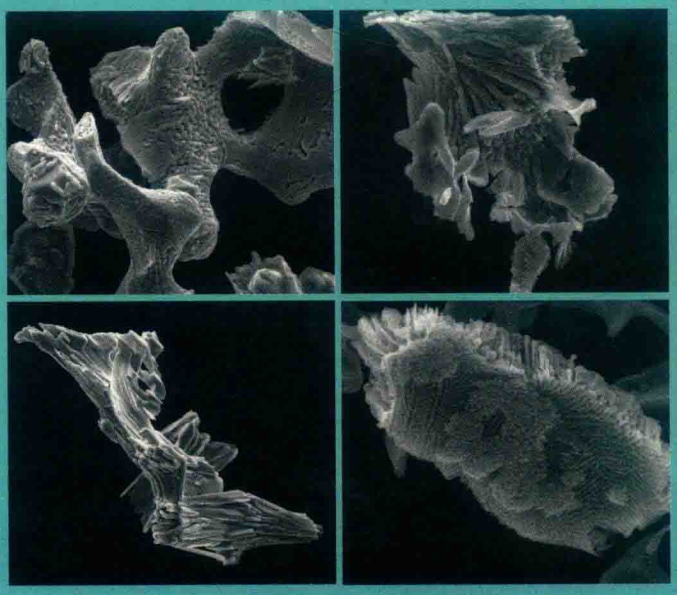
李晶◎著

Carbride in Special Steel:
Formation Mechanism and Control Technology

特殊钢中碳化物控制



冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn

特殊钢中碳化物控制

李 晶 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2019

内 容 提 要

本书系统阐述了特殊钢在电渣重熔、轧制和热处理等生产过程中碳化物的演变与控制，以及稀土、镁、氮、钛等合金元素作为异质形核剂进行合金化处理对特殊钢中碳化物的影响。

本书可供冶金、材料等领域的科研、生产、教学、管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

特殊钢中碳化物控制/李晶著. —北京：冶金工业出版社，2019.7

ISBN 978-7-5024-8183-4

Ⅰ.①特… Ⅱ.①李… Ⅲ.①特殊钢—碳化物—研究 Ⅳ.①TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 176297 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmip.com.cn 电子信箱 yjcbs@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 郑小利 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8183-4

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2019 年 7 月第 1 版，2019 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm；20 印张；4 彩页；401 千字；311 页

99.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

（本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换）

前　言

特殊钢是指具有特殊的化学成分、采用特殊的工艺生产、具备特殊的组织和性能、能够满足特殊需要的钢。特殊钢种类繁多，性能优异，主要包括高端弹簧钢和轴承钢、工模具钢、耐热钢和不锈钢、高温合金和精密合金等。特殊钢是国家重点工程建设和装备制造所需要的关键材料，其生产和应用代表一个国家工业化发展水平和制造业的强弱。虽然我国特殊钢总体质量与国际先进水平还有一定的差距，但是在某些钢种方面已取得了突破。

碳化物是特殊钢中重要的合金相之一，其类型、数量、形态、大小及分布的合理控制对钢性能有重要影响。作者在国家自然科学基金“镁对 H13 热作模具钢夹杂物和碳化物析出行为的研究”和“优质刀剪用高碳马氏体不锈钢中一次碳化物的控制”、广东省扬帆计划“高品质刀剪材料制备的工艺创新与产品研发”及厂协合作等 10 多项科技项目的支持下，对特殊钢中碳化物控制进行了十余年的深入研究，提出了电渣重熔过程中一次碳化物控制技术、电渣定向凝固一次碳化物控制技术、热轧和冷轧过程中碳化物控制技术、热处理过程中碳化物控制技术、新型辊锻热处理碳化物控制技术，明确了镁和稀土元素细化碳化物的作用机理，初步研究了氮对碳化物形成的影响，探讨了钛对特殊钢中碳化物的影响及在改善碳化物方面应用的可行性，对特殊钢中碳化物的控制取得了良好的效果。部分研究成果应用于高端刀剪用高碳马氏体不锈钢的生产，产品质量满足了高端用户要求。

本书总结了多年来作者与研究生共同进行的特殊钢中碳化物控制方面的科研成果和工艺实践，力求形成较为完整的碳化物控制工艺体系，供冶金及材料等领域的科研、生产、管理人员及高等院校相关专

业的师生阅读参考。

在本书的撰写过程中，得到朱勤天、祁永峰、王昊、张杰、于文涛等多名博士、硕士研究生及史成斌老师的帮助，钢铁冶金新技术国家重点实验室对本书出版给予了支持，在此表示真诚的感谢。

在国家项目、省部项目以及厂协项目的支持下，作者仍在进行特殊钢碳化物方面的研究工作。由于特殊钢种类繁多，碳化物演变过程复杂，本书在取材和论述方面必然存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

李　晶

2019 年 6 月

目　录

1　特殊钢中的碳化物 …… 1
1.1　碳化物及其分析方法 …… 1
1.1.1　碳化物的定义 …… 1
1.1.2　碳化物的分类 …… 2
1.1.3　碳化物的分析方法 …… 5
1.2　特殊钢中碳化物形成的热力学分析 …… 11
1.2.1　奥氏体热作模具钢中碳化物形成热力学分析 …… 13
1.2.2　8Cr13MoV 钢中碳化物形成热力学分析 …… 20
1.2.3　高速钢中碳化物形成热力学分析 …… 22
1.2.4　H13 热作模具钢中碳化物形成热力学分析 …… 23
1.2.5　Cr5 轧辊钢中碳化物形成热力学分析 …… 24
1.2.6　GCr15 轴承钢中碳化物形成热力学分析 …… 26
1.3　碳化物生长特征及形貌分析 …… 27
1.3.1　碳化物的形貌分析 …… 27
1.3.2　一次碳化物的形成特征 …… 29
1.3.3　二次碳化物的析出长大行为 …… 33
1.4　碳化物对钢材性能的影响及其控制方法 …… 39
1.4.1　电渣重熔对钢中一次碳化物的影响 …… 39
1.4.2　碳化物对钢材性能的影响 …… 43
1.4.3　碳化物的控制方法 …… 44
参考文献 …… 48

2　电渣重熔工艺中一次碳化物的控制 …… 53
2.1　电渣重熔工艺中一次碳化物的控制因素 …… 53
2.1.1　熔速对一次碳化物析出的影响 …… 54
2.1.2　充填比对一次碳化物析出的影响 …… 61
2.1.3　冷却制度对一次碳化物析出行为的影响 …… 66
2.2　定向凝固电渣重熔技术对碳偏析的影响 …… 72
2.2.1　定向凝固电渣重熔对枝晶间距的影响 …… 72
2.2.2　电渣锭枝晶生长形貌分析 …… 78

2.2.3 电渣定向凝固对碳偏析的影响 …… 79
2.3 定向凝固电渣重熔技术控制钢中碳化物 …… 85
2.3.1 定向凝固对碳化物尺寸和数量的影响 …… 85
2.3.2 定向凝固对碳化物三维形貌的影响 …… 89
2.3.3 定向凝固电渣重熔电渣锭性能分析 …… 95
参考文献 …… 98

3 轧制工艺中碳化物的控制 …… 101
3.1 开坯及高温扩散退火工艺对碳化物的影响 …… 102
3.1.1 开坯工艺对一次碳化物的影响 …… 102
3.1.2 电渣锭高温扩散退火对一次碳化物的影响 …… 104
3.1.3 热轧板高温扩散退火对一次碳化物的影响 …… 107
3.1.4 高温扩散退火对高碳钢网状碳化物的影响 …… 110
3.2 热轧工艺对碳化物的影响 …… 114
3.2.1 热轧变形量对碳化物的影响 …… 114
3.2.2 热轧变形温度对碳化物的影响 …… 116
3.2.3 轧制温度对 GCr15 轴承钢中网状碳化物的影响 …… 121
3.3 冷轧工艺对碳化物的影响 …… 123
3.3.1 冷轧板材碳化物与组织分析 …… 123
3.3.2 碳含量对冷轧板中碳化物影响 …… 125
3.3.3 冷轧板材厚度对碳化物的影响 …… 127
3.3.4 冷轧变形量对钢材性能的影响 …… 129
参考文献 …… 131

4 热处理工艺对钢中碳化物的影响 …… 132
4.1 球化退火工艺对碳化物的影响 …… 132
4.1.1 球化退火过程碳化物的演变 …… 132
4.1.2 奥氏体化保温时间（t_1）对碳化物及钢性能的影响 …… 140
4.1.3 球化期保温时间（t_2）对碳化物及钢性能的影响 …… 146
4.1.4 冷却速率对碳化物及钢性能的影响 …… 148
4.2 淬火工艺对碳化物的影响 …… 152
4.2.1 8Cr13MoV 钢特征相变点的测定 …… 152
4.2.2 奥氏体化温度和冷却制度对钢中碳化物影响 …… 153
4.2.3 淬火过程碳化物和组织演变 …… 158
4.2.4 淬火工艺对钢材性能的影响 …… 160
4.3 回火工艺对碳化物的影响 …… 166
4.3.1 回火温度对碳化物和组织的影响 …… 166

4.3.2　回火温度对力学性能的影响 …… 172
4.3.3　回火温度对腐蚀性能的影响 …… 175
4.4　辊锻热处理对碳化物的影响 …… 178
4.4.1　辊锻热处理工艺对晶粒尺寸的影响 …… 179
4.4.2　辊锻热处理对碳化物的影响 …… 180
4.4.3　辊锻热处理对刀具锋利性能的影响 …… 181
参考文献 …… 184

5　镁元素对 H13 钢中碳化物的影响 …… 186
5.1　H13 钢中含镁夹杂物的形成和去除 …… 186
5.1.1　含镁夹杂物物理性能的研究 …… 186
5.1.2　氧化铝、镁铝尖晶石夹杂物颗粒间聚集和长大特性 …… 187
5.1.3　夹杂物的长程引力特性及其作用范围 …… 193
5.1.4　镁对电渣重熔 H13 钢中夹杂物的影响 …… 196
5.2　含镁夹杂物对碳化物的影响分析 …… 202
5.2.1　镁对 H13 钢中碳化物的影响 …… 202
5.2.2　镁在 H13 电渣锭中偏聚的作用 …… 208
5.2.3　镁细化及球化碳化物机理分析 …… 210
5.3　热处理对含镁 H13 钢中碳化物类型及分布的影响 …… 214
5.3.1　H13 钢热处理过程碳化物的演变 …… 214
5.3.2　镁对退火处理后 H13 钢中碳化物类型及分布的影响 …… 221
5.3.3　镁对淬回火处理后 H13 钢中碳化物类型及分布的影响 …… 227
5.4　镁对 H13 模具钢力学性能的影响 …… 232
5.4.1　镁对 H13 模具钢相变规律的影响 …… 232
5.4.2　镁对 H13 模具钢热稳定性的影响 …… 235
5.4.3　镁对退火后 H13 模具钢力学性能影响研究 …… 238
5.4.4　镁对淬回火后 H13 模具钢性能的影响 …… 242
5.4.5　镁对 H13 模具钢耐磨性能的影响 …… 249
参考文献 …… 252

6　稀土元素对钢中碳化物的影响 …… 256
6.1　稀土对电渣前后钢中夹杂物行为的影响 …… 257
6.1.1　稀土含量对夹杂物数量及形貌的影响 …… 257
6.1.2　稀土含量对夹杂物形貌和成分的影响 …… 258
6.1.3　稀土元素对钢组织的影响 …… 260
6.2　稀土夹杂物对碳化物的影响 …… 261
6.2.1　稀土夹杂物对奥氏体热作模具钢中碳化物的影响 …… 261

6.2.2 稀土夹杂物对碳化物的影响 …… 266
6.3 热处理对稀土奥氏体热作模具钢中碳化物的影响 …… 268
6.3.1 稀土微合金化奥氏体热作模具钢组织 …… 268
6.3.2 稀土奥氏体热作模具钢晶界的影响 …… 270
6.4 稀土对奥氏体热作模具钢力学性能的影响 …… 273
参考文献 …… 275

7 氮元素对钢中碳化物的影响 …… 278
7.1 氮对奥氏体热作模具钢析出相影响的热力学分析 …… 278
7.1.1 氮对析出相析出温度的影响 …… 278
7.1.2 氮对奥氏体热作模具钢析出相成分的影响 …… 280
7.2 氮对退火态电渣锭组织和析出相的影响 …… 280
7.2.1 氮对退火态电渣锭枝晶的影响 …… 280
7.2.2 氮对电渣锭析出相的影响 …… 282
7.3 热处理工艺对含氮奥氏体模具钢中组织和析出相的影响 …… 287
7.3.1 固溶热处理对钢中碳化物的影响 …… 287
7.3.2 时效热处理对钢中碳化物的影响 …… 288
7.3.3 热处理工艺对含氮奥氏体模具钢性能的影响 …… 290
参考文献 …… 294

8 钛对高碳合金钢碳化物控制作用的可行性分析 …… 297
8.1 钛对铸态钢中碳化物的影响 …… 297
8.1.1 钛对碳化物类型的影响 …… 297
8.1.2 钛对碳化物成分的影响 …… 298
8.1.3 钛对碳化物形貌的影响 …… 300
8.2 钛对锻造和球化退火后钢中碳化物的影响 …… 302
8.2.1 钛对锻造后钢中碳化物的影响 …… 302
8.2.2 钛对球化退火后钢中碳化物的影响 …… 302
8.3 钛处理高碳合金钢的可行性分析 …… 304
8.3.1 钛对高碳合金钢中碳化物的影响机理 …… 304
8.3.2 钛处理高碳合金钢的可行性 …… 305
参考文献 …… 309

1 特殊钢中的碳化物

特殊钢是指具有特殊的化学成分、采用特殊的工艺生产、具备特殊的组织和性能、能够满足特殊需要的钢类。特殊钢中的合金元素大多为过渡族金属元素，这些合金元素容易与碳形成碳化物。碳化物是特殊钢中重要的合金相之一，对钢的性能有着重要影响。因此，合理地控制碳化物的类型、数量、形态、大小及分布，就成了特殊钢生产过程中的首要任务之一。

目前，大部分中、高碳合金的工模具特殊钢都是通过电渣重熔生产的。对于电渣重熔工艺生产的中、高碳合金工模具钢，电渣重熔凝固过程是一次碳化物产生的源头，是控制一次碳化物的关键。锻造及轧制工艺能够将不可避免生成的一次碳化物进行破碎细化，后续热处理促进一次碳化物溶解分断，降低一次碳化物对钢材性能的不利影响。热处理工艺能够控制大量弥散细小的二次碳化物析出，对基体起强化作用。稀土、镁、氮、钛等合金元素及其氧化物的作用是提供异质形核剂，可以在降低一次碳化物尺寸、进一步改善碳化物分布方面起重要作用。基于此，本书着重阐述特殊钢在电渣重熔、轧制和热处理过程中碳化物的演变与控制，以及合金化处理对特殊钢中碳化物的影响。

本章着重从热力学角度分析碳化物的形成与演变。

1.1 碳化物及其分析方法

碳化物种类繁多，人们对碳化物进行了广泛研究。本节针对特殊钢中常见的碳化物，介绍几种通用的分析方法。

1.1.1 碳化物的定义

碳化物是指碳与电负性比它小的或者相近的元素（除氢外）所生成的二元化合物。在钢中，一部分碳元素进入基体起固溶强化作用，另一部分将与合金元素结合形成碳化物。

碳化物具有脆性、高熔点和高硬度等特点，各种碳化物的显微硬度及熔点见表 1-1。碳化物中的合金元素与碳之间存在共价键，使碳化物硬度较高；同时由于金属原子间存在金属键，使碳化物具有导电特性以及正的电阻温度系数，因此，碳化物具有金属键和共价键的特点，但以金属键为主。

表 1-1　各种碳化物的显微硬度及熔点

碳化物	TiC	ZrC	NbC	VC	WC	Mo_2C	$Cr_{23}C_6$	Cr_7C_3	Fe_3C
H_μ /kg·mm^{-2}	2850~3200	2890	2400	2094	2200	1500	1650	2100	约 860
$T_{熔}$/℃	3150	3530	3500	2830	2860	2690（分解）	1520（分解）	1780（分解）	1650

1.1.2　碳化物的分类

钢中的碳化物因其所含合金元素不同、析出机理不同，有多种组成方式，不同钢种的碳化物类型不同。钢中碳化物按析出顺序分类，可分为一次碳化物和二次碳化物。凝固过程中，直接从液相中析出的大多为一次碳化物，包括过共晶成分合金在析出奥氏体之前析出的初生碳化物和发生共晶反应时析出的共晶碳化物，主要是 MC、M_2C、M_6C 型。凝固过程从高温过饱和固相中或者热处理时从固相基体析出的碳化物为二次碳化物，主要是 MC、M_2C、M_6C、M_7C_3、$M_{23}C_6$ 型。一次碳化物一般尺寸较大、形状不规则、熔点较高，能破坏钢材的连续性，受力时其周围基体容易产生裂纹，降低钢材的加工性能和使用性能。二次碳化物一般尺寸较小，其类型、形态、数量和分布可以通过热加工和热处理工艺控制。作为钢铁材料中重要的第二相，二次碳化物的控制对钢材性能的提高具有重要的作用。

按照晶体结构不同，钢中碳化物可分为晶体结构简单碳化物和晶体结构复杂碳化物。文献［1］指出，碳与金属原子半径的比值是决定碳化物结晶构造的主要因素之一。当碳原子和过渡族元素原子半径之比小于 0.59 时，形成的碳化物属于晶体结构简单型，其结构可以是面心立方点阵、体心立方点阵、密排六方结构，或简单六方点阵。这时碳原子填入金属立方晶格或六方晶格的空隙中，并使碳化物具有金属键，因而碳化物仍保留着明显的金属特性，属于此类碳化物的有 TiC、ZrC、VC、NbC、WC 等。这类碳化物的最大特点是高熔点和高硬度，它们是硬质合金、粉末高速钢、高温金属陶瓷材料的主要组成部分，也是工业用钢的重要合金相。当碳原子与过渡族元素原子半径的比值大于 0.59 时，简单金属原子点阵中的间隙小于碳原子直径，为了能容纳碳原子，金属原子点阵变形，形成复杂结构的碳化物，这类碳化物包括 M_3C、M_6C、$M_{23}C_6$、M_7C_3 等。这类碳化物也具有相当高的硬度，是合金钢中重要的强化相，但其熔点及硬度较前一类稍低。典型的简单结构和复杂结构碳化物介绍如下。

1.1.2.1　MC 型和 M_2C 型简单结构碳化物

MC 型碳化物主要出现在含有 Ti、Nb、V 等元素的钢中。MC 型碳化物具有

面心立方结构，如图 1-1 所示，碳原子在晶体点阵中占据八面体中心的位置。MC 型碳化物一般呈点状[2]、点条状和骨架状三种形态分布于枝晶间和晶界。部分 MC 型碳化物呈现出片状、树枝状、八面体状，如 TiC[3,4]。碳化物的形貌与力学性能有密切关系，粗骨架状的 MC 碳化物是高温合金疲劳裂纹的起始部位，会大大降低合金的疲劳性能；小块状的 MC 碳化物分布于晶界和枝晶间，有利于提高合金的持久性能。

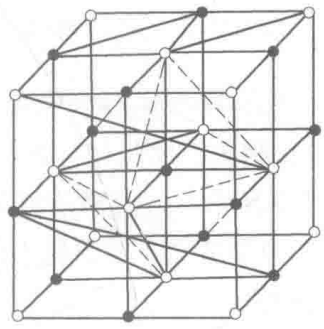


图 1-1 MC 型碳化物结构

有的 MC、M_2C 相在单位晶胞中包含 3 个金属原子（MC）或 6 个金属原子（M_2C）及 3 个非金属原子，例如 MoC、WC、Mo_2C、W_2C。其中，MoC、WC 的点阵常数 c/a 值接近 1，属于简单六方点阵；而 Mo_2C、W_2C 的点阵常数 c/a 值接近 1.6，属于密排六方点阵，主要存在于高速钢中，一般呈层片状或者羽毛状[5]。

1.1.2.2 $M_{23}C_6$ 型复杂结构碳化物

在不含 Nb、Ti、V 等强碳化物形成元素的钢中，$M_{23}C_6$ 型碳化物是最主要的碳化物。一般来说，$M_{23}C_6$ 型碳化物主要是 Cr 的碳化物，常写作 $Cr_{23}C_6$。$M_{23}C_6$ 型碳化物是一种复杂的面心立方结构，其结构如图 1-2 所示。每个单胞有 116 个原子，其中有 92 个金属原子和 24 个碳原子，点阵常数大约是奥氏体基体的 3 倍。由于合金成分和热处理工艺不同，$M_{23}C_6$ 碳化物中的 Cr 可以部分地被 Fe、Mo、W、Ni 等代替，其主要析出温度范围为 400~900℃。

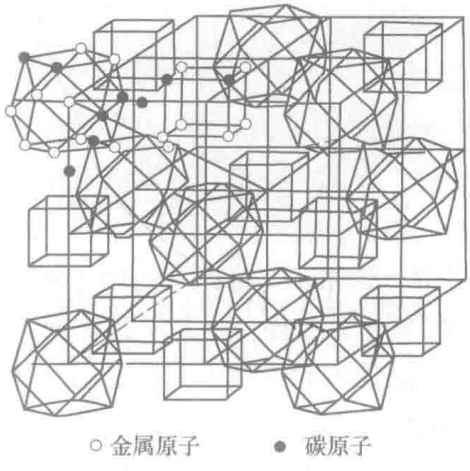


图 1-2 $M_{23}C_6$ 型碳化物结构

1.1.2.3　M_6C 和 M_7C_3 型复杂结构碳化物

M_6C 型碳化物一般出现在含有 Mo 或 Nb 的钢中，并且总是在其他沉淀物（碳化物或金属间化合物相）附近析出。M_6C 型碳化物也具有面心立方结构，如图 1-3 所示。点阵常数与 $M_{23}C_6$ 型碳化物相近，也是每个晶胞中含有 96 个金属原子，但是碳原子的数目不固定，所以一般认为 M_6C 型碳化物可能是一种电子化合物相。

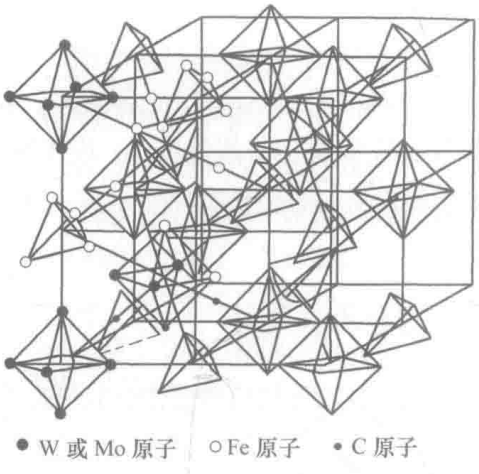


图 1-3　M_6C 型碳化物结构

M_6C 型碳化物的析出受成分影响比较大，N、Nb、Mo 和 Ni 是促进 M_6C 型碳化物析出的元素。一般地，对于 Ni 含量大于 25% 的合金，Mo、Nb、Ni 的含量越高，M_6C 型碳化物析出的倾向越大。

M_7C_3 型碳化物具有复杂六方结构，主要金属元素是 Cr 和 Fe，是高碳高铬钢中的主要碳化物，硬度一般为 HV1200～1800。这种碳化物是铬原子溶入铁碳系不稳定碳化物 Fe_7C_3 形成的。Fe_7C_3 晶体是一个六方点阵结构，每个碳原子与相邻的 6 个铁原子紧密接触，Cr_7C_3 晶体属于斜方晶系，Cr_7C_3 中的铬原子与 Fe_7C_3 中的铁原子排列方式很接近，铁原子与铬原子的尺寸也很接近，为铬原子大量取代铁原子形成 $(Fe,Cr)_7C_3$ 提供了条件。由于层错扩展方向大多平行于六方晶体棱柱面，导致 $(Fe,Cr)_7C_3$ 晶体不同取向上的硬度有所不同。对 $(Fe,Cr)_7C_3$ 晶体的显微硬度测定表明，棱柱横断面硬度约为 HV1700～1900，棱柱侧面硬度一般只有 HV1400 左右。碳化物的形态、类型和数量对高铬铸铁的耐磨性能和力学性能都有影响[6]。

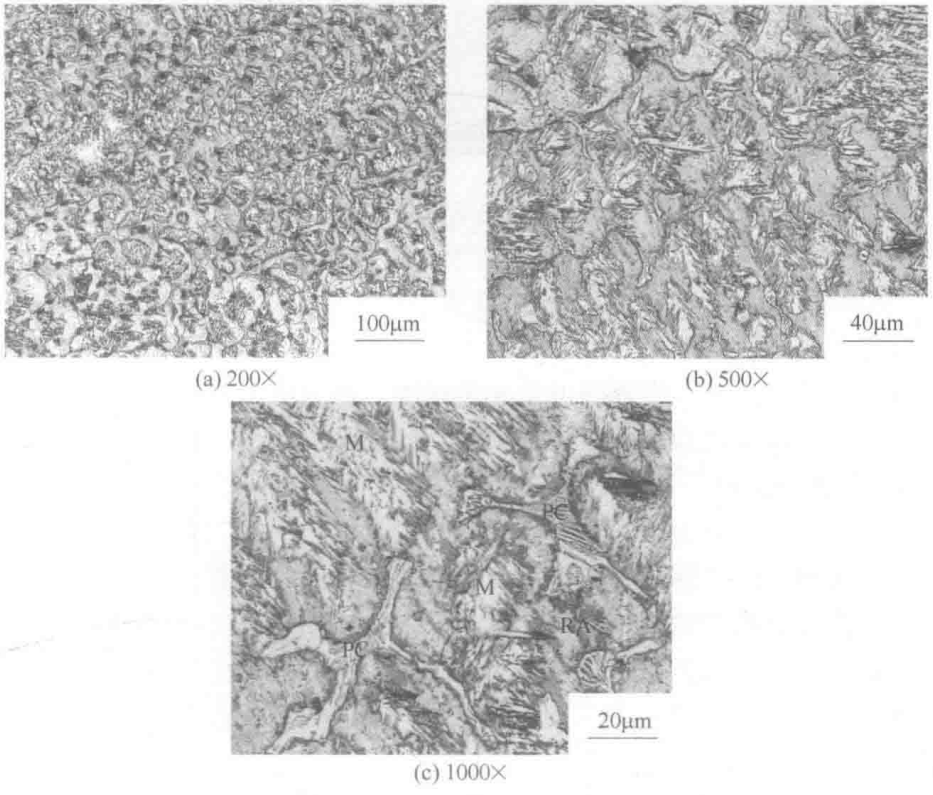
1.1.3 碳化物的分析方法

碳化物的分析方法较多，下面介绍几种常用的分析方法，并指出其适用范围。

1.1.3.1 碳化物形貌的观察方法

A 金相显微镜（OM）分析

金相分析是根据钢中各种成分在不同化学试剂中不同的腐蚀电位，使稳定相保存下来，不稳定相则被腐蚀溶解。腐蚀所形成的低洼处使保存下来的相的轮廓显现出来。限于金相显微镜的分辨率，该种分析方法只能分析尺寸较大的碳化物形貌，如一次碳化物、共晶碳化物和尺寸在微米级以上的二次碳化物。对尺寸过小的碳化物，金相显微镜不能明确分辨每一相的轮廓和颜色。金相显微镜（OM）不同倍数下的高碳马氏体不锈钢 8Cr13MoV 铸态组织如图 1-4 所示。



(a) 200×　(b) 500×　(c) 1000×

图 1-4 高碳马氏体不锈钢 8Cr13MoV 铸态组织

M—针状马氏体；RA—残余奥氏体；PC——次碳化物

B 扫描电子显微镜（SEM）分析

利用扫描电子显微镜（SEM）可对碳化物二维和三维形貌进行分析。在扫描电镜背散射衍射条件下，热轧开坯后高碳马氏体不锈钢 8Cr13MoV 钢中一次碳化

物的形貌和分布如图 1-5 所示。由图 1-5 可知，一次碳化物呈深灰色，钢材基体呈浅灰色。电渣锭中原始的一次碳化物多为聚集的棒状，经过热轧开坯后，一次碳化物被明显地打碎并分散开来。

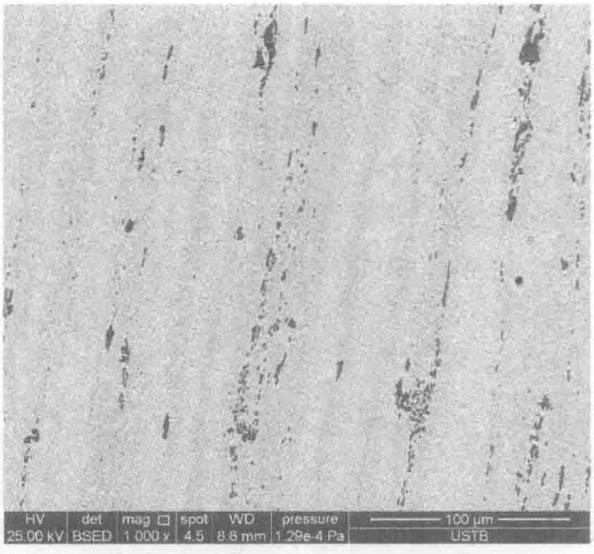


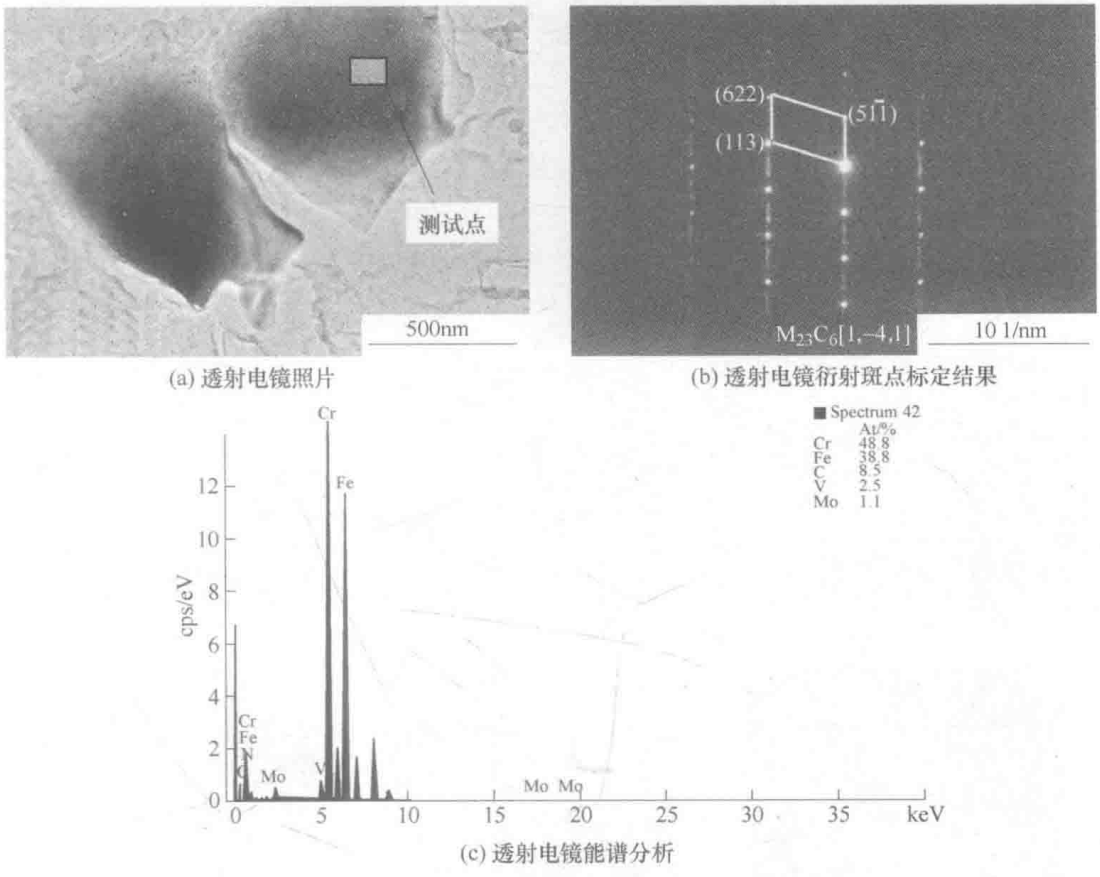
图 1-5　热轧开坯后钢中一次碳化物

C　透射电子显微镜（TEM）分析法

透射电子显微镜是以波长极短的电子束作为照明源，用电磁透镜聚焦成像的一种高分辨本领、高放大倍数的电子光学仪器。透射电子显微镜利用穿透样品的电子束成像，要求被观察的样品对入射电子束是“透明”的，对于透射电镜常用的加速电压为 100kV，要求试样厚度必须在 20~200nm 之间。做透射电镜高分辨像，要求样品厚度为 15nm。样品制备方法有两种：薄膜样品和碳（或金）萃取。为了使薄膜试样平整及放稳以便观察，通常将试样放置在支持网上。利用透射电子显微镜可对纳米级碳化物颗粒进行分析，得到其显微结构形貌及高分辨图像，但是对于萃取的大尺寸碳化物则由于其存在的蓬松结构，导致高分辨下流变比较严重，效果不是很理想。$M_{23}C_6$ 型碳化物在 TEM 下的形貌、衍射花样及能谱分析如图 1-6 所示。$M_{23}C_6$ 型碳化物的形貌呈现为不规则块状，尺寸在 1μm 左右，碳化物中铬原子分数为 48.8%，另外碳化物中还含有少量的钼和钒。

D　能谱仪（EDS）分析

能谱仪是借助 X 光量子能量的不同，对材料微区成分元素种类与含量进行分析，通常配合扫描电子显微镜与透射电子显微镜使用。能谱仪可以对晶内进行点、线、面的扫描，获得各元素含量分布图像。高碳马氏体不锈钢中碳化物的

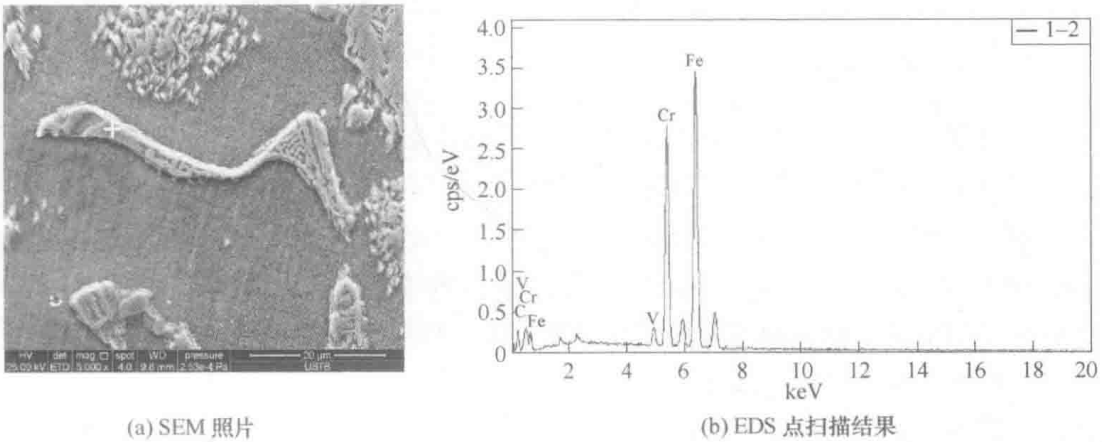


(a) 透射电镜照片　(b) 透射电镜衍射斑点标定结果

(c) 透射电镜能谱分析

图 1-6　$M_{23}C_6$ 型碳化物衍射花样及能谱分析图

SEM 照片和对应点的 EDS 点扫描结果如图 1-7 所示。由图 1-7 可以看出，这种一次碳化物主要是 Cr 和 Fe 的碳化物。



(a) SEM 照片　(b) EDS 点扫描结果

图 1-7　高碳马氏体不锈钢中碳化物

E　电子探针（EPMA）分析

电子探针又称微区 X 射线光谱分析仪、X 射线显微分析仪。其原理是利用聚焦的高能电子束轰击固体表面，使被轰击的元素激发出特征 X 射线，按其波长及强度对固体表面微区进行定性及定量化学分析。电子探针通常能分析直径和深度不小于 1μm 范围。主要用于一次碳化物和大尺寸二次碳化物中各元素的定量分析。利用电子探针对 8Cr13MoV 电渣锭组织中典型的一次碳化物及其附近区域进行面扫描，结果如图 1-8 所示，一次碳化物呈盘曲的棒状结构生长在晶界处，其中明显存在碳、铬、钼、钒元素的富集。

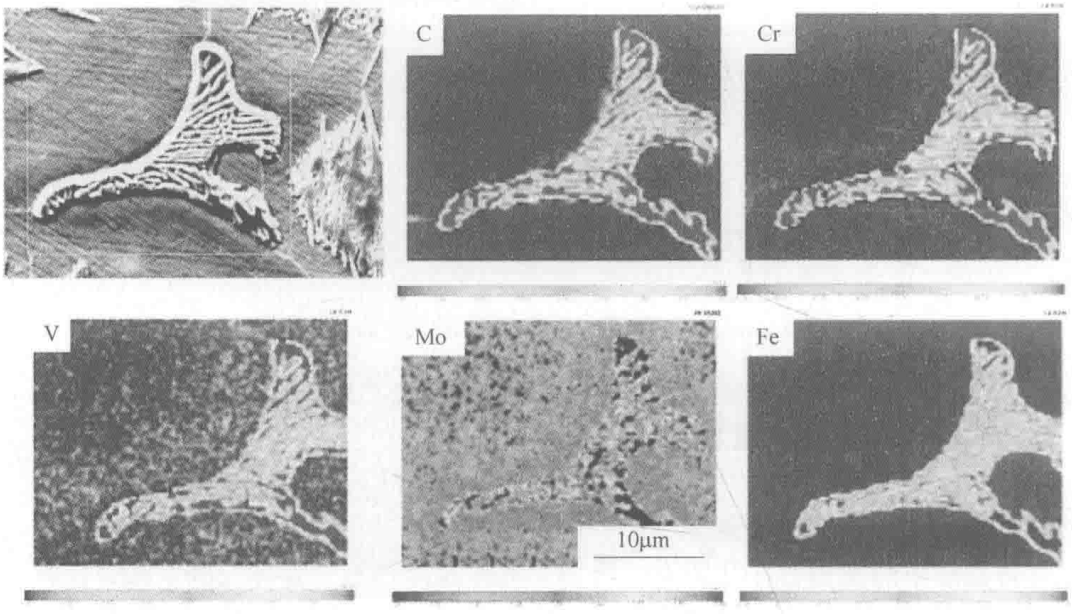


图 1-8　8Cr13MoV 铸态组织中典型一次碳化物面扫描

（下方颜色条代表自左到右元素含量逐渐升高）

1.1.3.2　碳化物晶体结构的分析

针对碳化物晶体结构，可使用电子背散射衍射（EBSD）、透射电子显微镜（TEM）以及 X 射线衍射仪（XRD）等方法分析。

A　电子背散射衍射（EBSD）

利用扫描电子显微镜（SEM）对样品进行电子背散射衍射（EBSD）分析，可以用于钢中碳化物的相鉴定和相比计算、碳化物的取向差分析、碳化物的尺寸形貌分析等。该种分析方法主要应用于一次碳化物的相鉴定、尺寸、形貌和取向分析。图 1-9 所示为 1150℃保温 2h 后的 HP40Nb 合金的 EBSD 检测的碳化物形貌和相分布[7]。