**引用格式**：康皓，刘宁，冯刚珍，等. 高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢第二相及其界面的几何相位分析[J]. 材料工程，2026，54(7)：272-279.
KANG Hao，LIU Ning，FENG Gangzhen，et al. Analysis of secondary phases and their geometric phases at interface of Cr-Ni-Mo alloy steel for brake discs of high-speed trains[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(7)：272-279.

# 高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢第二相及其界面的几何相位分析

康　皓*，刘　宁，冯刚珍，贾雨波
（兰州交通大学 机电工程学院，兰州 730070）

**摘要**：以调质处理后的高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢为研究对象，采用透射电子显微镜观察第二相的形貌并测量尺寸，利用能谱分析及电子衍射方法对第二相进行物相鉴定；详细阐述几何相位分析（GPA）进行全场应变测量的原理，并提出利用几何相位分析，通过基体与第二相高分辨电子显微图像（HRTEM）傅里叶变换得到的双晶衍射花样，研究其界面某一方向上的匹配关系。结果表明：高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢中的第二相形貌主要呈棒状，另存在少量近似圆形且尺寸较小的第二相。能谱分析结合电子衍射方法可知，近似圆形的小颗粒第二相为含Mn的$M_{23}C_6$型碳化物。采用几何相位分析方法，获得了基体与第二相$M_{23}C_6$界面在$x$、$xy$和$y$方向上的应变场，基体的$(1\bar{1}\bar{2})$晶面和第二相$M_{23}C_6$的$(\bar{1}1\bar{3})$晶面匹配关系为半共格。

**关键词**：制动盘用钢；第二相；界面；几何相位分析
**doi**：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000057　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000057
**中图分类号**：TG142.1；TB31　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)07-0272-08

# Analysis of secondary phases and their geometric phases at interface of Cr-Ni-Mo alloy steel for brake discs of high-speed trains

KANG Hao*，LIU Ning，FENG Gangzhen，JIA Yubo
（School of Mechanical Engineering，Lanzhou Jiaotong University，Lanzhou 730070，China）

**Abstract**：Taking the quenched and tempered Cr-Ni-Mo alloy steel for brake discs of high-speed trains as the research object，the morphology of the secondary phase is observed and the size is measured by transmission electron microscopy，and the secondary phase is identified by energy spectrum analysis and electron diffraction；the principle of full-field strain measurement by geometric phase analysis（GPA）is explained in detail，it is proposed to use the geometric phase analysis to study the matching relationship in a certain direction at the interface between the matrix and the secondary phase through the bicrystal electron diffraction pattern obtained by the Fourier transform of high-resolution transmission electron microscopy（HRTEM）images of the matrix and the secondary phase. The results show that the secondary phase of Cr-Ni-Mo alloy steel used in brake discs for high-speed trains is mainly in the form of rods，and there are a small amount of secondary phase with small size and approximately round shape；the energy spectrum analysis combined and the electron diffraction method shows that the secondary phase with approximately round shape and small size particles is the Mn-containing $M_{23}C_6$ carbides；the strain fields in the $x$，$xy$ and $y$ directions at the interface between the matrix and the secondary phase $M_{23}C_6$ is obtained by geometric phase analysis，the matching relationship between matrix $(1\bar{1}\bar{2})$ crystal planes and the secondary phase $M_{23}C_6$ $(\bar{1}1\bar{3})$ crystal planes is determined to be semi-coherent.

**Key words**：brake disc steel；secondary phase；interface；geometric phase analysis

盘形制动依靠制动盘与闸片间的摩擦，使列车速度急剧降低直至停车，而在此过程中制动盘的性能必须保持稳定，它是电制动失效后仍能保证列车安全的一种基础制动方式。随着列车速度的提高，对制动盘性能的要求也越来越高，制动盘材料经历了从石墨铸铁→低合金铸铁→蠕墨铸铁→特殊合金铸铁→合金钢的发展过程[1-2]。Cr-Ni-Mo系合金钢的合金元素主要有Cr、Ni、Mo、Mn等，具有良好的综合性能，服役前经调质处理，其组织为回火马氏体，是目前常用的制动盘钢。由于合金的扩散系数随温度升高急剧增加，而固溶强化在较高的温度效果有限，因此高温合金通常采用第二相强化的手段来提高其高温强度[3-5]。第二相强化通过弥散的第二相粒子阻碍位错移动来提高材料的屈服强度，故第二相强化效果与第二相的种类、形状、尺寸以及基体与第二相界面的匹配关系密切相关[6-8]。

获取微观结构中应变场的方法主要有两种：寻峰(peak-finding，PF)法和几何相位分析(geometric phase analysis，GPA)法[9]。相比而言，利用高分辨电子显微图像(high-resolution transmission electron microscopy，HRTEM)分析获得位移场和应变场的几何相位分析方法，其精度可达0.003 nm，精度更高且应用范围更广，并已用于金属材料孪晶、位错、低角度晶界、薄膜沉积层界面等的应变场分析[10-14]。然而，几何相位分析原理涉及高分辨电子显微图像的处理，即二维离散傅里叶变换及其逆变换的应用。现有文献对其原理阐述不清，导致研究者在应用该方法时产生困惑。另外，采用几何相位分析方法对微观应变场的研究多集中在孪晶、位错等晶体缺陷周围应变场，而基体与第二相界面应变场的分析研究较少。

本工作以调质处理后的高速列车制动盘Cr-Ni-Mo合金钢为研究对象，采用透射电子显微镜观察析出相的形貌并测量其尺寸，利用能谱及电子衍射对析出相进行了物相鉴定；以高分辨电子显微图像二维离散傅里叶变换和反变换理论为基础，详细阐述了几何相位分析进行全场应变测量的原理，提出采用几何相位分析通过基体与第二相高分辨电子显微图像傅里叶变换得到的双晶衍射花样，研究其界面某一方向上匹配关系的方法，并对高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢基体与第二相界面处某一方向的匹配关系进行了分析。

## 1　实验材料与方法

以调质处理(900 ℃淬火＋650 ℃高温回火)后的高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢为研究对象，其化学成分如表1所示。制作透射电子显微镜试样，采用透射电子显微镜观察第二相形貌并测量其尺寸，利用透射电镜的能谱及电子衍射分析对第二相进行物相鉴定。采用几何相位分析方法研究基体与第二相界面匹配关系，并对高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢基体与第二相界面处的应变场进行分析。

**表1　Cr-Ni-Mo合金钢的化学成分(质量分数/%)**

Table 1　Chemical compositions of Cr-Ni-Mo alloy steel (mass fraction/%)

| Cr | Ni | Mo | Mn | Si | C | N | P | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.88 | 1.04 | 0.57 | 1.03 | 0.54 | 0.25 | 0.01 | 0.005 | Bal. |

## 2　结果与分析

### 2.1　第二相分析

钢铁材料通过基体中分布的细小第二相颗粒而产生强化的方法称为第二相强化，根据第二相形成的机理可将相应的强化工艺分为沉淀强化和弥散强化。第二相强化效果与第二相的体积分数、尺寸以及基体与第二相的匹配关系密切相关，通常与第二相体积分数的1/2成正比，增加第二相的体积分数可提高强化效果，细化第二相尺寸对强化效果提高作用更为显著，尺寸细化一个数量级的作用大致相当于提高体积分数两个数量级[15]。高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢在使用前需经调质处理(900 ℃淬火＋650 ℃高温回火)，通过高温回火时沉淀析出的第二相来产生强化作用，而第二相的尺寸对强化效果起主导作用。第二相强化的机制在于第二相与滑移位错的交互作用，根据交互方式的不同可分为两种：位错绕过第二相颗粒并留下环绕位错环的Orowan机制和位错切过第二相的切过机制。前者中的第二相颗粒称为不可变形颗粒，后者中的称为可变形颗粒。需要指出的是，这种分类并非固定不变——同一种第二相属于可变形还是不可变形，实际上取决于其尺寸以及与基体之间的共格关系。当第二相颗粒尺寸很小且与基体保持良好共格关系时，表现为可变形颗粒；而当其尺寸增大、与基体的共格关系部分或完全破坏时，则转变为不可变形颗粒。当滑移位错以切过机制通过可变形颗粒时，共格应变强化是产生强化的主要方式；而当滑移位错以Orowan机制绕过不可变形颗粒时，由于位错弓出弯曲将增大位错的线张力，因而需要更大的外加应力才能使位错绕过第二相颗粒而继续滑移，形

成环绕第二相颗粒的位错环，此时位错的增殖成为强化的主要方式。

由于第二相强化机制为第二相与滑移位错的交互作用，而交互机制的类型与第二相颗粒尺寸及其与基体间的匹配关系有关。因此，本小节内容将分析高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢中第二相的形状和尺寸，并确定其种类，而基体与第二相之间的匹配关系将在2.2节进行分析。

图1为Cr-Ni-Mo合金钢第二相形貌及能谱分析。由图1(a)可以看出，基体为板条状马氏体，且板条清晰可见。板条中存在沉淀析出的第二相，其形貌主要呈棒状，长度在80～150 nm之间，宽度较均匀，在30～40 nm之间；另外，还存在近似圆形且尺寸较小的第二相，直径小于50 nm，但数量远少于棒状的第二相。图1(b)～(f)分别为C、Mn、Cr、Mo和Ni元素的面扫描结果，根据能谱分析可知，Cr-Ni-Mo合金钢中第二相富含C、Mn和Cr，而Mo和Ni的分布均匀。

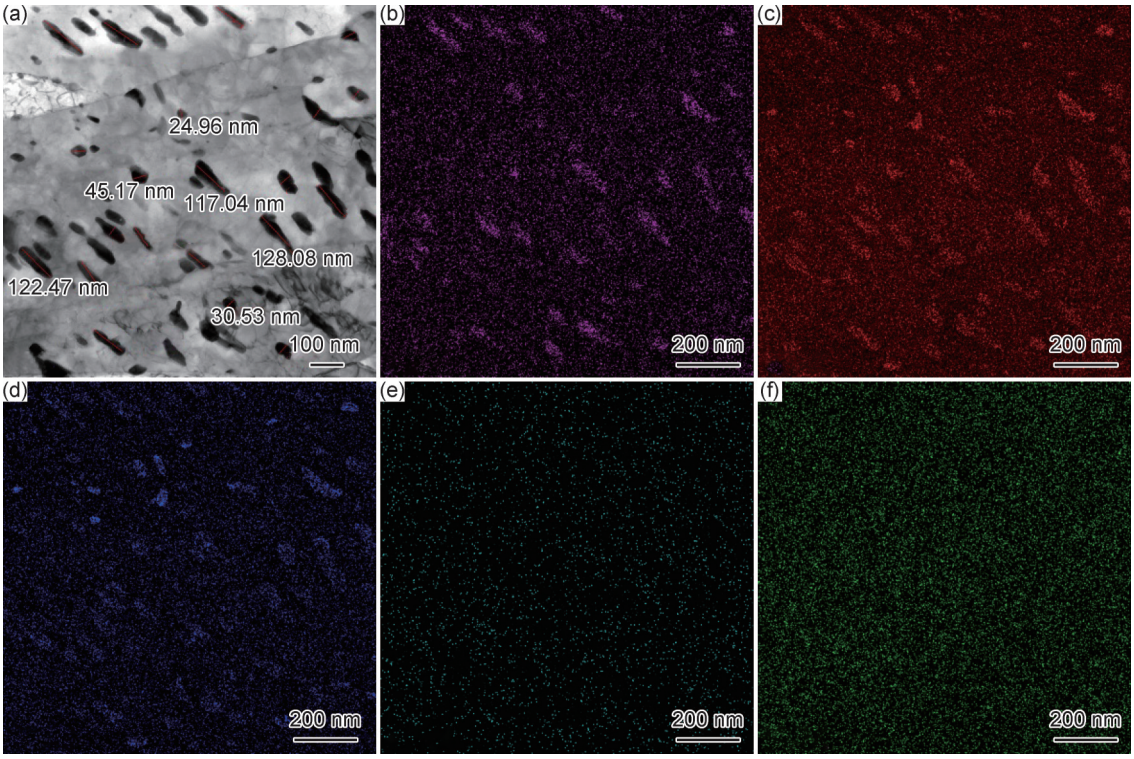



图1 Cr-Ni-Mo合金钢组织及元素能谱分析

(a)基体及第二相形貌；(b)C元素的分布；(c)Mn元素的分布；(d)Cr元素的分布；(e)Mo元素的分布；(f)Ni元素的分布

Fig.1 Microstructure and elemental energy spectrum analysis of Cr-Ni-Mo alloy steel

(a)morphology of matrix and secondary phase; (b)elemental distribution of C; (c)elemental distribution of Mn; (d)elemental distribution of Cr; (e)elemental distribution of Mo; (f)elemental distribution of Ni

为了进一步确定Cr-Ni-Mo合金钢中第二相的种类，分别对基体和第二相进行了高分辨电子显微成像和电子衍射成像，如图2所示。图2(a)为基体与近似圆形第二相的形貌(方框为进行电子衍射分析的第二相)；图2(b)为基体的高分辨电子显微图像；图2(c)为基体的单晶衍射花样，其为标准α-Fe的[$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$]带轴衍射花样，根据形貌和衍射花样分析可以确定基体为板条马氏体组织；图2(d)，(e)分别为基体+第二相和第二相的高分辨电子显微图像；图2(f)为第二相的[$\bar{1}\bar{1}0$]带轴衍射花样，通过分析可知其为$M_{23}C_6$，其中$M$为Fe、Cr、Mn，为面心立方结构，即$M_{23}C_6$为Fe、Cr和Mn的碳化物。Wu等[16-17]对高速列车制动盘用钢的成分、组织及性能进行了研究，也获得了钢中析出的第二相为$M_{23}C_6$的结论，与本研究结果一致；但并未提及$M_{23}C_6$中含Mn的情况，本研究通过能谱和衍射分析再一次证实制动盘钢中第二相为$M_{23}C_6$，且为含Mn的碳化物。采用同样方法可得，棒状第二相为$M_7C_3$，即另一种Fe、Cr和Mn的碳化物。

## 2.2 几何相位分析

### 2.2.1 高分辨显微电子图像的处理过程

一张完整晶体的高分辨电子显微图像可以由其傅里叶变换的逆变换表示为：

$$I(r)=\sum_g H_g \exp\left(2\pi i \boldsymbol{g}\cdot r\right) \tag{1}$$

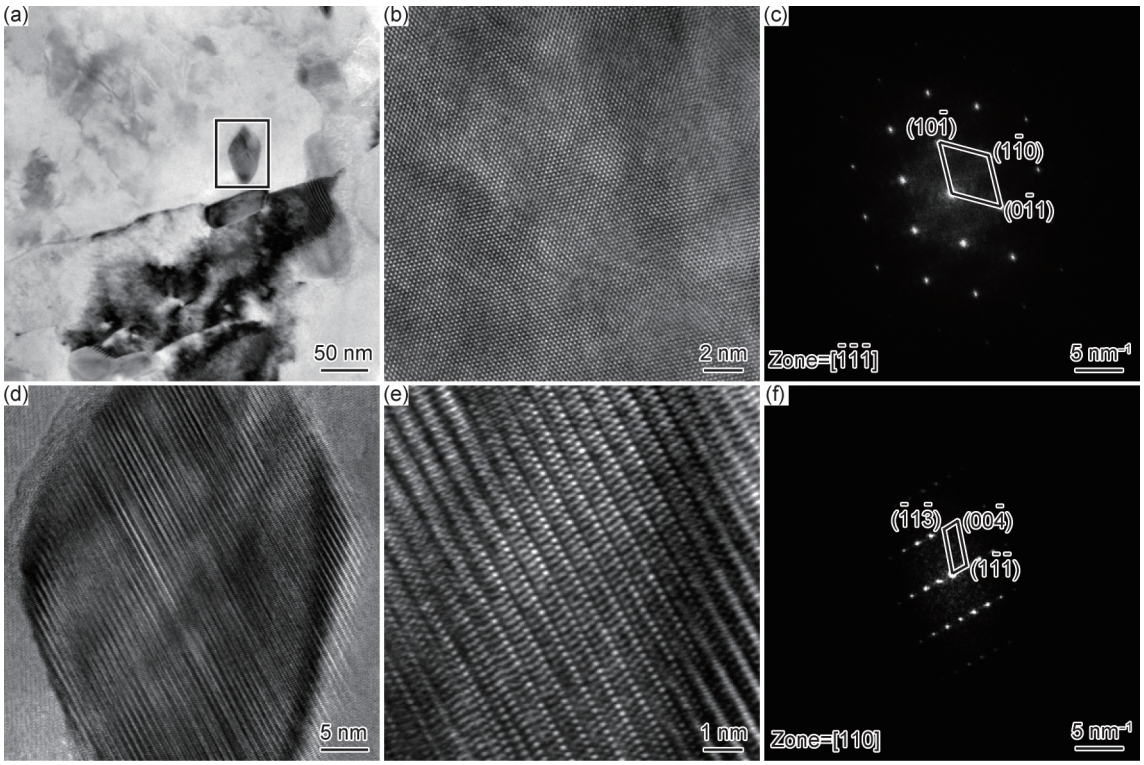



图2　Cr-Ni-Mo合金钢基体与第二相的高分辨图像

(a)基体及第二相形貌;(b)基体高分辨图像;(c)基体的衍射花样;(d)基体+第二相高分辨图像;(e)第二相高分辨图像;(f)第二相衍射花样

Fig.2　High-resolution images of matrix and secondary phase in Cr-Ni-Mo alloy steel

(a)morphology of matrix and secondary phase;(b)high-resolution image of matrix;(c)diffraction pattern of matrix;(d)high-resolution image of matrix and secondary phase;(e)high-resolution image of secondary phase;(f)diffraction pattern of secondary phase

式中:$I(r)$为高分辨电子显微图像在$r$处的强度;$\boldsymbol{g}$为此处的倒易晶格矢量;$H_g$为高分辨电子显微图像的傅里叶系数。$H_g$可以通过欧拉公式写成幅值与相位的形式,即:

$$H_g = A_g \exp(\mathrm{i}P_g) \tag{2}$$

式中:$A_g$为幅值;$P_g$为相位。如果倒易矢量相对于完整晶体倒易矢量发生了改变,即:

$$\boldsymbol{g} \rightarrow \boldsymbol{g} + \Delta\boldsymbol{g} \tag{3}$$

式中$\Delta\boldsymbol{g}$为倒易矢量相较于完整晶格的改变量。倒易矢量的变化在相位图中产生的相位变化为:

$$P_g(r) = 2\pi\Delta\boldsymbol{g}\cdot r \tag{4}$$

可得相位梯度为:

$$\nabla P_g(r) = 2\pi\Delta\boldsymbol{g} \tag{5}$$

由于实函数的傅里叶变换存在共轭对称性,将实空间中由式(1)表示的特定晶格条纹的图像写成幅值与相位的形式:

$$B_g(r) = 2A_g \cos(2\pi\boldsymbol{g}\cdot r + P_g) \tag{6}$$

式中:$B_g(r)$为特定晶格条纹在$r$处的强度。当实空间中存在位移时:

$$r \rightarrow r - u \tag{7}$$

式中:$r$为特定晶格条纹的位置;$u$为特定晶格条纹的位移。此时特定晶格条纹的图像可以写成:

$$B_g(r) = 2A_g \cos(2\pi\boldsymbol{g}\cdot r - 2\pi\boldsymbol{g}\cdot u + P_g) \tag{8}$$

比较式(8)和式(6),可以得到实空间存在位移变化时倒空间相位的变化:

$$\nabla P_g(r) = (-2\pi\boldsymbol{g}\cdot u + P_g) - P_g = -2\pi\boldsymbol{g}\cdot u \tag{9}$$

比较式(5)和式(9),就可以通过相位梯度$\nabla P_g(r)$将倒空间中倒易矢量的变化$\Delta\boldsymbol{g}$和实空间中位移的变化$u$联系起来。

2.2.2　位移场和应变场的获得

在高分辨电子显微图像的傅里叶变换图中取两个非线性的倒易矢量$\boldsymbol{g}_1$和$\boldsymbol{g}_2$,由式(9)可得:

$$P_{g_1}(r) = -2\pi\boldsymbol{g}_1\cdot u(r) = -2\pi\left[\boldsymbol{g}_{1x}u_x(r) + \boldsymbol{g}_{1y}u_y(r)\right] \tag{10}$$

$$P_{g_2}(r) = -2\pi\boldsymbol{g}_2\cdot u(r) = -2\pi\left[\boldsymbol{g}_{2x}u_x(r) + \boldsymbol{g}_{2y}u_y(r)\right] \tag{11}$$

写成矩阵的形式,则位移为:

$$\begin{pmatrix}u_x(r)\\u_y(r)\end{pmatrix}=-\frac{1}{2\pi}\begin{pmatrix}\boldsymbol{g}_{1x}\boldsymbol{g}_{1y}\\\boldsymbol{g}_{2x}\boldsymbol{g}_{2y}\end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix}P_{g_1}(r)\\P_{g_2}(r)\end{pmatrix}\tag{12}$$

式中：$u_x(r)$、$u_y(r)$分别为$r$位置$x$、$y$方向的位移；$\boldsymbol{g}_{1x}$、$\boldsymbol{g}_{1y}$、$\boldsymbol{g}_{2x}$、$\boldsymbol{g}_{2y}$为所选倒易矢量沿$x$、$y$方向的分量；$P_{g1}(r)$、$P_{g2}(r)$为$r$位置的相位梯度，相位梯度可以通过高分辨电子显微图像的傅里叶变换得到。至此，式(12)中等号右边部分完全已知，故可以计算此处位移场，从而根据位移场可得应变场，如式(13)所示。

$$e=\begin{pmatrix}e_{xx}e_{xy}\\e_{yx}e_{yy}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\dfrac{\partial u_x}{\partial x}\dfrac{\partial u_x}{\partial y}\\\dfrac{\partial u_y}{\partial x}\dfrac{\partial u_y}{\partial y}\end{pmatrix}\tag{13}$$

### 2.3 基体与第二相的匹配关系分析

对于基体与第二相的界面而言，界面两侧晶体相互接合，必然存在一定的匹配关系。对大颗粒第二相与基体的界面，二者之间以部分界面相互接合，界面两侧晶体(晶粒)互不包容，称之为部分接合界面[14-15]。而对于高速列车制动盘Cr-Ni-Mo合金钢中析出的近似圆形第二相，其尺寸较小，整个第二相被一个基体晶粒完全包含，即：第二相的全部外表面均与一个基体晶粒相互完全接合形成相界面，称为完全接合界面。

通常将相邻两相之间的相互配合关系分为三种：非共格、半共格和共格关系。由于基体与第二相之间存在界面，破坏了基体的连续性，产生一定程度的晶格畸变，由此产生了界面能，使系统能量增大。为了尽可能降低系统的能量，一方面可以尽量减小界面面积，另一方面则是通过界面两侧的晶体之间产生一定的相互匹配关系从而降低比界面能。非共格界面处的原子排列混乱，通常具有较高的比界面能。完全共格界面两侧晶体的晶体结构相同且点阵常数相差甚微，两晶体以合适的相互位相关系匹配，使得界面上的原子位置可同时属于两晶体的原子规则排列位置，从而将界面处的晶格畸变降至最低，比界面能显著降低。半共格界面两侧晶体以确定的位相关系匹配，当垂直于界面的晶面间距存在一定差异，且该差异无法通过晶格畸变完全容纳时，可引入伯格斯矢量平行于界面的位错列来容纳这种差异，此时比界面能居中[16-18]。

几何相位分析(GPA)作为一种行之有效的非接触全场应变测量方法，在微纳米尺度的变形测量中得到了广泛的应用[19]，采用这种方法很容易通过高分辨电子显微图像(HREM)得到高精度的应变场，主要分3步：(1)对高分辨电子显微图像进行傅里叶变换，得到倒空间图像及相位图像；(2)选择两个非线性的倒空间矢量，就可以得到倒空间矢量分量及对应的相位梯度；(3)通过计算得到位移场和应变场。对于高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢中析出的近似圆形第二相，被一个基体晶粒完全包含，可以采用基体＋第二相的高分辨电子显微图像经傅里叶变换得到的双晶衍射花样分析在此方向上界面的相互匹配关系[20]。为获取第二相与基体界面详细的匹配关系，需对晶体进行适当倾转，以得到不同晶带轴下的高分辨电子显微图像，从而确定界面在不同方向上的匹配关系。

图3为Cr-Ni-Mo合金钢第二相界面的几何相位分析。图3(a)为基体＋第二相的高分辨电子显微图像；对其进行快速傅里叶变换得到双晶衍射花样，此时的晶带轴为[110]，红色所标衍射斑点为基体，绿色所标衍射斑点为第二相，如图3(b)所示；选取基体的两个非线性倒易矢量$\boldsymbol{a}_1=(1\bar{1}\bar{2})$和$\boldsymbol{b}_1=(1\bar{1}0)$作为参考晶格倒易矢量，选取第二相中与参考晶格倒易矢量相邻的两个非线性倒易矢量$\boldsymbol{a}_2=(\bar{1}1\bar{3})$和$\boldsymbol{b}_2=(\bar{1}11)$进行分析，分别如图3(c)中红色和绿色所标处。选取第二相中与参考晶格倒易矢量相邻的两个非线性倒易矢量，是因为相邻倒易点对应的基体与第二相中晶面位相相近。

图3(d)～(f)分别为高分辨电子显微图像对应的$x$、$xy$和$y$方向的应变分布，$x$和$y$方向如坐标所标，且图3(d)～(f)中$x$和$y$方向均一致，可见在两相界面处$x$、$xy$和$y$方向的应变均发生了变化，在界面$x$方向应变变化较大，$y$方向应变较小，而$xy$方向应变由$x$和$y$方向应变决定，故居中。分别提取图3(d)～(f)中白线上的应变分布，对比图如3(g)所示，界面位于基体一侧$x$方向应变为拉伸应变，越靠近第二相应变越小，而第二相一侧$x$方向应变为压缩应变，靠近基体位置最大，随后逐渐减小，并且界面处存在一个应变较均匀区域，宽度约为13 nm，如图3(d)中箭头所标。

使用DigitalMicrograph软件对基体$(1\bar{1}\bar{2})$晶面和第二相$(\bar{1}1\bar{3})$晶面的匹配关系进行分析，如图4所示。由图4(a)可计算出基体$(1\bar{1}\bar{2})$晶面间距为0.103713 nm，由图4(b)可以计算出第二相$(\bar{1}1\bar{3})$晶面间距为0.104125 nm，两者相差不大，但这种差别无法通过晶格畸变来完全容纳，需引入伯格斯矢量平行于界面的位错列来容纳晶面间距的差别，导致界面处出现一定宽度的应变变化区，如图3(d)～(f)所示，宽度约13 nm，基体$(1\bar{1}\bar{2})$晶面和第二相$(\bar{1}1\bar{3})$晶面的界面匹配为半共格关系，图4(c)显示了基体$(1\bar{1}\bar{2})$晶面和第二相$(\bar{1}1\bar{3})$晶面相近的位相及界面处半共格匹配关系。

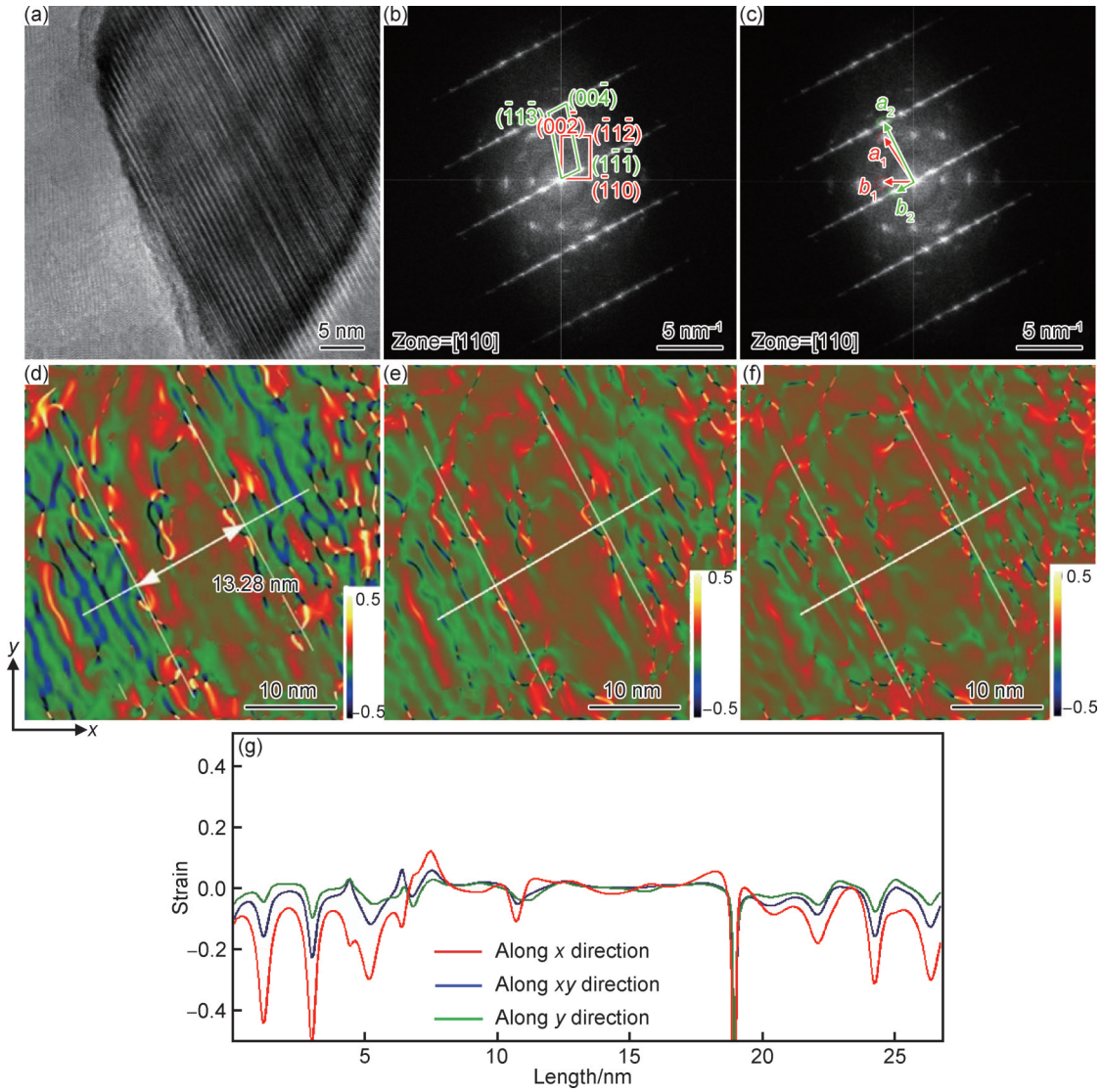



图3　Cr-Ni-Mo合金钢基体与第二相的几何相位分析

(a)基体+第二相的高分辨电子显微图像;(b)双晶衍射花样;(c)倒易晶格矢量的选取;(d)$x$方向应变分布;(e)$xy$方向应变分布;(f)$y$方向应变分布;(g)界面处$x$、$xy$、$y$方向应变对比

Fig.3　Geometric phase analysis of Cr-Ni-Mo alloy steel matrix and secondary phase

(a)high-resolution image of matrix and secondary phase;(b)bicrystalline diffraction patterns;(c)selection of reciprocal space vector;(d)strain distribution in $x$ direction;(e)strain distribution in $xy$ direction;(f)strain distribution in $y$ direction;(g)comparison of strains in $x$, $xy$, and $y$ directions at the interface

## 3　结论

(1)高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢中的第二相形貌主要呈棒状,长度在80~150 nm之间,宽度较均匀,在30~40 nm之间;另外,还存在近似圆形且尺寸较小的第二相,直径小于50 nm,但数量远少于棒状的第二相,经能谱及电子衍射分析为Fe、Mn、Cr的碳化物$M_{23}C_6$。

(2)通过基体+第二相高分辨电子显微图像的傅里叶变换可以得到双晶衍射花样,选取基体的两个非线性倒易矢量作为参考晶格倒易矢量,为了使分析晶面与参考晶面位相相近,选取第二相中与参考晶格倒易矢量相邻的两个非线性倒易矢量进行分析,通过几何相位分析可得该方向上基体与第二相界面的应变场。

(3)采用几何相位分析方法对高速列车制动盘用Cr-Ni-Mo合金钢基体与第二相$M_{23}C_6$界面应变场进行分析,界面$x$方向应变变化较大,$y$方向应变较小,且存在宽度约为13 nm的应变均匀区域,基体$(1\bar{1}\bar{2})$晶面和第二相$(\bar{1}1\bar{3})$晶面的界面匹配为半共格关系。

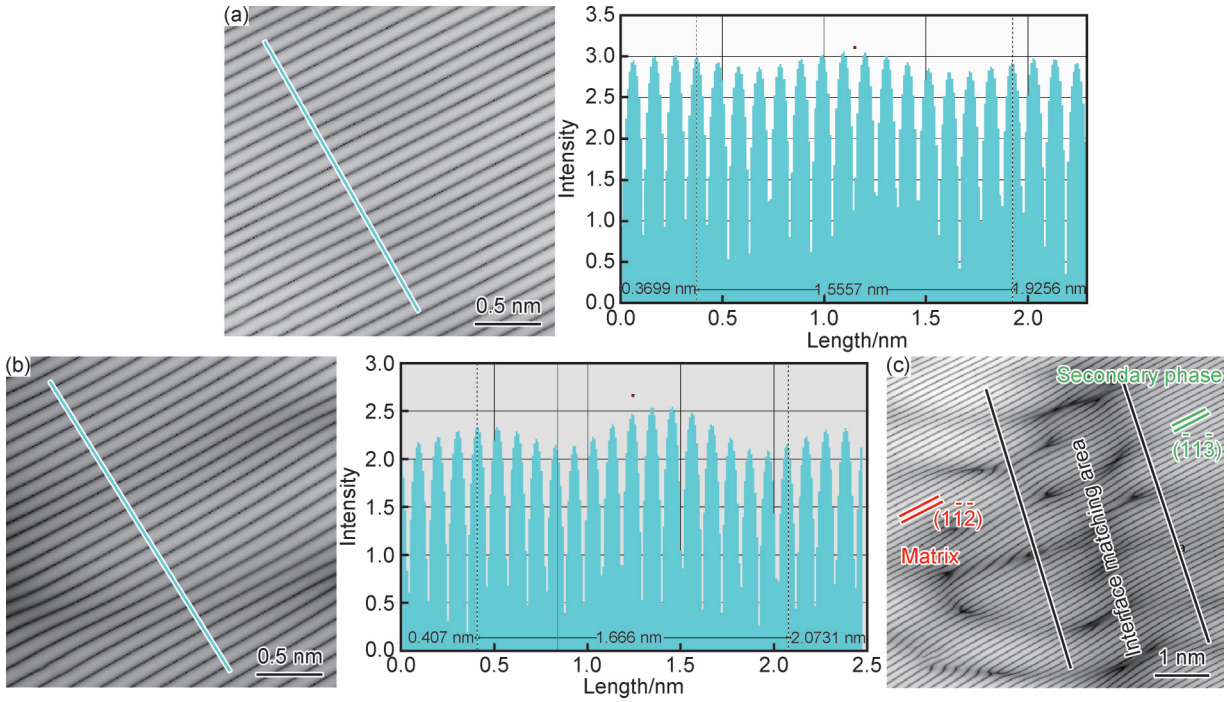



图4 Cr-Ni-Mo合金钢基体与第二相界面匹配关系

(a)基体(1$\bar{1}\bar{2}$)晶面间距;(b)第二相($\bar{1}$1$\bar{3}$)晶面间距;(c)基体与第二相界面匹配情况

Fig.4 Interface matching relationship between Cr-Ni-Mo alloy steel matrix and secondary phase

(a)interplanar crystal spacing of matrix (1$\bar{1}\bar{2}$); (b)interplanar crystal spacing of secondary phase ($\bar{1}$1$\bar{3}$);

(c)interface matching between matrix and secondary phase

## 参考文献


[1] 姚曙光,周亿莉,许平,等.轻量化高速列车制动盘材料-结构研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(6):2414-2431.
YAO S G,ZHOU Y L,XU P,et al.Progress of material-structure research on brake discs for lightweight high-speed trains[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2024,55(6):2414-2431.

[2] 李志强,张晓康,刘志成,等.高速列车铸钢与锻钢制动盘CCT曲线测定与分析[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(9):3453-3460.
LI Z Q,ZHANG X K,LIU Z C,et al.Determination and analysis of CCT curves of cast steel and forged steel brake disc for high-speed train[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(9):3453-3460.

[3] 雍岐龙,孙新军,郑磊,等.钢铁材料中第二相的作用[J].科技创新导报,2009(8):2-3.
YONG Q L,SUN X J,ZHENG L,et al.The role of the second phase in steel materials[J].Science and Technology Innovation Herald,2009(8):2-3.

[4] 杜一鸣,李胜利,艾新港,等.第二相粒子强化钢铁材料的研究进展[J].钢铁研究学报,2020,32(8):683-689.
DU Y M,LI S L,AI X G,et al.Research progress of strengthened iron and steel with second phase particle[J].Journal of Iron and Steel Research,2020,32(8):683-689.

[5] 孙新军,刘罗锦,梁小凯,等.高钛耐磨钢中TiC析出行为及其对耐磨粒磨损性能的影响[J].金属学报,2020,56(4):661-672.
SUN X J,LIU L J,LIANG X K,et al.TiC precipitation behavior and its effect on abrasion resistance of high titanium wear-resistant steel[J].Acta Metallurgica Sinica,2020,56(4):661-672.

[6] 吕昭平,蒋虽合,何骏阳,等.先进金属材料的第二相强化[J].金属学报,2016,52(10):1183-1198.
LU Z P,JIANG S H,HE J Y,et al.Second phase strengthening in advanced metal materials[J].Acta Metallurgica Sinica,2016,52(10):1183-1198.

[7] 南竹,张国赏.第二相粒子增强钢铁材料的研究进展[J].铸造技术,2018,39(7):1633-1636.
NAN Z,ZHANG G S.Research progress on second phase particle reinforced steel and iron materials[J].Foundry Technology,2018,39(7):1633-1636.

[8] 张小丽,冯晓伟,申勇峰.D6A钢在轧制过程中的强韧化机理[J].材料工程,2022,50(4):172-180.
ZHANG X L,FENG X W,SHEN Y F.Toughening mechanism of D6A steel during rolling process[J].Journal of Materials Engineering,2022,50(4):172-180.

[9] 郭红艳.几何相位分析法(GPA)基本原理[J].电大理工,2013(4):19-20.
GUO H Y.Basic principles of geometric phase analysis (GPA)[J].Study of Science and Engineering at RTVU,2013(4):19-20.

[10] 李旭,任玲玲,高思田,等.基于几何相位分析的Nb-Si{001}界面应变研究[J].航空材料学报,2018,38(2):96-103.
LI X,REN L L,GAO S T,et al.Strain study of Nb-Si{001}interface based on geometric phase analysis[J].Journal of Aeronautical Materials,2018,38(2):96-103.

[11] 侯小虎，白朴存，沈元国，等.7000系铝合金析出相应变的HRTEM几何相位分析[J].稀有金属材料与工程，2014，43(5)：1161-1164.
HOU X H，BAI P C，SHEN Y G，et al.Geometric phase analysis of strain in 7000 series aluminium alloy by HRTEM[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2014，43(5)：1161-1164.

[12] 贺小庆，温才，卢朝靖，等.AlSb/GaAs异质外延薄膜应变的HRTEM几何相位分析[J].电子显微学报，2009，28(4)：338-342.
HE X Q，WEN C，LU C J，et al. Geometric phase analysis of strain in AlSb/GaAs hetero-epitaxial film by HRTEM[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society，2009，28(4)：338-342.

[13] ZHAO C W，XING Y M，BAI P C，et al.Quantitative measurement of deformation field around low-angle grain boundaries by electron microscopy[J].Physica B：Condensed Matter，2008，403(10/11)：1838-1842.

[14] ZHAO C W，XING Y M，BAI P C.Experimental examination of displacement field in an edge dislocation core in aluminum[J]. Physics Letters A，2008，372(3)：312-315.

[15] 雍歧龙.钢铁材料中的第二相[M].北京：冶金工业出版社，2006：216-221.
YONG Q L. The second phase in steel materials[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2006：216-221.

[16] WU D，WANG F M，CHENG J，et al.Effects of Nb and tempering time on carbide precipitation behavior and mechanical properties of Cr-Mo-V steel for brake discs[J].Steel Research International，2018，89(5)：1700491.

[17] WU D，WANG F M，CHENG J，et al.Effect of Nb and V on the continuous cooling transformation of undercooled austenite in Cr-Mo-V steel for brake discs[J].International Journal of Minerals，Metallurgy，and Materials，2018，25(8)：892-901.

[18] HŸTCH M J，SNOECK E，KILAAS R.Quantitative measurement of displacement and strain fields from HREM micrographs[J].Ultramicroscopy，1998，74(3)：131-146.

[19] HŸTCH M J，POTEZ L. Geometric phase analysis of high-resolution electron microscopy images of antiphase domains：example $Cu_3Au$[J].Philosophical Magazine A，1997，76(6)：1119-1138.

[20] HŸTCH M J，PUTAUX J L，PÉNISSON J M.Measurement of the displacement field of dislocations to 0.03 Å by electron microscopy[J].Nature，2003，423(6937)：270-273.

**基金项目**：兰州交通大学-天津大学联合创新基金项目(2019054)；甘肃省自然科学基金项目(1610RJZA044)
**收稿日期**：2025-01-24；**录用日期**：2025-03-10
**通讯作者**：康皓(1979—)，男，副教授，博士，主要从事高速列车用结构材料组织及性能控制的研究，联系地址：甘肃省兰州市安宁区安宁西路88号兰州交通大学机电工程学院(730070)，E-mail：kanghao@lzjtu.edu.cn

（本文责编：寇凤梅）