JMatPro 软件在高强度钢-低合金钢研发应用方案

中仿 JMatPro 软件是一套功能强大的金属材料相图计算与材料性能计算软件，以强大而稳定的热力学模型、热力学数据为核心技术和计算基础，所有物理模型的建立都经过了广泛的验证，以确保材料性能计算的准确性。目前可以计算的合金类型包含铝合金、镁合金、铸铁、不锈钢、高中低合金钢、钴合金、镍基合金、镍铁基合金、镍基单晶超合金、钛合金、锆合金、焊料合金（锡焊）、铜合金。。

目前，国内外高强钢研发的重点主要集中在高强度及优异韧性匹配的低合金钢， 通过降低 C 含量，来获得良好的韧性和焊接性能，采用多元复合的 Nb-Ti、Nb-V、V-N、V-Ti 等微合金化的成分体系，借助细晶强化、第二相粒子的析出强化来进一步提高强度。

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室基于中仿 JMatPro 热力学模拟软件对 V-N 及 V-N-Cr 微合金钢中平衡相析出行为进行研究，并与轧制过程获得的 V-N-Cr 微合金钢的析出行为进行了对比。结果表明:V-N 钢与 V-N-Cr 微合金钢具有多种相同的析出第二相,包括 MN、Al N、MnS、M（C,N）、$M_{23}C_6$、M_6C 析出相,M（C,N）和 MN 的析出强化作用较明显。Cr 元素的添加能促进 V（C,N）析出,阻碍 VN 析出。V-N-Cr 微合金钢的 TEM 组织中多边形铁素体基体含有大量的高密度位错,V（C,N）析出相细小,弥散分布,包含两种尺寸类型,尺寸在 10～20 nm 的 V（C,N）析出相,主要在第一阶段轧制及等温阶段形成。尺寸在 3～5 nm 的析出相,在精轧阶段后期缓慢冷却过程中形成。这与 JMatPro 软件所计算预测出的 M（C,N）高温析出阶段和低温析出阶段的结果基本相同。

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室 V-N 微合金钢 JMatPro 应用案例

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。

相组成分析

图 1 为不同 Cr 含量的 V-N 微合金钢的平衡相组成。

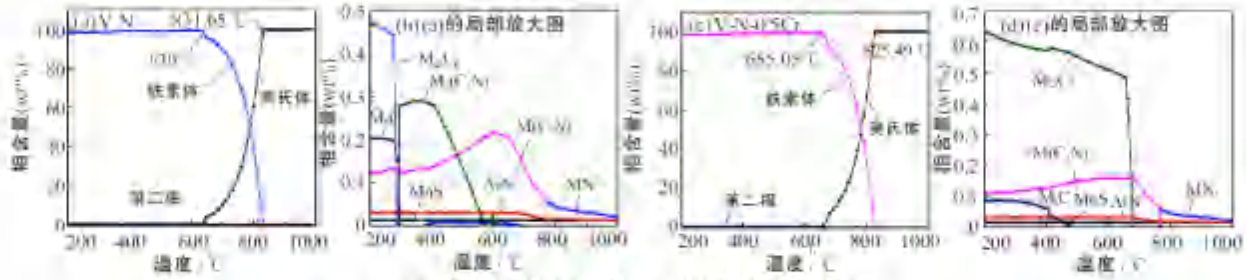

图 1 不同 Cr 含量的 V-N 微合金钢的平衡相组成

Fig.1 Equilibrium phase composition of V-N microalloyed steel with different Cr

由图 1（a） 可知， 微合金化钢组织转变产物主要包括奥氏体、铁素体和多种第二相，V-N 钢中铁素体向奥氏体开始及结束的转变温度分别为 A1=630℃、A3=831.65℃，V-N-Cr 微合金钢的 A1 温度比 V-N 钢的高，A1 为 655.08℃，但是 A 温度随 Cr 含量的增加而下降，0.5Cr 钢的 A3 为 825.49℃。由图 1（a）局部放大图图 1（b）可知，V-N 钢与 V-N-Cr 微合金钢的析出相中存在部分相同的第二相，包括 MN、AlN、MnS、M（C，N）、M23C6、M6C。由于 V 的碳化物和氮化物具有相同的立方晶体学结构和非常相似的晶格常数， 表现出很大的互溶性。在 800℃以上的较高温度时，奥氏中的主要析出相为 MN[9-10]，随着温度的降低，MN 的析出量增大，在奥氏体中开始析出时几乎为纯 MN，直到所有的 N 耗尽为止时，析出物有一个向着碳氮化物的渐变，促使 M（C，N）在γ→α 相变过程中或者随后析出。AlN 析出速率极低， 其析出物比例很小。合金成分设计中 S 的含量仅为 0.05%，形成的 MnS 析出相的质量百分数非常低，且 MnS 在再加热过程中难以溶解，基本可忽略不计。相比 V-N-Cr 钢来说，图 1（b）中 V-N 钢的析出第二相较多，还包括渗碳体、M2 （C，N）， 由于微合金钢中含碳量仅为 0.05%以及 M（C，N）析出物对 C 原子的消耗，渗碳体的质量分数较低。两种微合金钢中 M（C，N）相的析出量随温度的升高呈先增加后减小的变化趋势，其他相大致呈现出逐渐减少的趋势。添加 Cr 元素后微合金钢的第二相析出产物变少， 但是析出相所占的质量百分数增大，尤其是 M23C6 相，其析出温度被明显提高， 由 V-N 钢中 287℃升

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。
全国统一客户服务热线：400 888 5100 网址：www.CnTech.com 邮箱：

高至 V-N-0.5Cr 钢中 680℃， 由此可知，Cr 元素的添加可有效提高第二相的析出温度。同时，各平衡析出相的析出量、初始析出温度等均存在较多差异。表 1 列出了两种 V-N 微合金钢中平衡第二相的析出温度。但是需要指出的是，热力学计算得到的是第二相粒子的均匀成分， 与实际生产过程中的情况存在一定的差异。

M(C,N)相的析出行为

图 2 给出了析出相 M（C，N）中元素比例分布与对应温度的热力学计算结果。

表 1 主要析出相的析出温度(℃)

Tab.1 Initial precipitation temperature of main precipitation phases (℃)

钢	MN	AlN	MnS	M(C,N)	$M_{23}C_6$	M_6C
V-N	1075	1119	1400	768	287	293
V-N-0.5Cr	1066	1111	1400	765	680	479

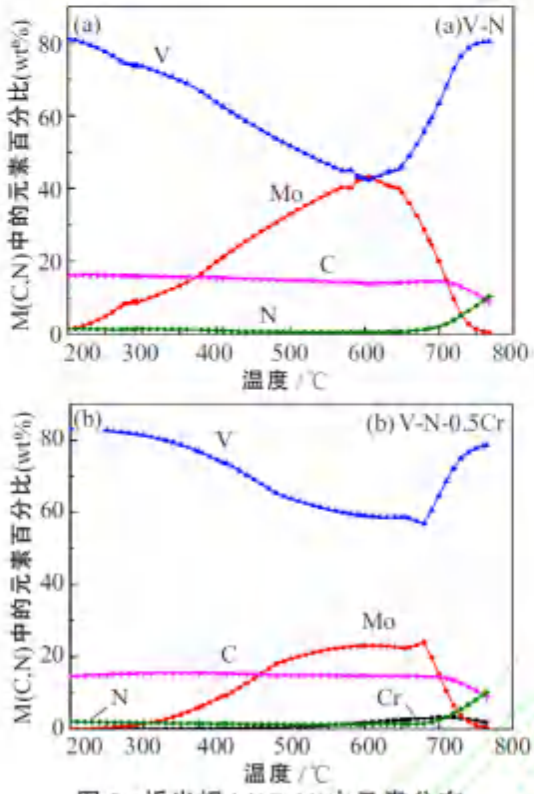

图 2 析出相 M(C,N)中元素分布

Fig.2 Element distribution of M(C,N) precipitation phase

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。
全国统一客户服务热线：400 888 5100 网址：www.CnTech.com 邮箱:

由图 2（a）可见，V-N 微合金钢的 M（C，N）中主要包括 Mo、V、C、N 四种元素，V-N-Cr 微合金钢的 M（C，N）析出相中主要元素为五种，分别是 Cr、Mo、V、C、N。V 元素所占的析出占位分数最大， 其次是 Mo、C 和 N 在 V-N 和 V-N-Cr 微合金钢中所占比例并没有因 Cr 元素的加入而引起大幅的变化，C 含量基本保持在 M（C，N）元素分布质量百分数的 15%左右，N 含量占 1.5%左右。V 的溶解度很高，在常规的加热温度下 V 易在钢中固溶，V 与 N 结合容易，能促进 V（C，N）的沉淀析出，它在高温奥氏体区和低温铁素体区均能析出，为铁素体的形成提供良好的条件，细化晶粒，提高了钢的强度。但是钒与其他微合金元素的交互作用，争夺相同的间隙元素，导致形成复合碳氮化物，降低了 V 在奥氏体中的溶解量[11-12]。图 3 给出了 V、Mo 在 V-N 及 V-N-Cr 微合金钢的 M（C，N）中的占位分数随温度的变化趋势。由图 3（a）可知，一方面 V 元素在 M（C，N）中的占位分数随着温度的升高呈现先下降后上升的趋势，存在转折最低点；并随着 Cr 含量在 V-N-Cr 微合金钢中的增加，这个转折点出现右移，转折点温度升高，由 V-N 钢中 605℃的转折温度升高至 V-N-0.5Cr 钢中 680℃。另一方面，在相同温度下，随着 Cr 含量的增加，V 在 M（C，N）中的占位分数比例增大，由此可知，Cr 元素促进 V 碳氮化物析出行为的发生。图 3（b）中 Mo 在 M（C，N）中的占位分数的变化趋势与 V 正好相反， 随着温度的升高呈现先上升后下降的趋势，存在转折最高点；并随着 Cr 含量在 V-N 微合金钢中的增加，这个转折点出现右移，转折点温度升高。在相同温度下加入 Cr 元素后，Mo 在 M（C，N）中的占位分数比例减小。由此可知，Cr 元素阻碍了 Mo 在碳氮化物中析出行为的发生。

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。

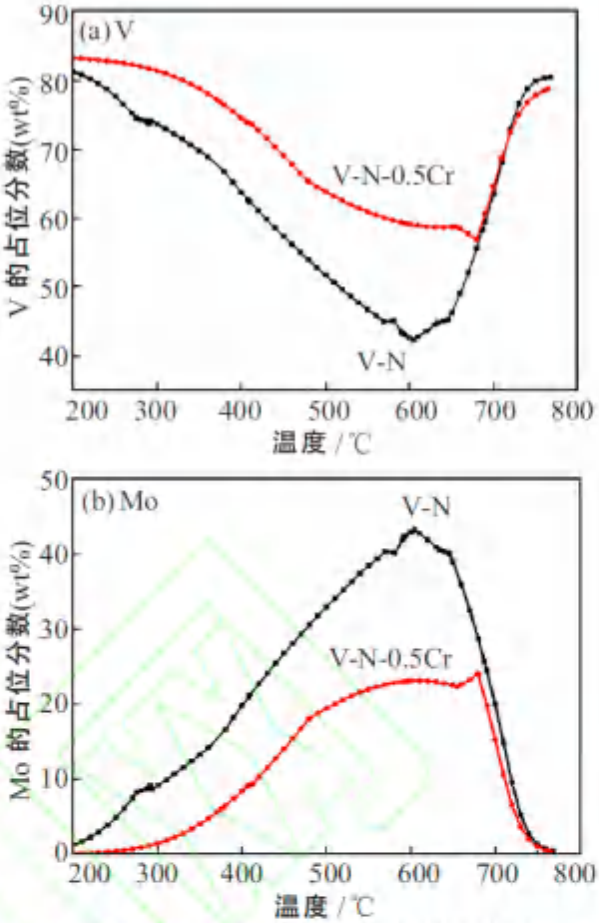

图 3 V、Mo 在 V-N 及 V-N-Cr 微合金钢的 M(C,N)中的占位分数

Fig.3 V, Mo contents of M(C,N) in V-N and V-N-Cr microalloyed steels

MN 相的析出行为

图 4 给出了 MN 析出相中元素比例分布与对应温度的热力学计算结果。由图 4 (a) 可见，V-N 微合金钢的 MN 析出相的析出过程分为两个阶段，高于 768℃以上的高温析出阶段和低于 687℃的中低温析出阶段， 高温析出阶段为侧重分析部分。图 4 (b) 中 V-N-0.5Cr 微合金钢中 Cr、Mo、V、C、N 五种元素在 MN 中的比例和趋势与 V-N 钢大致相同。与 M (C, N) 不同，在 MN 中 V

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。
全国统一客户服务热线：400 888 5100 网址：www.CnTech.com 邮箱:

元素所占分数比例最大，其次是 N，N 的占位百分数在 15%左右，C 的占位分数随温度的升高而逐渐变小，直至稳定状态。

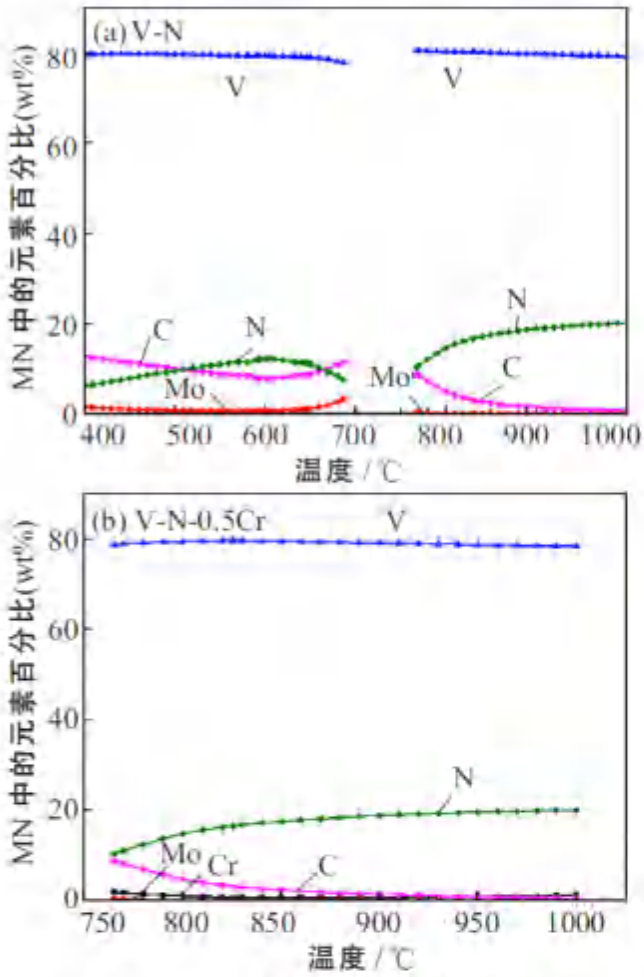

图 4 析出相 MN 中的元素分布

Fig.4 Element distribution of precipitation phase MN

图 5 给出了 V、Mo 在 V-N 及 V-N-Cr 微合金钢的 MN 中的占位分数随温度的变化趋势。由图 5 (a) 可知，V 元素在 MN 中的占位分数无论在高温析出段还是中低温析出段均随着温度的升高呈现减小趋势；而 V-N-0.5Cr 钢中 V 元素的占位分数随温度的升高呈先增加后减小的趋势， 在 825℃达到转折最高点，在转折温度时 V 的占位分数达到最大值。图 5 (b) 中 Mo 在 MN 中的占位分数随着温度的升高呈现下降趋势，对于 V-N 钢，高于 850℃时基本保持在稳定值。Cr 元素的添加对 Mo 的占位分数的变化影响甚微。V-N-0.5Cr 微合金钢在 830℃时达到 Cr 在 M (C，N) 中占位分数的转折最低点。

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。
全国统一客户服务热线：400 888 5100 网址：www.CnTech.com 邮箱：

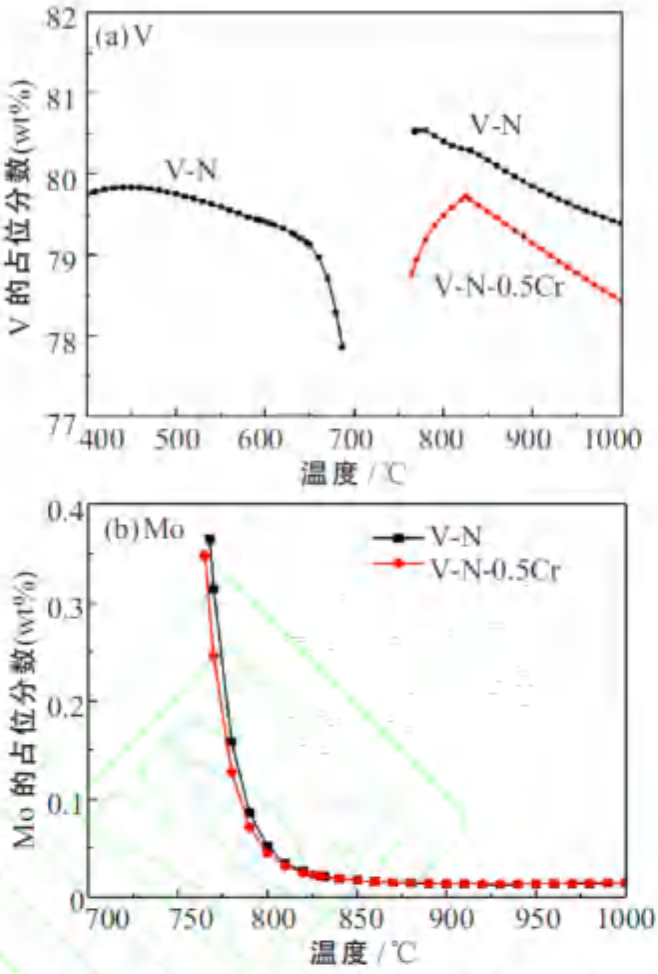

图 5 V、Mo 在 V-N 及 V-N-Cr 微合金钢的 MN 中的占位分数

Fig.5 V and Mo contents of MN in V-N and V-N-Cr microalloyed steels

微观组织观察和元素分析

图 6 为终轧温度 850℃、终冷温度 500℃轧制工艺条件下获得的 V-N-Cr 微合金钢的 TEM 显微组织、析出物形貌及 EDX 能谱分析。由图 6（a）、（b）可看出，多边形铁素体基体中含有大量的高密度位错，针状铁素体由相互交织的多个亚板条结构组成，板条宽度为 200～250nm，有效抑制裂纹扩展。由图 6（c）、（d）可观察到在多边形铁素体和针状铁素体的组织内部有两种不同尺寸的析出相出现，尺寸在 10～20nm 的 V（C，N）析出相，主要在第一阶段轧制及等温阶段形成。尺寸在 3～5nm 的析出相，呈球状，弥散分布在铁素体/ 贝氏体铁素体晶粒内部，该析出物主要在精

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。
全国统一客户服务热线：400 888 5100 网址：www.CnTech.com 邮箱：

轧阶段后期缓慢冷却过程中形成。这与文中图 4 所预测出的 M（C，N）高温析出阶段和低温析出阶段的结果基本相同。由 EDX 能谱分析可知，由于实验钢中加入了较高含量的 C 元素，促使 V（C，N）析出相中固溶有 Cr、Mo，形成了含有 Cr、Mo 的碳氮化物。这与文中图 2（b）、3（b）的 JMatPro 预测结果大致相同。

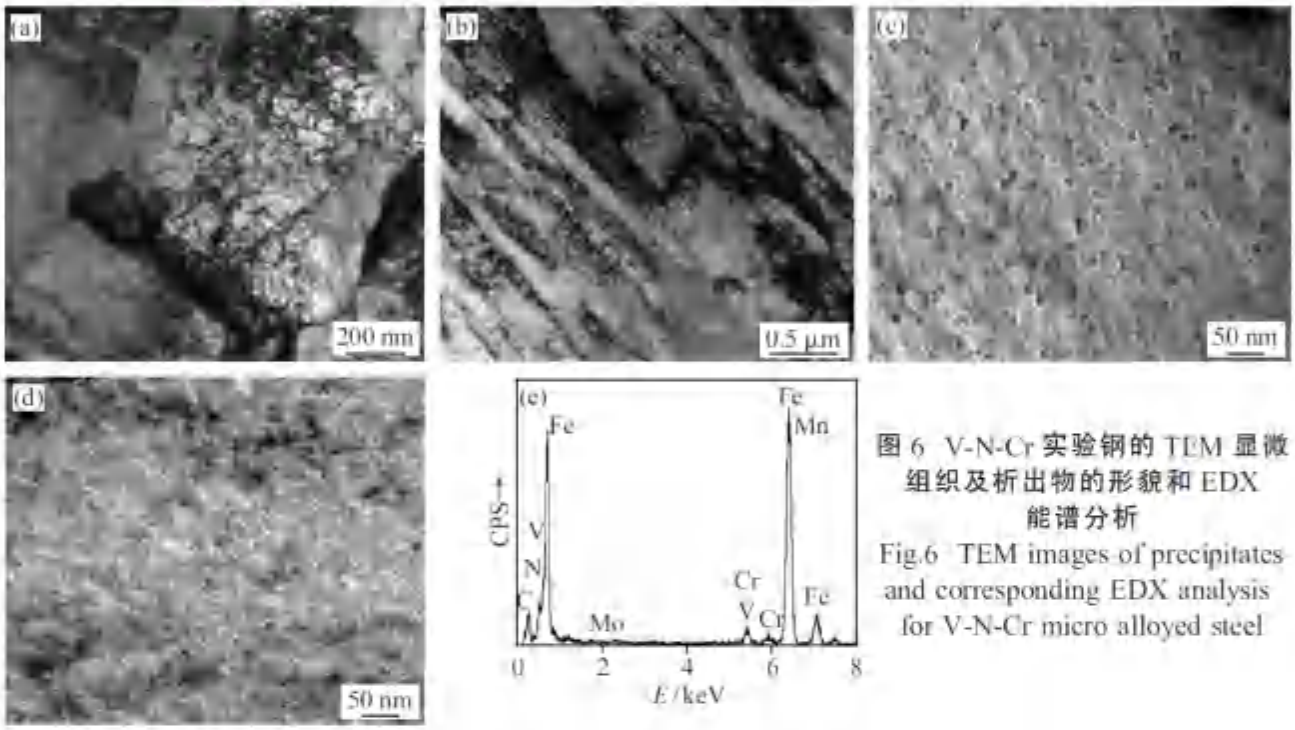

图 6 V-N-Cr 实验钢的 TEM 显微组织及析出物的形貌和 EDX 能谱分析

Fig.6 TEM images of precipitates and corresponding EDX analysis for V-N-Cr micro alloyed steel

结论

1. V-N 钢与 V-N-Cr 微合金钢中都含有 MN、AlN、MnS、M（C，N）、M23C6、M6C 析出相。
2. V-N 钢与 V-N-Cr 微合金钢在 M（C，N）及 MN 析出相中均含有 Mo、V、C、N 四种元素。Cr 的加入会使 V 在 M（C，N）中的占位分数增大，促进 V（C，N）析出，但会使 V 在 MN 中的占位分数减小，阻碍 VN 析出。
3. V-N-Cr 微合金钢的组织中多边形铁素体基体含有大量的高密度位错，V（C，N）析出相细小弥散分布，其小尺寸在 3～5nm，大尺寸在 10～20nm。

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。
全国统一客户服务热线：400 888 5100 网址：www.CnTech.com 邮箱：

关于中仿

中仿智能科技（上海）股份有限公司（股票简称：中仿智能，股票代码：838476）成立于 2007 年，是国际先进仿真技术高科技公司，服务于全球的土木交通、国防军工、教育科研等领域。

随着业务的飞速发展，中仿已拥有超过 1000 家用户，其中包括宝钢、鞍钢、哈工大、中广核以及各大高校和中科院所、设计院所、金属研究所等，建立了遍布全国的销售和服务网络。中仿始终与国内外最优秀的仿真技术研究机构和企业保持长期而紧密的合作关系，致力于提供世界先进的仿真技术解决方案。

中仿坚持自主创新，持续提升核心竞争力，积累了深厚的创新研发能力，并形成完备的服务体系。公司多次承担国家科技部和上海市科委研发项目，荣获国家高新技术企业、上海市"双软"认证企业等称号并入选全军武器装备采购信息名录，为国防建设提供先进的虚拟仿真技术和产品。

"仿真智领创新"是中仿的企业核心观念，也是我们坚持的产品核心价值。中仿坚持不懈地创新研发，力争成为智能仿真技术行业的典范。公司网站 www.cntech.com

中仿是 JMatPro 软件在中国地区唯一的合作伙伴，主要负责软件在中国的技术支持、市场推广及销售工作，多年来在金属相图分析、材料热物性能、复合材料筛选等领域快速发展，培育了一批又一批软件的忠实用户，同时也为用户进提供周到的技术支持服务，使众多的中国相关专业工程师在国际前沿课题参与、工程设计等方面取得了长足进展。

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。

联系我们

中仿科技 CnTech 作为 JMatPro 在中国地区的合作伙伴，致力于为用户提供最优秀的软件以及优质的个性化技术支持。中仿科技定期举办现场培训、研讨会和网络研讨会，想要了解最新的研讨会信息与软件资料或是您在软件使用中遇到了问题，欢迎咨询 info@cntech.com。

版权声明：本文件含有中仿智能科技（上海）股份有限公司的商业秘密，未经中仿智能科技（上海）股份有限公司批准，不可将本文件或其中部分复印或引用到其他文件中，用于其他目的。