensional morphology of degenerate ferrite in an Fe-G-Mo alloy [J]. *Scrip Mater*, 2002, 46: 569- 574.

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-05-0680); 湖北省自然科学基金计划青年杰出人才资助项目 (2006ABB037)

收稿日期: 2009-01-22; 修订日期: 2009-06-13

作者简介: 周珍妮 (1981—), 女, 硕士研究生, 主要从事钢铁新材料方面的研究, E-mail: 147829sea@163.com

通讯作者: 吴开明 (1966—), 男, 教授, 博士, 主要从事钢铁新材料与焊接技术研究, 联系地址: 湖北省武汉市青山区和平大道 947 号武汉科技大学 8# 信箱 (430081), E-mail: wukaiming@wust.edu.cn; wukaiming2000@yahoo.com

DNA 序列分拣碳纳米管新方法

在最近出版的《自然》杂志上, 美国杜邦公司和理海 (Lehigh) 大学科学家组成的研究小组表示, 他们在生产碳纳米管 (CNTs) 方面取得了突破性的进展, 成功开发出以 DNA 为基底的可从多种碳纳米管的混合物中分拣出特殊类型的碳纳米管的方法。研究人员说, 新的方法借助专门的 DNA 序列, 可从碳纳米管混合物中分拣出所有 12 种主要的单空间螺旋特征的半导体碳纳米管, 其分拣能力能够满足基础研究和应用开发的需求。

那么, DNA 序列是如何识别和分拣不同的碳纳米管的呢? 研究小组表示, 这同 DNA 自身的某种能力相关, 该能力致使 DNA 可通过包裹碳纳米管, 形成与其本身常见的双螺旋有所不同的结构。专家介绍, 碳纳米管的圆筒形结构对于 DNA 而言是陌生的。但是, 研究人员却能让 DNA 吸附到不同结构的表面。如果表面为类似于碳纳米管的圆筒形, 那么人们获得的则是被称为贝塔管桶 (Beta-barrel) 的变形体。

目前用于生产碳纳米管的方法所获得的是由粗细各异和对称性 (或空间螺旋特征) 不同的多种碳纳米管产品的混合物。在这些不同的碳纳米管使用前, 需要把它们拆散开, 按照电子特性进行分类并筛选出来。然而, 从单壁纳米管混合物中系统地挑选出具有相同电子特征的碳纳米管是人们所期望的目标, 也是至今为止被证明为难以逾越的障碍。