

不同热处理制度对 Gr. 38 钛合金板材的组织性能的影响

王幸运, 杨 铮, 赵小龙

(新疆湘润新材料科技有限公司, 新疆维吾尔自治区 哈密 839000)

摘要: 研究了不同热处理制度对 Gr. 38 钛合金板材显微组织和力学性能的影响。结果表明: 低温普通退火处理对 Gr. 38 钛合金板材的组织 and 力学性能影响不大; 两相区固溶时效处理可以大幅度提高 Gr. 38 钛合金板材的抗拉强度和硬度, 但其塑性和冲击韧性下降显著; 固溶后水冷较空冷可以获得更细的次生 α 相和相对更少的初生 α 相, Gr. 38 钛合金板材的抗拉强度和硬度更高; 通过控制时效温度可以调整次生 α 相的片层厚度, 时效温度越高, 合金的抗拉强度和硬度越低, 塑性和冲击韧性越高。Gr. 38 钛合金板材具有较好的防弹性能, 采用普通退火工艺获得的板材防弹性能最佳。

关键词: Gr. 38 钛合金; 低温普通退火; 固溶时效; 时效温度; 防弹性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.026

中图分类号: TG335.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0202-05

Influence of different heat treatment systems on microstructure and properties of Gr. 38 titanium alloy plate

Wang Xingyun, Yang Zheng, Zhao Xiaolong

(Xinjiang XRun New Material Technology Co., Ltd., Hami 839000, China)

Abstract: The influences of different heat treatment systems on the microstructure and mechanical properties of Gr. 38 titanium alloy plates were studied. The results show that the low temperature general annealing treatment has little effect on the microstructure and mechanical properties of Gr. 38 titanium alloy plate. The tensile strength and hardness of Gr. 38 titanium alloy can be greatly improved by solution and aging treatment in two-phase zone, but its plasticity and impact toughness decrease significantly. After solution treatment, finer secondary α phase and less primary α phase are obtained by water cooling than air cooling, and the tensile strength and hardness of Gr. 38 titanium alloy are higher. The lamellar thickness of secondary α phase can be adjusted by controlling the aging temperature. The higher the aging temperature is, the lower the tensile strength and hardness of alloy are, but the higher the plasticity and impact toughness are. Gr. 38 titanium alloy plate has better bulletproof performance, and the best bulletproof performance is obtained by general annealing process.

Key words: Gr. 38 titanium alloy; low temperature general annealing; solution and aging; aging temperature; bulletproof performance

钛合金具有较高的强度密度比、优异的耐腐蚀

性能和焊接性能, 在航空、航天、兵器、舰船、民用等领域得到了广泛的应用^[1-5]。钛合金与钢相比, 可达到结构减重 30% 以上, 同等质量的装甲钛合金较铝合金的防护力提高了 30% 以上。因此, 钛合金成为世界各装甲强国为减轻整车质量和提高防护能力所竞相采用的主要材料之一^[6-7]。

收稿日期: 2023-07-07; 修订日期: 2023-10-15

基金项目: 自治区重点研发任务专项 (2022B01029)

作者简介: 王幸运 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: 13309282316@163.com

Liu Y. The Estimation and Statistical Computational Realization of the Parameters in Panel Data Autoregressive Models with Spatial Dependent Errors [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.

[18] Jain A, Varshney A K, Joshi U C. Short-term water demand forecast modelling at IIT kanpur using artificial neural networks [J]. Water Resources Management, 2001, 15 (5): 299-321.

[19] Liu Z B, Tu X, Wang X H, et al. Carbide dissolution and austenite grain growth behavior of a new ultrahigh-strength stainless steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27

(6): 732-741.

[20] Mimaki T, Nakazawa Y, Hashimoto S, et al. Stress corrosion cracking of copper bicrystals with $\langle 110 \rangle$ -tilt $\Sigma 3$, $\Sigma 9$, and $\Sigma 11$ coincident site lattice boundaries [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1990, 21 (9): 2355-2361.

[21] 吴昊. 新型奥氏体不锈钢冷变形及退火组织和性能研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.

Wu H. Study on Microstructure and Properties of New Austenitic Stainless Steel after Cold Deformation and Annealing [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.

Gr. 38 钛合金是美国 ATI 公司研发的一种新型高强钛合金，其室温抗拉强度与 Ti-6Al-4V 合金相当。该钛合金属于 $\alpha+\beta$ 两相钛合金，以廉价的铁元素替代昂贵的钒元素，降低了合金成本，同时该合金具有优异的抗子弹冲击性能，因而成为了军用装甲防护板和车辆部件的首选材料。本文通过研究不同热处理制度对 Gr. 38 钛合金板材显微组织及室温力学性能的影响，最终选择相对性能优异的板材进行打靶测试，为 Gr. 38 钛合金的进一步研究提供了参考。

1 试验材料与方法

试验用 Gr. 38 钛合金板材采用 3 次真空自耗电弧熔炼的 $\Phi 220$ mm 铸锭，扒皮取样并在相变点以上开坯，两相区反复镦拔锻造成板坯，板坯厚度约为 95 mm。随后在两相区 940~960 $^{\circ}\text{C}$ 经过两火+换向轧制，制成尺寸为 7.5 mm \times 1000 mm \times L mm 的成品板材（其中 L 为轧制后长度，不作为控制尺寸），随后进行不同热处理，测试其力学性能。Gr. 38 钛合金板材的化学成分见表 1，检测其相变点为 980 $^{\circ}\text{C}$ 。热轧板材的原始组织见图 1，为典型的两相钛合金组织。

表 1 Gr. 38 钛合金化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of Gr. 38 titanium alloy
(%, mass fraction)

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
91.3	4.40	2.50	1.41	0.258	0.029	0.014	0.002



图 1 Gr. 38 钛合金板材的原始显微组织
Fig. 1 Original microstructure of Gr. 38 titanium alloy plate

采用箱式电阻炉对 Gr. 38 钛合金板材进行热处理，热处理制度见表 2。采用 CMT5205 电子万能试验机、ZBC2302 摆锤式冲击试验机、3001XLM 硬度计进行力学性能测试，采用 ICX41M 光学显微镜进行显微组织观察。按照 GJB 59.18—1988^[8] 对板材进行抗弹测试，测试标准为 53 式 7.62 普通钢芯弹

表 2 Gr. 38 钛合金板材的热处理制度
Table 2 Heat treatment systems for Gr. 38 titanium alloy plate

编号	热处理制度
HT1（普通退火）	650 $^{\circ}\text{C}\times 60$ min/空冷
HT2（固溶时效）	950 $^{\circ}\text{C}\times 60$ min/空冷+530 $^{\circ}\text{C}\times 360$ min/空冷
HT3（固溶时效）	950 $^{\circ}\text{C}\times 60$ min/空冷+580 $^{\circ}\text{C}\times 360$ min/空冷
HT4（固溶时效）	950 $^{\circ}\text{C}\times 60$ min/水冷+580 $^{\circ}\text{C}\times 360$ min/空冷
HT5（固溶时效）	950 $^{\circ}\text{C}\times 60$ min/水冷+620 $^{\circ}\text{C}\times 360$ min/空冷

0 $^{\circ}$ 角 100 m 垂直射击。

2 试验结果与讨论

2.1 不同热处理制度后 Gr. 38 钛合金板材的显微组织

2.1.1 普通退火后的显微组织

经过 650 $^{\circ}\text{C}\times 60$ min/空冷退火后的显微组织见图 2。普通退火与原始 R 态（热轧）组织相比略有变化，由于退火温度低，晶粒尺寸以及初生 α 相含量变化不显著，初生的不规则 α 相逐渐等轴化，且晶界清晰，网状的 β 转变相即次生 α 相取向由热轧态的错乱交织、边界不清晰逐渐变为边界清晰的转变相。

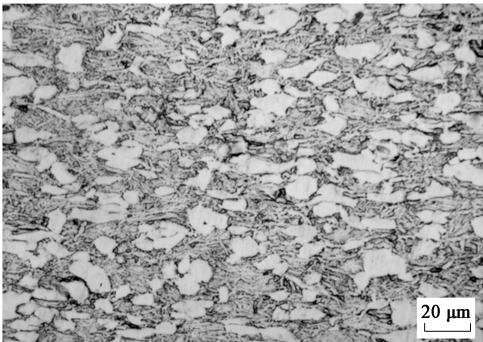


图 2 Gr. 38 钛合金板材 HT1 后的显微组织
Fig. 2 Microstructure of Gr. 38 titanium alloy plate after HT1

2.1.2 固溶时效处理后的显微组织

图 3 为经过两相区不同固溶时效制度后的显微组织。图 3a 和图 3b 为经相变点下的 950 $^{\circ}\text{C}$ 固溶后空冷再时效的显微组织，与原始 R 态和退火态相比，固溶时效处理后的组织构成基本相同，即由初生 α 相和次生片层状 α 相组成。不同的是，固溶时效后初生 α 相明显球化，几乎均成为等轴状，网状的 β 转变相即次生片层状 α 相在固溶处理后消失，并在随后的时效过程中重新析出，其集束取向更明显，且尺寸较退火态更细。较小的初生 α 相被高温

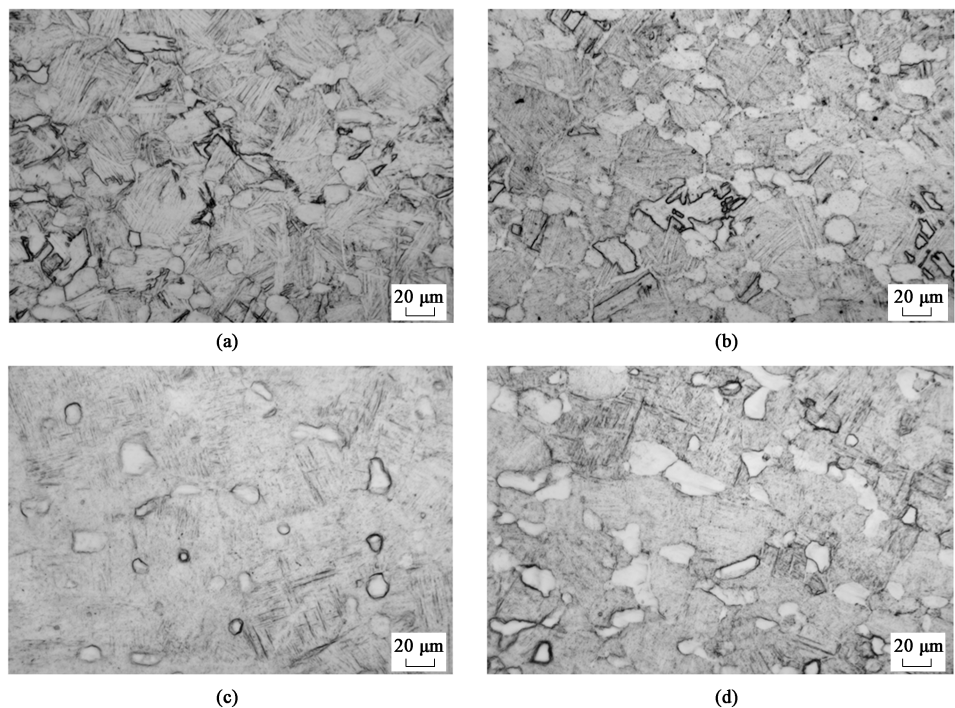


图 3 Gr. 38 钛合金板材固溶时效后的显微组织
(a) HT2 (b) HT3 (c) HT4 (d) HT5

Fig. 3 Microstructures of Gr. 38 titanium alloy plate after solution and aging

溶解，较大的初生 α 相在高温下未溶解完全并在时效处理过程中保留下来。随着时效温度的提高，次生片层状 α 相在固溶后时效过程中重新析出，且随着时效温度提高，片层厚度增大。图 3c 和图 3d 为经 950 $^{\circ}\text{C}$ 固溶后水冷再进行时效炉冷的显微组织，与固溶后空冷相比，水冷处理冷却速度较快，已固溶的 β 组织在快冷时转变为次生细针状 α 相，其尺寸明显小于空冷时效的次生片层状 α 相，高温下未溶解的初生 α 相在水冷时来不及在冷却时长大被瞬间保留下来，因此，固溶水冷+时效处理比固溶空冷+时效处理的初生 α 相含量少。固溶水冷后再时效空冷可以看出，时效温度高时，次生片层状 α 相（图 3c）的尺寸也相对较大，这与固溶后空冷再进行时效的规律相同。

2.2 不同热处理制度后 Gr. 38 钛合金板材的力学性能

表 3 为 Gr. 38 钛合金板材 R 态（热轧）及不同热处理制度处理后的力学性能，其中 R_m 为抗拉强度、 R_{eL} 为屈服强度、 A 为伸长率、 KU_2 为冲击功。为了获得相对较高的室温强度，选择了较低的 650 $^{\circ}\text{C}$ 进行退火处理，与热轧态相比，低温退火处理后材料的抗拉强度为 1089 MPa，比原始 R 态（热轧）略有降低，伸长率变化不大，冲击韧性明显降低，

表 3 不同热处理制度处理后 Gr. 38 钛合金板材的力学性能
Table 3 Mechanical properties of Gr. 38 titanium alloy plate treated by different heat treatment systems

编号	R_m / MPa	R_{eL} / MPa	A / %	KU_2 / J	布氏硬度 / HBW
R 态（热轧）	1105	1007	18.0	31.0	3185
HT1	1089	1001	17.5	27.0	3244
HT2	1078	954	15.0	24.5	3322
HT3	1061	949	15.5	24.0	3303
HT4	1226	1106	11.5	19.0	3567
HT5	1177	1069	14.0	21.0	3538

这与文献 [9] 和文献 [10] 报道的退火后冲击韧性的变化规律相同。这是因为：相变点下热处理冲击试样的微裂纹形核位置主要集中于初生 α 相界附近或晶间 β 相内的 α/β 界面，而退火后组织等轴化以及网状 β 相的分解重组导致组织中微裂纹随初生 α 相含量及 α/β 界面增加而增多，从而导致冲击韧性降低。布氏硬度提高了约 2%，这可能是因为低温退火热处理导致的合金中的 β 残留组织中析出了细小的针状 α 相^[11]，这种析出对材料的抗拉强度和塑性影响不大，但对静态测试的硬度有所提升。

在两相区 950 $^{\circ}\text{C}$ 固溶后空冷并时效处理后，合金的抗拉强度和塑性均较退火处理时略低，这与固溶空冷并时效后的组织、退火态组织表现相吻合。

固溶时效时初生 α 相经高温均匀化, 次生片层状 α 相重新时效析出并聚集排列, 塑性变形时位错更易运动, 阻力更小, 因此, 屈服强度降低显著, 由于次生片层状 α 相较退火态细小, 布氏硬度反而明显提高。

经过 950 $^{\circ}\text{C}$ 固溶后水冷并时效处理后, 与 HT2 和 HT3 热处理后相比, HT4 和 HT5 热处理后合金的抗拉强度和硬度大幅度提高, 同样 580 $^{\circ}\text{C}$ 时效处理时, 固溶水冷 (HT4) 合金的抗拉强度较固溶空冷提高了约 15%, 达到 1226 MPa, 硬度提高了约 8%, 但塑性下降了约 26%, 伸长率仅为 11.5%, 冲击韧性下降了 21%, 冲击功由 24 J 降低至 19 J。这是由于: 固溶后 β 相在快速冷却时转变为细针状 α 相, 初生 α

相含量大幅度减少, 文献 [12] 和文献 [13] 研究表明, 当初生 α 相含量少于 20% 时, 材料的塑性会随着初生 α 相含量的增加而提高。同样固溶水冷处理后, HT5 由于时效温度高, 初生 α 相含量增多, 次生 α 相排列更有序, 变形时晶界处位错塞积程度下降, 因此, 其抗拉强度降低、硬度降低、塑性提高。

2.3 抗弹性能测试

抗弹测试选择了塑性和冲击韧性相对较高的 HT1 以及抗拉强度、硬度和塑性匹配良好但冲击韧性相对较差的 HT5 热处理制度, 靶板热处理完成后表面抛丸酸洗处理, 按照 GJB 59.18—1988^[8] 进行 5 发子弹测试后的结果见图 4。

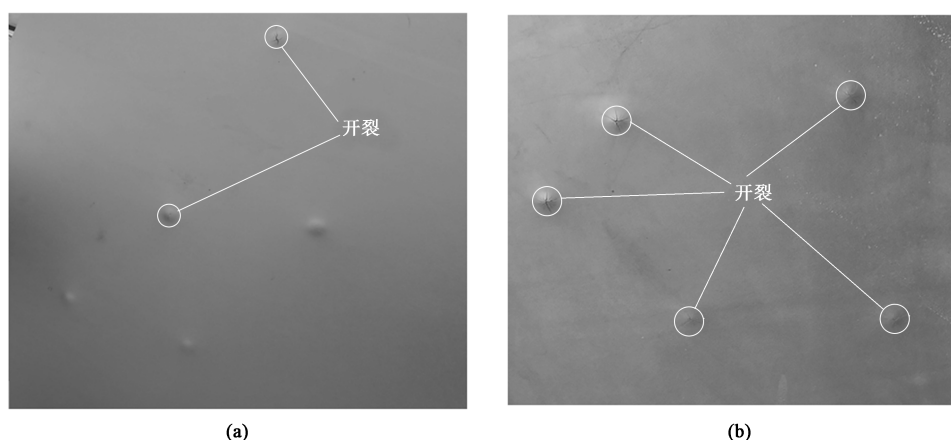


图4 抗弹测试结果宏观图

(a) HT1 (b) HT5

Fig. 4 Macroscopic plots of bulletproof test results

经过 HT1 热处理后的靶板 (图 4a) 中, 3 发防护等级达到二级 (合格损伤), 其余背部有轻微裂纹。经过 HT5 热处理的靶板背部均有不同程度的裂纹, 防护等级大于四级 (不合格损伤)。测试结果表明: 抗拉强度、硬度的提高并不能有效地提高防弹性能, 本次试验条件下普通退火态的 Gr. 38 钛合金板材具有 1100 MPa 级的强度, 塑性、硬度和冲击韧性相对匹配最好, 因此获得了相对最佳的抗弹结果。

3 结论

(1) Gr. 38 钛合金板材在两相区低温普通退火后显微组织变化不大, 在两相区固溶处理后初生 α 相明显减少且球化, 固溶冷却速度越快, 初生 α 相越少, 次生 α 相越细小, 固溶时效获得了等轴的初生 α 相, 次生 α 相排列有序度提高, 且随着时效温度的提高, 次生片层状 α 相越厚。

(2) 低温普通退火热处理对 Gr. 38 钛合金板材的力学性能影响不大, 固溶时效处理可大幅度提高合金的抗拉强度和硬度, 但塑性和冲击韧性下降显著。固溶后冷却速度越快, 抗拉强度和硬度越高, 塑性和冲击韧性下降; 时效温度越高, 抗拉强度和硬度降低, 塑性和冲击韧性提高。

(3) Gr. 38 钛合金板材具有较好的防弹性能, 低温普通退火处理的防弹性能优于固溶时效处理。

参考文献:

- [1] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S1): 280-282.
Li Y, Zhao Y Q, Zeng W D. Application and development of aerial titanium alloys [J]. Materials Reports, 2020, 34 (S1): 280-282.
- [2] 邹武装. 钛及钛合金在航天工业的应用及展望 [J]. 中国有色金属, 2016, (1): 70-71.
Zou W Z. Application and prospect of titanium and titanium alloys in aerospace industry [J]. China Nonferrous Metals, 2016, (1): 70-71.

- [3] 陈京生, 孙葆森, 安康. 钛合金在兵器装备上的应用 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (12): 14-20.
Chen J S, Sun B S, An K. Titanium alloys for ordnance equipment applications [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41 (12): 14-20.
- [4] 常辉, 王向东, 周廉. 钛合金及其在舰船装备上的应用现状与趋势 [J]. 中国材料进展, 2014, 33 (9): 603-607, 629.
Chang H, Wang X D, Zhou L. Present situation and development trend of titanium alloy and its applications in ships [J]. Materials China, 2014, 33 (9): 603-607, 629.
- [5] 孙建刚, 宋德军. 国内外石油、天然气用钛合金研究及应用概况 [J]. 材料开发与应用, 2019, 34 (6): 96-102.
Sun J G, Song D J. Research and application of titanium alloys for petroleum and natural gas at home and abroad [J]. Development and Application of Materials, 2019, 34 (6): 96-102.
- [6] 王光临. 防弹钛合金中厚板焊接工艺试验研究 [J]. 焊接技术, 2022, 51 (2): 42-45, 114.
Wang G L. Experimental study on welding process of bulletproof titanium alloy plate [J]. Welding Technology, 2022, 51 (2): 42-45, 114.
- [7] 朱知寿, 商国强, 王新南, 等. 低成本高性能钛合金研究进展 [J]. 钛工业进展, 2012, 29 (6): 1-5.
Zhu Z S, Shang G Q, Wang X N, et al. Research and development of low cost and high performance titanium alloys [J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29 (6): 1-5.
- [8] GJB 59.18—1988, 装甲车辆试验规程 装甲板抗枪弹性能试验 [S].
GJB 59.18—1988, Test operations procedure for armoured vehicles—Armour plate bullet-proof test [S].
- [9] 陈军, 赵永庆, 曾卫东, 等. 退火工艺对 Ti700 钛合金冲击韧性的影响 [J]. 金属热处理, 2007, 32 (7): 69-71.
Chen J, Zhao Y Q, Zeng W D. Influence of annealing process on impact toughness of Ti700 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32 (7): 69-71.
- [10] 王孔探, 严中令, 张志仁. 退火温度对 TC4 钛合金冲击韧性的影响 [A]. 第六届全国钛及钛合金学术交流会文集 [C]. 北京: 原子能出版社, 1987.
Wang K T, Yan Z L, Zhang Z R. The Influence of annealing temperature on the impact toughness of TC4 titanium alloy [A]. Proceedings of the 6th National Symposium on Titanium and Titanium Alloys Academic Exchange [C]. Beijing: China Atomic Energy Press, 1987.
- [11] 杜刚, 孙小平, 高玉社, 等. 低温固溶及时效处理对 TC4 钛合金棒材组织及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (6): 1941-1944.
Du G, Sun X P, Gao Y S, et al. Effect of low temperature solution and aging treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy bars [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47 (6): 1941-1944.
- [12] 王玉会, 李艳, 张旺峰, 等. 不同变形量 TA15 钛合金的热处理行为 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (S1): 641-646.
Wang Y H, Li Y, Zhang W F, et al. Heat treatment behavior of TA15 titanium alloy with different deformation degrees [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20 (S1): 641-646.
- [13] 薛强, 彭雯雯, 曾卫东. α 相形态与含量对 TA15 钛合金力学性能的影响 [J]. 钛工业进展, 2015, 32 (2): 13-16.
Xue Q, Peng W W, Zeng W D. Effect of alpha phase morphology and content on properties of TA15 titanium alloy [J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32 (2): 13-16.

第 21 届国际制造研究会议征文通知

(21st International Conference on Manufacturing Research, ICMR 2024)

第 21 届国际制造研究会议 (21st International Conference on Manufacturing Research, ICMR 2024) 将于 2024 年 8 月 28-30 日于英国苏格兰格拉斯哥举办, 同期召开第 38 届英国制造研究全国会议。

ICMR 由英国大学制造和工程负责人联合会 (COMEH) 发起, 是英国主要的制造研究会议, 自 2003 年起发展为国际会议, 旨在将研究人员、学者和企业界人士聚集在一起, 分享他们的愿景、知识和经验, 共同探讨新兴趋势和新挑战。随着 21 世纪制造业全球化进程的加快, 与时俱进的迫切需求推动了技术、研究和创新的快速发展。ICMR 征集有关前沿和新兴理论及其工业应用的论文, 旨在汇集全球学术、政府和工业组织的实践和理论知识。

一、组织单位

主办单位: The University of Strathclyde, UK

协办单位: COMEH, UK; 中国机械工程学会塑性工程分会

二、重要日期、内容

• 2024 年 3 月 30 日, 全文投稿截止

• 2024 年 5 月 1 日, 通知全文审理结果

• 2024 年 5 月 16 日, 最终投稿截止

• 2024 年 7 月 15 日, 提前缴费截止

• 2024 年 8 月 20 日, 最终注册截止

三、会议网址: <https://www.icmr.org.uk/>

四、联系方式

联系人: Dr. Jie Zhao, ICMR2024 Administrator, The University of Strathclyde

地 址: Department of Design, Manufacturing & Engineering Management Glasgow, G1 1XJ UK

电 话: +44 (0) 141 574 5155, 邮箱: j.zhao@strath.ac.uk

中国机械工程学会塑性工程分会