

## 深海系统连接毂的锻造及热处理工艺

董晓雨<sup>1</sup>, 刘统亮<sup>1</sup>, 程寒生<sup>2</sup>, 刘康<sup>1</sup>, 尹燕波<sup>1</sup>, 盛天宇<sup>3</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570300; 2. 中国海洋石油集团有限公司, 北京 100010;

3. 张家港海锅新能源装备股份有限公司, 江苏 张家港 215628)

**摘要:** 基于我国南海某深海油气田开发经验, 立足于现场低温、高压等工况要求, 对深海连接系统锻件的锻造和热处理工艺进行合理设计, 以确保该连接毂锻件能够满足深海油气井的开发生产需求。结合化学成分控制对连接系统大壁厚锻件进行试生产, 同时开展锻件试样的化学成分、力学性能、冲击功和显微组织的相关分析。结果表明: 锻件的化学成分和力学性能优异, 满足深海生产工况实际要求; 经过生产工艺优化后, 锻件的力学性能良好, 具备良好的冲击断裂韧性; 热处理后的显微组织为粒状贝氏体+铁素体, 晶粒度为9级, 不同位置的晶粒度较为均匀, 且非金属夹杂物未见明显差异。

**关键词:** 深海连接系统; 连接毂; 化学成分; 力学性能; 冲击功; 显微组织

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.007

中图分类号: TG115

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940(2024)01-0054-05

## Forging and heat treatment process on connection hub for deep-sea system

Dong Xiaoyu<sup>1</sup>, Liu Tongliang<sup>1</sup>, Cheng Hansheng<sup>2</sup>, Liu Kang<sup>1</sup>, Yin Yanbo<sup>1</sup>, Sheng Tianyu<sup>3</sup>

(1. CNOOC China Limited, Hainan Branch, Haikou 570300, China;

2. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China;

3. Zhangjiagang Haiguo New Energy Equipment Manufacturing Co., Ltd., Zhangjiagang 215628, China)

**Abstract:** Based on the development experience of a deep-sea oil and gas field in the South China Sea, and based on the working condition requirements of on-site low-temperature and high-pressure, the forging and heat treatment process of the deep-sea connection system forgings were reasonably designed to ensure that the connection hub forgings met the development and production needs of deep-sea oil and gas wells. Then, combined with chemical composition control, the trial production of large-wall-thickness forgings of connection system was carried out, and the related analysis on the chemical composition, mechanical properties, impact energy and microstructure of the forgings samples were carried out. The results show that the chemical composition and mechanical properties of the forgings are excellent and meet the actual requirements of deep-sea production working conditions. After the optimization of production process, the mechanical properties and impact fracture toughness of the forgings are good. The microstructure after heat treatment is granular bainite + ferrite with grain size of 9. The grain size at different positions is more uniform, and there is no obvious difference in non-metallic inclusions.

**Key words:** deep-sea connection system; connection hub; chemical composition; mechanical properties; impact energy; microstructure

在深海环境中的油气田开发需要应用水下生产系统, 该系统不同部件之间的协同工作要靠连接系统实现<sup>[1-2]</sup>, 本文将其实称为深海连接系统。连接器作为水下连接系统的重要组成部分, 其母头端一

般与海底软管、刚质跨接管或脐带缆连接, 公头端与水下结构物, 如采油树、管汇和海底管道终端等相连接, 连接器结构性能的好坏直接影响到整个水下生产系统的可靠性和安全性<sup>[3]</sup>。在实际生产过程中, 考虑到石油化工行业恶劣的海洋环境, 为保障深海连接的可靠性和稳定性, 连接器的关键核心部件一般采用高强度的合金钢锻件。毂是水下连接器的重要组成部分, 在油气开采时, 连接毂的内壁与高温油气介质直接接触, 外表面承受海水的压力, 对力学性能指标和稳定性要求极高, 国外众多知名油气生产商通常采用 F65 低碳高强度合金钢作为连接毂的锻件材料<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2023-06-01; 修订日期: 2023-09-10

基金项目: 工业和信息化部高技术船舶与科研项目 (MC-202030-H04); 国家发展和改革委员会项目 (LSZX-2020-HN-05); 国家发展和改革委员会科技攻关项目 (CCL2020HNFN0183)

作者简介: 董晓雨 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: dongxy10@cnooc.com.cn

通信作者: 刘统亮 (1997-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: liutl6@cnooc.com.cn

用于某深海油气田的连接器设计水深超千米, 其连接器的连接毂锻件图如图1所示, 张家港海锅新能源装备股份有限公司采用5.5 t钢型F65八角钢锭原材料锻造, 锻造完成后单个连接毂的质量为690 kg, 最大壁厚为335 mm。由于采用F65低碳高强度合金钢作为原材料, 锻件壁厚大, 锻造时需反复长时间加热和变形, 以充分消除锻件带状组织并达到内外部晶粒分布平衡等要求, 微观组织不易控制; 同时, 深海所用连接锻件对材料的力学性能和稳定性要求更高。本研究基于国内某深海油气田开发实际经验, 立足现场需求, 合理设计锻件的锻造和热处理工艺, 以确保该连接毂锻件能够满足深海油气井开发生产需求。

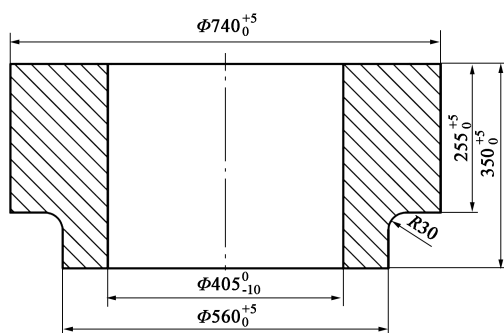


图1 某深海连接毂锻件图

Fig. 1 Forgings drawing of a deepwater connection hub

常规锻件的制造工艺为: 钢锭冶炼—下料锯切—锻造—机械加工—热处理(正火+淬火+回火)—取样—性能测试<sup>[5-6]</sup>, 因连接毂的有效截面较厚, 结合现场生产经验, 为消除大壁厚锻件中的带状组织, 达到组织均匀化和细化晶粒的目的, 对热处理工艺方案进行优化。即在锻造完成后进行锻后热处理(正火), 空冷后进行机械加工, 随后进行性能热处理(淬火+回火), 在900℃左右保温3.5 h以上, 使工件充分奥氏体化后进行淬火, 回火温度保持在620℃以上, 最后, 在工件最大壁厚的1/4、1/2、3/4处进行轴向取样。

## 1 试验方案

### 1.1 化学成分控制

根据深海环境的特殊性, 锻件原材料采用DN-VGL-RP-0034-2015<sup>[7]</sup>中的最高等级SFC 3, 该等级锻件材料除了满足工件所承受的环境工作载荷外, 还能承受相应的疲劳载荷, 除此之外, 对原材料合金元素(P、S、V、Sn、Sb、As、B等)的含量限制也更加严格。由于成形后的工件的有效截面较厚,

原材料钢锭需经过EBT(电炉)+LF(精炼炉)+VD(真空炉)冶炼, 采用偏心底出钢浇注、二次精炼以及真空脱气和充分镇静、凝固后进行退火处理以控制非金属夹杂。5.5 t钢型F65八角钢锭成形后, 基于ASTM A788-10<sup>[8]</sup>对其进行化学成分分析。

### 1.2 锻造及热处理工艺

该连接毂锻件的锻造工艺路线为: 出炉—反复3次拔长—倒棱滚圆—冲孔—扩孔成形, 锻造设备为5 t锤, 锻造方式为自由锻, 总锻造比为48.6, 锻造温度为800~1200℃, 拔粗和拔长过程中始终保持准确的阶段性锻造比。

锻造时, 连接毂锻件的冲孔直径为 $\phi 250$  mm, 经扩孔修整成形后, 内孔直径为 $\phi 375$  mm, 锻件外径为 $\phi 765$  mm, 此时壁厚为390 mm。为消除该大壁厚连接毂锻件内的带状组织, 并保证锻件内各组织的均匀化, 锻造完成后随即进行锻后热处理(正火), 其工艺曲线如图2所示。

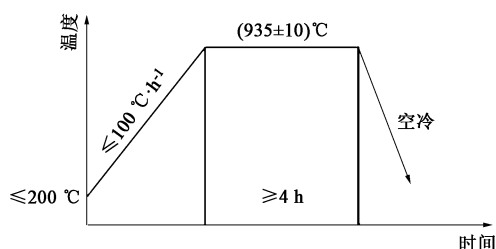


图2 锻后热处理(正火)工艺曲线

Fig. 2 Process curve of heat treatment (normalizing) after forging

锻后热处理之后再行机械加工, 机械加工完成后的连接毂锻件的最大壁厚为353 mm、最小壁厚为173 mm。为使锻件具备适用深海的良好综合力学性能, 制定锻件合适的升温速度、保温时间和冷却方式以进行调质(淬火+回火)热处理, 具体热处理工艺曲线如图3所示。淬火时严格按照API RP 6HT-2013<sup>[9]</sup>执行, 以控制该连接毂锻件的转移速度, 达到理想的冷却效果。

## 2 试验结果分析

### 2.1 成分控制

众多研究结果表明, 合理的化学成分是大壁厚锻件的力学性能稳定性的保障<sup>[10-13]</sup>。在钢锭冶炼过程中, 本研究通过EBT(电炉)+LF(精炼炉)+VD(真空炉)的冶炼方法进行冶炼, 采用偏心底出钢浇注、二次精炼以及真空脱气和充分镇静、凝固后进行退火处理, 适当降低碳、锰含量和提高铬、

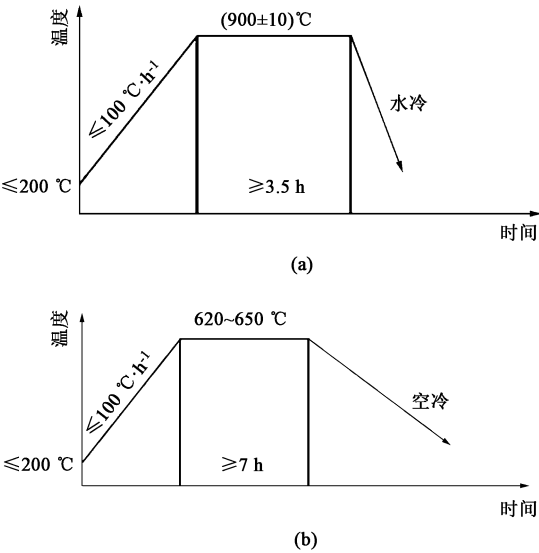


图 3 调质热处理工艺曲线

(a) 淬火 (b) 回火

Fig. 3 Process curves of quenched-tempered heat treatment

(a) Quenching (b) Tempering

镍和钼等合金元素的含量，同时控制了非金属夹杂的含量。检测钢锭原材料各化学组成的成分均控制

在规范的合理范围内，且 P、S 等有害元素的含量均符合 ASTM A788-10<sup>[8]</sup> 的要求。

2.2 力学性能分析

根据 DNVGL-RP-0034-2015<sup>[7]</sup> 的要求，在锻件最大壁厚的 1/4、1/2 和 3/4 处进行轴向取样，使用材料拉伸试验机和布氏硬度计进行力学性能测试，相应的试验结果如表 1 所示（ $T$  为锻件最大壁厚）。由表 1 可知，最大壁厚的 1/4、1/2、3/4 处实测的屈服强度、抗拉强度、伸长率、断面收缩率、屈服比和硬度均位于 ASTM A694-16<sup>[14]</sup> 范围内。

2.3 冲击功分析

厚壁低合金钢锻件对低温冲击韧性具有极高的要求，一般采用夏比 V 型冲击试验方法来评价材料的动态冲击断裂韧性。根据 ASTM A370-17<sup>[15]</sup> 要求，在锻件最大壁厚的 1/4、1/2、3/4 处各取 3 个夏比 V 型冲击试样，并使用同一试验设备对锻件进行  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的 V 型缺口低温冲击试验。相应的试验结果如表 2 所示。由表 2 可知，所测值均满足 DNVGL-RP-0034-2015<sup>[7]</sup> 的要求，且保持良好的冲击断裂韧性。

表 1 锻件试样力学性能测试结果

Table 1 Test results of mechanical properties for forgings samples

试样位置	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	屈服比	硬度/HBW
T/4 横向	485	617	31.7	78.0	0.79	189
T/4 纵向	504	628	30.8	77.7	0.80	185
T/2 横向	459	608	32.6	76.9	0.75	180
T/2 纵向	488	620	31.8	78.5	0.79	178
T3/4 横向	456	589	31.6	76.9	0.77	181
T3/4 纵向	451	597	31.2	78.5	0.76	185
ASTM A694-16 范围	450~570	535~690	$\geq 20$	$\geq 35$	$\leq 0.90$	174~230

表 2 锻件试样冲击功测试结果 (J)

Table 2 Impact energy test results of forgings samples (J)

试样位置	第 1 个试样	第 2 个试样	第 3 个试样	平均值
T/4 横向	293	291	291	291.7
T/4 纵向	293	291	291	291.7
T/2 横向	284	278	290	284.0
T/2 纵向	160	284	278	240.7
T3/4 横向	280	285	285	283.3
T3/4 纵向	275	299	299	291.0
DNVGL-RP-0034-2015 范围	$\geq 38$ (单个)	$\geq 38$ (单个)	$\geq 38$ (单个)	$\geq 50$ (平均)

2.4 显微组织分析

采用金相显微镜对锻件试样进行金相分析，试验结果如图 4 所示，基于 ASTM E45-13<sup>[16]</sup> 对锻件试

样的非金属夹杂物进行评级，锻件试样的非金属夹杂物的 A、B、C 级别均为 0 级，D 级别中粗系为 0.5 级、细系为 1 级，均为球状氧化物，纯净度较

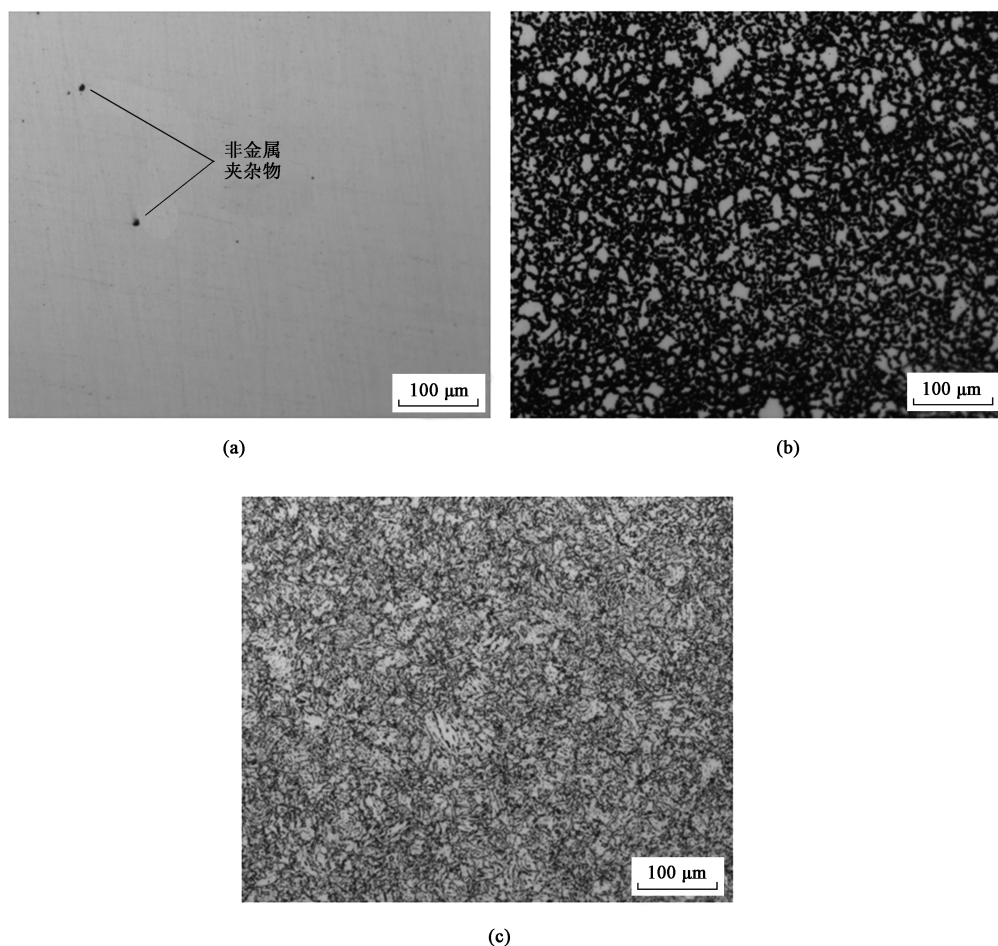


图 4 锻件试样的显微组织分析结果

(a) 非金属夹杂物 (b) 晶粒度 (c) 显微组织

Fig. 4 Microstructure analysis results of forgings samples

(a) Non-metallic inclusion (b) Grain size (c) Microstructure

好，满足 DNVGL-RP-0034 - 2015<sup>[7]</sup> 的要求，结合 ASTM E407-07<sup>[17]</sup> 可知，锻件试样的显微组织为粒状贝氏体+铁素体，根据 ASTM E112-13<sup>[18]</sup> 的要求并结合锻件试样 3 个视场的级别数对晶粒度进行评级，结果为 9 级。

### 3 结论

(1) 深海水下生产系统的连接毂锻件的壁厚较大，所用材料为低碳高强度合金钢，微观组织不易控制，对力学性能和稳定性要求高；从原材料出发，通过化学成分控制和设计合理的锻造及热处理工艺，得到的产品的微观组织良好，化学成分和力学性能均满足深海生产工况实际要求。

(2) 锻件经过生产工艺优化后，力学性能良好，具备良好的冲击断裂韧性，热处理后的显微组

织为粒状贝氏体+铁素体，晶粒度为 9 级，不同位置的晶粒度较为均匀，且非金属夹杂物未见明显差异，是该生产工艺的良好应用。

(3) 对于大壁厚锻件的质量控制，本研究的化学成分、锻造和热处理工艺控制是保障锻件有效生产的可靠手段之一，可为类似深海大壁厚锻件生产提供有益的参考。

#### 参考文献：

- [1] 谢彬，曾恒一. 我国海洋深水油气田开发工程技术研究进展 [J]. 中国海上油气，2021，33 (1): 166-176.  
Xie B, Zeng H Y. Research advancement in offshore deepwater oil and gas development engineering technologies in China [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33 (1): 166-176.
- [2] 刘统亮，刘孔忠，杜宇成，等. 深海安装工况下水下采油树鹅脖连接器安全性能分析 [J]. 中国海上油气，2022，34 (4): 242-252.  
Liu T L, Liu K Z, Du Y C, et al. Safety performance analysis of



- subsea christmas tree gooseneck connectors under installation conditions in deepwater [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34 (4): 242-252.
- [3] 刘孔忠, 刘统亮, 何恩, 等. 深海多工况载荷作用下软管连接器结构强度分析 [J]. 力学与实践, 2022, 44 (5): 1055-1065.
- Liu K Z, Liu T L, He E, et al. Structural strength analysis of flexible flowline connector under multi-load in deepwater [J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44 (5): 1055-1065.
- [4] 戚嵩, 周声结, 杨阳, 等. 化学成分对深水管道连接器 A694 F65 钢冲洗压力帽锻件力学性能的影响 [J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58 (3): 18-22.
- Qi H, Zhou S J, Yang Y, et al. Effect of chemical composition on mechanical properties of A694 F65 steel flushing pressure cap forging of deep water pipeline connector [J]. Physical Testing and Chemical Analysis; Part A: Physical Testing, 2022, 58 (3): 18-22.
- [5] 蒋中华. 厚壁低合金钢锻件冲击波动机制及控制方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- Jiang Z H. Investigation on Mechanism and Control Methods of Impact Energy Fluctuation of Low Alloy Steels Used for Heavy Wall Forgings [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [6] 黄鑫, 吴君三, 马苏, 等. F22 阀体锻件超声探伤不合格原因的分析 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (19): 156-158.
- Huang X, Wu J S, Ma S, et al. Analysis on causes of non-conformance of ultrasonic flaw detection for F22 valve body forgings [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (19): 156-158.
- [7] DNVGL-RP-0034-2015, Steel forgings for subsea applications [S].
- [8] ASTM A788-10, Standard specification for steel forgings, general requirement [S].
- [9] API RP 6HT-2013, Heat treatment and testing of carbon and low alloy steel large cross section and critical section components [S].
- [10] 方旭升, 汪盼盼, 奚涛涛, 等. 大锻件用 25Cr2Ni4MoV 钢锻粗与拔长工艺分析 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (8): 47-55.
- Fang X S, Wang P P, Xi T T, et al. Analysis on upsetting and stretching process of 25Cr2Ni4MoV steel for heavy forgings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (8): 47-55.
- [11] 戚嵩, 葛辉, 周勇, 等. 厚壁盲孔深水管道连接器锻件材料均质化工艺开发 [J]. 石油化工设备, 2021, 50 (6): 59-63.
- Qi H, Ge H, Zhou Y, et al. Homogenization technology development for heavy wall and blind hole deep water pipeline connector forging material [J]. Petro-Chemical Equipment, 2021, 50 (6): 59-63.
- [12] 李靖南, 董瑞峰, 陈子帅, 等. 梯度加热工艺对自由锻 GH4720Li 高温合金成形性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (2): 162-168.
- Li J N, Dong R F, Chen Z S, et al. Formability of free forging GH4720Li superalloy with different gradient heating process [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (2): 162-168.
- [13] 王明珍, 朱乾皓, 吴剑, 等. 超大厚壁法兰锻件成形工艺的研发 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (5): 123-125.
- Wang M Z, Zhu Q H, Wu J, et al. Research and development of forming process for super heavy flange forgings with thick wall [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (5): 123-125.
- [14] ASTM A694-16, Standard specification for carbon and alloy steel forgings for pipe flanges, fittings, valves, and parts for high-pressure transmission service [S].
- [15] ASTM A370-17, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products [S].
- [16] ASTM E45-13, Standard test methods for determining the inclusion content of steel [S].
- [17] ASTM E407-07, Standard practice for microetching metals and alloys [S].
- [18] ASTM E112-13, Standard test methods for determining average grain size [S].

## 关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程（锻压）分会成立于 1963 年，是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体，是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定：凡承认本会章程并符合条件者，可申请为本会会员。

**会员的权利与义务：**1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌，铜牌由秘书处统一制作并颁发，可申请定制；2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠；3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动；4. 优先获得本会的有关学术资料，免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志；5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo 链接；6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权；7. 接受本会委托，进行论证、评议、咨询等工作；8. 享有入会、退会的自由。

**申请手续：**提交入会申请表。申请个人会员，需填写《个人会员入会申请表》，同时提交“个人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员，需填写《团体会员入会申请表》，同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处，并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱；也可登陆学会网站，进行在线注册。经审批通过后，将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记，由学会秘书处颁发会员证书。

地 址：北京市海淀区学清路 18 号 707 室塑性工程分会

联系人：李佳盈、秦思晓、周 林、金 红

电 话：010-62912592 传 真：010-62912592 邮 箱：duanya@cmes.org 网 址：http://www.cstp-cmes.org.cn

中国机械工程学会塑性工程分会