

粘度时变浆液的水化机制及其在 治理基坑涌水中的应用

张佳兴¹, 裴向军¹, 靖向党²

(1. 成都理工大学地质灾害防治与环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 长春工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要:为了研究含助剂1号(纤维素类溶剂)、2号(合成硅钙早强剂)和3号(酰胺类稳定剂)的SJP型粘时变浆液的水化机制及其性能,通过引用温度、温变速率,进行SJP浆液与纯水泥浆的水化热对比试验,构建了SJP型粘时变浆液的水化、硬化模型,揭示了2、3号助剂协调水泥二次水化的机理及助剂掺入依据。同时实验证明,SJP型粘时变浆液具有很好粘时变性,初配流动性好、可灌性强、初凝与终凝时间可控等良好特性,对于孔隙、裂隙发育地层及动水条件下注浆效果优于传统水泥浆,并在治理基坑涌水中得到了成功应用。

关键词:SJP型粘时变浆液;水化机制;流变性;基坑涌水

中图分类号:TU472.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)11-0070-05

Hydration Mechanism of Viscosity Time-varying Slurry and the Application in the Treatment of Water Gushing in Excavation/ZHANG Jia-xing¹, PEI Xiang-jun¹, JING Xiang-dang² (1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China)

Abstract: In order to study the hydration mechanism and the performance of SJP time-varying slurry with the admixture 1# (cellulose-based solvents), 2#(synthesis of silicon calcium early strength agent) and 3#(amides stabilizer), by referring the temperature and the rate of temperature variation, the hydration heat contrast test between SJP time-varying slurry and neat cement paste was made and the hydration and hardening models of SJP time-varying slurry were constructed to reveal the mechanism of admixture 2# and 3# coordinating the cement to the secondary hydration and the basis of admixture content. By the contrast test, it is proved that SJP time-varying slurry has good viscosity time variation, good initial fluidity, good grouting property and controllable initial setting time and final setting time etc., the grouting effects should be superior to the traditional cement slurry in the strata where porosity and fracture develop and in dynamic water condition, SJP grouting material has been successfully applied in dealing with water gushing in excavation.

Key words: SJP viscosity time-varying slurry; hydration mechanism; rheological property; water gushing

0 引言

注浆是采用外力通过钻孔或注浆管将具有胶凝性的浆液注入岩土体的裂隙、孔隙中,实现松散土体、破碎岩体的胶结,形成新的结构稳定的“整体”,进而达到改善原有岩土体物理力学性能,提高岩土体强度、抗渗性等指标的为目的的技术方法^[1]。从19世纪法国人查理士·贝利尼最早使用粘土和石灰浆加固第厄普冲刷闸开始,注浆理论、材料和技术不断发展^[2]。19世纪德国 Jeziorsky 提出了以水玻璃与氯化钙为注浆材料的硅化注浆法,我国于1953年开

始应用水玻璃,之后相继研制应用了聚氨酯、环氧树脂等化学浆液及水泥浆浆液^[3-4],其中水泥浆主要以素水泥浆、水泥-粘土浆,对于水泥-水玻璃-磷酸盐复合浆液较为常见,广泛应用于水电坝基加固、隧道工程的加固与防水、地基处理等工程中^[1,5-8]。

目前对浆液的研究多为复合浆液,通过添加剂的使用对浆液的综合性能进行调节,满足相关工程的实际需要^[2]。本文在已有研究“SJP粘时变浆液”的基础上对其水化机理进行探讨,对其组分比例和复合浆液性能做了进一步研究,并比较系统地研究

收稿日期:2016-02-28

基金项目:地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队重点项目(编号:SKLGP2014Z001)

作者简介:张佳兴,男,汉族,1992年生,硕士在读,主要从事岩土工程、地质工程等领域的工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号成都理工大学环境与土木工程学院, zjx1992@outlook.com。

了其流变性、稳定性、可灌性及凝结特性。其中 SJP-1 型水泥复合浆液已在河北省承德市某基坑抢险止水工程中得到成功应用。

1 SJP 型粘时变浆液性能研究

1.1 浆液组成及适用性

SJP 型粘时变浆材主要由水泥、水、助剂 1 号(纤维素类溶剂)、助剂 2 号(合成硅钙早强剂)和助剂 3 号(酰胺类稳定剂)组成。配制时以水泥浆为基浆,与外加剂经复配,制得可泵期在 5~90 min 可调的粘度时变型浆材。因该型浆材具有广泛的可泵期、较短的初凝、终凝时间,故适用于陡倾宽缝岩层、松散杂填土层和动水条件下注浆^[9]。

通过改变 2、3 号助剂的种类又研制了分别适合于冻土层的 SJP-2 型浆材和加固湖沼相盐渍土、滨海相软土的 SJP-3 型浆材。

1.2 SJP 型浆液水化机制

工程中常用的水玻璃、铝氧熟料—碳酸盐系等速凝剂或早强剂在加入水泥浆后,快速在水化的水泥颗粒表面形成“包被”层,阻止了水泥的进一步水化^[10-11],进而达到速凝的目的。针对 SJP 型粘时变浆液的水化机制裴向军进行了研究^[9]。在水泥水化反应初期,溶液达到过饱和状态, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 析出,同时与 C_3A 反应生成钙矾石,水化硅酸钙溶胶与钙矾石晶体构成一层半渗透膜,附着在水泥颗粒表面,使水化速率减慢。当掺入 1 号助剂纤维素类有机材料,打破水泥颗粒被隔绝的状态,使其快速参与反应,并在水泥颗粒间以半透析方式反应生成大量致密的胶结物;通过控制助剂 2、3 号的加量来控制反应速度与反应进程,进而依据需求控制水泥浆的反应。通过研究,构建了 SJP 型粘时变型浆液水化、硬化模型,如图 1 所示。

采用 P. C32.5 的复合硅酸盐水泥,在 1、2、3 号助剂加量不同的情况下,进行水化热测试。通过表 1 可知,当加入 SJP 材料(助剂 1、2、3 号)后,水化热的温峰出现时间向后推延,且最高温峰小于纯水泥浆,而水化放热量具有随 2 号加量的增加先增再降的趋势。

通过图 2 水化热曲线可知,就试验研究的 SJP 型粘时变浆液而言,与不加助剂的纯水泥相比,放热速率(温变速率)低;存在两个明显的温峰,水化温峰变宽并降低;随着 2 号助剂加量的增加,温峰出现

的时间逐渐延迟,二次温峰值均大于首次;当 2 号助剂加量 $> 1.8\%$ 时,水化热小幅度上升。

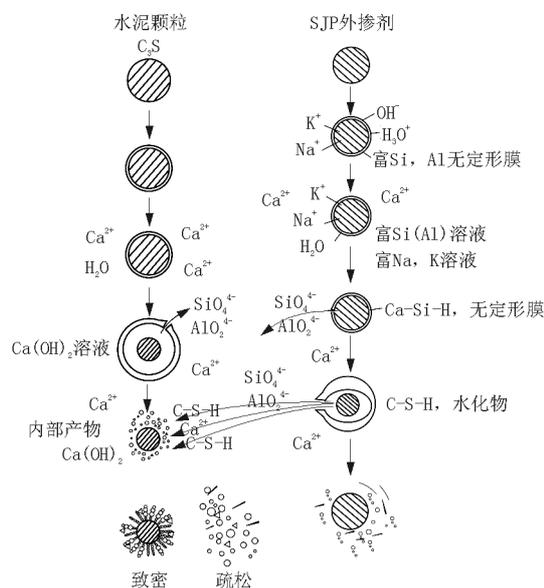


图 1 SJP 型粘时变浆液水化、硬化模型

表 1 助剂不同加量条件下水化热数据

浆材组成	1 号加量/%	2 号加量/%	3 号加量/%	水化温度峰值出现的时间 T_{\max}/h	水化温度峰值 $\Theta_{\max}/\text{℃}$	水化 1 d 的放热量 $Q_1/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	水化 3 d 的放热量 $Q_3/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
水泥	0	0	0	19.5	41.8	69.7	114.8
SJP1	0.33	1.8	1.0	25.5	30.5	60.4	96.4
SJP2	0.33	2.0	1.0	34	34.1	191.2	178
SJP3	0.33	2.2	1.0	78	36.6	82.7	156.6
SJP4	0.33	2.6	1.0	83.5	34.4	10	140.6

SJP 型粘时变浆液水化的第一个显著温峰为诱导期温峰,说明 SJP 助剂的加入,是水泥的分散程度增加, C_3S 进一步水化,水化硅酸钙生成速率增大,放热量明显增加,当“包被”再次产生时,水泥进入水化诱导期。当 2 号助剂水化后,以其高分子材料比表面积大、阴离子释放大量的特点,吸附溶液中的 Ca^{2+} ,加速 C-S-H 沉淀,使“包被”再度破裂,水泥水化加速,温度升高。但由于助剂 3 号的水化,在固体颗粒表面形成一层半渗透膜,使 2 号助剂的溶解、吸附、沉淀作用减慢,故在水化热温度曲线中出现一个平稳期。随着 3 号助剂向水泥颗粒的渗透,半渗透膜逐渐稀释,使钙矾石的生成量在受到一段时间抑制作用后迅速增加,水泥开始加速二次水化,水化温度快速升高出现第二温峰,随着水化的完成温度逐渐趋于平稳。通过水化热分析进一步阐明了 SJP 型浆液的水化机理。

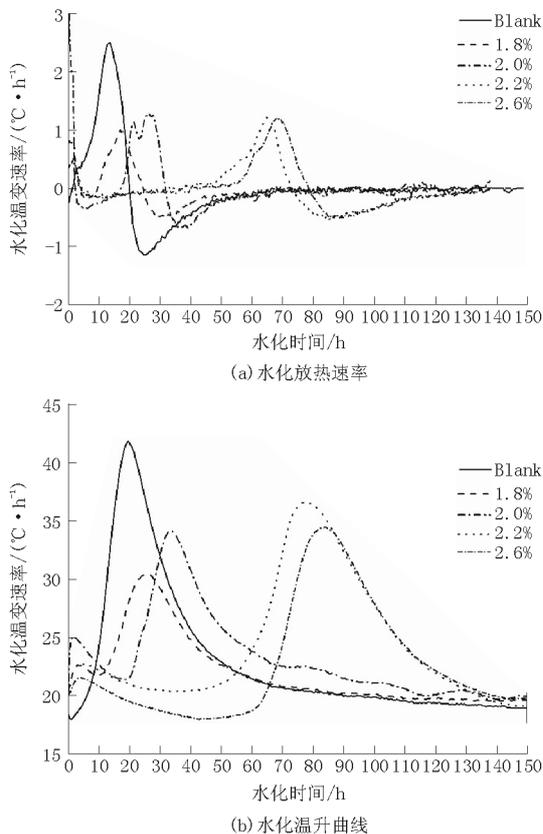


图2 纯水泥浆液与SJP型浆液水化温度、温变速率曲线

表2 不同浆液性能对比

浆液材料	水灰比 λ	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	2 h 析水率/ %	初始粘度		可泵期/ min	凝结时间		抗压强度	
				漏斗粘度/s	流动度/mm		初凝/min	终凝/min	7 d/MPa	28 d/MPa
纯水泥浆	0.45	1.83	1.7	>180		120	250	362		29.50
	0.6	1.71	3.4	37.49	230	263	960	1120	16.95	27.43
	0.8	1.58	15	20.45	308	446	1200	1750	5.06	9.17
SJP型浆液	0.6	1.71	0.4	42.47	220	30	82	208	23.73	30.56
	0.8	1.58	2.3	20.28	300	65	198	394	7.41	10.43

2 SJP型粘时变浆液在治理基坑涌水中的应用

2.1 工程概况及工程地质条件

承德某高层住宅工程楼房占地面积 7080 m², 设有地下室 2 层, 基坑平面尺寸为 119 m × 60 m, 基坑开挖深度 7.9 m。本工程北侧为平房区, 距离约 20 m, 西侧临近道路且道路西侧临近汉河距离 60 m, 南侧距离居民楼最近处 4 m。基坑开挖前, 场地呈东北高、西南低。场地地层自上而下依次为杂填土、粉质粘土、卵石层、强—中风化基岩。其中地下水位于粉质粘土层, 埋深为 3.2 m。建筑基础采用条基与筏板基础, 基础位于中风化及岩层。

在进行基坑底部整平施工条基时, 西侧坑壁和坑底出现渗水, 主要可见涌水层位是卵砾石层和

1.3 浆液性能

不同浆液性能对比见表 2。通过初始流动度、粘度、可泵期、凝结时间的对比可知, 水灰比 $\lambda = 0.6, 0.8$ 时, SJP 型粘时变浆材与纯水泥浆在初始流动度、粘度、密度性能方面基本相同, 而 SJP-1 的析水率是纯水泥浆的 1/7, 可泵期缩短为原来的 1/10 左右, 初终凝时间缩短了 13 h, 浆液的稳定性大大提高; 与 $\lambda = 0.45$ 的纯水泥相比, 在有相近的可泵期、初终凝时间情况下, SJP 型浆液有更好的流动性和可灌性; 对于 SJP 型浆液的 7 d、28 d 的抗压强度均大于纯水泥浆。

可见 SJP 型粘时变浆液具有以下优点: 初始流动性好, 稳定性好, 可泵期可调, 初终凝时间间隔短, 结石体具有一定抗压强度。良好的流动性能有效保证细小裂隙、孔隙中的扩散半径, 可灌性强; 可调节的可泵期, 对于孔隙性大、裂隙发育、结构松散的地层可在保证扩散半径的前提下, 有效节约浆液用量; 同时低析水率使浆液具有良好的稳定性, 固结体体积收缩小, 有效保证了孔隙填充度。

强—中风化基岩层。业主为防止西侧坑壁坍塌和顺利施工, 在坑外和坑底西北角各设置一口降水井, 并在垫层下设置导水管, 效果不佳, 终未实现降水并导致地下室在建成后大量涌水, 涌水量 350 m³/d。

通过水文试验分析认为, 该基坑及地下室出水主要来自于西侧汉河, 通过 M、L、K 轴线下的破碎裂隙岩层、分布范围较大的砂砾石层和粉粒含量多的粉质粘土层, 渗入基坑。由于水流的冲刷、携带作用, 使地层渗透性逐渐增大, 最终导致基坑大量涌水。

2.2 处理方案及工艺

2.2.1 处理方案

通过分析该场地的工程与水文地质条件和涌水原因, 提出的总体治理方案为: 二期注浆, 填充裂隙、

封堵孔隙。注浆原则:自下而上,先外后内。

由于本工程基坑主要涌水通道为孔隙性大的砂卵石层和裂隙发育的基岩,故此次基坑地下室止水治理主要采用渗透注浆法,为保证浆液对孔隙的填充度,使渗透注浆在一定压力下完成(压力小于劈裂注浆压力)。由于基坑外侧地下水丰富,为防止浆液被水稀释,影响注浆效果,故应控制浆液的凝结时间;对于钻孔布置,首先在地下室外侧分两序注浆,使浆液填充填土层孔隙、基坑外砂卵石层、基坑侧壁基岩层裂隙及底部基岩裂隙,完成主要孔隙、裂隙的封堵,使涌水量减少 80%。其次,在地下室内对剩余涌水点,采用流动性好的 SJP 型粘时变浆材,完成基坑底部剩余裂隙的封堵,注浆方案见图 3,注浆设计施工布置情况见图 4。

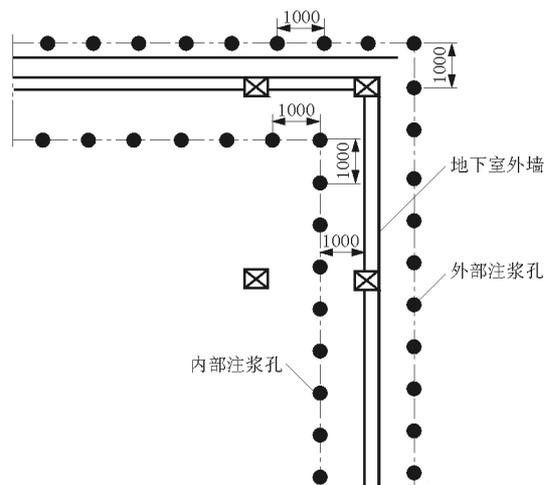


图 3 注浆方案图

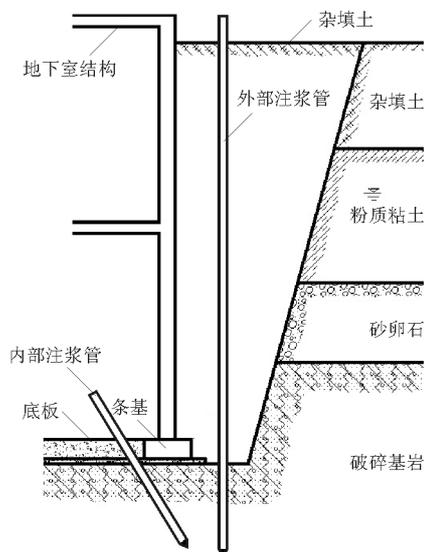


图 4 注浆设计施工图

2.2.2 施工工艺

2.2.2.1 外部注浆

外围注浆孔使用 XY-1 型钻机成孔,开孔直径 110 mm,孔深 10 m,插入注浆管进入基岩 1.0 m,采用孔口密封,注浆管底端为锥形,锥尖上方设置 2 m 长花管段。

2.2.2.2 内部注浆

内部注浆采用风动成孔,进入完整基岩 1 m,花管注浆孔口密封,密封段穿过混凝土垫层,防治浆液沿垫层面流失。

根据地层情况,选用 SJP 抗渗型复合浆液,浆液性能参数见表 3。在施工中应注意:(1)在外围注浆时,应调整浆液配方,在保证流动性的情况下,使浆液在可泵期后粘度快速增加,短时间内达到初、终凝,防止浆液被地下水稀释,提高浆液固结率,提高填充区防渗性;(2)在室内注浆时,应根据具体出水点位置实施注浆,且要调整浆液,使其具有较好的流动性、分散性,保证微小裂隙的封堵。

表 3 SJP 抗渗型浆液组成和性能

水灰比 λ	浆液组成				浆液性能	
	助剂 1/%	助剂 2/%	助剂 3/%	膨润土/%	可泵期/min	初凝/min
0.6 ~ 0.7	0.33	2	1.0 ~ 1.6	2	20 ~ 30	120 ~ 185

2.3 施工效果及评价

采用上述方法,历时 30 天,共施工外围钻孔 160 个,灌注水泥 240 t,部分孔注浆量见表 4。外围注浆施工完成后,地下室内涌水量下降为 70 m³/d;通过钻孔检测,所取岩心内裂隙均有水泥胶结,证明达到了设计目标。

表 4 部分钻孔注浆量统计表

孔号	外部注浆			内部注浆		
	注浆量/L	水泥耗量/t	注浆压力/MPa	注浆量/L	水泥耗量/t	注浆压力/MPa
1	3000	3.0	0.40	500	0.50	0.5
3	1800	1.8	0.50	210	0.21	0.6
5	1200	1.2	0.40	240	0.24	0.5
7	3000	2.0	0.60	400	0.40	0.6
9	600	0.6	0.40	200	0.20	0.7
11	2400	2.4	0.40	600	0.60	0.5
13	500	0.5	0.70	200	0.20	0.8
15	3400	3.4	0.35	220	0.22	0.5

对于基坑地下室内部的注浆,施工历时 20 天,共施工钻孔 100 个,灌注水泥 50 t,部分孔注浆量见表 4。内部注浆孔施工结束后,地下室内存在零星

漏水点,后又针对漏水点注浆,达到了完全封堵的目的,设计目标全部完成。

3 结论

(1)通过引用温度、温变速率的参数,对 SJP 型浆液与纯水泥浆的水化热进行测定,研究了 SJP 型粘时变浆液水化机制,解释了粘时变性浆液外掺剂的掺入依据,揭示了 2 号早强剂、3 号助剂共同协调水泥二次水化的溶剂化膜理论。

(2)实验证明,SJP 型粘时变浆液具有很好的粘时变性,初配粘度低,可泵期调节范围大,特别是在可泵期内粘度增长缓慢,可泵期后粘度快速增长至失去流动性,并在短时间内达到初凝。这一特点在保证浆液充分灌入地层的同时,避免了过度流失和被地下水稀释,能有效保证注浆效果。

(3)工程应用证明,SJP 型粘时变浆液适用于松散回填层、砂卵石层、裂隙发育的基岩的地基处理注浆,尤其是地下水丰富的地层,能够有效减少因普通水泥浆液等不可控带来的资源浪费和地下水污染。

参考文献:

[1] 编委会. 地基处理手册(第三版)[M], 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

(上接第 69 页)

的第三强度理论和第四强度理论,尤其在复杂应力状态有限元数值分析中,Mises 屈服准则获得了更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] 管朝晖,杨斌. 工程用钻杆螺纹断裂失效研究[J]. 机械设计与制造,2009,(12):152-154.
- [2] 苏继军,殷琨,郭同彤. 提高钻杆接头螺纹强度的有效方法研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(8):40-42
- [3] 冯清文. 绳索取心钻杆螺纹锥度与强度关系及应力研究[J]. 探矿工程,1995,(6):24-26.
- [4] Changgen Bu, Boru Xia, Yinjun Lian, et al. Simulation of Hertz Transient Contact/Impact of Flexible Bodies[J]. Journal of Earth Science,2012,23(2):225-232.
- [5] Changgen Bu, Yegao Qu, Zhiqiang Cheng, et al. Numerical Simulation of Impact on Pneumatic DTH Hammer Percussive Drilling [J]. Journal of Earth Science,2009,20(5):868-878.
- [6] Maohong Yu. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th Century[J]. Applied Mechanics

出版社,365-366,399-409.

- [2] 阮文军,王文臣,胡安兵. 新型水泥复合浆液的研制及其应用[J]. 岩土工程学报,2001,(2):212-216.
 - [3] 孙钊,夏可风. 98 水利水电地基与基础工程学术交流会论文集[C]. 天津:天津科学技术出版社,1999.
 - [4] 葛家良. 化学灌浆技术的发展与展望[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3384-3392.
 - [5] 周厚贵,李焰. 三峡工程坝基灌浆与围堰防渗施工新技术[J]. 水电能源科学,2009,(1):140-143,219.
 - [6] 李术才,张霄,张庆松,等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(12):2377-2396.
 - [7] 邓仁清. 高压富水隧道注浆堵水施工技术及应用[J]. 地下空间与工程学报,2006,(2):263-266,275.
 - [8] 阮文军,苏孟元. 水泥复合浆液在治理涌水涌砂基坑中的应用[J]. 工程勘察,2004,(1):36-38.
 - [9] 裴向军,黄润秋,李正兵,等. 锦屏一级水电站左岸卸荷拉裂松弛岩体灌浆加固研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(2):285-288.
 - [10] Coulter S, Martin C D. Single Fluid Jet-grout Strength and Deformation Properties [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2006,21(6):690-695.
 - [11] 王继敏,蒋学林. 锦屏一级水电站煌斑岩脉水泥化学复合灌浆试验研究[J]. 长江科学院院报,2010,27(2):60-63.
-
- [7] Bu C, Li X, Sun L, et al. Arithmetic solution for the axial vibration of drill string coupling with a down-the-hole hammer in rock drilling[J]. Journal of Vibration & Control,2016,22(13):3090-3101.
 - [8] 徐秉业,刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
 - [9] Krenk S. A Family of Invariant Stress Surfaces[J]. Journal of Engineering Mechanics,2014,122(3):201-208.
 - [10] Hill R. The mathematical theory of plasticity [J]. Mathematical Gazette,1998,313(35):13-26.
 - [11] 杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
 - [12] Emmens, Wilko C, d. B. A. H. Van. A Yield Criterion Based on Mean Shear Stress [J]. Key Engineering Materials,2014:611-612.
 - [13] Christensen R M. Yield functions/failure criteria for isotropic materials[J]. Proceedings of the Royal Society A,1997,453:1473-1491.
 - [14] <http://wenku.baidu.com/view/4c793706bed5b9f3f90f1c6c.html?re=view>[DB/OL].