[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl[7]
B22F 1/00
C22C 33/02

[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 00121777.1

[45] 授权公告日 2005 年 1 月 19 日

[11] 授权公告号 CN 1185068C

[22] 申请日 2000.7.28 [21] 申请号 00121777.1

[30] 优先权

[32] 1999. 7.30 [33] US [31] 09/363,855

[71] 专利权人 魁北克金属粉末有限公司

地址 加拿大魁北克

[72] 发明人 M·加杰 P·菲里普利
A·特路德尔

审查员 李双庆

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所

代理人 段承恩

权利要求书 10 页 说明书 23 页 附图 3 页

[54] 发明名称 铁－石墨复合粉末以及采用此粉末生产的烧结制品

[57] 摘要

公开了一种显微组织为铁基体中嵌入有碳簇团的铁－石墨复合粉末，包括含约 2－4.5wt%的碳和约 0.05－2.5wt%的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒，其中所述碳簇团的至少 30%完全嵌入所述铁基体中。 还公开了一种制备该铁－石墨复合粉末的方法，一种由这种复合粉末制备烧结制品的方法以及由其制备的烧结制品。

ISSN1008-4274

1. 一种铁－石墨复合粉末，包括含约 2－4.5wt％的碳和约 0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

2. 根据权利要求 1 的铁－石墨复合粉末，其中所述碳簇团的至少 50％完全嵌入所述铁基体中。

3. 根据权利要求 1 的铁－石墨复合粉末，其中所述碳簇团的至少 70％完全嵌入所述铁基体中。

4. 根据权利要求 1－3 中任一项的铁－石墨复合粉末，其中所述碳簇团嵌入在基本为铁素体的基体。

5. 根据权利要求 1－3 中任一项的铁－石墨复合粉末，包含约 3～4wt％的碳和约 0.3～2wt％的硅。

6. 根据权利要求 1－3 中任一项的铁－石墨复合粉末，其颗粒尺寸小于约 300 微米。

7. 根据权利要求 1－3 中任一项的铁－石墨复合粉末，其包含至少一种合金化元素。

8. 根据权利要求 1－3 中任一项的铁－石墨复合粉末，其包含至少一种下述元素：锰、镍、钼、铜、铬、硼、磷或者这些元素的混合物。

9. 根据权利要求 8 的铁－石墨复合粉末，其中所述粉末是一种包含锰、镍、钼、铜、铬和磷中至少一种元素的合金。

10. 根据权利要求 8 的铁－石墨复合粉末，其中所述粉末是一种包含锰、镍、钼、铜、铬、硼和磷中至少一种元素的混合物。

11. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 2％的锰。

12. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 1％的锰。

13. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 0.7％的锰。

14. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 0.1％的锰。

15. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 4％的镍。

16. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 1.5％的镍。

17. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 4％的钼。

18. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 1.5％的钼。

19. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 2％的铬。

20. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 1％的铬。

21. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 3％的铜。

22. 根据权利要求 10 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 1％的铜。

23. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 0.2％的硼。

24. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 1％的磷。

25. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 0.5％的磷。

26. 根据权利要求 9 的铁－石墨复合粉末，其包含小于约 0.15％的磷。

27. 制备铁－石墨复合粉末的方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约650℃加热至至少约900℃的温度；以及

（c）将所述粉末从所述至少约900℃的温度冷却至高于约600℃的温度，

其中，将所述粉末从约650℃加热至所述至少约900℃时，其加热速度应足以使得碳簇团在所述粉末颗粒的芯部中形核并随后将该粉末以不大于约10℃/分钟的速度进行冷却，且

其中，所述粉末是由含约2－4.5wt％的碳和约0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒构成，其中所述碳簇团的至少30％完全嵌入所述铁基体中。

28. 根据权利要求27的方法，其中,所述的冷却步骤（C）包含选自下述的冷却步骤与保温步骤的组合，

（i）将所述粉末从高于约900℃的温度冷却至高于约600℃的温度，并且在上述高于约600℃的温度下保温所述粉末；

（ii）任选地，将所述粉末从所述高于约600℃的温度冷却至另一个高于约600℃的温度，并且在所述温度下保温所述粉末；以及

（iii）任选地，重复步骤（ii）。

29. 根据权利要求27或28的方法，其中所述碳簇团的至少50％完全嵌入所述铁基体中。

30. 根据权利要求27或28的方法，其中所述碳簇团的至少70％完全嵌入所述铁基体中。

31. 根据权利要求27或28的方法，其中，所述雾化的粉末被加热至高于1000℃的温度。

32. 根据权利要求27或28的方法，其中，所述粉末被冷却至不低于约700℃的温度。

33. 根据权利要求27或28的方法，还包括在约850℃到所述至少约900℃之间的温度或在所述至少约900℃的温度下，保温所述雾化的铁粉末足以使铁粉末中的碳化物完全分解的时间。

34. 制备铁-石墨复合粉末的方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约650℃加热至至少约900℃的温度；以及

（c）将所述粉末从高于约900℃的温度冷却至低于约600℃的温度；

（d）将所述粉末重新加热至高于约700℃的温度；以及

（e）将所述粉末从高于约700℃的温度冷却至高于600℃的温度，

其中，将所述粉末从所述约650℃加热至所述至少约900℃时，其加热速度应足以使得碳簇团在所述粉末颗粒的芯部中形核并随后将该粉末以不大于约10℃/分钟的速度进行冷却，且

其中，所述粉末是由含约2－4.5wt％的碳和约0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒构成，其中所述碳簇团的至少30％完全嵌入所述铁基体中。

35. 根据权利要求34的方法，其中，将所述粉末重新加热至高于800℃的温度，并且，从该高于800℃的温度冷却至不低于700℃的温度。

36. 一种制备铁-石墨复合粉末的方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约650℃加热至至少约900℃的温度；以及

（c）将所述粉末从高于约900℃的温度冷却至低于约600℃的温度；

（d）将所述粉末重新加热至高于约700℃的温度；

（e）将所述粉末从所述高于约700℃的温度冷却至高于600℃的温度；

（f）将所述粉末在所述高于约600℃的温度保温；以及

（g）任选地，重复步骤（e）和（f），

其中，将所述粉末从约650℃加热至所述至少约900℃时，其加

热速度应足以使得碳簇团在所述粉末颗粒的芯部中形核并随后将该粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，且

其中，所述粉末是由含约 2－4.5wt％的碳和约 0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒构成，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

37. 根据权利要求 36 的方法，其中将所述粉末重新加热至高于 800℃并且从所述高于 800℃的温度冷却至不低于 700℃的温度。

38. 根据权利要求 27 或 28 的方法，其中所述的工艺步骤在基本无氧的气氛中进行。

39. 根据权利要求 38 的方法，其中所述的气氛是氩、氮、氨、氢、或者它们的混合物。

40. 根据权利要求 39 的方法，其中所述气氛含小于约 10％的氢气。

41. 根据权利要求 38 的方法，其中的所述气氛是一种真空气氛。

42. 根据权利要求 27 或 28 的方法，其中，步骤（c）中的铁－石墨复合粉末是一种铁－石墨复合合金粉末，而且，步骤（a）中的铁水含有至少一种下述元素：锰、镍、钼、铜、铬、硼和磷。

43. 根据权利要求 27 或 28 的方法，其中，所述铁－石墨复合粉末是一种铁－石墨复合粉末混合物，而且，步骤（c）中形成的铁－石墨复合粉末与至少一种单质形式的合金化元素、合金或者化合物相混合，所述合金化元素、合金或者化合物含有至少一种选自于锰、镍、钼、铜、铬、硼和磷的合金化元素。

44. 采用包括对一种铁－石墨复合粉末进行烧结的方法制备的烧结制品，其中所述粉末包括含约 2－4.5wt％的碳和约 0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

45. 基本完全致密的烧结制品，采用包括在低于约 1200℃的温度下对一种铁－石墨复合粉末进行烧结的方法制备，其中所述粉末包括含约 2－4.5wt％的碳和约 0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基

体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

46. 根据权利要求 44 的烧结制品，其采用进一步包含液相烧结的方法进行制备。

47. 根据权利要求 44－46 中任一项的烧结制品，其中，所述制品具有由铁素体、珠光体、奥氏体－铁素体、贝氏体、马氏体、奥氏体、回火马氏体或者这些组织的混合物组成的铁基体。

48. 根据权利要求 44－46 中任一项的烧结制品，其显微组织为在奥氏体－铁素体基体中嵌入有碳簇团，该制品采用进一步包括下述步骤的方法制备:

（a）将所述烧结制品加热至约 825－950℃间的一个温度;

（b）将所述制品冷却至约 150－450℃间的一个温度；以及

（c）在该约 150－450℃间的温度下，保温处理所述制品，时间约 15－60 分钟。

49. 根据权利要求 44－46 中任一项的烧结制品，其含有至少一种下述元素：锰、镍、钼、铜、铬、硼和磷。

50. 一种铁－石墨复合粉末，由包括如下步骤的方法制备:

（a）将一种含碳和含硅的铁水雾化成为一种雾化的铁粉末;

（b）将所述雾化的铁粉末加热到高于约 900℃温度；以及

（c）将所述粉末从高于约 900℃的温度冷却至不低于约 700℃的温度;

其中，将所述粉末加热至高于约 900℃，其加热速度应足以使得碳簇团在所述粉述颗粒的芯部中形核，并将该粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，和

其中，所述粉末包括含约 2－4.5wt％的碳和约 0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的复合颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

51. 根据权利要求 50 的铁－石墨复合粉末，其中所述碳簇团的至少 50％完全嵌入所述铁基体中。

52. 根据权利要求 50 的铁－石墨复合粉末，其中所述碳簇团的至少 70％完全嵌入所述铁基体中。

53. 根据权利要求 50－52 中任一项的铁－石墨复合粉末，其中所述碳簇团嵌入在基本为铁素体的基体中。

54. 根据权利要求 50－52 中任一项的铁－石墨复合粉末，其颗粒尺寸小于约 300 微米。

55. 根据权利要求 50－52 中任一项的铁－石墨复合粉末，其中所述颗粒包含约 3～4wt％的碳和约 0.3～2wt％的硅。

56. 根据权利要求 50－52 中任一项的铁－石墨复合粉末，其中所述颗粒包含约 3.2～3.7wt％的碳和约 0.8～1.3wt％的硅。

57. 根据权利要求 50－52 中任一项的铁－石墨复合粉末，包含约 3.5～3.7wt％的碳和约 0.8～1.0wt％的硅。

58. 根据权利要求 50－52 中任一项的铁－石墨复合粉末，其包含至少一种合金化元素。

59. 根据权利要求 50－52 中任一项的铁－石墨复合粉末，其中所述铁水包含至少一种下述元素：锰、镍、钼、铜、铬和磷。

60. 根据权利要求 50－52 中任一项的铁－石墨复合粉末，其中，所述粉末是用还包括以下步骤的方法制备的：将冷却的粉末与至少一种合金粉末相混合，所述合金包括选自于锰、镍、钼、铜、铬、硼和磷的合金化元素。

61. 一种铁－石墨复合粉末的制备方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约 650℃加热到高于约 1000℃温度；以及

（c）将所述粉末从所述高于约 1000℃的温度冷却至高于约 700℃的温度；

其中，所述粉末以高于约 30℃/分钟的速度被从约 650℃的温度加热到高于约 1000℃的温度，在约 850℃到所述高于约 1000℃之间的温度或在所述高于约 1000℃的温度下，保温约 5 分钟－16 小时，然后将

该粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，和

其中，所述粉末包括含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

62. 一种铁－石墨复合粉末的制备方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约 650℃加热到高于约 1000℃温度；以及

（c）将所述粉末从所述高于约 1000℃的温度冷却至不低于约 700℃的温度；

其中，所述的冷却步骤包含选自下述的冷却步骤与保温步骤的组合：

（i）将所述粉末从所述高于约 1000℃的温度冷却至不低于约 700℃的温度，并且在上述不低于约 700℃的温度下保温所述粉末；

（ii）任选地，将所述粉末从所述不低于约 700℃的温度冷却至另一个不低于约 700℃的温度，并且在所述温度下保温所述粉末；以及

（iii）任选地，重复步骤（ii）；

其中，所述粉末以高于约 30℃/分钟的速度被从约 650℃的温度加热到所述高于约 1000℃的温度，在所述高于约 1000℃的温度下，保温约 5 分钟－16 小时，然后将粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，和

所述粉末包括含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

63. 根据权利要求 61 或 62 的方法，其中所述碳簇团的至少 50％完全嵌入所述铁基体中。

64. 根据权利要求 61 或 62 的方法，其中所述碳簇团的至少 70％完全嵌入所述铁基体中。

65. 一种制备铁-石墨复合粉末的方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约650℃加热到高于约1000℃温度；以及

（c）将所述粉末从高于约1000℃的温度冷却至低于约600℃的温度；

（d）将所述粉末重新加热至高于约800℃的温度；以及

（e）将所述粉末从所述高于约800℃的温度冷却至不低于700℃的温度；

其中，所述粉末以高于约30℃/分钟的速度被从约650℃的温度加热到所述高于约1000℃的温度，在所述高于约1000℃的温度下，保温约5分钟－16小时，然后将粉末以不大于约10℃/分钟的速度进行冷却，和

所述粉末包括含有约3.2重量%-约3.7重量%的碳、和约0.8重量%-约1.3重量%的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的颗粒，其中所述碳簇团的至少30％完全嵌入所述铁基体中。

66. 根据权利要求65的方法，其进一步包括如下步骤：

（f）将所述粉末在所述不低于约700℃的温度保温；以及

（g）任选地，重复步骤（e）和（f）。

67. 根据权利要求61或62的方法，其中所述的工艺步骤在基本无氧的气氛中进行。

68. 一种包括复合粉末颗粒的铁－石墨复合粉末，由包括如下步骤的方法制备：

（a）将一种含碳和含硅的铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约650℃加热到高于约1000℃温度；以及

（c)将所述粉末从所述高于约1000℃的温度冷却至不低于约700℃的温度；

其中，所述粉末以高于约30℃/分钟的速度被从约650℃的温度加热到所述高于约1000℃的温度，在所述高于约1000℃的温度下，保温

约 5 分钟－16 小时，然后将该粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，和

并包括约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅的、并且其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

69. 根据权利要求 68 的铁－石墨复合粉末，其中所述碳簇团的至少 50％完全嵌入所述铁基体中。

70. 根据权利要求 68 的铁－石墨复合粉末，其中所述碳簇团的至少 70％完全嵌入所述铁基体中。

71. 根据权利要求 68 的铁－石墨复合粉末，含有约 3.5 重量%-约 3.7 重量%的碳和约 0.8 重量%-约 1.0 重量%的硅。

铁－石墨复合粉末
以及采用此粉末生产的烧结制品

技术领域

本发明涉及用于生产具有优良的机械性能和机加工性能的结构部件的金属粉末。具体而言，本发明涉及铁－石墨复合粉末、其制备方法以及采用粉末冶金制造技术由所述粉末制造部件的方法。

背景技术

传统上，可以通过铸造液态金属或者将固态金属成形或加工为特定的形状或外形来制造金属部件。可锻铸铁是一种特别可用于制造金属部件的材料，因其具有优良的机加工性能、韧性、延展性、耐腐蚀性、强度、磁性能和均匀性。这些性能的产生归因于该铸铁的金相组织，所述组织包含嵌入铁基体中的碳簇团。然而，可锻铸铁是一种铸铁。

由于廉价的、轻质的机器部件的需求不断增加，粉末冶金（P/M）制造技术正在取代传统的制造方法。粉末冶金中，金属粉末原材料被模压成生坯，所述生坯将进行烧结处理。烧结体可进一步进行精压、锻造、热处理，以及，偶而需要切削或机加工，以获得最终的金属产品。例如，美国专利5,628,045公开了一种通过选择性冷却（附加热处理）烧结件来获得具有奥氏体和/或贝氏体基体的烧结部件的方法。因此，该方法中所使用的金属粉末原材料必须拥有几种重要性能。金属原材料必须适合模压处理，并且，因此具有可容许的硬度和压缩性能，粉末的硬度对其压缩性能有直接影响－较低的硬度产生较佳的压缩性能。此外，由金属原材料获得的固态金属产品应该具有有利的机械强度、韧性和机加工性能。因此，用于制备这些产品的金属原材料也必须拥有良好的热处理性能，例如，可烧结性和淬硬性。

已有研究者试图制备一种用于粉末冶金制造的粉末，该粉末也能获得具有高石墨含量和可锻铸铁显微组织的烧结制品。例如，Yang（粉末冶金与颗粒材料的国际会议，1998年6月1日发表）公开了一种通过由含有硼和硫的P/M铁合金构成的生坯的石墨化制备的烧结钢。所述烧结钢具有铁素体基体，其中石墨在所述烧结制品的孔隙中析出。

所述石墨是一种所谓“自由态”石墨，因为所产生的石墨形状取决于其发生析出的孔隙的形状。

Uenosono（粉末冶金与颗粒材料国际会议文集，1997 年 6 月 29 日－7 月 2 日，Chicago,Illinois）公开了一种烧结钢，该钢与 Yang 公开的钢类似，也含有硼和硫并且具有在孔隙部位沉积的石墨。

Shivanath（美国专利 5,656,787）对碳/铁混合物在形成烧结制品中的使用进行了公开。在这种情况下，所述混合物包含在由相对较大的铁合金颗粒形成的空隙内分布的相对较小的碳颗粒。

Ovecoglu(国际粉末冶金杂志(Intl. J. powder Metallurgy),1998)公开了对铁粉末和石墨粉末进行碾磨，以形成铁-碳复合粉末合金。长时间碾磨该铁-石墨粉末混合物会使石墨逐渐消失。碾磨 20 小时后的粉末的 X 射线衍射表明粉末颗粒仅含α-Fe。

然而，这些方法不能产生具有可锻铸铁的金相组织或所希望的性能的 P/M 粉末。而且这些方法不能大量有效地生产此类粉末。因此，理想的是提供一种铁－石墨复合粉末，所述复合粉末能提供可锻铸铁的优点，并且可以用来使用粉末冶金制造技术生产烧结制品。

发明内容

本发明涉及一种新型的铁－石墨复合粉末，所述复合粉末的显微组织包含分布在铁基体中的碳簇团(carbon cluster)。本发明另一个实施方案涉及制备所述铁－石墨复合粉末的方法，所述方法包含的步骤为：

（a）雾化处理铁水，以形成一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末加热至第一阶段的石墨化温度；以及

（c）将所述粉末从第一阶段石墨化温度冷却至第二阶段石墨化温度。

本发明也涉及采用烧结本发明的铁－石墨复合粉末的方法制备的烧结件。在又一个实施方案中，本发明涉及由本发明的铁－石墨复合粉末生产的烧结制品，所述烧结制品已进行烧结后处理。

在一个技术方案中，本发明提供一种铁－石墨复合粉末，包括含约 2－4.5wt％的碳和约 0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种制备铁－石墨复合粉末的

方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约650℃加热至至少约900℃的温度；以及

（c）将所述粉末从所述至少约900℃的温度冷却至高于约600℃的温度，

其中，将所述铁粉末从约650℃加热至所述至少约900℃时，其加热速度应足以使得碳簇团在所述粉末颗粒的芯部中形核并随后将该粉末以不大于约10℃/分钟的速度进行冷却，

其中，所述粉末是由含约2－4.5wt％的碳和约0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒构成，其中所述碳簇团的至少30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种制备铁-石墨复合粉末的方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约650℃加热至至少约900℃的温度；以及

（c）将所述粉末从高于约900℃的温度冷却至低于约600℃的温度；

（d）将所述粉末重新加热至高于约700℃的温度；以及

（e）将所述粉末从高于约700℃的温度冷却至高于600℃的温度，

其中，将所述粉末从所述约650℃加热至所述至少约900℃时，其加热速度应足以使得碳簇团在所述粉末颗粒的芯部中形核并随后将该粉末以不大于约10℃/分钟的速度进行冷却，且

其中，所述粉末是由含约2－4.5wt％的碳和约0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒构成，其中所述碳簇团的至少30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种制备铁-石墨粉末的方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约650℃加热至至少约900℃的温度；

以及

（c）将所述粉末从高于约900℃的温度冷却至低于约600℃的温度；

（d）将所述粉末重新加热至高于约700℃的温度；

（e）将所述粉末从所述高于约700℃的温度冷却至高于600℃的温度；

（f）将所述粉末在所述高于约600℃的温度保温；以及

（g）任选地，重复步骤（e）和（f），

其中，将所述铁粉末从约650℃加热至所述至少约900℃时，其加热速度应足以使得碳簇团在所述粉末颗粒的芯部中形核并随后将该粉末以不大于约10℃/分钟的速度进行冷却，

其中，所述粉末是由含约2－4.5wt％的碳和约0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒构成，其中所述碳簇团的至少30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种采用包括对一种铁－石墨复合粉末进行烧结的方法制备的烧结制品，其中所述粉末包括含约2－4.5wt％的碳和约0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒，其中所述碳簇团的至少30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种基本完全致密的烧结制品，采用包括在低于约1200℃的温度下对一种铁－石墨复合粉末进行烧结的方法制备，其中所述粉末包括含约2－4.5wt％的碳和约0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的铁－石墨复合粉末颗粒，其中所述碳簇团的至少30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种铁－石墨复合粉末，由包括如下步骤的方法制备：

（a）将一种含碳和含硅的铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末加热到高于约900℃温度；以及

（c）将所述粉末从高于约900℃的温度冷却至不低于约700℃的温度；

其中，将所述粉末加热至高于约900℃，其加热速度应足以使得碳簇团在所述粉末颗粒的芯部中形核，并将该粉末以不大于约10℃/

分钟的速度进行冷却，和

其中，所述粉末包括含约 2－4.5wt％的碳和约 0.05-2.5wt％的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的复合粉末颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种铁－石墨复合粉末的制备方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约 650℃加热到高于约 1000℃温度；以及

（c）将所述粉末从所述高于约 1000℃的温度冷却至高于约 700℃的温度；

其中，所述粉末以高于约 30℃/分钟的速度被从约 650℃的温度加热到高于约 1000℃的温度，在约 850℃到所述高于约 1000℃之间的温度或在所述高于约 1000℃的温度下，保温约 5 分钟－16 小时，然后将该粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，和

所述粉末包括含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种铁－石墨复合粉末的制备方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约 650℃加热到高于约 1000℃温度；以及

（c）将所述粉末从所述高于约 1000℃的温度冷却至不低于约 700℃的温度；

其中，所述的冷却步骤包含选自下述的冷却步骤与保温步骤的组合，

（i）将所述粉末从所述高于约 1000℃的温度冷却至不低于约 700℃的温度，并且在上述不低于约 700℃的温度下保温所述粉末；

（ii）任选地，将所述粉末从所述不低于约 700℃的温度冷却至另一个不低于约 700℃的温度，并且在所述温度下保温所述粉末；以及

（iii）任选地，重复步骤（ii）；

其中，所述粉末以高于约 30℃/分钟的速度被从约 650℃的温度加热到所述高于约 1000℃的温度，在所述高于约 1000℃的温度下，保温约 5 分钟－16 小时，然后将粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，和

所述粉末包括含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种制备铁-石墨复合粉末的方法，包括如下步骤：

（a）将一种铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约 650℃加热到高于约 1000℃温度；以及

（c）将所述粉末从高于约 1000℃的温度冷却至低于约 600℃的温度；

（d）将所述粉末重新加热至高于约 800℃的温度；以及

（e）将所述粉末从所述高于约 800℃的温度冷却至不低于 700℃的温度；

其中，所述粉末以高于约 30℃/分钟的速度被从约 650℃的温度加热到所述高于约 1000℃的温度，在所述高于约 1000℃的温度下，保温约 5 分钟－16 小时，然后将粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，和

所述粉末包括含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团的颗粒，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

在又一个技术方案中，本发明提供一种包括复合粉末颗粒的铁－石墨复合粉末，由包括如下步骤的方法制备：

（a）将一种含碳和含硅的铁水雾化成为一种雾化的铁粉末；

（b）将所述雾化的铁粉末从约 650℃加热到高于约 1000℃温度；以及

（c）将所述粉末从所述高于约 1000℃的温度冷却至不低于约 700℃的温度；

其中，所述粉末以高于约 30℃/分钟的速度被从约 650℃的温度加

热到所述高于约 1000℃的温度，在所述高于约 1000℃的温度下，保温约 5 分钟－16 小时，然后将该粉末以不大于约 10℃/分钟的速度进行冷却，和

并包括约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅的、其显微组织为在铁基体中嵌入有回火碳簇团，其中所述碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体中。

附图说明

图 1 图示说明的是本发明实施例 1 中使用的石墨化方法的时间/温度分布。

图 2 是一张通过在真空环境中进行的石墨化处理获得的含约 10％石墨的铁粉末样品的铁素体显微组织的光学显微照片。

图 3 是一张铁粉末样品的显微组织的光学显微照片，其中，所述组织含有约 80％的铁素体，10％的石墨和 10％的珠光体。

图 4 是通过不完全石墨化处理获得的铁粉末样品的显微组织的光学显微照片，其中，所述石墨化处理在分解的氨（N_2/H_2）气氛中进行，所述显微组织包含主要处于粉末颗粒表面的碳簇团。

具体实施方式

本发明的铁－石墨复合粉末由具有碳簇团位于铁基体中的显微组织的铁-石墨复合粉末颗粒组成，其中碳簇团可位于所述颗粒的表面或嵌入所述颗粒中。优选的是该碳簇团是回火碳簇团。在本发明的一个优选实施方案中，所述铁-石墨复合粉末包括具有嵌入在铁基体中的碳簇团显微组织的复合粉末颗粒。有利的是，在所述复合粉末颗粒中存在的碳簇团的至少 30％完全嵌入所述铁基体。即，存在于所述复合粉末颗粒中的碳簇团的 70％或更少位于所述颗粒的表面。优选至少 50％的碳簇团完全嵌入铁基体中。更优选至少 60％的碳簇团完全嵌入铁基体中。最优选至少 70％的碳簇团完全嵌入铁基体中。所述复合粉末的铁基体可以包含铁素体、珠光体、奥氏体－铁素体（ausferrite）、贝氏体、马氏体、奥氏体、游离渗碳体、回火马氏体或者其混合物。优选地，本发明的铁－石墨复合粉末的显微组织是碳簇团嵌入基本为铁素体（至少 60％铁素体）的基体中。更优选地，本发明的铁－石墨复合粉末的显微组织为碳簇团嵌入铁素体与珠光体的混合基体（至少 80％铁素体）中。最优选地，本发明的铁－石墨复合粉末的显微组织

为碳簇团嵌入在全部为铁素体的基体中。因此，在本发明的优选实施方案中，所述铁-石墨复合粉末具有可锻铸铁的金相显微组织。即，所述铁-石墨复合粉末是可锻铸铁的缩微形式。

本发明的铁－石墨复合粉末是一种铁－碳－硅合金，其含有约 2－4.5wt％的碳和约 0.05-2.5wt％的硅。优选地，所述复合粉末含有约

3－4wt%的碳和约 0.1-2wt%的硅．在一个优选的实施方案中，所述复合粉末包含约 3－4wt%的碳和约 0.3-2wt%的硅．具有碳簇团嵌入在铁基体中的显微组织的示例性的本发明铁-石墨复合粉末，包含约 3.2-3.7wt%的碳和约 0.8-1.3wt%的硅．本发明的铁-石墨复合粉末优选具有由碳簇团嵌入铁基体的组成的显微组织，包含约 3.5-3.7wt%的碳和约 0.8-1.0wt%的硅．本发明的复合铁粉末和/或所获得的烧结制品也可以含有至少一种本领域使用的常规的其它合金元素．示例性的合金元素包括，但不仅限于：锰、镍、钼、铜、铬、硼、磷或者它们的混合物．本发明的铁－石墨复合粉末可以是一种复合合金粉末，其中，至少一种合金元素存在于雾化前的铁水中．

可以通过将至少一种单质形式的合金元素，或者将至少一种含有至少一种所述合金元素的合金或化合物溶解在液态铁中，来制备用于本发明的液态铁合金．或者，本发明的铁－石墨复合粉末可以是一种复合粉末混合物，其中，至少一种单质形式的合金元素或者至少一种含有至少一种合金元素的合金或化合物与石墨化的复合粉末混合，以形成所述复合粉末混合物．用来与铁水进行合金化或者与铁－石墨粉末进行混合，以获得上述粉末合金或者粉末混合物的单质形式的合金元素、合金和/或化合物在本领域为人熟知．考虑选择适当的单质形式的合金元素（如，Cu^0）、含有所要求的合金元素的适当的合金（例如铁合金，如铁磷合金）或适当的化合物（例如，氮化硼）来获得本发明的具有任何所要求的元素组成的粉末合金和/或粉末混合物，此为本领域的技术人员的普通技能．

本发明的复合铁粉末和/或者所获得的烧结制品可以含有小于约 2%的锰，小于约 4%的镍，小于约 4%的钼，小于约 2%的铬，小于约 0.2%的硼，小于约 1%的磷和/或小于约 3%的铜．优选地，当所述复合粉末为含铜合金时，所述粉末含有小于约 1%的铜，而当所述复合粉末是一种含铜混合物时，所述复合粉末混合物含有小于约 3%的铜．另一方面，所述复合粉末和/或烧结制品可以含有小于约 1%的锰，小于约 1.5%的镍，小于约 1.5%钼，小于约 1%的铬和/或小于约 0.5%

的磷．本发明的复合铁粉末和/或者获得的烧结制品可以含有上面所列的任何元素，但也可以含有小于约 0.7％的锰和/或小于约 0.15％的磷．在另一个实施方案中，本发明的复合铁粉末和/或获得的烧结制品可以含有上面所列的任何元素，但可含有小于约 0.1％的锰．

本发明的铁－石墨复合粉末的显微组织由嵌入铁基体中的碳簇团组成，所述复合粉末可以采用包括下述步骤的方法进行制备：

（a）对铁水进行雾化处理，以形成雾化的铁粉末；

（b）将该雾化的铁粉末加热至第一阶段的石墨化温度；以及

（c）将所述粉末由第一阶段石墨化温度冷却至第二阶段的石墨化温度．采用本发明方法的制备的铁－石墨复合粉末的铁基体可以是铁素体、珠光体、奥氏体－铁素体（ausferrite）、贝氏体、马氏体、奥氏体、游离的渗碳体、回火马氏体或者它们的混合物．优选地，由本方法获得的铁－石墨复合粉末的显微组织含有嵌入基本上（至少 60％）为铁素体的基体中的碳簇团，更优选地，所述基体为铁素体与珠光体的混合体（至少 80％的铁素体），并且，最优选，所述基体为全部铁素体．

本方法的第一步包括将铁水雾化处理，以形成铁粉末．有利的是，由本发明方法获得的铁粉末中每一喷雾后的颗粒具有均匀的化学组成．对含有至少碳和硅的铁水合金的雾化处理可提供一种铁粉末，其中该粉末的每一颗粒具有相同或基本相同的碳和硅的浓度．可以采用水雾化或气雾化技术来进行雾化处理．优选地，采用水雾化技术以产生具有不规则外形颗粒的铁粉末，所述颗粒的平均粒径小于约 300μm，而且，其显微组织为亚稳态的铁的碳化物和奥氏体，偶而也有马氏体存在．所述铁粉末颗粒的显微组织包含在奥氏体基体上的亚稳态的铁的碳化物，所述奥氏体基体的存在归因于雾化过程中铁水的瞬时凝固．雾化处理的颗粒的显微组织取决于化学组成(所有其它雾化参数不变)．例如，碳浓度低的铁粉末的雾化处理颗粒典型的显微组织，具有较多的奥氏体和较少的块状碳化物网络．碳浓度高的铁粉末易于形成具有块状碳化物网络和较少奥氏体的显微组织，它促进了石墨化过程．

所述雾化的铁粉末然后可以进行包含第一阶段石墨化处理和第二阶段石墨化处理的石墨化处理。在这些处理过程中，发生两种截然不同的转变。第一种转变涉及铁粉末中碳化物的分解和石墨的形核和长大(碳簇团)。第二种转变涉及所述粉末中铁组织的转变及所述碳簇团的进一步长大。

第一阶段的石墨化处理是一个加热过程，其间，碳化物的分解和存在于过饱和奥氏体中的过剩碳提供了使所述碳簇团形核和长大的碳。该过程包括将所述铁粉末加热至高于约 900℃但低于粉末熔点的温度。优选地，将所述铁粉末加热至高于 1000℃的温度。该加热过程包括两个阶段：一个加热阶段，其间碳簇团发生形核（定位（localization）），和一个任选的保温阶段，其间完成碳化物的分解。可通过控制从约 650℃到高于约 900℃，优选到高于约 1000℃的温度的加热阶段期间的加热速度，实现对所得粉末颗粒中碳簇团的定位（即嵌入内部与在表面）的控制。在本发明一个优选的实施方案中，所述铁-石墨粉末被从约 650℃加热到高于约 900℃时，其加热速度使得至少 30%的碳簇团的形核发生于颗粒内部，即在复合粉末中形成的碳簇团的至少 30％完全嵌入在铁基体中。优选的是，所述铁-石墨粉末被从约 650℃加热到高于约 900℃时，其加热速度使得至少 50%的碳簇团完全嵌入在铁基体中。更优选的是，所述铁-石墨粉末被从约 650℃加热到高于约 900℃时，其加热速度使得至少 60%的碳簇团完全嵌入在铁基体中。最优选的是，所述铁-石墨粉末的加热速度使得至少 70%的碳簇团完全嵌入在铁基体中。在所述铁粉末的温度达到约 850℃到所述第一阶段石墨化温度之间后，将所述粉末在该温度范围保温或在所述第一阶段石墨化温度保温，其保温时间足以使铁粉末中的碳化物分解（所述保温阶段）。优选的是，对铁－石墨粉末进行处理，使得在第一阶段石墨化过程中可完成碳化物的分解。然而，含残量的碳化物（不超过约 10％）的铁－石墨复合粉末包括在本发明的范围内，可用于制造本文所述完全致密或基本完全致密的烧结制品。一旦达到适当的碳化物分解程度，可对所述铁粉末样品进行第二阶段石墨化处理。

优选的是，可根据铁－石墨复合粉末的化学组成和粉末雾化后的组织调整所述加热过程，从而在将粉末从约 650℃加热到高于约 900℃、优选高于约 1000℃的第一阶段石墨化温度时，其加热速度足以使得碳簇团在铁粉末颗粒的芯部中形核，并且任选地，该粉末样品在约 850℃到高于约 900℃（优选高于约 1000℃）之间或在高于约 900℃（优选高于约 1000℃）的温度下，保温一段足以使铁粉末中的碳化物完全分解的时间．例如，对于含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅，或优选的是含有约 3.5 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.0 重量%的硅的铁－石墨复合粉末，可将其从约 650℃的温度加热到高于约 900℃、优选高于约 1000℃的温度，加热速度高于约 30℃/分钟，以使得高于 30％的碳簇团在所述粉末颗粒芯部析出/形核．换言之，以高于约 30℃/分钟的速度加热可获得一种铁－石墨复合粉末，其中在所述粉末颗粒中高于 30％的碳簇团完全嵌入在铁基体中．对于此类粉末，低于约 30℃/分钟的加热速度导致超过 70％的碳簇团定位/形核于粉末颗粒的表面．在所述铁粉末达到高于约 900℃、优选高于约 1000℃的第一阶段石墨化温度后，所述铁粉末可在第一阶段的石墨化温度下保持约 5 分钟－16 小时，以完成碳化物在铁粉末中的分解．

第二阶段的石墨化包括将所述铁粉末从第一阶段石墨化温度控制冷却至第二阶段的石墨化温度，在所述温度下，所述粉末中的铁组织发生转变，并且，碳向碳簇团的形核位置扩散以使其长大．具体地说，本发明的第二阶段石墨化包括将铁粉末从高于 700℃、优选从低于约 800℃（但高于 700℃）的温度控制冷却到第二阶段石墨化温度．在本发明的方法中，将所述粉末冷却到适当的第二石墨化温度，其总体冷却速度足以使得碳向碳簇团的形核位置扩散以使其长大，从而使得所述粉末中的铁组织发生转变（例如，转变为基本为铁素体的显微组织，包括从奥氏体转变为铁素体、奥氏体转变为珠光体和珠光体转变为铁素体），由此形成具有由碳簇团嵌入在铁基体组成显微组织的复合粉末．可将如此形成的复合铁粉末冷却到室温，或冷却到任何适于进一

步处理（例如加工成烧结制品、包装等）的温度。第二阶段石墨化过程的控制冷却可以是连续冷却过程（例如，通过使传送带上的粉末通过差温加热(温度连续变化)的炉或通过加热到温度连续降低的相邻的一组炉而实现）或是分步的冷却过程，包括独立的冷却和保温步骤（例如，通过使粉末在单一炉中保温然后分步降低炉温而实现）。炉中不同部分的温差或不同炉间或一炉中不同的温度设定之间的温差可使粉末以比希望的总体冷却速度快的速度暂时冷却。然而，如图 1 所示，通过包括快速冷却间隔和随后非冷却间隔（即将铁在选定的温度下保温）的冷却方法，可获得适当的冷却速度。例如，对于含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅，或优选的是含有约 3.5 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.0 重量%的硅的粉末，可将其从高于 700℃、优选从低于约 800℃的温度冷却到第二阶段石墨化温度，其总体冷却速度不高于 10℃/分钟，以使粉末中的铁组织发生转变，并且，碳发生扩散和使碳簇团长大。对于这种粉末，高于约 10℃/分钟的冷却速度不能为奥氏体向铁素体的转变提供足够的时间，即一部分碳残留在铁基体中，并且碳簇团的长大不完全。

高于约 600℃的温度适合作为第二阶段的石墨化温度，然而，该温度可以依据粉末中合金元素的存在类型和/或浓度而改变。优选地，第二阶段的石墨化温度高于约 650℃，并且，更优选地，不低于约 700℃。本领域的技术人员将会意识到的是，本发明的复合粉末中的合金元素的存在类型和/或浓度不仅会影响控制冷却应冷至的温度（第二阶段的石墨化温度），而且，也影响由第二个石墨化温度冷至室温后，所获得的复合粉末的铁基体。例如，对于含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅，或优选的是含有约 3.5 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.0 重量%的硅的粉末，第二阶段石墨化温度高于约 700℃，而总体冷却速度不高于 10℃/分钟，优选不高于约 4℃/分钟。考虑到此处的这些教导，依据铁粉末中合金元素的性质和浓度，来修正第二阶段的石墨化温度，以便获得具有包

含嵌入所需铁基体中的碳簇团的显微组织的复合铁粉末，此为本领域的技术人员的普通技能。

第二阶段的石墨化处理可以在第一阶段的石墨化处理后马上进行，或者作为一个独立的过程，在较晚些时候进行。例如，可以对第二阶段的石墨化处理的控制冷却的实施方式进行调整，以使铁粉末的温度直接由高于约 900℃的第一阶段的石墨化温度降低至第二阶段的石墨化温度，其中将铁粉末从高于 700℃、优选从低于约 800℃的温度冷却到第二石墨化温度的冷却速度足以使碳扩散至形核位置以确保碳簇团的长大，以使粉末中的铁组织发生转变。另一种方法是，第二阶段的石墨化处理可以作为包括铁试样重新加热的一个独立的步骤来进行。例如，铁粉末样品可以首先加热至高于约 900℃的第一阶段的石墨化温度，冷却至低于约 600℃的温度（如，室温），再加热到至少高于 700℃的温度，之后，进行第二阶段的石墨化处理的控制冷却，其中将铁粉末从高于约 700℃的温度冷却到第二石墨化温度的冷却速度足以使碳扩散至形核位置以确保碳簇团的长大，以使粉末中的铁组织发生转变。优选地，可以将铁粉末再加热至高于约 800℃的温度，以确保珠光体向奥氏体的快速转变。

因此，可以采用包含下步骤的连续冷却方法，由雾化的铁粉末制备出包括具有由嵌入铁基体中的碳簇团组成的显微组织的颗粒的铁－石墨复合粉末：

（a）将雾化的铁粉末加热至高于约 900℃的温度；以及

（b）将所述粉末由高于约 900℃的温度冷至高于约 600℃的温度。

在本方法中，将所述铁粉末从约 650℃加热至高于约 900℃的加热速度足以使得碳簇团在铁粉末的芯部中形核，并且任选地，该粉末在约 850℃到高于约 900℃之间或在高于 900℃的温度下，保温一段足以使铁粉末中的碳化物充分分解的时间。此后将该粉末从高于 700℃、优选从低于约 800℃（但高于 700℃）的温度冷却到高于约 600℃的温度，其冷却速度应足以使得所述粉末中的铁组织发生转变，并且使碳

簇团长大．换言之，将该粉末从约 650℃加热至高于约 900℃、优选高于约 1000℃的第一阶段石墨化温度，其加热速度足以使得碳簇团在铁粉末的芯部中形核，并且任选地，该粉末样品在约 850℃到第一阶段石墨化温度之间或在第一阶段石墨化温度下，保温一段足以使铁粉末中的碳化物达到期望的分解程度的时间，此后将该粉末从高于约 900℃、优选高于约 1000℃的第一阶段石墨化温度冷却到高于 700℃、优选低于约 800℃的温度，然后从高于 700℃、优选低于约 800℃的温度冷却至高于约 600℃的第二石墨化温度，其冷却速度足以使得所述粉末中的铁组织发生转变，并且使碳扩散至形核位置，由此形成其显微组织为铁基体上嵌入有碳簇团的复合粉末．例如，对于含有约 3.2 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.3 重量%的硅，或优选的是含有约 3.5 重量%-约 3.7 重量%的碳、和约 0.8 重量%-约 1.0 重量%的硅的粉末，将其从约 650℃的温度加热到高于约 1000℃的温度，加热速度高于 30℃/分钟，将该粉末在高于约 1000℃的温度保温约 5 分钟－约 16 小时，然后将该粉末以不高于约 10℃/分钟，优选不高于约 4℃/分钟的冷却速度冷却到高于约 700℃的温度，这样就足以形成其显微组织为铁基体上嵌入有碳簇团的复合粉末．

所述冷却过程也可以包含下述步骤:

（1）将所述粉末由高于约 900℃的温度冷至低于约 600℃的温度;

（2）将所述粉末再加热至高于约 700℃的温度；以及

（3）将所述粉末由高于约 700℃的温度冷却至高于 600℃的温度．优选地，将所述粉末再加热至高于 800℃的温度并且以上述方式冷却至不低于 700℃的温度．

由雾化的铁粉末制备铁－石墨复合粉末的本发明的方法的又一个实施方案包括一个分步冷却和保温过程，其包含如下步骤:

（a）将雾化的铁粉末加热至高于约 900℃的温度；以及

（b）将所述粉末由高于约 900℃的温度冷却至高于约 600℃的温度;

其中，所述冷却步骤包含选自下述的冷却和保温步骤的组合:

（i）将所述粉末由高于约 900℃的温度冷却至高于约 600℃的温度，并在所述高于约 600℃的温度保温所述粉末；

（ii）任选地，将所述粉末由高于约 600℃的上述温度冷却至另一个高于约 600℃的温度，并且，在所述温度下保温所述粉末；以及

（iii）任选地，重复步骤（ii）；

在本发明方法的该实施方案中，按照上述方式，将所述粉末从约 650℃加热至高于约 900℃的加热速度足以使得碳簇团在粉末颗粒的芯部中形核，并且任选地，该粉末样品在约 850℃到高于约 900℃之间或在所述高于 900℃的温度下，保温一段足以使所述粉末中的碳化物充分分解的时间。此后将该粉末从高于约 900℃的温度冷却到高于 700℃的温度，然后采用冷却和保温步骤的组合从约 700℃冷却至高于约 600℃的温度，其冷却速度应足以使得所述粉末中的铁组织发生转变，并且使碳簇团长大。该冷却过程也可以包含如下步骤：

（1）将所述粉末由高于约 900℃的温度冷却至低于约 600℃的温度；

（2）将所述粉末再加热至高于约 700℃的温度；以及

（3）将所述粉末由高于约 700℃的温度冷却至高于 600℃的温度；

（4）在所述高于约 600℃的温度保温所述粉末；以及

（5）任选地，重复上述的步骤（3）和（4）。优选地，将所述粉末再加热至高于 800℃的温度，并且冷却至不低于 700℃的温度。所述分步冷却/保温的方法典型地包括重复进行二次或多次冷却和保温步骤，并且其特征在于：降低所述粉末的温度，之后，将所述粉末在所述降低的温度下保持一段充分的时间，以使得所述粉末中的铁组织发生转变，并且使碳扩散至形核位置。实施例 1 介绍了一种包含三个冷却/保温循环的分步冷却/保温的方法，其中，从高于约 900℃的第一阶段石墨化温度冷却至高于约 600℃的第二石墨化温度的总体冷却速度低于 2℃/分钟，而从高于约 700℃（例如，760℃）冷却至高于 600℃（例如，700℃）的总体冷却速度低于 1℃/分钟。该实施例中，在不低于约 700℃的三个降低的温度（例如，760℃，730℃和 700℃）下，分

别对所述粉末进行保温，保温时间至少为 1.25 小时/每循环。

在本发明的方法中，铁粉末中的硅浓度可用以调整本发明中获得的复合粉末的显微组织，硅促进碳形核位置的形成。雾化的铁－石墨粉末中较高的硅浓度能提供更多的形核位置，从而导致石墨的快速形核，而较低的硅浓度能提供的形核位置较少，从而产生较慢的石墨形核。在加热和冷却阶段，硅浓度的这些作用继而影响所产生的铁－石墨复合粉末的显微组织与时间的关系，并且影响为获得所要求的显微组织所需要的总时间。然而，当所述粉末中碳含量超过约 3.4%时，硅对铁－石墨复合粉末所形成的显微组织的所述影响降低了。

在含有高浓度的形核位置（高硅浓度，例如，>1.0wt.%硅）的铁粉末中，铁组织将快速发生（例如，奥氏体向铁素体）的转变，原因在于奥氏体中的碳向碳簇团处的扩散快（扩散路径短）。奥氏体向铁素体的转变在含低浓度的形核位置（低硅浓度，例如，<0.5wt.%的硅）的铁粉末中可进行得非常慢，需要更长的冷却时间。由于碳扩散至碳簇团所需要的时间长（奥氏体中的碳的扩散路径长），含有低浓度硅和低碳含量的雾化的铁粉末的石墨化会造成奥氏体向珠光体，然后向铁素体/珠光体混合物的逐步转变。由于碳簇团形核增多（高碳含量）使得奥氏体中碳的扩散至形核位置的路径变短，因此含有低浓度硅和高碳含量的雾化的铁粉末的石墨化会造成奥氏体向铁素体/珠光体混合物的快速转变。因此，可通过调整铁－石墨复合粉末中硅和碳的浓度并调整冷却过程的时间长度来影响由本发明方法获得的复合粉末的显微组织。

此外，实施本方法所使用的气氛也可以用来影响按本发明制备的复合粉末的显微组织。例如，可以对气氛和形核的速度进行调整以便影响处理过程中铁－石墨粉末的脱碳速度。脱碳是碳与氧的反应，该反应会减少能够形成碳簇团的有效碳量。因此，利用高的硅浓度和碳浓度和快速将所述粉末加热至约 650℃到高于约 1000℃的范围内促进了芯部石墨形核和使较多的碳被隔离在铁基体内，从而减少能够与氧反应的有效碳量（脱碳）。此外，在基本无氧的气氛中实施所述石墨

化处理将最大程度地减少脱碳。一种基本无氧的气氛含有小于约 3.0% 的氧，并且，优选小于约 1.0% 的氧。所述基本无氧的气氛可以是一种氢、氮、氨、氢气氛或者它们的混合物。所述基本无氧的气氛优选含少于约 10%的氢。或者是，所述基本无氧的气氛可以是压力小于约 30mm 汞柱的真空。优选的，所述方法在氢或氮气氛中进行。最优选地，所述方法在氮气氛中进行。

在不同气氛中进行石墨化过程也可以用来获得具有不同显微组织的铁－石墨复合粉末，例如，氢具有高的导热率。因此，当所述冷却过程在氢或者分解的氨气氛中进行时，可以使粉末快速冷却。如果冷却过程的总体冷却速度非常快，就可以形成一种具有不完全石墨化的显微组织（未达到基本为铁素体基体，例如，<60％铁素体）的产物。存在于颗粒表面的石墨形核量取决于存在于该表面氧化物的量。因此可调整控制冷却过程以提供充分的时间使粉末组织转变为基本上铁素体基体（例如 60％），并使碳簇团在粉末中长大。例如通过提供更长冷却或更长冷却/保温时间，来调整冷却过程以使总体冷却速度小于约 10℃/分钟，或者如果需要，小于约 4℃/分钟。雾化期间形成的表面氧化物由于这种气氛中存在有氢（H_2）而快速还原，从而可能形成这样一种显微组织，其中，石墨在颗粒的表面形核（对照例 1）而不是在颗粒内部形核。因此，该过程在含小于约 10％氢的基本无氧的气氛中进行。

针对此处所做的有关介绍，现在来考虑通过常规实验调整铁粉末的组成、粉末加热达到的温度、粉末的加热速度、用于获得期望的碳化物分解程度的粉末保温时间（在保温阶段）、以及冷却速度和方式，以获得碳簇团嵌入铁基体中的显微组织的铁－石墨复合粉末，此为本领域的技术人员的普通技能。可以采用传统技术，例如，通过将所述粉末固定在一适当介质中，抛光所获试样并在显微镜下目测颗粒组织，来确定铁－石墨复合粉末试样的显微组织。

所形成的具有可锻铸铁显微组织的铁－石墨粉末可借助粉末冶金技术用来制备具有优异机加工性能、强度和韧性的烧结制品，例如，

金属部件．因此，为了与粉末冶金加工过程相适应，根据本发明的铁－石墨复合粉末的平均颗粒尺寸小于约 300μm．如果所述复合粉末是一种复合粉末混合体，各混合组元（单质形式的合金元素、含有上述合金元素的合金或化合物）也将具有小于约 300μm 的平均颗粒尺寸．可以根据一般的传统方法，通过模压所述铁－石墨复合粉末形成生坯并烧结所述生坯，来对此处所述及的铁－石墨复合粉末进行烧结处理．然后，可以对所形成的烧结制品进行烧结后处理，例如，热处理（如淬火和回火等），精压、锻造和切削或机加工，以获得最终的部件．所获得的部件具有碳簇团嵌入铁基体的可锻铸铁的金相显微组织，其中所述的铁基体可以是铁素体、珠光体、奥氏体－铁素体、贝氏体、马氏体、回火马氏体或者它们的混合物．烧结制品碳簇团的尺寸类似于用于制备该制品的粉末中的簇团尺寸．因此，与由可锻铸铁制造的制品的显微组织相比，由本发明方法制造的烧结制品具有很小的碳簇团弥散分布于铁基体的组织．

重要的是，要注意到本发明铁－石墨复合粉末的熔点显著低于传统铁粉末的熔点．例如，根据本发明的含有 0.94wt.％硅和 3.29wt.％碳的铁－石墨复合粉末的熔点为约 1150－1225℃．相反，传统的铁要在高达 1400℃的温度下烧结，而无任何熔化的迹象．因此，可以在高于约 1140℃到低于约 1200℃的相对低的温度下进行本发明的铁－石墨粉末的烧结．当铁－石墨粉末试样在接近粉末液相线的温度烧结时，可能会发生某种液相烧结．液相烧结的出现会导致高密度的烧结制品形成．因此，在高于约 1140℃到低于约 1200℃的温度下对使用本发明的铁－石墨粉末制备的制品进行烧结可获得完全致密或基本致密的材料，而在低于约 1140℃的温度下烧结获得的制品未达到完全致密．例如，在约 1155℃烧结的、使用含有约 3.2 重量％-约 3.7 重量％的碳、和约 0.8 重量％-约 1.3 重量％的硅的本发明的铁－石墨复合粉末制备的烧结制品，其光学金相表明该烧结制品基本无气孔．

本发明的另一个实施方案涉及具有等温淬火（austempered）铸铁的显微组织的烧结制品．含有高浓度的碳和硅的等温淬火的可锻铸

铁具有良好的抗拉和疲劳强度、延性、韧性、耐磨性和机加工性能。等温淬火的铸铁由奥氏体－铁素体构成，其特征在于其是一种各铁素体板片被富碳奥氏体层隔开的双相组织。

采用一种对所述烧结制品进行烧结后热处理的方法来生产本发明的等温淬火的烧结制品。例如，可以采用包含下述步骤的方法，由烧结制品来制备等温淬火的烧结制品：

（a）将所述烧结制品加热至约 825－950℃的温度；

（b）将所述制品冷却至约 150－450℃的温度；以及

（c）将所述制品在所述约 150－450℃的温度下保温约 15－60 分钟。之后，可将所处理的制品冷却至室温。

有利的是，由本发明的铁－石墨复合粉末制成的烧结制品具有优异的机加工性能。传统上，将另外的化合物，如硫化锰和氮化硼添加到铁粉末中以获得具有良好机加工性能的烧结制品。由本发明的铁－石墨复合粉末制备的烧结制品不需添加这些化合物就具有优异的机加工性能。本发明的方法的结果是：复合粉末的碳簇团在烧结制品的显微组织中得以保留并且在机械加工期间起润滑剂的作用。

下面的实施例目的是对本发明的特定优选实施方案进行说明，本发明并不受此所限。

参考实例 1

通过水雾化含有 0.94％的硅和 3.29％的碳的铁水来生产一种铁粉末。所述水雾化的铁粉末完全干燥处理后，在 Lindberg 管式炉中进行加热。先用高纯氢（99.99％）净化处理炉子五次，之后，再放入干燥、雾化的粉末样品，所述粉末样品被盛放在陶瓷坩锅中，其粉末量为 10－15 克。通过在氢气氛（99.99％）中将一组铁粉末样品加热至 1020℃，并分别保温 4、8 或 16 小时来进行石墨化处理。由此所获得的样品的石墨化程度采用传统的步骤，由计算机化的图像分析仪加以确定，加热 4、8 和 16 小时的上述铁样品中形成的石墨的体积分数分别为 7.9％，8.3％和 10.2％。

实施例 1

通过将一种含 0.94％硅和 3.29％碳的铁水水雾化处理来制备一种铁粉末．然后，将所述水雾化的铁粉末完全干燥．在真空气氛（低于约 30 毫米汞柱），将所述粉末的五个样品在 Lindberg 管式炉中连续加热在 1020℃，在该温度下保温三小时，之后，以分步方式进行冷却约 4 小时．将所述样品从 1020℃冷却至约 760℃并在该温度下保温约 1.25 小时，再冷却至约 730℃并在该温度下保温约 1.25 小时，之后，冷却至约 700℃并在该温度下保温约 1.5 小时．之后，将所述样品冷却至室温．图 1 图示说明了本实施例所采用的石墨化方法的时间/温度分布图，图 2 示出的是采用所述石墨化方法获得的铁粉末样品之一的最终显微组织．所述粉末的石墨化程度采用参考实例 1 中所述的方法进行确定．五个铁－石墨复合样品中的平均石墨体积为约 10％．

对所获铁－碳复合样品的硬度进行测定，并与 ATOMET®29 和 ATOMET®1001 （生产商：Quebec Metal Powders, Inc., Tracy, Quebec, Canada）的硬度进行比较．本发明的铁粉末，ATOMET®29 和 ATOMET®1001 的硬度分别为 100、98 和 83$VHN_{50gf.}$

实施例 2

根据实施例 1 中所述的步骤对实施例 1 中所述的水雾化的铁粉末样品进行处理，但不同的是加热步骤进行 2 小时，分步冷却过程进行的时间为约 2 小时．将所述样品从 1020℃冷却至约 760℃并且在该温度下保温约 0.5 小时，冷却至约 730℃并且在该温度下保温约 0.5 小时，之后，冷却至约 700℃并且在该温度下保温约 1 小时．然后，将所述样品冷却至室温．如图 3 所示，采用该石墨化方法获得的铁粉末样品的显微组织是一种铁素体/珠光体基体，其组成为约 80％的铁素体、约 10％的珠光体和约 10％的作为碳簇团的石墨．

实施例 3

通过将一种含有 1.33％硅和 3.32％碳的铁水水雾化处理来获得一种铁粉末．将所述水雾化的铁粉末彻底干燥，之后，在 Lindberg 管式炉中，于真空气氛（低于约 30 毫米汞柱）下，在 1020℃下加热并在该温度下保温 0.25 小时，然后，采用分步的方式冷却约 1 小时．将所

述样品由 1020℃冷却至约 760℃并且在该温度下保温约 0.5 小时，之后，冷却至约 700℃并且在该温度下保温约 0.5 小时．然后，将所述样品冷却至室温．采用该石墨化方法获得的铁粉末样品的显微组织为含有嵌入的碳簇团的完全铁素体基体．

实施例 4

通过将一种含有 1.33％硅和 3.32％碳的铁水水雾化处理，获得一种铁粉末，将所述水雾化的铁粉末彻底干燥，然后，在 Lindberg 管式炉内，于氮气氛中，在 1020℃下加热并且在该温度下保温 0.25 小时，然后，采用分步的方式冷却约 1.25 小时．将所述样品由 1020℃冷却至约 760℃并且在该温度下保温约 0.25 小时，再冷却至约 740℃并且在该温度下保温约 0.25 小时，再冷却至约 730℃并且在该温度下保温约 0.25 小时，又冷却至约 720℃并且在该温度下保温约 0.25 小时，然后冷却至约 700℃并且在该温度下保温约 0.25 小时．之后，将所述样品冷却至室温．采用该石墨化方法获得的铁粉末样品的显微组织由包含嵌入的碳簇团的完全铁素体基体构成．

实施例 5

通过在 110,200 磅/英寸^{2}的压力下，将根据实施例 1 的步骤获得的铁－石墨复合样品模压成型，并在约 1155℃下烧结处理所述密实体(压坯)，来制备出标准的横向断裂试样．采用类似方法制备出混合有 0.9wt％石墨的 ATOMET®29 的标准横向断裂对照样．在根据 ASTMB－528－839 进行的试验中，所述铁－石墨粉末试样的烧结横向断裂强度为 154,553（磅/英寸^2），而 ATOMET®29（添加有 0.9％的石墨）试样的烧结横向断裂强度为 119,809（磅/英寸^2）．

对照例 1

通过将含有 1.33％硅和 3.32％碳的铁水水雾化处理来获得一种铁粉末．将所述水雾化的铁粉末彻底干燥，之后，在 Lindberg 管式炉中，于分解的氨（75％H_2/25％N_2）的气氛中，加热至 1020℃，并且在该温度下保温 0.25 小时，然后，采用分段的方式冷却约 1.66 小时．将所述样品由 1020℃冷却至约 760℃并且在该温度下保温约 0.5 小时，再

冷却至约 740℃并且在该温度下保温约 0.33 小时，又冷却至约 720℃并且在该温度下保温约 0.33 小时．之后，冷却至约 700℃并且在该温度下保温约 0.5 小时．然后，将所述样品冷却至室温．如图 4 所示，采用该石墨化方法获得的铁粉末样品的显微组织是一种铁素体/珠光体基体，其含有主要位于粉末颗粒表面的碳簇团．

对于本领域的技术人员而言利用常规实验显而易见的其它的变化和修正均包括在本发明的范围和教导之中．本发明只是受后面的权利要求书的限制．

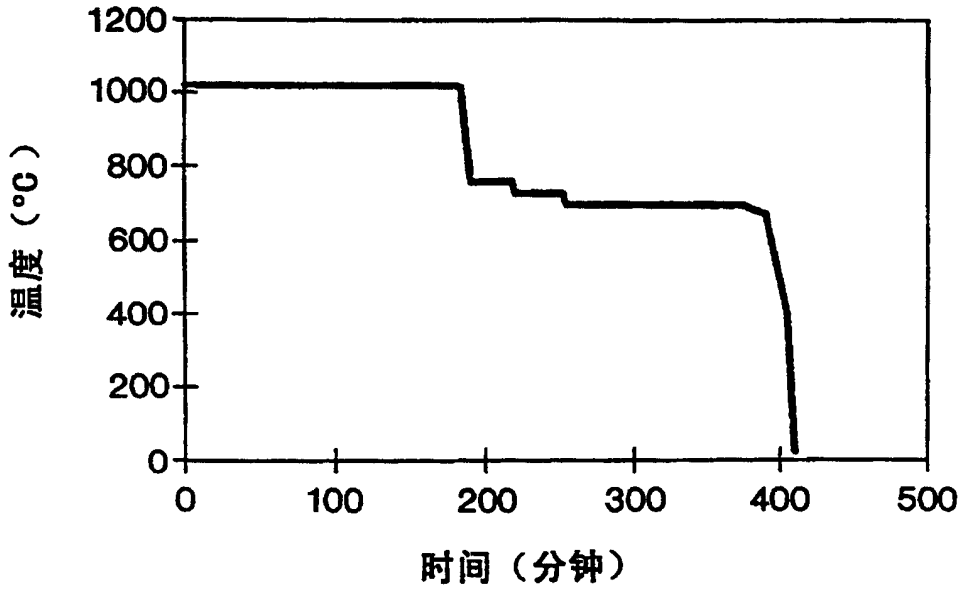

图 1



图 2

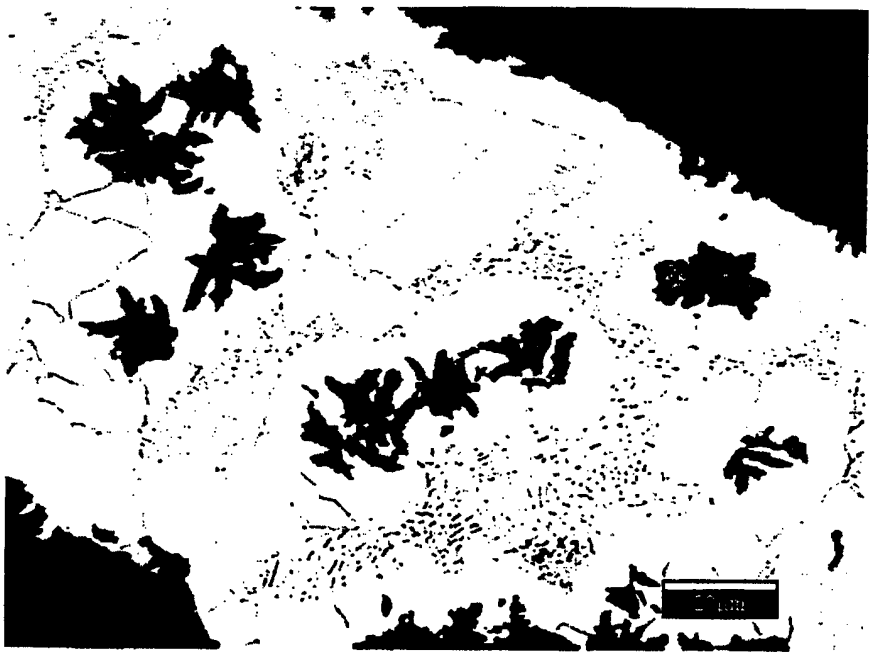

图 3

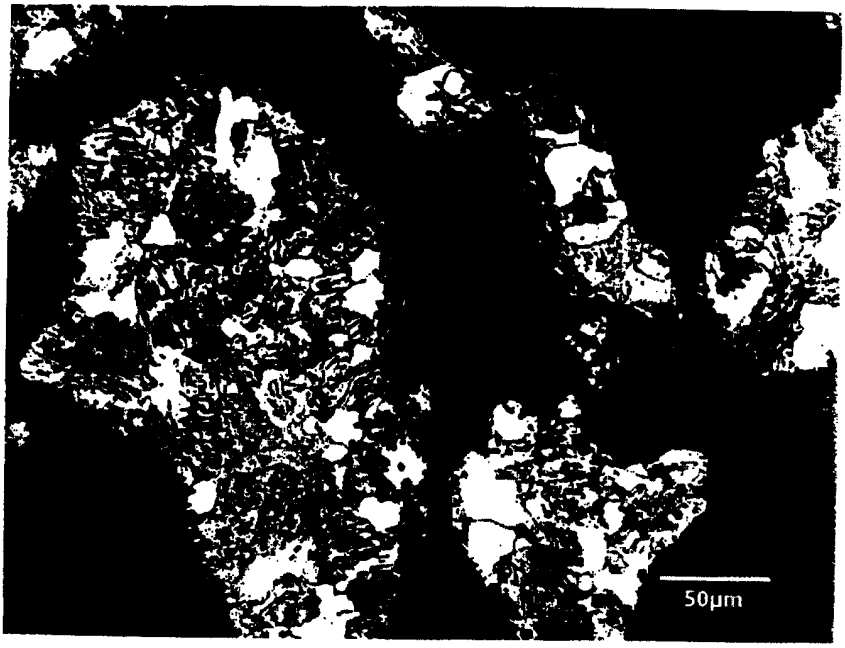

图 4